



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

ANDEL DENILSON MATOS LIMA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS ÁGUAS DE POÇO E
INDUSTRIAL TRATADA NA CORROSÃO DO COBRE**

Belém/PA
2021

ANDEL DENILSON MATOS LIMA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS ÁGUAS DE POÇO E
INDUSTRIAL TRATADA NA CORROSÃO DO COBRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PPGEI), da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração Materiais Metálicos e Caracterização.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo Cardoso Filho.

Belém/PA
2021

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)**

- L732a Lima, Andel Denilson Matos.
Avaliação da influência das águas de poço e industrial
tratada na corrosão do cobre / Andel Denilson Matos Lima. —
2021.
xiv, 62 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. José Carlos de Araújo Cardoso
Filho
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Industrial, Belém, 2021.
1. Corrosão. 2. Cupons de corrosão. 3. Cobre. 4.
Águas industriais . I. Título.

CDD 620.1623

ANDEL DENILSON MATOS LIMA

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DAS ÁGUAS DE POÇO E
INDUSTRIAL TRATADA NA CORROSÃO DO COBRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PPGEI), da Universidade Federal do Pará, como requisito para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração Materiais Metálicos e Caracterização.
Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo Cardoso Filho.

DATA DE APROVAÇÃO: 04/02/2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos de Araújo Cardoso Filho
(PPGEI – ITEC – UFPA – Orientador)

Prof. Dr. Paulo Cordeiro Machado
(PPGEI – ITEC – UFPA – Membro Interno)

Prof. Dr. Marcelo Camargo Severo de Macêdo
(PPGEM – DEM – UFES – Membro Externo)

Dedico esta Dissertação a Deus, a minha esposa, Érica Lima, aos meus pais, Anselmo e Maria Helena e a minha irmã, Ândrea Lima.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por todas as realizações e conquistas que estão acontecendo nesse momento de minha vida. Ele faz tudo acontecer no momento certo e na hora certa.

Aos meus pais, Anselmo Afonso Góes Lima e Maria Helena Matos Lima, aos quais apostaram, confiaram e investiram financeiramente em toda minha vida acadêmica e profissional, muito obrigado!

A minha dedicada, companheira, atenciosa, amorosa e incentivadora Érica de Moraes Lima, minha esposa, por estar sempre ao meu lado em todos os momentos em que precisei de atenção, carinho e incentivo. Ela sem dúvida, foi a principal responsável por mais essa conquista acadêmica. Sou muito grato pela paciência, compreensão e amor dedicado.

A minha irmã Ândrea Dayse Matos Lima, por estar sempre disposta a ajudar quando precisei de ajuda.

A todos os meus familiares, que contribuíram direta e indiretamente para que eu pudesse alcançar mais este objetivo na minha vida.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PPGEI), da Universidade Federal do Pará, por toda a estrutura disponibilizada.

Ao Prof. Dr. José Carlos de Araújo Cardoso Filho, pela orientação fornecida ao longo deste projeto, além da confiança por ter me aceitado como seu orientado.

A Raynne Pereira pelo apoio durante os ensaios e coleta de dados, os quais foram fundamentais para a realização desse trabalho.

Por fim, agradeço a todos que de maneira direta e indireta contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

O monitoramento eficiente da corrosão previne, em uma indústria, paradas não programadas para manutenções corretivas para troca de peças, tubulações, materiais, componentes e equipamentos fabricados em cobre que possuem contato com água bruta ou tratada e sofrem desgastes ao longo do tempo.

Este trabalho monitorou através da exposição das águas de poço e tratada de uma indústria de cosméticos, localizada no Estado do Pará, o nível de corrosividade quando em contato com cupons de corrosão (corpos de prova) fabricados em cobre. O método de análise consistiu na imersão destes cupons em água de poço e água industrial no período de 7, 14, 21 e 28 dias. A cada período os cupons foram retirados limpos e levados para ensaios de perda de massa, taxa de corrosão, potencial de corrosão e curvas de polarização. Além das análises físico-químicas e microbiológicas das amostras das águas para o cálculo de estabilidade, que mostra se a tendência é estável, corrosiva ou incrustante. Os resultados mostraram que a água de poço tem corrosividade baixa e a água industrial tem corrosividade moderada, mesmo recebendo um tratamento químico para correção do pH e controle microbiológico. A perda de massa e a taxa de corrosão do cupom de cobre foram maiores para água industrial e as curvas de polarização e potencial de corrosão mostraram que a água industrial possui um grau elevado de corrosão em comparação com a água de poço.

Palavras-Chave: Corrosão, Cupons de Corrosão, Cobre, Águas Industriais.

ABSTRACT

Efficient corrosion monitoring prevents, in an industry, unplanned downtime for corrective maintenance to exchange parts, pipes, materials, components and equipment made of copper that have contact with raw or treated water and that suffer wear and tear over time.

This work monitored through the exposure of well water and treated a cosmetics industry, located in the State of Pará, the level of corrosivity when in contact with corrosion coupons (proof bodies) made of copper. The method of analysis consisted of immersing these coupons in well water and industrial water for 7, 14, 21 and 28 days. In each period, the coupons were removed clean and taken to mass loss tests, corrosion rate, corrosion potential and polarization curves. In addition to physical-chemical and microbiological analyzes of water samples for the calculation of stability, which shows whether the trend is stable, corrosive or fouling. The results showed that well water has low corrosivity and industrial water has moderate corrosivity, even receiving chemical treatment for pH correction and microbiological control. The loss of mass and the corrosion rate of the copper coupon were greater for industrial water and the polarization curves and corrosion potential showed that industrial water has a high degree of corrosion compared to well water.

Keywords: Corrosion, Corrosion Coupons, Copper, Industrial Waters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Infográfico do suporte do cobre a economia circular	22
Figura 2: Diagrama de Pourbaix do sistema cobre-água a 25°C.	30
Figura 3: Taxa de processos de corrosão na dependência do potencial do eletrodo	35
Figura 4: Coluna litoestratigráfica da região Nordeste do Estado do Pará.	36
Figura 5: Poço tubular profundo	38
Figura 6: Poço escavado em uma propriedade rural.	38
Figura 7: Desenho esquemático dos tipos de poços existentes para a captação de águas subterrâneas	39
Figura 8: Incrustação de carbonato de cálcio em tubulação de PVC	41
Figura 9: Silicato de cálcio em aletas de torre de resfriamento	42
Figura 10: Silicato de cálcio em trocador de casco e tubo	43
Figura 11: Depósito de ferro em torre de resfriamento	43
Figura 12: Fouling retirado da bacia de uma torre de resfriamento	44
Figura 13: Incrustação microbiológica nas aletas de uma torre de resfriamento.	45
Figura 14: Curva de polarização (b) obtida em um potenciostato para um caso de corrosão simples (a)	48
Figura 15: Esquema dos pontos de coleta das amostras de água	53
Figura 16: Esquema de imersão dos cupons nas águas de poço e industrial	54
Figura 17: Célula eletroquímica utilizada nos ensaios	55
Figura 18: Equipamentos utilizados para os ensaios de potencial de corrosão e curva de polarização	55
Figura 19: Aspecto visual dos cupons de corrosão expostos a água de poço	61
Figura 20: Aspecto visual dos cupons de corrosão expostos a água industrial	61
Figura 21: Índice de Ryznar para água de poço	62
Figura 22: Índice de Ryznar para água industrial	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Atributos e aplicações de cobre e ligas de cobre	22
Tabela 2: Solubilidade do carbonato de cálcio em relação a temperatura	41
Tabela 3: Tabela do Índice de Langelier (LSI)	50
Tabela 4: Dimensões e quantitativos de cupons fabricados em cobre	52
Tabela 5: Resultado da análise laboratorial da amostra de água de poço	56
Tabela 6: Resultado da análise laboratorial da amostra de água industrial	56
Tabela 7: Resultado dos ensaios de perda de massa para os cupons de corrosão em contato com a água de poço	58
Tabela 8: Resultado dos ensaios de perda de massa para os cupons de corrosão em contato com a água industrial	58
Tabela 9: Taxa de corrosão para os cupons expostos a água de poço	59
Tabela 10: Taxa de corrosão para os cupons expostos a água industrial	59
Tabela 11: Categorização qualitativa de taxas de corrosão	60
Tabela 12: Potencial de corrosão para o cobre exposto as águas de poço e industrial	63
Tabela 13: Parâmetros eletroquímicos obtidos por extrapolação de Tafel para o cobre exposto as águas de poço e industrial a 25°C	65

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Monitoramento da perda de massa dos cupons expostos as águas de poço e industrial	59
Gráfico 2: Monitoramento da taxa de corrosão dos cupons expostos as águas de poço e industrial	60
Gráfico 3: Potencial de corrosão dos cupons em cobre	63
Gráfico 4: Curvas de polarização em triplicata dos cupons de cobre em água de poço	64
Gráfico 5: Curvas de polarização dos cupons de cobre em água industrial e de poço	65

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
EUA	Estados Unidos da América
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
ICA	International Copper Association
NACE	National Association of Corrosion Engineers
TC	Taxa de Corrosão
RSI	Índice de Ryznar
LSI	Índice de Langelier
CC	Cupom de Corrosão
ECS	Eletrodo de Calomelano Saturado
STD	Sólidos Totais Dissolvidos

LISTA DE SÍMBOLOS

pH	Potencial hidrogeniônico
pH _{H2O}	Potencial hidrogeniônico da água
pH _s	Potencial hidrogeniônico de saturação
Cu	Cobre
mV	Milivolts
E _{PC}	Potencial de Corrosão [mV/ECS]
I _{CORR}	Corrente de Corrosão [$\mu\text{A}/\text{cm}^2$]
W	Perda de massa [g]
A	Área da superfície inicial exposta do cupom de corrosão [mm^2]
T	Tempo de exposição [dias]
D	Densidade do metal do cupom de corrosão [g/cm^3]
°C	Grau Celsius
n	Valência
s	Segundos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 JUSTIFICATIVA	18
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
4.1 PROCESSOS CORROSIVOS	19
4.2 O COBRE E SUAS LIGAS	19
4.3 A UTILIZAÇÃO DO COBRE NA INDÚSTRIA	21
4.4 CORROSÃO DO COBRE E SUAS LIGAS EM MEIO AQUOSO	25
4.5 PRINCIPAIS FORMAS DE CORROSÃO EM MEIO AQUOSO	25
4.6 REAÇÕES ELETROQUÍMICAS	27
4.7 REAÇÕES QUÍMICAS	31
4.7.1 Formando Íons Metálicos de Menor Valência	31
4.7.2 Mecanismo de Desintegração da Superfície Metálica	32
4.7.3 Mecanismo por Controle de Filme de Superfície	33
4.7.4 Mecanismo de Dissolução Química Direta	33
4.8 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: FORMAÇÕES PIRABAS E BARREIRAS NO ESTADO DO PARÁ	35
4.8.1 Formação Pirabas	36
4.8.2 Formação Barreiras	37
4.9 TIPOS DE POÇOS PARA CAPTAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	37
4.10 PRINCIPAIS PROBLEMAS CAUSADOS PELA ÁGUA EM SISTEMAS INDUSTRIAIS	39
4.10.1 Incrustações e Depósitos	39
4.10.1.1 Carbonato de cálcio	40
4.10.1.2 Silicato de magnésio e de cálcio	41
4.10.1.3 Sílica	42
4.10.1.4 Ferro	43
4.10.1.5 Fouling	44
4.10.1.6 Poeira	44

4.10.1.7 Matéria orgânica	45
4.11 MONITORAMENTO DA CORROSÃO ELETROQUÍMICA	45
4.11.1 Controle de Oxigênio Dissolvido	45
4.11.2 Cupons de Corrosão	46
4.11.3 Taxa de Corrosão	47
4.11.4 Curvas de Polarização	48
4.11.5 Índice de Estabilidade de Langelier	48
4.11.6 Índice de Ryznar	50
5 MATERIAIS E MÉTODOS	52
5.1 MATERIAIS	52
5.1.1 Cupons de Corrosão em Cobre	52
5.1.2 As Águas de Poço e Industrial	52
5.2 METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS	53
5.2.1 Ensaios de Perda de Massa	53
5.2.2 Taxa de Corrosão	54
5.2.3 Potencial de Corrosão e Curvas de Polarização	54
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	56
6.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DAS ÁGUAS	56
6.2 PERDA DE MASSA	58
6.3 CÁLCULO DA TAXA DE CORROSÃO	59
6.4 CÁLCULO DO ÍNDICE DE RYZNAR	61
6.5 POTENCIAL DE CORROSÃO E CURVAS DE POLARIZAÇÃO	63
6.5.1 Potencial de Corrosão	63
6.5.2 Curvas de Polarização	64
7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
7.1 CONCLUSÕES	66
7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	68
ANEXO A – LAUDO PARA ÁGUA DE POÇO	75
ANEXO B – LAUDO PARA ÁGUA INDUSTRIAL	76

1 INTRODUÇÃO

Com o emprego de novas tecnologias e o aprimoramento das técnicas de produção, associado a racionalização de gastos, uma indústria inicia, assim, o seu processo de competitividade no mercado nacional e/ou internacional.

Segundo Junior *et al.* (2015), as perdas operativas (de produção) devido a falhas de equipamentos reduzem a eficiência operacional e podem traduzir em elevados prejuízos econômicos para a indústria.

A corrosão está presente nos materiais metálicos em geral e, em especial, envolvidos nas diversas atividades industriais. A deterioração destes é causada pela interação físico-química entre o material e o meio corrosivo, onde causa grandes problemas nas mais variadas atividades. Para evitar as perdas dos materiais de elevado uso industrial, são utilizadas técnicas anticorrosivas que incluem os revestimentos, as técnicas de modificação do meio, a proteção catódica e anódica e, os inibidores de corrosão como a utilização de compostos orgânicos (FRAUCHES-SANTOS *et al.*, 2013).

Com o intuito de avaliarem os tipos e a intensidade dos processos corrosivos a que suas estruturas e equipamentos estão sujeitos, as empresas utilizam o monitoramento da corrosão para o seu controle. Existem diversas técnicas utilizadas para este fim. A técnica com cupons de corrosão merece destaque por ser simples e eficiente, sendo uma das mais utilizadas. As empresas adquirem os cupons de um determinado material e os expõem ao meio com o objetivo de analisar os efeitos obtidos (SILVA, 2016).

Monitorando o processo corrosivo, os cupons de corrosão são dispostos em locais específicos de uma instalação metálica (tubulações ou dutos em operação) e expostos por determinado período. Os cupons instalados são periodicamente retirados e submetidos a ensaios e análises em laboratório para quantificar as taxas de corrosão. Com base nos valores de taxa de corrosão (generalizada ou localizada) dos cupons recebem uma determinada classificação que servirão de referência para a implementação das medidas corretivas ou preventivas a serem tomadas (TEIXEIRA *et al.*, 2013)

Nos mais variados tipos de indústrias, peças e equipamentos possuem o cobre como um dos metais em sua estrutura. Por conta do alto valor de aquisição, serpentinas de trocadores de calor (evaporadores, condensadores e fancoils),

rolamentos, tubos internos de caldeira, válvulas, tubulações, merecem uma atenção redobrada quanto ao prolongamento de sua vida operacional.

O presente trabalho, consiste em avaliar a influência das águas bruta e tratada de uma indústria de cosméticos, instalada no Estado do Pará, na corrosão do cobre, numa exposição direta de 7, 14, 21 e 28 dias e monitorar o nível do processo corrosivo através das técnicas de perda de massa, curvas de polarização e taxa de corrosão, simulando os efeitos causados pelas águas em componentes e equipamentos da indústria em estudo.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a influência das águas bruta e tratada de uma indústria de cosméticos, instalada no Estado do Pará, na corrosão do cobre, em uma exposição direta de 7, 14, 21 e 28 dias e monitorar o nível do processo corrosivo através das técnicas de perda de massa, curvas de polarização e taxa de corrosão, simulando os efeitos gerados pelas águas em componentes e equipamentos, que possuem o cobre em sua estrutura, da indústria em estudo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o potencial de corrosão dos cupons, em laboratório, quando submetidos ao contato com as águas bruta e industrial;
- Avaliar o tempo em que os cupons iniciam o processo de corrosão quando submetidos ao contato com as águas bruta e industrial;
- Avaliar o nível de corrosividade das águas em estudo;
- Quantificar as perdas de massa dos cupons de corrosão fabricados em cobre durante 7, 14, 21 e 28 dias de exposição;
- Quantificar a taxa de corrosão sofrida pelos cupons ao longo dos períodos de exposição.
- Verificar as curvas de polarização dos cupons ao longo dos períodos de exposição.

3 JUSTIFICATIVA

Na indústria de cosméticos, assim como em diversos processos industriais, o processo produtivo envolve inúmeros equipamentos de troca térmica, sendo a água, na maioria dos casos, o meio de recirculação para troca de calor.

Na área da Utilidades temos os geradores de vapor, também conhecidos como caldeiras, que possuem feixes de tubos em cobre instalados na fornalha. Temos também os chillers com condensação de ar, cuja serpentina é confeccionada em cobre, além das tubulações internas, para geração de água gelada a ser enviada a Saboaria, que possui trocadores de calor casco e tubo, onde os feixes tubulares também são fabricados em cobre, para troca térmica da massa utilizada no processo produtivo. E por fim, temos na fabricação de sabonetes os chillers de placas (cujas placas são em cobre) que repassam água gelada para prensa e moldes, onde os sabonetes serão formados.

A redução da vida operacional, destes equipamentos e o desgaste estão associados, comumente, a corrosão. O processo corrosivo está relacionado a qualidade da água que entra em contato direto com os equipamentos. No caso da indústria em estudo, temos a água bruta (oriunda do poço 2) e a água industrial (que recebe um tratamento – cloração e controle de pH). As coletas de amostras destas águas foram realizadas no percurso de abastecimento dos tanques e coletadas no mesmo dia e horário.

Com isso, esta pesquisa tem o intuito de avaliar a influência das águas na corrosão do cobre, já que o impacto na produção é imensurável, por se tratar de equipamentos estratégicos e de grande valor tanto na questão operacional quanto financeiro.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 PROCESSOS CORROSIVOS

Os processos corrosivos podem variar conforme o material e o meio, apresentando mecanismos distintos:

- mecanismo eletroquímico: onde ocorrem reações químicas que envolvem transferência de carga ou elétrons através de uma interface ou eletrólito.
- mecanismo químico: onde ocorrem reações químicas diretas entre o material metálico, ou não-metálico, com o meio corrosivo, não havendo geração de corrente elétrica.

Durante um processo corrosivo, a interface eletrodo/eletrólito adquire estrutura conhecida como dupla camada elétrica, na qual alguns fatores - tais como: i) separação de cargas entre os elementos do metal e os íons da solução, ii) interação entre os íons da solução e moléculas de água, iii) adsorção de íons no eletrodo e iv) processos difusionais e migracionais de espécies iônicas - ocorrem de maneira particular e com importância fundamental no entendimento deste processo (MAREK, 1992).

4.2 O COBRE E SUAS LIGAS

O cobre (Cu) é um material amplamente utilizado nos mais variados campos da atividade humana, basicamente devido a sua capacidade de associar uma boa resistência a corrosão a propriedades mecânicas desejáveis. Uma utilização comum do cobre é na fabricação de tubos para a condução de água. Neste caso, é usual seu emprego no transporte de água potável e em redes de chuveiros automáticos para combate a incêndio, também conhecidos como *sprinklers* (JUNIOR *et al.*, 2002; SCHIPPER *et al.*, 2018).

O cobre tem cor marrom avermelhada, brilhante se polido, é maleável e dúctil, é bom condutor de calor e eletricidade. Somente a prata conduz eletricidade melhor do que este metal. Além do mais, é resistente à corrosão em muitos meios (algumas atmosferas industriais, água do mar, soluções salinas em geral, solos, ácidos orgânicos etc.), sendo atacado por ácido nítrico, halogênios, amônia com água e sulfitos. Devido à sua grande condutividade térmica, o cobre é também

frequentemente usado em trocadores e condutores de calor (AMIN e KHALED, 2010; DAVIS, 2001; MENNUCCI, 2011).

Além da excelente condutividade, o cobre possui propriedades mecânicas ideais em ambientes com baixas e altas temperaturas, é fácil de fabricar ou moldar e pode ser facilmente usinado. Tem excelente resistência à oxidação e corrosão. O cobre é o quinto metal mais usado no mundo para ser útil na forma pura ou de liga. As ligas de cobre mais comumente usadas são latão, cobre-níquel e bronze (GOROVEI e BENEÀ, 2018).

Compreender os mecanismos de corrosão das ligas de Cu é importante para muitas aplicações contemporâneas, como em microeletrônica ou como material de lata para armazenamento de lixo nuclear. Nestes casos, mesmo taxas de corrosão extremamente pequenas podem ser prejudiciais devido à pequena quantidade de material presente ou aos tempos de vida extremamente longos necessários. Em outras circunstâncias, uma taxa de corrosão controlada pode ser necessária para aplicações como a liberação deliberada de cátions de cobre como biocida ou na preparação de materiais nanoporosos por desalimentação (SEQUEIRA, 2011; TUCK *et al.*, 2010).

A corrosão envolve a alteração do material e do meio ambiente e ambos os fatores são importantes para as ligas de Cu. A alteração do material pode assumir várias formas. O craqueamento sazonal do latão foi uma das primeiras formas reconhecidas de craqueamento por corrosão sob tensão (MOORE *et al.*, 1921).

A corrosão atmosférica das ligas de Cu é extremamente bem documentada devido ao seu uso em construções arquitetônicas e artísticas e está intimamente associada às pátinas esverdeadas esteticamente agradáveis formadas após muito tempo de exposição atmosférica. A abundância de artefatos arqueológicos à base de cobre fornece um banco de dados da estabilidade de longo prazo útil para a validação de modelos de corrosão para armazenamento de resíduos nucleares de longo prazo (FÉRON *et al.*, 2008; GRAEDEL *et al.*, 1987).

Os íons Cu têm propriedades biocidas e as ligas de Cu podem ser usadas como materiais autodesinfetantes. Para esta aplicação, é necessário encontrar um ponto ótimo entre a liberação de íons e a formação de óxido: o primeiro é suficiente para gerar a concentração crítica de íons de cobre necessários para matar as bactérias e o segundo, baixo o suficiente para evitar a formação de manchas ou a passivação de filmes de óxido com o contato manual (HUTCHISON, 2017).

4.3 A UTILIZAÇÃO DO COBRE NA INDÚSTRIA

O cobre (Cu) é um metal industrial amplamente empregado na sociedade moderna. A China tem sido um dos maiores e mais crescentes consumidores de cobre do mundo desde o ano de 2002, com uma taxa média de crescimento 2,4 vezes maior do que a taxa média de crescimento global (XU, 2008).

O Brasil é o 15º (décimo quinto) maior produtor de Minério de Cobre, com produção em 2011 de 400 mil toneladas. A produção mundial de Cobre é estimada em 16,1 mil toneladas (2011), sendo o Chile o maior produtor mundial, com 33,66% do total, seguido pelo Peru, com 7,58%, China com 7,5% e EUA com 6,96% (IBRAM, 2012).

Em 2017 o cobre representou 9,4% do valor total da produção mineral comercializada brasileira, ficando atrás somente do ferro com 71,7% (BRASIL, 2019).

A corrosão pode levar à falha de componentes em uma variedade de ambientes industriais. Um estudo mostrou que o custo direto da corrosão foi de US \$ 276 bilhões nos Estados Unidos em 2002, o que foi aproximadamente 3,1% do Produto Nacional Bruto. Do ponto de vista econômico, alguns dos danos da corrosão não podem ser totalmente evitados, mas muitas perdas podem ser reduzidas (CARVALHO, 2014; KOCH *et al.*, 2002).

Devido à sua resistência à corrosão e bioincrustação em ambientes de água do mar, ductilidade mecânica, excelente condutividade elétrica e térmica, as ligas de cobre são amplamente utilizadas como condensadores e materiais de tubulação de trocador de calor em usinas de energia marítima. O cobre tem uma boa resistência à corrosão na maioria dos casos. No entanto, ele ainda sofre corrosão, como corrosão por pite, corrosão em fendas e corrosão sob tensão (POLAN, 1987).

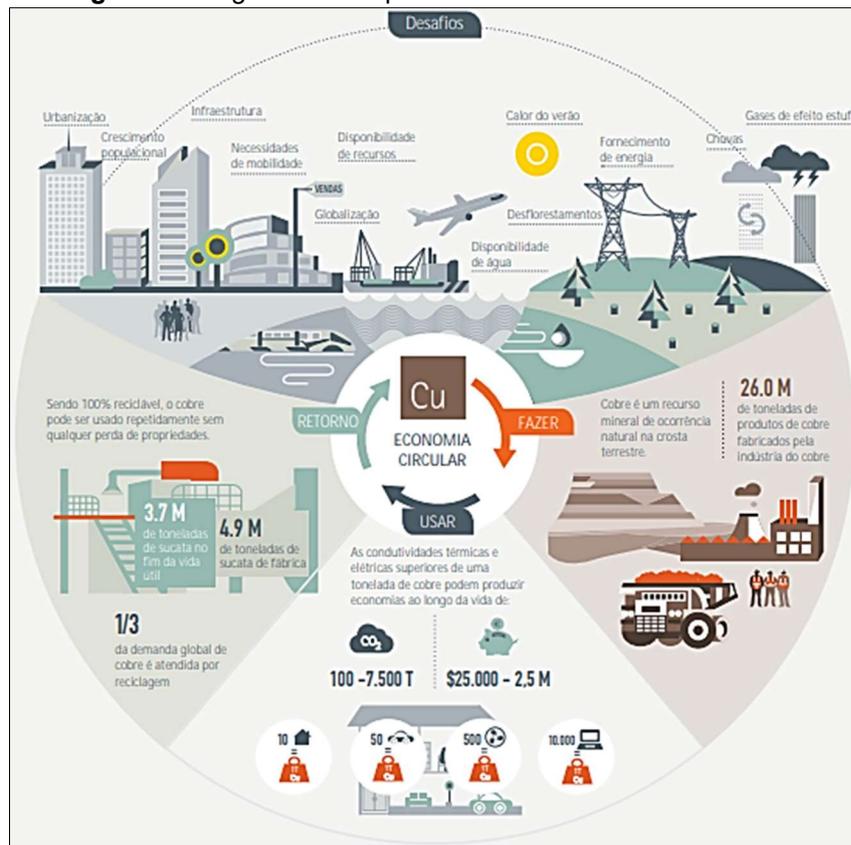
A seleção de materiais em sistemas de refrigeração é um processo complexo. Deve ser um meio-termo entre os requisitos devido à química da água e os requisitos operacionais do sistema. Uma variedade de materiais tem sido usada para aquecedores de água de alimentação e tubos condensadores. Na água do mar, os mais comuns incluem aço carbono revestido, titânio, ligas de cobre (latão de alumínio, ligas de cobre-níquel 90Cu-10Ni e 70Cu-30Ni), latão almirantado e Monel (70% níquel, 30% cobre), às vezes também aço inoxidável 304 é usado. Os tubos condensadores são geralmente feitos de materiais cuprosos (CARVALHO, 2014).

Cobre e ligas de cobre são comumente usados em condensadores e trocadores de calor devido à sua alta condutividade térmica e elétrica, trabalhabilidade mecânica e

boa resistência à corrosão e macrofouling. A liga de níquel e pequenas quantidades de ferro em cobre melhora a resistência à corrosão. Portanto, as ligas de Cu-Ni são preferidas em ambientes marinhos devido à formação de uma película superficial protetora aderente e fina que se forma natural e rapidamente após a exposição à água do mar limpa (CARVALHO, 2014).

Na Figura 1, temos um infográfico demonstrando a economia circular e os desafios da utilização do cobre no mundo globalizado.

Figura 1: Infográfico do suporte do cobre a economia circular.



Fonte: ICA, 2018.

A Tabela 1 lista algumas das razões pelas quais o cobre e as ligas de cobre são vitais para os principais tipos de aplicação que se beneficiam das combinações dos atributos descritos.

Tabela 1: Atributos e aplicações de cobre e ligas de cobre

Propriedade	Indústria / Tipo de Aplicação
Estética	Arquitetura, escultura, joalheria, relógios, talheres.
Bactericida	Ferragens para portas, motores marítimos de combustão interna, tratamentos de colheita.

Resistência à bioincrustação	Engenharia geral, hidráulica e marítima, metalmeccânica, aeroespacial, geração de energia, construção naval, plataformas offshore de petróleo e gás.
Resistência à corrosão	Tubos e acessórios para encanamento, telhados, engenharia geral e marítima, construção naval; engenharia química, processos industriais, incluindo decapagem, gravação e destilação; encanamento doméstico, arquitetura, dessalinização, têxteis, fabricação de papel.
Facilidade de fabricação	Todas as opções acima mais a impressão.
Condutividade elétrica	Geração, transmissão e distribuição de energia elétrica, comunicações, soldagem por resistência, eletrônica.
Amizade ambiental	Essencial para a saúde de humanos, animais e colheitas
Fungicida	Agricultura, preservação de alimentos e madeira.
Propriedades de baixa temperatura	Criogenia, manuseio de gás líquido, supercondutores.
Resistência mecânica/ductilidade	Engenharia geral, engenharia naval, defesa, aeroespacial.
Não magnético	Instrumentação, equipamento de levantamento geológico, varredores de minas, perfuração offshore.
Não faiscante	Mineração e outras ferramentas de segurança, distribuição de oxigênio.
Elasticidade	Molas e contatos elétricos, pinos de segurança, foles de instrumentos, embalagens eletrônicas.
Condutividade térmica	Permutadores de calor e equipamentos de ar condicionado / refrigeração, radiadores automotivos, motores de combustão interna, mineração.

Fonte: CALCUTT, 2001.

O cobre tornou possível o desenvolvimento contínuo e eficiente da indústria elétrica porque possui a maior condutividade dos metais comerciais. Além disso, tem propriedades mecânicas favoráveis em temperaturas baixas, ambientais e elevadas, é facilmente fabricado ou fundido para moldar e pode ser facilmente usinado. O cobre também tem excelente resistência à oxidação e corrosão. A fina camada de óxido que se forma é condutora; o que significa que as conexões feitas corretamente terão uma longa vida útil e não se deteriorarão com o tempo. De cabos de transmissão de alta tensão a microcircuitos e de geradores de megawatt a computadores, em todos os aspectos da geração, transmissão e uso de eletricidade, o cobre é o metal essencial com eficiência energética (CALCUTT, 2001).

A alta condutividade elétrica do cobre é acompanhada por excelente condutividade térmica, o que torna o cobre a primeira escolha para aplicações de trocador de calor. Bons exemplos são os radiadores automotivos de cobre-latão brasados recentemente desenvolvidos que são totalmente competitivos com os equivalentes de alumínio em termos de eficiência térmica e peso leve, e são

significativamente mais duráveis. O cobre e suas ligas representam 6 - 9% em peso (ou aproximadamente 50 - 55lb, 23-25kg) do conteúdo de um automóvel típico. O cobre em si é essencial para todo o chicote elétrico, enrolamentos do alternador e do motor de partida e outros motores e atuadores. Ligas de cobre são usadas para cliques de mola condutiva, terminais e conectores. Ligas de cobre também são usadas para rolamentos, engrenagens e guias de válvula, radiadores, tubos hidráulicos e fixadores. Componentes pequenos e usinados podem ser feitos mais baratos em latão do que em aço e, para aplicações automotivas, geralmente não precisam de proteção cara contra corrosão. O cobre também é um componente essencial das ligas de alumínio usadas em blocos de motor, cabeçotes de cilindro e outras peças fundidas automotivas. E, o cobre está começando a desempenhar um papel importante em veículos elétricos e híbridos, em motores de arranque / geradores, motores de acionamento, circuitos e como cátodo em baterias de níquel-hidreto metálico recentemente comercializadas. Ao todo, o conteúdo de cobre dos veículos futuros pode ser três vezes o usado hoje (CALCUTT, 2001).

Existem cobre e ligas de cobre que atendem a quase todas as necessidades industriais previsíveis, desde componentes miniaturizados de eletrônicos modernos até produtos de várias toneladas para a indústria pesada. As aplicações comuns de engenharia incluem válvulas, bombas, trocadores de calor, vasos, freios para grandes aeronaves e veículos off-road, mancais de deslizamento para inúmeros produtos mecânicos, hélices de navios e matrizes de moldagem por injeção de plástico. O uso do cobre em nossas casas e indústrias não gera riscos à saúde; na verdade, o cobre é um oligoelemento essencial em nossas dietas. Desenvolvimentos recentes em tecnologia de semicondutores incluíram o uso de cobre para ajudar a aumentar o desempenho em 30% e reduzir o tamanho. 200 milhões de transistores podem ser agrupados em um único chip. Apesar de seu uso generalizado (e crescente), não há risco de que os recursos naturais se esgotem. O cobre é extraído em muitos lugares do mundo, e o novo metal é geralmente abundante. Por outro lado, o cobre também tem a enorme vantagem de ser facilmente reciclado. É facilmente separado de outras sucatas e pode ser reutilizado de forma econômica. Na verdade, a alta reciclabilidade do cobre foi citada como uma das propriedades "verdes" do metal (CALCUTT, 2001).

4.4 CORROSÃO DO COBRE E SUAS LIGAS EM MEIO AQUOSO

O cobre é conhecido como um metal nobre que fornece resistência à corrosão adequada na atmosfera e em alguns ambientes químicos devido à formação de um filme passivo protetor (óxido) ou camada não condutiva de produtos de corrosão em sua superfície (ADELOJU e HUGHES, 1986; SUTER *et al.*, 1993).

Em um sistema de resfriamento, a corrosão resulta na diminuição gradual da espessura do cobre ou mesmo na perfuração da parede do tubo do trocador de calor, o que pode causar vazamento futuros.

A corrosão do cobre e a formação de produtos de corrosão em sua superfície afetam negativamente o desempenho de um sistema e podem reduzir sua eficiência (ATTIA *et al.*, 2016).

Os principais fatores que afetam a corrosão são o oxigênio e outros gases dissolvidos, os sólidos dissolvidos e suspensos, o pH, a velocidade, a temperatura e a atividade microbiana (ALFANTAZI, AHMED e TROMANS, 2009).

Segundo Carvalho (2014), metais corroem em ambientes aquosos por um processo eletroquímico, no qual a perda real de metal ocorre pela dissolução de íons metálicos carregados, M^{n+} ("n" = valência), e a produção de elétrons como segue:



No caso do cobre:



Qualquer reação que libere elétrons, Equações 1 e 2, é chamada de "reação anódica". Para que o processo de corrosão continue, os elétrons liberados pela reação anódica devem ser consumidos por uma reação catódica ocorrendo simultaneamente sobre a superfície metálica, que envolve espécies químicas presentes no ambiente aquoso circundante. Uma reação anódica e catódica deve ocorrer para ter corrosão (CARVALHO, 2014).

4.5 PRINCIPAIS FORMAS DE CORROSÃO EM MEIO AQUOSO

O processo de corrosão ocorre, comumente, na face de separação entre o metal e o eletrólito.

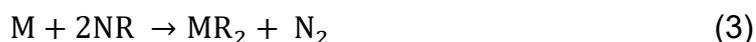
Em meio aquoso, as principais formas de corrosão que encontramos são:

- **Corrosão uniforme:** é a forma menos agressiva de corrosão. O ataque, neste caso, se estende de forma homogênea sobre toda a superfície metálica, e sua penetração média é igual em todos os pontos. Embora a corrosão geral seja frequentemente referida como corrosão uniforme, a profundidade da corrosão na superfície do metal não é totalmente uniforme. Na verdade, normalmente existem picos e vales sobre a superfície do metal quando a corrosão geral ataca um metal. No entanto, a corrosão é considerada geral quando não há pequenas áreas com corrosão profunda no metal. Ela é geralmente fácil de medir e prever (KUTZ, 2018; MURTY, 2013; PONTE, 2003).
- **Corrosão localizada:**
 - **Corrosão alveolar:** se processa na superfície metálica produzindo sulcos com certa profundidade, sempre inferiores ao seu diâmetro de superfície. Sua principal característica são sulcos semelhantes a alvéolos com fundo arredondado. É um tipo de corrosão localizada (OLIVEIRA, 2012).
 - **Corrosão puntiforme ou por pite:** se processa ponto a ponto, em pequenas áreas localizadas na superfície metálica, produzindo uma espécie de pites ou simplesmente furos que são cavidades em forma angulosa com profundidades superior ao diâmetro de superfície do furo. Alguns autores chamam-na de corrosão por pitting. Este tipo de corrosão pode ocorrer em superfícies passivadas, inclusões ou limites de grãos na superfície podem ser o ponto de partida da destruição. Ânions agressivos penetram no filme em tais locais e formam essas pequenas cavidades. A gravidade da corrosão por pite é controlada pelo ambiente, concentração de cloreto, acidez do eletrólito, concentração do oxidante, temperatura, características estruturais, composição de metal ou liga, concentração de oxigênio dissolvido, potencial e taxas de varredura potenciais (BRUNNER, 2014; OLIVEIRA, 2012; POPOV, 2015).
 - **Corrosão por placas:** é a que se localiza em regiões de superfície metálica e não em toda sua extensão, caracterizando-se por apresentar uma espécie de escavação no material (OLIVEIRA, 2012).

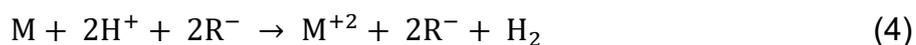
4.6 REAÇÕES ELETROQUÍMICAS

As reações eletroquímicas ocorrem na superfície do eletrodo por meio de processos consecutivos, incluindo a transferência de elétrons. Portanto, o material do eletrodo deve ser eletronicamente condutivo e, então, ser capaz de interagir com a molécula. Dessa forma, na maioria das reações, que se manifestam em presença de uma superfície metálica, ocorre esta transferência de corrente através do metal, e a reação é eletroquímica em sua natureza. Como na corrosão de um metal a superfície metálica está sempre presente, as reações básicas responsáveis pela corrosão são eletroquímicas. Entretanto, a neutralização de uma solução alcalina por um ácido não é eletroquímica, pois mesmo que a reação possa ser expressa em termos de íons, a reação entre H^+ e OH^- não envolve transferência de corrente por uma distância maior do que aquela entre essas duas partículas (NAPPORN *et al.*, 2018; WOLYNEC, 2003).

Segundo Buchanan e Stansbury (2012), as reações eletroquímicas podem ser divididas em pelo menos duas semirreações, com cada meia-reação envolvendo perda ou ganho de elétrons por espécies químicas que, como resultado, sofrem alterações de valência. As semirreações envolvem superfícies metálicas nas quais (3) íons metálicos passam ou são depositados da solução, ou (4) o estado de valência de outra espécie é alterado. Se as semirreações ocorrem em metais fisicamente separados em um meio condutor apropriado (geralmente uma solução aquosa), uma diferença no potencial elétrico é geralmente observada entre eles. Por exemplo, considere a seguinte reação de corrosão:



ou, se os estados ionizados do NR e MR_2 forem levados em consideração, as reações equivalentes de



A reação 5 é a soma das seguintes semirreações:



em que o M, tendo perdido elétrons para formar íons M^{+2} , é oxidado e os íons de hidrogênio são reduzidos a gás hidrogênio. Conceitualmente, essas duas semirreações podem ocorrer em superfícies fisicamente distintas, colocando o M em uma solução de íons M^{+2} e platina, que normalmente é quimicamente inerte, em uma solução de íons de hidrogênio em que o gás hidrogênio é borbulhado.

Segundo DURET-THUAL (2014), uma abordagem termodinâmica também pode ser usada para reações eletroquímicas. Em uma determinada fase, a temperatura e pressão constantes, contendo várias espécies, cada espécie i possui um potencial químico μ_i definido por:

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln a_i \quad (8)$$

onde μ_i^0 é o potencial químico padrão (condições padrão $T = 25^\circ\text{C}$, $a_i = 1$, pressão 1 bar) e a atividade a_i das espécies na fase ($a_i = c_i$ em solução diluída). Uma reação química entre A e B para dar C + D ocorrerá se a entalpia livre ΔG da reação for negativa. A entalpia livre está relacionada com a variação dos potenciais químicos das espécies: + D ocorrerá se a entalpia livre ΔG da reação for negativa. A entalpia livre está relacionada à variação dos potenciais químicos das espécies:



$$\Delta G = \mu_C + \mu_D - (\mu_A + \mu_B) \quad (10)$$

em um sistema eletroquímico, envolvendo um condutor eletrônico (metal) e um eletrólito (condutor iônico), ocorre a troca de cargas entre as duas fases; um termo adicional é adicionado ao potencial químico para levar em consideração a energia elétrica. Cada espécie denominada i é então definida por seu potencial eletroquímico μ_i^{\sim} em vez de μ_i

$$\mu_i^{\sim} = \mu_i + z_i + fE_i \quad (11)$$

onde f é a constante de Faraday, ou seja, $96.500C$ e E_i é o potencial da fase contendo i e z_i a valência da espécie i . Quando um metal M está em contato com um eletrólito contendo apenas os cátions M^{n+} como oxidantes, então um equilíbrio é estabelecido:



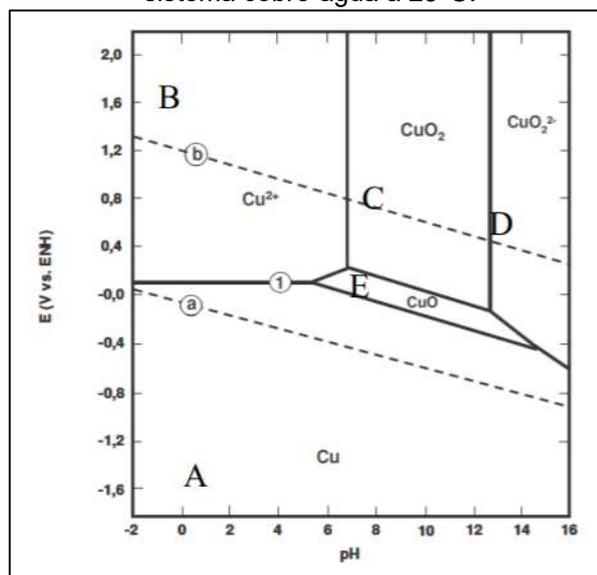
no equilíbrio $\Delta G = 0$, e os potenciais eletroquímicos são iguais. Isso leva às seguintes equações: 0, os potenciais eletroquímicos $\tilde{\mu}_M$ e $\tilde{\mu}_{M^{n+}}$ são iguais. Isso leva às seguintes equações:

$$\Delta G_{chemi} = -nfE \quad (\text{em equilíbrio}) \quad (13)$$

$$E_{M^{n+}/M} = E_{M^{n+}/M}^o + \left(\frac{RT}{nf}\right) \times \ln a_{M^{n+}} \quad (\text{Equação de Nernst}) \quad (14)$$

quando dois pares redox Ox_1 / Red_1 e Ox_2 / Red_2 reagem, é possível prever a direção da reação comparando o potencial de cada semirreação $Ox_1 + ne^- \leftrightarrow Red_1$ e $Ox_2 + ne^- \leftrightarrow Red_2$. Considerando a reação global $Ox_1 + Red_2 \leftrightarrow Red_1 + Ox_2$, o ΔG é negativo na direção escrita se $-nfE_1 + nfE_2 < 0$, ou seja, $E_1 > E_2$. Isso significa que quando um metal está em um eletrólito contendo um par redox com um potencial maior do que o metal, ele será oxidado. Em soluções aquosas, os íons metálicos sofrem reações ácido / base e reações eletroquímicas. O domínio de estabilidade de cada espécie pode ser representado em um diagrama de pH potencial. Um exemplo é o Diagrama de Pourbaix, representado na Figura 2. De acordo com o pH, a oxidação do metal pode produzir íons dissolvidos ou óxido ou hidróxido sólido. Esses diagramas fornecem dados termodinâmicos, mas também fornecem informações valiosas sobre os produtos de corrosão que afetam a taxa de corrosão. Se produtos sólidos podem se formar no metal, eles podem exercer um efeito de barreira e reduzir a taxa de dissolução.

Figura 2: Diagrama de Pourbaix do sistema cobre-água a 25°C.



Fonte: CRUZ, 2010.

A partir da Figura 2, podemos identificar várias regiões as quais corresponde uma maior estabilidade termodinâmica para um determinado composto metálico. A região A corresponde assim à situação na qual o composto mais estável é o cobre (Cu), para a região B o composto mais estável é o íon Cu^{2+} , para a região C o CuO_2 (óxido de cobre II) e de forma igual para as restantes regiões (CRUZ, 2010).

Para Cruz (2010), podemos caracterizar as várias áreas de acordo com a espécie predominante por:

- **Zona de imunidade:** onde as reações não são termodinamicamente possíveis. Nesta zona não ocorre corrosão visto que o material apresenta um comportamento inerte, ou seja, tende a manter-se na sua forma metálica (Cu) (A);
- **Zona de corrosão:** onde é possível ocorrerem reações com consequente destruição metálica. Nestas zonas as formas mais estáveis são as iônicas (Cu^{2+} e CuO_2^{-2}) (B e D);
- **Zona de passivação:** onde é possível ocorrerem reações que levam a formação de óxidos (ou hidróxidos) metálicos, estáveis e com função protetora (CuO e CuO_2). Com efeito nestas zonas a corrosão metálica é quase inexistente devido à formação de películas de óxidos protetores (C e E).

4.7 REAÇÕES QUÍMICAS

O ferro, o cromo e outros metais, em soluções eletrolíticas, se dissolvem mais rapidamente do que as taxas de corrosão (ou dissolução) determinadas por métodos eletroquímicos. Isso indica que simultaneamente com a dissolução eletroquímica ocorre a dissolução química. A dissolução química não depende do potencial do eletrodo. Sob algumas condições, a dissolução química de metais é o processo dominante de dissolução (JEGDIĆ *et al.*, 2016).

Em muitos casos os valores da taxa de corrosão obtidos por métodos gravimétricos ou analíticos são maiores do que aqueles obtidos pelo método de resistência à polarização. Por essas razões, foi proposto o uso de fatores de correção para taxas de corrosão eletroquímica. Além disso, observou-se que as taxas de corrosão obtidas por métodos eletroquímicos em temperaturas elevadas apresentam um desvio significativo em comparação aos resultados de métodos gravimétricos ou analíticos. No entanto, os métodos eletroquímicos para determinar a taxa de corrosão ainda são amplamente utilizados, muitas vezes sem a verificação dos resultados por métodos diretos como o método de perda de peso e métodos analíticos (PRAŽAK, 1974).

Segundo Jegdić *et al.* (2016), existem vários mecanismos de corrosão química, que explicam por que a quantidade de eletricidade que flui durante a dissolução anódica do metal é menor do que a quantidade de eletricidade que é calculada com base na perda de massa, usando a lei de Faraday. Esses mecanismos também fornecem uma explicação por que a valência efetiva é menor do que a valência esperada. Os seguintes mecanismos de corrosão química são geralmente considerados:

- formando íons metálicos de menor valência;
- mecanismo de desintegração da superfície metálica;
- mecanismo por controle de filme de superfície;
- mecanismo de dissolução química direta.

4.7.1 Formando Íons Metálicos de Menor Valência

Com a dissolução de um metal há formação de íons com valência maior que outros, podendo-se supor que a reação eletroquímica ocorre gradualmente, provavelmente por meio de várias etapas de reação de um elétron (CONWAY, 1960). Durante o processo de dissolução vários metais passam pela etapa de íons

monovalentes, na forma de Me^+ , como por exemplo o Zn e Cu ou na forma de MeOH, como por exemplo o Fe (BOCKRIS *et al.*, 1961; DRAŽIĆ e ZEČEVIĆ, 1978; MATTSON e BOCKRIS, 1959).

Os íons de baixa valência podem se difundir no eletrólito, se não forem adsorvidos na superfície do eletrodo. Nesses casos, a taxa de difusão de íons com baixa valência do eletrodo para a solução depende das condições hidrodinâmicas. Assim, a valência aparentemente baixa depende das condições hidrodinâmicas nas proximidades da superfície do eletrodo. Entretanto, se os intermediários de baixa valência são fortemente adsorvidos na superfície do eletrodo, sua difusão na solução não pode ser esperada e, portanto, a redução da valência aparente também não pode ser esperada (JEGDIĆ *et al.*, 2016).

4.7.2 Mecanismo de Desintegração da Superfície Metálica

A desintegração mecânica da superfície metálica explica o aumento observado na concentração de íons metálicos na solução, acima das concentrações esperadas (JEGDIĆ *et al.*, 2016).

Analisando a dissolução anômala de zinco e alumínio é possível observar que a desintegração mecânica dos metais investigados (efeito chunk) foi responsável pela baixa valência aparente. De acordo com o mecanismo de desintegração mecânica proposto, a separação dos grupos de átomos da superfície ocorre durante a dissolução desses metais. Esses grupos de átomos são fracamente ligados à superfície e podem ser transportados como partículas de metal para a solução (caso o eletrólito for suficientemente agressivo). Na solução de ácido sulfúrico ou clorídrico, a corrosão espontânea das partículas pode ser esperada nessas soluções. Isso resulta no acúmulo de íons metálicos na solução em uma quantidade maior do que a que corresponde à quantidade de eletricidade escoada. Além disso, ocorre a reação de evolução do hidrogênio, onde a valência aparente obtida experimentalmente é inferior à valência esperada (STRAUMANIS, 1961).

O ferro na solução de ácido sulfúrico, com pH igual a 2, sofre corrosão duas vezes mais rápido devido à desintegração mecânica (efeito chunk) do que era esperado de acordo com os resultados das medições eletroquímicas (MARCH e SCHASCHL, 1960).

4.7.3 Mecanismo por Controle de Filme de Superfície

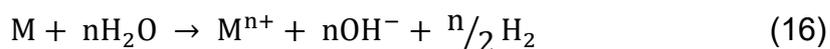
Segundo Jegdić *et al.* (2016), o mecanismo de dissolução química, que é controlado pela presença de filme protetor na superfície do metal, pode explicar o comportamento anódico anômalo dos metais, que se manifesta pela redução da eficiência da corrente e efeito diferencial negativo. Este comportamento foi frequentemente observado durante a dissolução de Mg, Zn e Al. Existem diferentes versões deste mecanismo, muitas das quais são baseadas no fato de que esses metais são cobertos por uma película passiva. O filme passivo é destruído durante a dissolução anódica e então restaurado. Dependendo da composição da solução (por exemplo, na presença de íon Cl⁻), as propriedades do filme passivo mudam, o que leva à ocorrência de pontuações na superfície do metal. O efeito diferencial negativo se manifesta como aumento da evolução do hidrogênio com o aumento da densidade de corrente anódica.

Na corrosão sob tensão e fadiga, a evolução do hidrogênio também foi observada, por corrosão dos aços inoxidáveis austeníticos e martensíticos, nas polarizações anódicas (JONES, 1998).

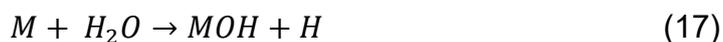
4.7.4 Mecanismo de Dissolução Química Direta

O metal é polarizado catodicamente para diferentes valores de polarização catódica por um longo período para permitir o acúmulo dos íons correspondentes na solução a uma concentração alta o suficiente para que seu valor possa ser determinado por métodos analíticos. Para muitos metais, verificou-se que a dissolução total era muito maior do que o esperado, e que o processo de dissolução era independente do potencial do eletrodo (KOLOTYRKIN e FLORIANOVICH, 1984; KOLOTYRKIN e AGLADZE, 1967; VORKAPIĆ e DRAŽIĆ, 1979).

A reação geral de dissolução química para todos os metais pode ser escrita como:



Para o Fe e Cr, que é dependente do pH, um mecanismo mais complexo foi apresentado:





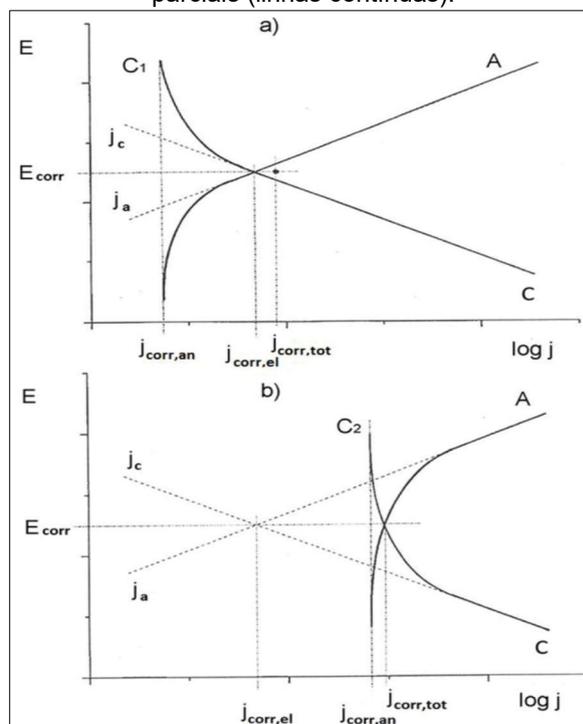
A dissolução química dos metais, que ocorre de acordo com a reação 16, ou reação 17-18, é independente do potencial do eletrodo, de forma que as reações de dissolução química são apresentadas por linhas verticais no diagrama eletroquímico de Tipo de Wagner-Traud, conforme mostrado na Figura 3. A posição dessas linhas é determinada pela reação química dos metais com a água e depende do tipo de metal, da temperatura e do pH (KOLOTYRKIN e FLORIANOVICH, 1984).

Como pode ser visto na Figura 3a, quando a taxa de dissolução química não é muito maior que a taxa de corrosão eletroquímica, o desvio da linha reta para a densidade de corrente anódica parcial pode ser observado apenas na região de polarizações catódicas, linha vertical C1. No caso em que a taxa de dissolução química é muito maior do que a taxa de corrosão eletroquímica, o desvio da linha reta da densidade de corrente anódica parcial pode ser observado muito antes do potencial de corrosão, ou seja, na região da polarização anódica real, linha vertical C2 na Figura 3b (JEGDIĆ *et al.*, 2016).

Os diagramas anteriores também podem ser analisados do ponto de vista da reação eletroquímica da evolução do hidrogênio catódico. Considerando que o hidrogênio molecular é formado pelas reações químicas 16 ou pelas reações 17-18, a densidade de corrente total para a evolução do hidrogênio na dependência do potencial do eletrodo é a soma da densidade de corrente catódica parcial e a densidade de corrente apropriada para a reação química, linha vertical C1 na Figura 3a e C2 na Figura 4b (JEGDIĆ *et al.*, 2016).

Figura 3: Taxa de processos de corrosão na dependência do potencial do eletrodo.

C: Linha Tafel para evolução de hidrogênio catódico.
 A: Linha Tafel para dissolução anódica de metal.
 C1- dissolução química de metal com baixa taxa específica.
 C2- dissolução química de metal com alta taxa específica.
 A taxa total é sempre a soma de todos os processos parciais (linhas contínuas).



Fonte: DRAŽIĆ e POPIĆ, 2005.

4.8 ÁGUAS SUBTERRÂNEAS: FORMAÇÕES PIRABAS E BARREIRAS NO ESTADO DO PARÁ

Diante às inúmeras fontes de captação da água, destinada ao consumo humano, podemos destacar o manancial subterrâneo, onde a captação pode ser proveniente de um aquífero confinado ou artesiano, localizado entre duas camadas relativamente impermeáveis, ou também a partir de aquíferos livres próximos a superfície (SILVA e ARAUJO, 2003).

No Estado do Pará, apesar de apresentar uma densa rede de drenagem superficial, formada por muitos rios, cerca de 70% dos municípios paraenses utilizam como fonte de abastecimento as águas subterrâneas, devido ao baixo custo de produção (CPRM, 2013).

Segundo a CPRM (2013), o Estado do Pará possui seu território dividido em 7 domínios hidrogeológicos:

- as formações cenozoicas;
- as bacias sedimentares;

- o domínio poroso/fissural;
- as rochas metassedimentares ou metavulcânicas;
- as rochas vulcânicas;
- as rochas cristalinas;
- as rochas carbonáticas e metacarbonáticas.

Dentre os domínios hidrogeológicos listados acima, as formações indiferenciadas, barreiras e pirabas, referente as formações cenozoicas, são caracterizadas por aquíferos porosos e com os subdomínios aluviões, conforme descrição na Figura 4. Essas duas formações (pirabas e barreiras) são as principais fontes responsáveis pelas características das águas subterrâneas de alguns dos municípios paraense: Abaetetuba, Barcarena, Benevides e Capanema.

Figura 4: Coluna litoestratigráfica da região Nordeste do Estado do Pará.

IDADE	SEQUÊNCIA DEPOSITIONAL	UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS	DESCRIÇÃO	NÍVEL DO MAR	
				Alto ←	→ Baixo
Plio-Pleistoceno	C	Pós-Barreiras	Areas e argilas de coloração amarelada e avermelhada, de granulometria fina a média	?	?
Mioceno	NEO	Paleossolo laterítico			
		Formação Barreiras	Argilitos com laminações plano paralelas, wavy e flaser; Arenitos macios laminações com superfícies de reativação recobertas por drapes de argila formando camadas associadas a ciclos de maré.		
	MESO	Formação Barreiras			
EO	A	Formação Barreiras			
		Formação Pirabas	Carbonatos fossilíferos cinza claro e escuro com terrígenos, arenitos, arenitos argilosos com laminações plano paralelas e lenticular associada a ciclos de maré		
Neo Oligoceno		Paleossolo laterítico-Bauxítico			
Cretáceo		Grupo Itapecuru			

Fonte: ROSSETTI *et al.*, 2001.

4.8.1 Formação Pirabas

A formação pirabas pode ser encontrada ao longo dos estados do Maranhão e Piauí. Tem como ocorrência tipo a ilha de Fortaleza, no município de São João de Pirabas, e ao longo da faixa da costa do Pará, nas localidades de Salinópolis, Maracanã, Curuçá e nos territórios de Capanema. Possui uma litologia caracterizada pela presença de calcário ricamente fossilíferos, apresentando coloração amarelada

ou acinzentada, alternados com argilas e areias. Algumas vezes, são caracterizados por calcários duros de coloração cinza, correlacionados com camadas de argila calcífera em leitos sucessivos. Os aquíferos resultantes da formação pirabas são considerados os melhores aquíferos da região, uma vez que seus níveis arenosos com grande expressão lateral chegam em torno de 30 m, favorecendo o acúmulo de um grande volume de água, grande transmissividade e com uma vazão em torno de 300.000 m³/h. Suas camadas produtoras são formadas por areias de granulometria fina, média a grossa, algumas com seixos arredondados e subarredondados (CPRM, 2013; MATTA *et al.*, 2000; SILVA *et al.*, 2018).

4.8.2 Formação Barreiras

A formação barreiras, no Estado do Pará, tem ocorrência, especialmente, no nordeste brasileiro, na região Bragantina e nas proximidades da região Metropolitana de Belém. É um sistema com grande participação no abastecimento nas capitais litorâneas nordestinas de São Luís, Belém, Fortaleza, Natal e Maceió. É um aquífero com predominância no município de Abaetetuba, Barcarena e Benevides. Apresenta uma constituição litológica formada por arenitos, siltitos, argilitos e conglomerados, apresentando cores variadas que estão laterizadas, sob a forma de perfil imaturo. A unidade barreiras comumente aparece em profundidades de 25 a 90 metros. Caracterizado com camadas de espessuras em torno de 70 m e uma vazão de aproximadamente 80 m³/h (CPRM, 2013; MATTA *et al.*, 2000; SILVA *et al.*, 2018; ALMEIDA, 2007; MATTA *et al.*, 2004).

4.9 TIPOS DE POÇOS PARA CAPTAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Para a captação de águas subterrâneas são utilizados alguns tipos de poços. Os poços tubulares profundos, os rasos, cisterna, cacimbas ou amazonas são os principais meios de retirada de água do lençol freático. Suas características estão descritas a seguir (ABAS, 2005; ANA, 2016).

- poço tubular profundo (artesiano e semiartesiano): obra de engenharia geológica de acesso a água subterrânea, executada com sonda perfuratriz mediante perfuração vertical com diâmetro de 4" a 36" e profundidade de até 2.000 metros, para captação de água, ilustrado na Figura 5.

Figura 5: Poço tubular profundo.



Fonte: ANA, 2016.

- poço raso, cisterna, cacimba, amazonas ou escavado: poços de grandes diâmetros (1 metro ou mais), escavados manualmente e revestidos com tijolos ou anéis de concreto, ilustrado na Figura 6. Captam a água do lençol freático e possuem geralmente profundidades na ordem de até 20 metros.

Figura 6: Poço escavado em uma propriedade rural.



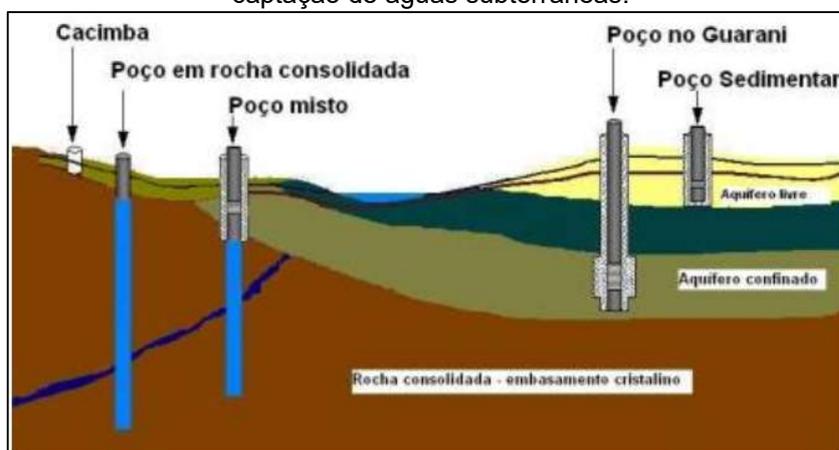
Fonte: ANA, 2016.

Conforme ABAS (2005), a Figura 7 abaixo representa esquematicamente os tipos de poços existentes para a captação das águas subterrâneas:

- cacimba, poço raso, cisterna ou poço amazonas: construídos manualmente. Não carece de licenciamento ou autorização governamental dos órgãos gestores.
- poço perfurado em rochas consolidadas ou cristalinas: também conhecido como semiartesiano.

- misto: poço perfurado em rochas inconsolidadas e consolidadas pode ser chamado também semiartesiano.
- poço no aquífero guarani: poço perfurado em rochas consolidadas e inconsolidadas, com grandes diâmetros (até 36") e profundidades (até 2.000 metros), também chamado de artesiano, jorrante ou não.
- poço sedimentar: perfurado em rochas geralmente inconsolidadas, pode ser chamado também de semiartesiano.

Figura 7: Desenho esquemático dos tipos de poços existentes para a captação de águas subterrâneas.



Fonte: ABAS, 2005.

4.10 PRINCIPAIS PROBLEMAS CAUSADOS PELA ÁGUA EM SISTEMAS INDUSTRIAIS

4.10.1 Incrustações e Depósitos

Incrustação é qualquer tipo de depósito indesejável em superfície de transmissão de calor que aumente significativamente as resistências à transferência de calor e ao escoamento, aumentando, também, a perda de carga sobre o regime. Neste caso, as incrustações precipitam de forma a se fixarem na área interna dos tubos de cobre do condensador, local onde a água de condensação atua e região onde ocorrem as trocas térmicas. Geralmente não levamos em consideração incrustações no lado externo dos tubos, local onde escoo o refrigerante, já que este se encontra em um circuito fechado no ciclo de refrigeração da máquina. Deste modo é irrelevante o processo externo de incrustação, apesar de existirem fatores de incrustações normatizados para os refrigerantes (RIBEIRO, 2011).

A incrustação pode ter uma evolução diferente em cada trocador de calor. Segundo Taborek et al. (1972), e Somerscales (1990) a relação entre a taxa de deposição e a taxa de remoção é que resulta em uma grande variedade de modelos de incrustação.

A taxa de deposição depende do mecanismo de incrustação, enquanto a taxa de remoção depende da força de adesão do depósito e da tensão de cisalhamento. Se a taxa de deposição é constante e a taxa de remoção é desprezível ou se a diferença entre a taxa de deposição e a taxa de remoção é constante, a curva representativa da evolução da incrustação com o tempo assumirá a forma de uma reta. Segundo Zubair et al. (2000), este tipo de incrustação representa, geralmente, depósitos duros e de difícil remoção.

A incrustação assintótica ocorre se a taxa de deposição é constante e a taxa de remoção é proporcional à espessura da camada de incrustação. Isto sugere que a força de cisalhamento na superfície da camada está aumentando ou que os outros mecanismos que deterioram a estabilidade da camada estão tomando lugar. a incrustação denominada “falling rate”, que é um tipo de incrustação intermediária aos tipos linear e assintótica, ocorrerá se a taxa de deposição for inversamente proporcional à espessura da camada de incrustação (MADI, 2005).

O principal meio de incrustação nesses tipos de trocadores é por precipitação de partículas, principalmente de origem cálcica que se acumulam nas paredes dos tubos de cobre. No entanto, é comum verificar em limpezas, incrustações por oxidação, incrustações lamacentas ou orgânicas tais como algas e colônias de origem bacteriana. Atualmente, para aumentar a área da troca térmica, tem-se a opção de utilizar tubos aletados por fora e ranhurados por dentro (RIBEIRO, 2011).

As incrustações são completamente previsíveis, em função de leis da química, com isso citaremos a seguir quais os tipos mais frequentemente observados nos sistemas de resfriamento.

4.10.1.1 Carbonato de cálcio

Segundo Water Meyer^a (2011), o carbonato de cálcio (CaCO_3) é um dos primeiros compostos a se precipitar sobre superfícies de troca térmica dos sistemas de resfriamento, formando as incrustações. Isto ocorre, pois sua solubilidade é inversamente proporcional ao aumento da temperatura conforme nos mostra a Tabela 2 abaixo:

Tabela 2: Solubilidade do carbonato de cálcio em relação a temperatura.

Solubilidade (mg/l)	Temperatura (°C)	Solubilidade (mg/l)	Temperatura (°C)
810	0	330	60
700	10	260	80
650	20	190	100
560	25	25	180
520	30	14	225
440	40	11	260
380	50	8	335

Fonte: WATER MEYER^a, 2011.

A temperatura não é o único fator que pode interferir na pré-saturação do carbonato de cálcio (CaCO_3), em sistemas de recirculação de águas. A Figura 8 mostra a parte interna de uma tubulação incrustada.

Figura 8: Incrustação de carbonato de cálcio em tubulação de PVC.

Fonte: NASCIMENTO *et al.*, 2009.

4.10.1.2 Silicato de magnésio e de cálcio

Silicato de Cálcio (CaSiO_3) e Silicato de Magnésio (MgSiO_3) são depósitos tenazes (de difícil remoção) e dependentes do pH e da concentração de cálcio ou magnésio e sílica na água de recirculação. Normalmente são encontrados, em sistemas operando com pH superior a 7,8. Outros fatores tais como, elevadas temperaturas de película nos trocadores de calor, elevada temperatura da água de recirculação e relação magnésio e sílica relativa, afetam o aparecimento de

incrustação de silicato de magnésio, conforme Figura 9. Quando a relação é igual a 1:1, ou quando os teores de magnésio superam os teores de cálcio, ocorre a precipitação de $MgSiO_3$ e normalmente a precipitação do $MgSiO_3$ se dá nos trocadores de calor e nos enchimentos das Torres de Resfriamento. As solubilidades do silicato de cálcio e do silicato de magnésio têm curvas de solubilidade inversamente proporcional ao aumento da temperatura. Conseqüentemente, quanto mais elevada à temperatura de película de um trocador de calor, maior será a propensão para encontrarmos estes tipos de incrustação (WATER MEYER^a, 2011).

Figura 9: Silicato de cálcio em aletas de torre de resfriamento.



4.10.1.3 Sílica

A sílica, em sistemas de resfriamento raramente se apresenta sob a forma de incrustações vítreas, conforme ilustrado na Figura 10, pois para tanto, necessitaria atingir altas concentrações, altas temperaturas de película, além de submissão do sistema a baixos valores de pH. E como todo depósito, as incrustações por sílica são também dependentes da temperatura. Entretanto, mudanças bruscas de pH, são geralmente, mais representativas, na formação destes depósitos. A solubilidade da sílica está intimamente ligada ao pH. Quanto maior o pH maior a solubilidade da sílica na água (WATER MEYER^a, 2011).

Figura 10: Silicato de cálcio em trocador casco e tubo.



4.10.1.4 Ferro

O ferro, normalmente é detectado nos depósitos encontrados nos trocadores de calor, ou tubulações, sendo uma deposição muito frequente e abundante, ilustrado na Figura 11. A maior parte dos depósitos de ferro se parece com ferrugem. Na grande maioria das vezes encontram-se na forma de Fe_2O_3 , e podem ser facilmente detectados, pela simples utilização de um ímã nas inspeções. A causa da precipitação de óxidos de ferro é um fenômeno diferente das demais causas de formação de outros depósitos. Inicialmente o íon ferroso (Fe^{2+}) encontra-se na forma solúvel, entretanto, ao ser aerado na Torre de Resfriamento, ou sob influência da cloração, é convertido a férrico (Fe^{3+}), insolúvel, o qual se precipita. A precipitação do ferro, em sistemas de troca térmica, pode ser agravada pela presença de bactérias ferro oxidante, as quais utilizam a energia produzida pelo processo de oxidação, para promover a sua deposição (WATER MEYER^a, 2011).

Figura 11: Depósito de ferro em torre de resfriamento.



4.10.1.5 Fouling

Fouling é um tipo de deposição, derivada de matéria suspensa presente na água, conforme Figura 12. Difere do termo Incrustação, pelo simples fato que os depósitos dela oriundos, advêm de matéria suspensa na água, enquanto a incrustação deriva da insolubilidade de matéria dissolvida na água. Do mesmo modo que a incrustação, o fouling causa redução da eficiência das taxas de transmissão de calor, corrosão por sub-depósitos, desenvolvimento microbiológico (favorecendo a corrosão microbiologicamente induzida M.I.C.), com conseqüente redução de produção e parado não programado (WATER MEYER^a, 2011).

Figura 12: Fouling retirado da bacia de uma torre de resfriamento.



Fonte: WATER MEYER^a, 2011.

4.10.1.6 Poeira

A poeira, nada mais é que a combinação de elementos insolúveis como sílica, alumínio e óxido de ferro, além de outros elementos constantes da crosta terrestre, os quais são “lavados” na torre de resfriamento, e absorvidos pela água de recirculação. Um sistema que possua uma torre de resfriamento sujeito à intensiva contaminação por poeira, deverá apresentar deposição predominantemente por sílica (matéria mais abundante da crosta terrestre). Algumas outras poeiras, entretanto, podem conter maior concentração de outro tipo de material particulado, tal como óxido de ferro, sínter (siderúrgicas), carvão (regiões industriais), poluição etc. (WATER MEYER^a, 2011).

4.10.1.7 Matéria orgânica

Segundo Water Meyer^a (2011), a matéria orgânica a qual produz fouling é formada por algas, bactérias e fungos formadores de limo, além de folhas e galhos, insetos (que caem normalmente na bacia da torre de resfriamento) ou mesmo por microrganismos mortos cujos corpos (que não desaparecem com a utilização de microbicidas), contribuem para formar depósitos. Todo este conjunto funciona como uma verdadeira “rede” ou “malha” que segura os sólidos suspensos, provocando um tipo comum de depósito conhecido por “fouling de origem orgânica”. Trata-se de um tipo de depósito indesejável, pois este tipo de fouling acumula outros tipos de depósitos inorgânicos, os quais são retidos pelos primeiros, conforme ilustrado na Figura 13. Costuma-se denominar o fouling orgânico por “biofouling”.

Figura 13: Incrustação microbiológica nas aletas de uma torre de resfriamento.



Fonte: WATER MEYER^a, 2011.

4.11 MONITORAMENTO DA CORROSÃO ELETROQUÍMICA

4.11.1 Controle de Oxigênio Dissolvido

A presença de oxigênio dissolvido na água faz com que o cátodo de qualquer célula de corrosão se despolarize, sustentando o processo de corrosão. A forma mais comum de ataque por oxigênio é a corrosão localizada do tipo pites. O mecanismo de corrosão sob depósitos mais comum é denominado aeração diferencial, que consiste na diferença da quantidade de oxigênio dissolvido observada na água acima do depósito e na área sob o depósito, cuja quantidade de oxigênio é grande na primeira e deficiente na segunda. Portanto, forma-se uma célula de aeração diferencial, em

que a área com pouco oxigênio se transforma no ânodo, implicando corrosão severa sob o depósito. Esse processo é cíclico e autoalimentado. O produto de corrosão formado é um depósito adicional onde se criam células de aeração diferencial, que dão continuidade à corrosão (METLER, 2016).

4.11.2 Cupons de Corrosão

É uma técnica que expõe uma pequena espécime de metal (o cupom) a um ambiente de interesse por um período de tempo para determinar a reação do metal ao meio ambiente. Eles são usados para avaliar a corrosividade de vários sistemas, monitorar a eficácia dos programas de detecção de corrosão e avaliar a adequação de diferentes metais para sistemas e ambientes específicos. Os cupons podem ser instalados no próprio sistema ou em um circuito ou aparelho de teste especial. As taxas de corrosão mostradas pelos cupons e a maioria dos outros dispositivos de monitoramento de corrosão raramente duplicam a taxa real de corrosão nas tubulações e vasos do sistema. Taxas de corrosão precisas do sistema podem ser determinadas por métodos de medição não destrutivos ou curvas de frequência de falha. Os dados fornecidos por cupons de corrosão e outros tipos de monitores devem estar relacionados aos requisitos do sistema. Altas taxas de corrosão em cupons podem ser usadas para verificar a necessidade de ação corretiva. Se um programa de mitigação de corrosão for iniciado e os dados de cupom subsequentes indicarem que a corrosão foi reduzida, as informações podem ser usadas para aproximar a eficácia do programa de mitigação (NACE, 2005).

O cupom pode ser um metal semelhante ao tubo ou um metal mais reativo, como zinco ou alumínio, que dá respostas mais rápidas às condições corrosivas. No entanto, está em condições de superfície e os efeitos de aceleração da temperatura e pressão de fundo de poço não são medidos, razão pela qual um metal mais ativo é frequentemente usado no lugar de um aço correspondente (REHM *et al.*, 2012).

Segundo NACE (2005), o tempo de exposição deve ser considerado ao interpretar os dados do cupom de corrosão. A exposição a curto prazo (15 a 45 dias) fornece respostas rápidas, mas pode resultar em taxas de corrosão mais altas do que as exposições a longo prazo. Condições agravantes, como incrustações bacterianas, podem levar algum tempo para se desenvolver no cupom. Como o tempo de exposição afeta os resultados dos testes, os períodos de exposição devem ser tão

consistentes quanto possível. Uma tolerância de $\pm 7\%$ permite uma variação de ± 2 dias com uma exposição de 30 dias. Isso é satisfatório para a maioria das aplicações.

4.11.3 Taxa de Corrosão

A resistência à corrosão e a velocidade de um material metálico são os parâmetros mais importantes a serem determinados. Enquanto a primeira fornece uma informação meramente comparativa da estabilidade de dois ou mais materiais num mesmo meio ou de um material em dois ou mais meios, a segunda apresenta informação da rapidez com que a reação de corrosão ocorre. Cabe mencionar que esses parâmetros são determinados geralmente mediante ensaios de curta duração que tentam simular as condições reais às quais serão expostos os materiais em serviço. Por isso, é necessária certa cautela quando se pretende selecionar um material estimando sua vida útil por extrapolação desses parâmetros (GEMELI, 2001; GENTIL, 2007).

Determinar a taxa de corrosão é poder mensurar a velocidade do desgaste que uma determinada superfície metálica está sofrendo. É uma avaliação importante, pois consegue estimar a vida útil de materiais e equipamentos.

Segundo a NACE (2005), o cálculo da taxa média de corrosão, expressa como taxa uniforme de perda de espessura por unidade de tempo em milímetros por ano (mm/ano), é mostrado na Equação 3:

$$TC = \frac{W \times 365 \times 1000}{A \times T \times D} \quad (20)$$

Onde:

TC: taxa de corrosão em milímetros por ano (mm/ano).

W: perda de massa em gramas (g).

A: área da superfície inicial exposta do cupom de corrosão em milímetros quadrados (mm²).

T: tempo de exposição em dias (d).

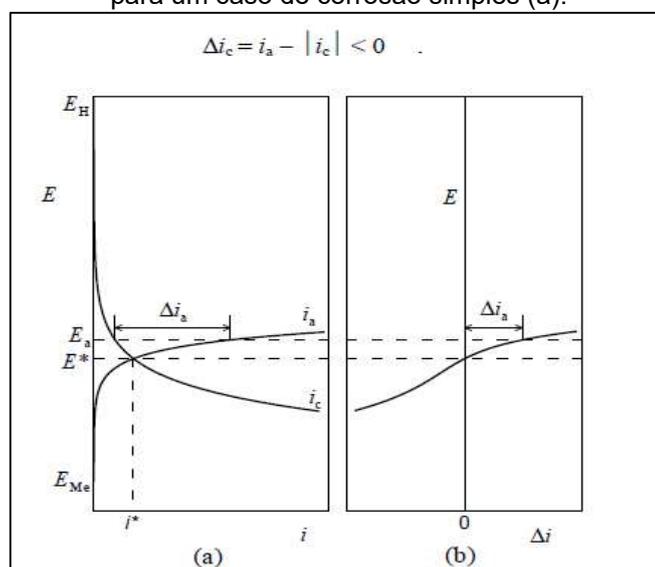
D: densidade do metal do cupom de corrosão em gramas por milímetro cúbico (g/cm³).

4.11.4 Curvas de Polarização

O conhecimento do comportamento eletroquímico de um metal num potencial de eletrodo diferente do potencial de corrosão (ou de equilíbrio) apresenta interesse tanto prático como teórico. Um controle adequado do potencial de eletrodo é realizado por um potenciostato, através do qual é possível, além de impor ao eletrodo o potencial desejado com relação ao eletrodo de referência, também medir a corrente de polarização e, inclusive, registrá-la em função do potencial por meio de um registrador. Assim, obtendo as curvas de polarização, que representam a relação entre o potencial de eletrodo aplicado e a correspondente corrente medida no potenciostato, conforme ilustrado na Figura 14 (WOLYNEC, 2003).

É uma ferramenta importante em investigações de uma variedade de fenômenos eletroquímicos. Tais medidas permitem estudos do mecanismo de reação e da cinética dos fenômenos de corrosão e deposição de metais (STERN e GEARY, 1957).

Figura 14: Curva de polarização (b) obtida em um potenciostato para um caso de corrosão simples (a).



Fonte: WOLYNEC, 2003.

4.11.5 Índice de Estabilidade de Langelier

Segundo Water Meyer (2009), W. F. Langelier, demonstrou matematicamente que a precipitação ou dissolução do carbonato de cálcio na água sofre a interferência (além da temperatura), dos sólidos totais dissolvidos, da alcalinidade total, do teor de dureza de cálcio e finalmente do pH da própria água. Este método baseia-se na determinação de um pH de saturação (pH_s) para o $CaCO_3$.

Os coeficientes para o cálculo do pH_s são:

- Dureza cálcica (ppm $CaCO_3$);
- Dureza magnésiana (ppm $CaCO_3$);
- Alcalinidade M ou alcalinidade total (ppm $CaCO_3$);
- Sólidos totais dissolvidos;
- Temperatura;
- pH da água sob análise.

O cálculo do Índice de Saturação de Langelier é feito a partir da diferença entre o pH da água (pH_{H_2O}) e o pH calculado quando a mesma água estiver saturada com $CaCO_3$ (pH_s).

De acordo com Water Meyer (2009), para o procedimento de cálculo, entra-se na Tabela de Langelier, com os valores obtidos com a análise da água. Determinam-se os fatores A, B, C, D e E, em função dos laudos de análise da água. Aplicando-se a fórmula abaixo, calcula-se o pH de saturação (pH_s) pela seguinte expressão:

$$pH_s = 9,3 + A + B + C - D - E \quad (21)$$

Os fatores A, B, C, D e E, podem ser extraídos da Tabela 1. Então, utilizando o pH da água do sistema, calcula-se o Índice de Saturação (LSI):

$$LSI = pH_{H_2O} - pH_s \quad (pH \text{ do sistema} < 10,5) \quad (22)$$

$$LSI = pH_s - pH_{H_2O} \quad (pH \text{ do sistema} > 10,5) \quad (23)$$

Para Water Meyer (2009), isto significa que a tendência à incrustação crescerá ao aumentarmos o pH do meio, entretanto esta tendência se inverte quando o pH cresce acima de 10,5. Este tipo de cálculo é bastante aplicado para tratamento de águas brutas. A Tabela 3 nos auxilia a calcular o pH_s e o Índice de Saturação, também conhecido como Índice de Langelier (LSI).

Tabela 3: Tabela do Índice de Langelier (LSI)

STD (ppm)	A	Temperatura (°C)	B	Dureza de Mg	C	Dureza de Ca	D	Alcalinidade M ou Total	E
50	0,07	0	2,6	0	0,05	10	0,6	10	1
100	0,1	5	2,46	20	0,15	12	0,68	12	1,08
200	0,13	10	3,34	40	0,25	14	0,75	14	1,15
400	0,16	15	2,21	60	0,35	17	0,83	17	1,23
600	0,18	20	2,09	80	0,45	20	0,9	20	1,3
800	0,19	30	1,88	100	0,5	25	1,01	25	1,4
1000	0,2	40	1,71	120	0,6	30	1,06	30	1,48
2000	0,22	50	1,55	140	0,7	40	1,2	40	1,6
4000	0,25	60	1,4	160	0,75	50	1,3	50	1,7
		70	1,27	180	0,8	60	1,38	60	1,78
		80	1,16	200	0,85	80	1,51	80	1,9
				220	0,9	100	1,6	100	2
				230	0,95	150	1,78	150	2,18
				240	1	200	1,9	200	2,3
				250	1,05	300	2,08	300	2,48
				260	1,1	500	2,3	500	2,7
				270	1,15	700	2,45	700	2,85
				280	1,2	1000	2,6	1000	3

Fonte: WATER MEYER, 2009.

Para obter-se uma água de qualidade “Estável” (sem incrustação por CaCO_3), regula-se o pH do sistema com ou com produtos alcalinos, de maneira que o resultado das equações de Langelier sejam sempre iguais à zero. Langelier fez seus estudos, para Estações de Tratamento de Água Potável e seu objetivo era o de evitar problemas de corrosão e incrustação nas linhas de distribuição de água, nas diferentes partes dos Estados Unidos. Suas conclusões são válidas até os dias de hoje, e recomenda-se a utilização de sua metodologia de cálculo, nos sistemas de abastecimento e distribuição de água clarificada industrial ou potável para uso humano (WATER MEYER, 2009).

Segundo Trovati (2004), valores positivos para o LSI indicam tendência de deposição e valores negativos indicam tendência de dissolução de CaCO_3 . O Índice de Saturação é apenas qualitativo e, como o próprio Langelier enfatizou, é apenas um meio de indicação da tendência e da força motriz do processo (corrosivo ou incrustante) e não é, de modo algum, um método de mensurar esta tendência.

4.11.6 Índice de Ryznar

Segundo Water Meyer (2009), através do Índice de Ryznar (RSI), podemos prever o potencial de deposição de carbonato de cálcio ou de corrosão, em um sistema de resfriamento. Isto ocorre, pois sabemos também que águas que

contenham maiores quantidades de carbonato de cálcio são menos corrosivas do que águas mais brandas.

Para o cálculo do Índice de Ryznar (RSI), é utilizada a seguinte expressão:

$$RSI = 2pH_s - pH_{H_2O} \quad (24)$$

Utilizando-se este índice, uma água sem tratamento torna-se incrustante em valores abaixo de 6,0 e começa a apresentar características corrosivas com valores de Índice de Ryznar acima de 7,0 (TROVATI, 2004).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos testes foram utilizadas análises visuais, perda de massa e ensaios eletroquímicos, como potencial de corrosão e curvas de polarização. Além de registros fotográficos dos cupons de corrosão após o contato com as águas durante os períodos de exposição.

5.1 MATERIAIS

5.1.1 Cupons de Corrosão em Cobre

Os cupons de corrosão foram fabricados nas dimensões e quantitativos descritos na Tabela 4, conforme Water Meyer (2008) orienta para padronização de cupons utilizados em teste para avaliação da corrosão.

Tabela 4: Dimensões e quantitativos de cupons fabricados em cobre.

Cupons de Corrosão	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Área (mm ²)
CC1	30,1	13	391,3
CC2	30,1	13,6	409,36
CC3	30,0	13,6	408
CC4	30,35	13,6	412,76
CC5	30,1	13,85	416,89
CC6	30	13,8	414
CC7	30,45	13,6	414,12
CC8	30,7	13,55	415,99

5.1.2 As Águas de Poço e Industrial

A água industrial possui um tratamento químico para controle microbiológico e correção de pH. A dosagem de hipoclorito de sódio (NaClO) a 12% é de 3 l/h. Já a dosagem de hidróxido de sódio (NaOH) a 50% é de 6 l/h.

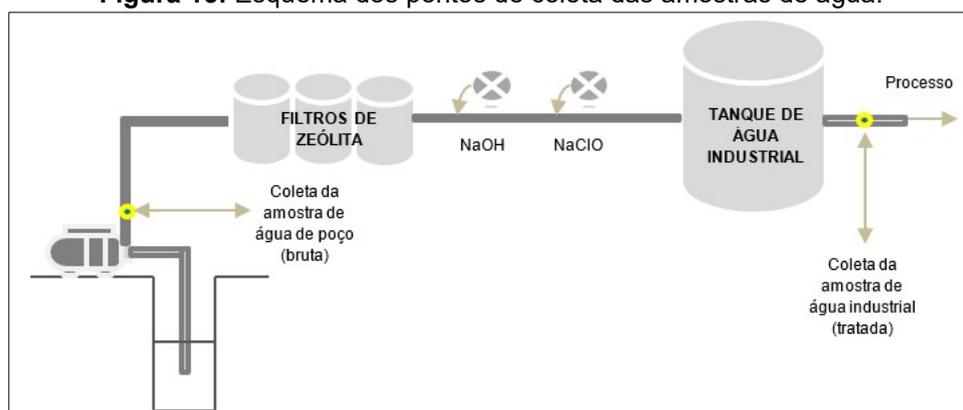
Nos testes foram utilizados 3L de cada tipo de água (poço e industrial). As amostras foram enviadas ao Laboratório de Corrosão da Universidade Federal do Pará. Também foram coletadas 500 ml de cada tipo de água que foram enviadas a um Laboratório externo para análises físico-químicas e microbiológicas, conforme Tabelas 5 e 6.

A amostra de água bruta, coletada no poço denominado de nº 2 (ou somente poço 2 – nomenclatura adota pela indústria em estudo), foi coletada no dia 25/10/21018 às 09h:52min, cuja temperatura da amostra foi de 27°C (medição

realizada in loco). Este poço possui uma profundidade de aproximadamente 85 m e é revestido por vários tubos lisos (processo de encamisamento), com solda entre as partes, e complementando o espaço entre a tubulação de encamisamento e as paredes internas com pré filtro (protegendo o interior do poço das impurezas e particulados da parte externa). O fator sazonalidade impacta apenas na altura da coluna d'água e não tem correlação com a contaminação do lençol freático. Já a amostra de água industrial foi coletada às 10h do dia 25/10/2018, com uma temperatura de 29,5°C (medição realizada in loco), conforme Figura 15.

A água industrial é armazenada em um tanque de 730 m³ (equivalente a 730.000 litros ou a 730 caixas d'água de 1.000 litros) e recebe um tratamento químico para os controles do pH (adição de soda cáustica) e microbiológico (adição de cloro).

Figura 15: Esquema dos pontos de coleta das amostras de água.



5.2 METODOLOGIAS EXPERIMENTAIS

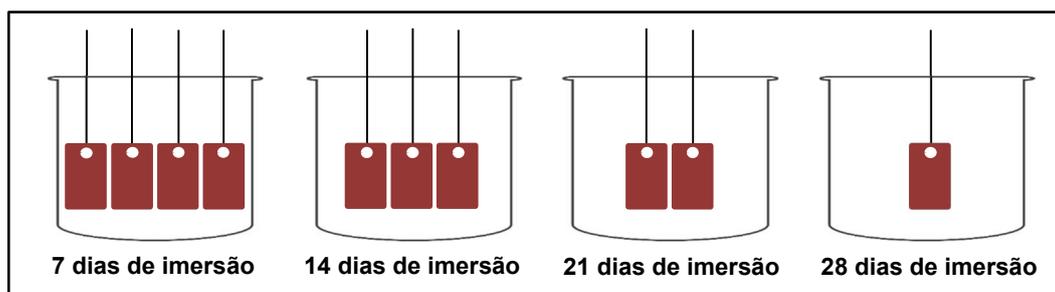
5.2.1 Ensaios de Perda de Massa

Para os ensaios de perda de massa, foi utilizado cupons de corrosão, fabricados em cobre, conforme Tabela 5. Os cupons passaram por um preparo antes do início dos ensaios. Eles foram lixados com lixas de #100, #150, #180, #320 e #600. Antes da lixa #600 foi realizado um ataque químico com ácido sulfúrico durante 1 minuto. Em seguida foram limpos com água destilada e álcool 96% e, por fim, medidos.

A bateria de ensaios contemplou 8 cupons de corrosão, 2 litros de cada tipo de água e 8 recipientes de 250 ml cada. Para o ensaio com água de poço foram separados 4 cupons e 4 recipientes para realizar a imersão. Já para o ensaio com água industrial foram separados os outros 4 cupons e os recipientes restantes.

Atingindo o tempo de 7, 14, 21 e 28 dias, 1 cupom de corrosão foi retirado tanto da água de poço quanto da água com tratamento (industrial), conforme ilustrado na Figura 16. Em seguida, eles foram limpos e pesados numa balança analítica AG200 GEHAKA.

Figura 16: Esquema de imersão dos cupons nas águas de poço e industrial.



5.2.2 Taxa de Corrosão

Para determinar a taxa de corrosão, em micrometro por ano, utilizamos o cálculo proposto pela NACE (2005), conforme Equação 20, que leva em consideração a perda de massa, a área superficial exposta do cupom as águas de poço e industrial, o tempo médio de exposição e a densidade do metal (cobre).

5.2.3 Potencial de Corrosão e Curvas de Polarização

Os ensaios eletroquímicos realizados foram para avaliar quantitativamente a corrosividade das amostras.

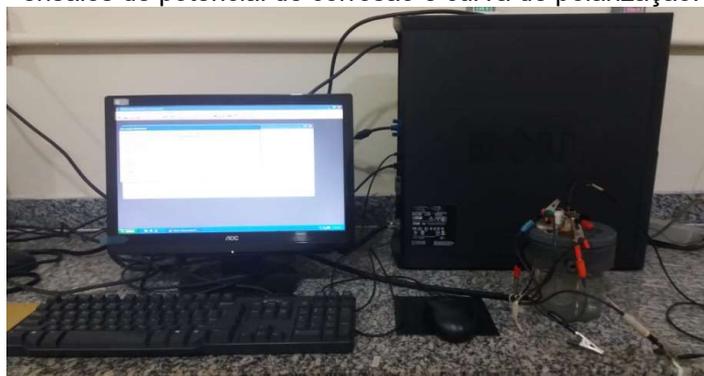
A célula eletroquímica consistiu de uma cuba eletroquímica de 600 ml, uma tampa de acrílico com aberturas circulares, eletrodo de calomelano saturado (ECS) como referência (ER), eletrodo de trabalho (ET), uma rede de platina como contra eletrodo (CE), a água da amostra a ser utilizada como eletrólito (solução). A célula eletroquímica (ou célula de corrosão) está ilustrada na Figura 17.

Figura 17: Célula eletroquímica utilizada nos ensaios.



Na realização dos ensaios, para calcular a diferença de potencial elétrico entre os eletrodos de trabalho e o de referência, foi utilizado um Potenciostato/Galvanostato, da Gamry Instruments, versão 4.21, com software ESA400, conforme Figura 18. Além do Excel 2003 para criação de um banco de dados e geração de gráficos.

Figura 18: Equipamentos utilizados para os ensaios de potencial de corrosão e curva de polarização.



O monitoramento foi realizado durante 1.200 segundos e com leituras a cada 10 segundos. E para a obtenção do potencial de circuito aberto (potencial de corrosão) levanta-se a curva de polarização a partir da região anódica até a região catódica.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na indústria os corpos de prova (cupons de corrosão) de cada tipo de material, a ser analisado, é inserido em árvore de corrosão ou na linha de água para imersão. Este procedimento é uma forma de avaliar se está havendo ataque corrosivo, deposição (incrustação) ou nenhum impacto que venha a comprometer a performance de equipamentos (trocadores de calor) ou a própria tubulação. Avaliações em duplicatas ou triplicatas não são aplicáveis para o mesmo material devido o tempo de resposta e ações rápidas para reconexão que a indústria precisa tomar referente a rotina operacional. Os ensaios realizados são representativos para esse tipo de modelo utilizado na indústria. Quando aplicamos modelos estatísticos precisamos de um número maior de amostras para que possamos mensurar a margem de erro.

6.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DAS ÁGUAS

Foram realizadas as análises físico-químicas das águas de poço e industrial e os resultados estão representados nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Resultados das análises da água de poço.

ÁGUA DE POÇO		
Parâmetros	Unidade	Resultado
pH	1 a 14	5,93
Alcalinidade Total	ppm de CaCO ₃	4,0
Condutividade	µS/cm	78,8
Dureza Total	ppm de CaCO ₃	20,0
Ferro Total	ppm de Fe	4,58
Sólidos Totais Dissolvidos	ppm de CaCO ₃	33,25
Coliformes Totais	UFC/ml	0

Tabela 6: Resultados das análises da água industrial.

ÁGUA INDUSTRIAL		
Parâmetros	Unidade	Resultado
pH	1 a 14	6,62
Alcalinidade Total	ppm de CaCO ₃	36,0
Condutividade	µS/cm	231,0
Dureza Total	ppm de CaCO ₃	56,0
Ferro Total	ppm de Fe	1,16
Sólidos Totais Dissolvidos	ppm de CaCO ₃	93,12
Coliformes Totais	UFC/ml	1,1

Segundo Alfantazi, Ahmed e Tromans (2009) e Bayliss e Deacon (2002), o pH, sólidos totais dissolvidos, temperatura, condutividade, dureza total e atividade microbiana, além de outros fatores, afetam diretamente no processo de corrosão.

Os resultados de pH das amostras (água de poço e industrial) apresentaram característica ácida.

Para o parâmetro alcalinidade a amostra da água de poço apresentou resultado abaixo do limite de 15 a 50 ppm de CaCO_3 esperado para uma água de alimentação, e para água industrial o resultado foi de 36 ppm de CaCO_3 atendendo a faixa limite de 30 a 350 ppm de CaCO_3 esperado para uma água de recirculação, conforme Water Meyer (2009).

A condutividade pode ser definida como a capacidade de uma substância conduzir corrente elétrica, ou seja, quanto mais sais dissolvidos uma água apresentar mais eletricidade ela irá conduzir. Nas amostras analisadas podemos observar que a água de poço possui uma condutividade menor em comparação a água industrial. Quanto mais condutividade maior será a probabilidade de a água proporcionar corrosão ou incrustação nos sistemas. A drenagem (purga) para renovação de água do sistema é uma das formas de evitar o acúmulo e deposição de sais.

A dureza total também é outro parâmetro associado a presença de sais dissolvidos. A dureza refere-se à quantidade de íons polivalentes contidos na água, especificamente relacionado aos íons de cálcio e magnésio. Ambos resultados apresentaram valores baixos para esse parâmetro.

A água de poço apresentou resultado quase 4 vezes maior que água industrial para o parâmetro ferro total. A profundidade do poço e a característica do terreno são fatores que influenciam. O poço em questão apresenta profundidade de 80 m (considerado um poço com profundidade mediana).

O parâmetro sólidos totais dissolvidos (STD) apresentou resultado maior para a água industrial em comparação com a água de poço. O STD está relacionado com a presença de sais minerais que se concentram na água e acabam se depositando devido à falta de drenagem (purga) para renovação da água do sistema e/ou por limpeza periódica do tanque de armazenamento.

O crescimento microbiológico é medido para constatar a presença de microrganismos que venham a gerar um processo corrosivo. Para a água de poço podemos observar que o resultado foi de 0 UFC/ml. Já para a água industrial o valor foi de 1,1 UFC/ml. Para Water Meyer (2009), a contagem microbiológica não poderá exceder de 10.000 UFC/ml, caso contrário, poderemos ter problemas decorrentes de depósitos microbiológicos e de corrosão microbiologicamente induzida.

6.2 PERDA DE MASSA

Os resultados obtidos nos ensaios de perda de massa para os cupons de corrosão, fabricados em cobre, submetidos ao contato com as águas de poço e industrial, estão descritos nas Tabelas 7 e 8, respectivamente.

Tabela 7: Resultado dos ensaios de perda de massa para os cupons de corrosão em contato com a água de poço.

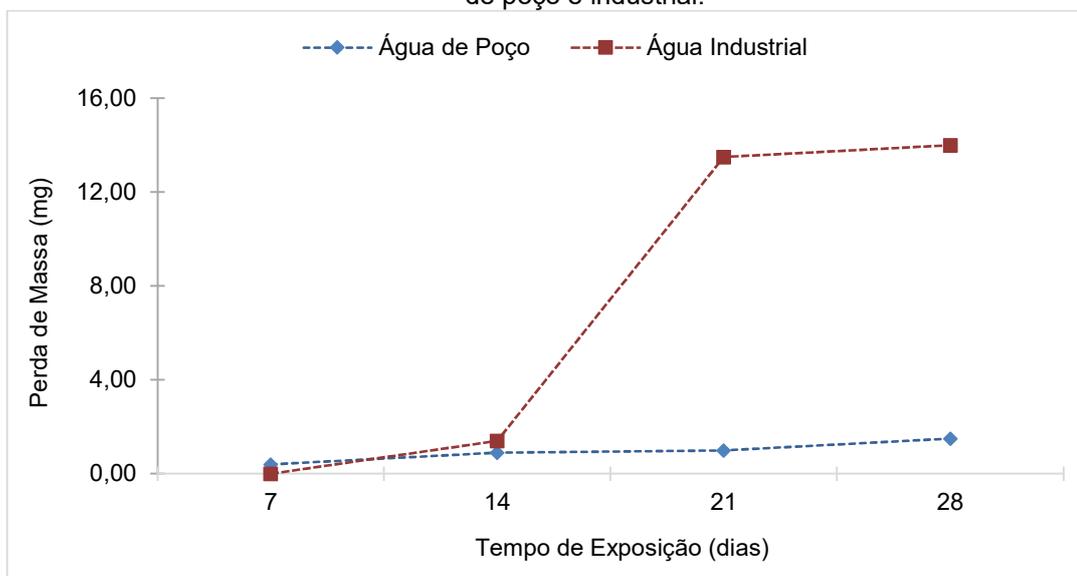
ÁGUA POÇO 2						
Cupom de Corrosão (CC)	Massa Inicial (mg)	Tempo de Exposição				Perda de Massa (mg)
		7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	
CC1	1.320,9	1.320,5	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	0,40
CC2	1.339,2	xxxxxx	1.338,3	xxxxxx	xxxxxx	0,90
CC3	1.350	xxxxxx	xxxxxx	1.349	xxxxxx	1,00
CC4	1.303,4	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	1.301,9	1,50
Cupom de Corrosão (CC)	Porcentagem de Perda de Massa	Área CC (cm ²)	Perda de Massa por Área (mg/cm ²)			
CC1	0,03%	4,16	0,10			
CC2	0,06%	4,14	0,21			
CC3	0,07%	4,14	0,24			
CC4	0,11%	4,16	0,36			

Tabela 8: Resultado dos ensaios de perda de massa para os cupons de corrosão em contato com a água industrial.

ÁGUA INDUSTRIAL						
Cupom de Corrosão (CC)	Massa Inicial (mg)	Tempo de Exposição				Perda de Massa (mg)
		7 dias	14 dias	21 dias	28 dias	
CC5	1.151,7	1.151,7	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	0
CC6	1.326	xxxxxx	1.324,6	xxxxxx	xxxxxx	1,4
CC7	1.292,5	xxxxxx	xxxxxx	1.279	xxxxxx	13,5
CC8	1.292,5	xxxxxx	xxxxxx	xxxxxx	1.278,5	14
Cupom de Corrosão (CC)	Porcentagem de Perda de Massa	Área CCC (cm ²)	Perda de Massa por Área (mg/cm ²)			
CC5	0%	4,16	0			
CC6	0,12%	4,14	0,34			
CC7	1,04%	4,14	3,26			
CC8	1,08%	4,15	3,37			

Durante o período de exposição, podemos notar que os cupons de corrosão que foram expostos a água de poço, apresentaram perda de massa crescente e linear. Entretanto, cupons de corrosão que foram expostos a água industrial, apresentaram perda de massa significativa a partir do décimo quarto dia, conforme o Gráfico 1.

Gráfico 1: Monitoramento da perda de massa dos cupons expostos as águas de poço e industrial.



6.3 CÁLCULO DA TAXA DE CORROSÃO

Os resultados obtidos no cálculo da taxa de corrosão para os cupons, fabricados em cobre, submetidos ao contato com as águas de poço e industrial, estão descritos nas Tabelas 9 e 10, respectivamente.

Para determinar a taxa de corrosão, em micrometro por ano, utilizamos o modelo de cálculo proposto pela NACE (2005), que utiliza como variáveis a perda de massa (W), a área superficial (A) exposta do cupom as águas de poço e industrial, o tempo médio de exposição (T) e a densidade do metal (D).

Tabela 9: Taxa de corrosão para os cupons expostos a água de poço.

Parâmetros	CC1	CC2	CC3	CC4
W (g)	0,0004	0,0009	0,0010	0,0015
A (mm ²)	416,89	414	414,12	415,99
T (d)	7	14	21	28
D (g/cm ³)	8,96	8,96	8,96	8,96
TC (µm/ano)	8,17	9,25	6,85	7,68
TC (mm/ano)	0,00817	0,00925	0,00685	0,00768

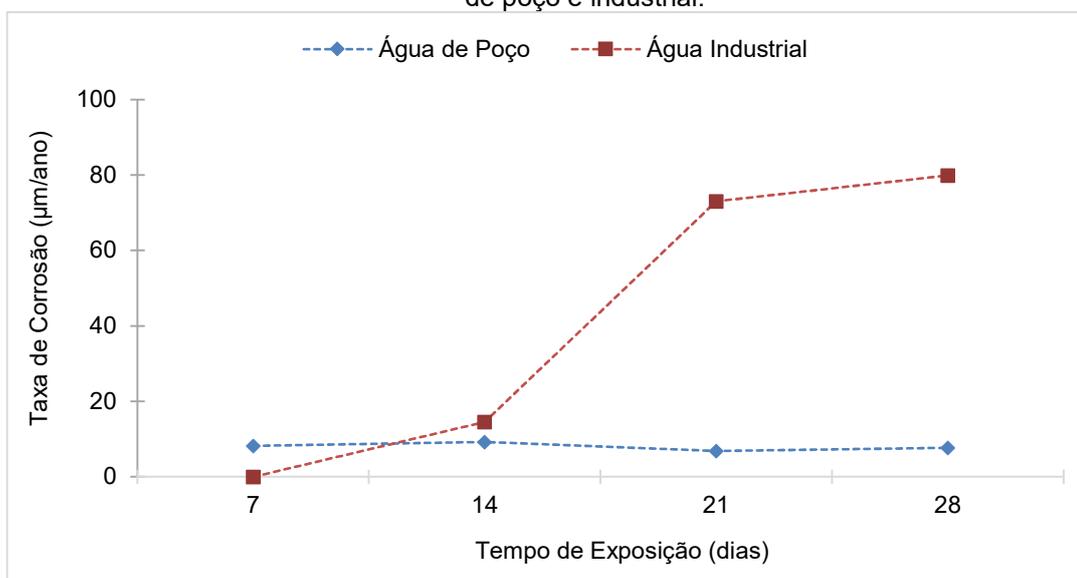
Tabela 10: Taxa de corrosão para os cupons expostos a água industrial.

Parâmetros	CC5	CC6	CC7	CC8
W (g)	0,0004	0,0009	0,0010	0,0015
A (mm ²)	391,3	409,36	408	412,76

T (d)	7	14	21	28
D (g/cm ³)	8,96	8,96	8,96	8,96
TC (µm/ano)	0	14,56	73,04	72,93
TC (mm/ano)	0	0,01456	0,07304	0,07293

O Gráfico 2, ilustra a taxa de corrosão para os cupons expostos as águas de poço e industrial.

Gráfico 2: Monitoramento da taxa de corrosão dos cupons expostos as águas de poço e industrial.



Com o objetivo de fazer uma avaliação mais criteriosa dos cupons, do ponto de vista da taxa de corrosão, utilizamos a classificação sugerida pela NACE (2005), que categoriza qualitativamente as taxas de corrosão, conforme Tabela 11.

Tabela 11: Categorização qualitativa de taxas de corrosão.

Taxa média de corrosão (mm/ano)	Tendência da Corrosividade
< 0,025	Baixa
0,025 a 0,12	Moderada
0,13 a 0,25	Alta
> 0,25	Severa

Fonte: NACE, 2005.

Como pode ser observado, as taxas de corrosão para os cupons expostos a água de poço estão na categoria de corrosividade baixa. Entretanto, os cupons expostos a água industrial estão na categoria de corrosividade moderada. As Figuras

19 e 20 mostram o aspecto visual dos cupons após o período de imersão nas águas de poço e industrial, respectivamente.

Figura 19: Aspecto visual dos cupons de corrosão expostos a água de poço.

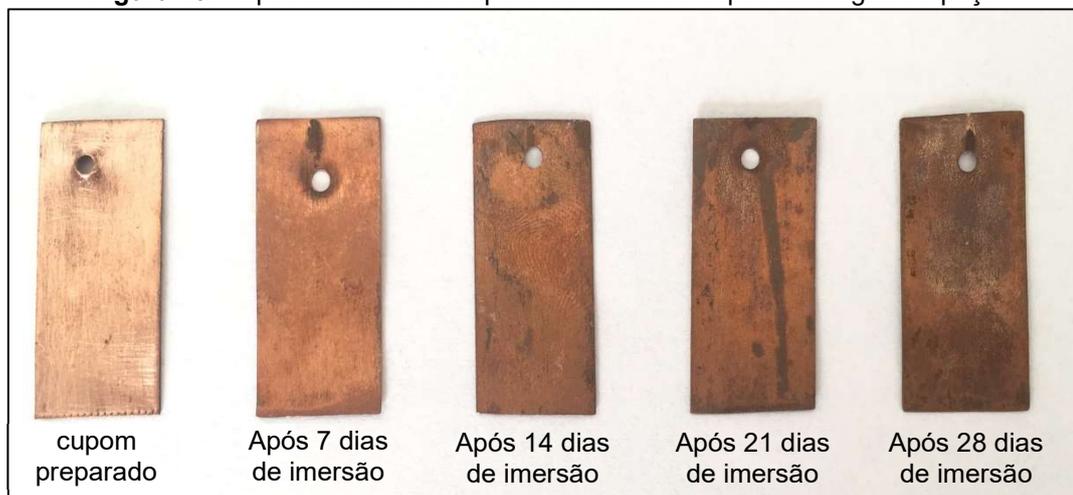


Figura 20: Aspecto visual dos cupons de corrosão expostos a água industrial.



6.4 CÁLCULO DO ÍNDICE DE RYZNAR

Para o estudo de estabilidade das águas de poço e industrial, através dos resultados das análises físico-químicas e microbiológicas (Tabela 3 e 4), foi possível simular a tendência das águas em estudo. O Índice de Ryznar nos mostra 3 tipos de tendência: estável, incrustante e corrosiva. As Figuras 21 e 22 mostram que o resultado obtido foi de tendência corrosiva das águas analisadas.

Avaliando o resultado do LSI e RSI para a água de poço, os valores de -4,56 e 15,04, respectivamente, nos mostram que temos indicação de dissolução de CaCO_3 e características corrosivas, conforme estudo abordado por Trovati (2004). A mesma

avaliação foi utilizada para água industrial, que apresentou valores para o LSI e RSI de -2,04 e 10,71, respectivamente, com a indicação de dissolução de CaCO_3 e características corrosivas.

Figura 21: Índice de Ryznar para água de poço.

CÁLCULO DO ÍNDICE DE RYZNAR			
INDÚSTRIA: COSMÉTICOS			
AMOSTRA: ÁGUA DE POÇO			
DATA DA COLETA: 25/10/2018			
Parâmetros da Água		Alimentação	
Condutividade:	μS/cm	78,8	
pH:		5,93	
Sólidos Totais Diss.:	ppm	33,3	
Temperatura.:	°C	27,4	
Dureza TOT:	ppm	20	
Alcalinidade TOT:	ppm	4	
		Alimentação	
pH de Saturação:	=pHs=	10,49	(9,3+A+B)-(C+D)
Índice de Langelier:	=L.S.I.=	-4,56	(pH-pHs)
Índice de Ryznar:	=R.S.I.=	15,04	(2pHs-pH)
Característica da Água:		CORROSIVA	

Figura 22: Índice de Ryznar para água industrial.

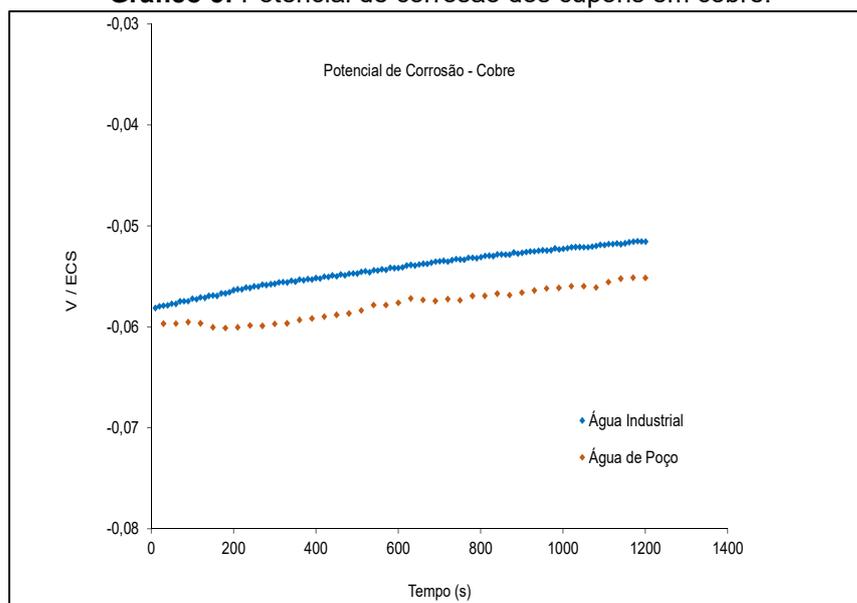
CÁLCULO DO ÍNDICE DE RYZNAR			
INDÚSTRIA: COSMÉTICOS			
AMOSTRA: ÁGUA INDUSTRIAL			
DATA DA COLETA: 25/10/2018			
Parâmetros da Água		Recirculação	
Condutividade:	μS/cm	231,0	
pH:		6,62	
Sólidos Totais Diss.:	ppm	93,1	
Temperatura.:	°C	29,5	
Dureza TOT:	ppm	56	
Alcalinidade TOT:	ppm	36	
		Recirculação	
pH de Saturação:	=pHs=	8,66	(9,3+A+B)-(C+D)
Índice de Langelier:	=L.S.I.=	-2,04	(pH-pHs)
Índice de Ryznar:	=R.S.I.=	10,71	(2pHs-pH)
Característica da Água:		CORROSIVA	

6.5 POTENCIAL DE CORROSÃO E CURVAS DE POLARIZAÇÃO

6.5.1 Potencial de Corrosão

A variação do potencial de eletrodo em função do tempo para o cobre a 25°C é mostrada no Gráfico 3. A evolução do potencial tanto para a água industrial quanto para a água de poço foi monitorada no tempo de 1.200 segundos.

Gráfico 3: Potencial de corrosão dos cupons em cobre.



Avaliando as curvas apresentadas no Gráfico 3, podemos verificar o comportamento similar do potencial de circuito aberto para o cobre. Um valor inicial, muito próximo as duas águas, de -0,058 V/ECS para a industrial e -0,060 V/ECS para a de poço, foi encontrado. Na Tabela 12, os valores de potencial de corrosão (V/ECS), são apresentados após 1.200 segundos de imersão. Os potenciais permaneceram em uma faixa de -0,050 V/ECS a -0,055 V/ECS. A aproximação dos valores de potencial pode indicar que a composição e comportamento durante a imersão nas águas sofre processo corrosivo com o passar do tempo para as duas águas de forma lenta e gradual.

Tabela 12: Potencial de corrosão para o cobre exposto as águas de poço e industrial.

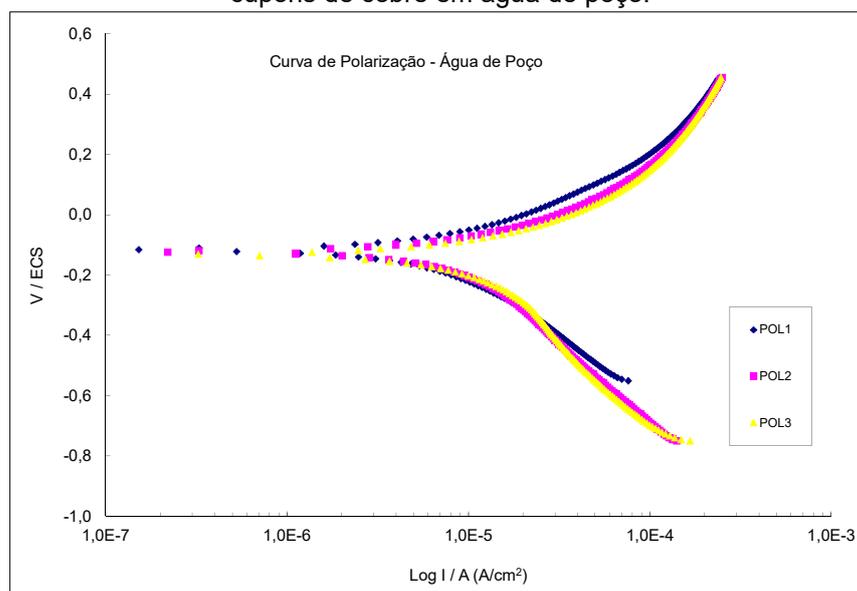
Material	Tipos de Água	E_{CORR} (V/ECS)
Cobre	Poço	-0,055
	Industrial	-0,052

6.5.2 Curvas de Polarização

Para Panossian *et al.* (2014), é muito comum a utilização das curvas de polarização experimentais para a determinação das taxas de corrosão de sistemas metal/eletrólito. Muitos equipamentos comerciais trazem softwares específicos que determinam os valores das constantes de Tafel diretamente das curvas de polarização experimentais, usando trechos da curva para altos valores de potenciais. Já Pearson e Brook (1991), relata que as curvas de polarização experimentais podem ser geradas, para uma ampla faixa de potencial aplicado, de um determinado sistema metal/eletrólito a partir de curvas de polarização das reações individuais que ocorrem sobre um eletrodo.

É importante destacar que os ensaios de polarização, para o estudo realizado, foram realizados em triplicata, onde fica patente a elevada reprodutibilidade das curvas de polarização.

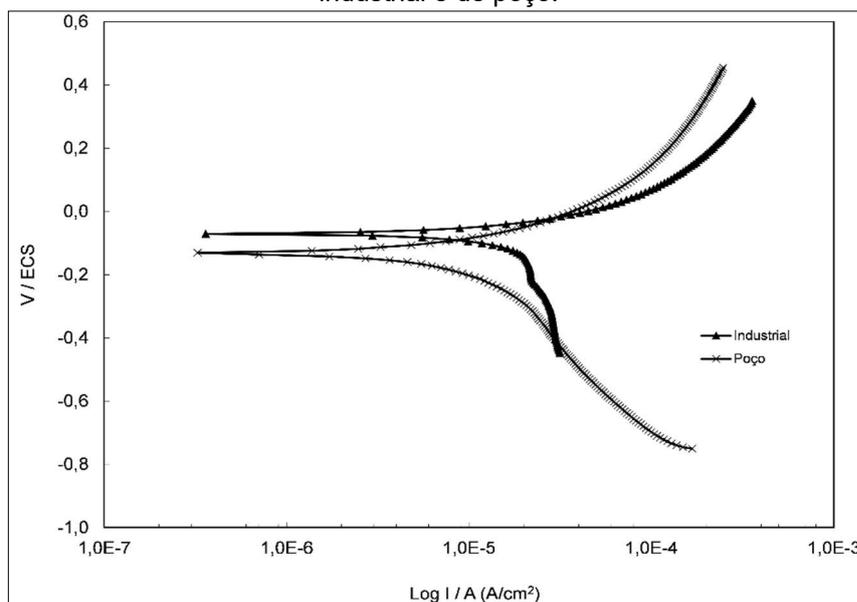
Gráfico 4: Curvas de polarização em triplicata dos cupons de cobre em água de poço.



O efeito das águas de poço e industrial na taxa de corrosão (I_{CORR}) dos cupons de corrosão de cobre foi investigado pelo método de extrapolação de Tafel.

O efeito das águas de poço e industrial na taxa de corrosão (I_{CORR}) do cobre está demonstrado nas curvas de polarização experimentais anódicas e catódicas, conforme Gráfico 5. Para cada água (poço e industrial) os ensaios foram realizados a temperatura de 25°C para os cupons de corrosão em cobre. As correntes medidas variam na ordem de 10^{-7} a 10^{-3} A/cm².

Gráfico 5: Curvas de polarização dos cupons de cobre em água industrial e de poço.



Os resultados de polarização para o cobre mostrados no Gráfico 4 indicam que o comportamento das curvas anódicas não foi similar para as águas estudadas, sem uma sobreposição dos dados experimentais ao longo de quase toda totalidade de extensão em regiões anódicas. Porém, verificou-se um deslocamento da curva referente a água industrial próximo ao potencial de corrosão (E_{CORR}), responsável pelas diferenças nos parâmetros eletroquímicos encontrados na simulação dos dados experimentais, conforme Tabela 13.

Tabela 13: Parâmetros eletroquímicos obtidos por extrapolação de Tafel para o cobre exposto as águas de poço e industrial a 25°C.

Material	Tipos de Água	E_{CORR} (mV/ECS)	I_{CORR} ($\mu A/cm^2$)
Cobre	Poço	0,45	10,2
	Industrial	0,38	25,5

Pela avaliação dos parâmetros destacados na Tabela 4.2 tem-se que a corrente de corrosão para o cobre exposto a água industrial é de 2,5 vezes maior em comparação com a de poço. Este resultado implica que no processo inicial de corrosão, a água industrial apresentou maior taxa de corrosão.

7 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

Com esse estudo foi possível concluir que tanto a água industrial quanto a água de poço apresentaram tendência corrosiva quando em contato com o cobre no período máximo de 28 dias de exposição.

As análises laboratoriais apresentaram pH de 5,93 para água de poço e 6,62 para água industrial. Evidenciando que mesmo com a correção de pH que a água industrial sofre, para poder ser enviada ao processo fabril, não é eficiente para corrigi-lo na faixa de 7,0 a 8,0. Os demais parâmetros analisados foram utilizados para simular o Índice de Ryznar das águas, cujo resultado também foi de tendência corrosiva.

Os cupons de corrosão fabricados em cobre quando expostos a água de poço obtiveram uma perda de massa de 0,40 mg (7 dias de exposição), 0,90 mg (14 dias de exposição), 1,0 mg (21 dias de exposição) e 1,5 mg (28 dias de exposição). Entretanto, os cupons expostos a água industrial apresentaram uma perda de massa de 0 mg (7 dias de exposição), 1,4 mg (14 dias de exposição), 10,5 mg (21 dias de exposição) e 15,50 mg (28 dias de exposição), sendo maior em comparação com a água bruta (poço).

Para o cálculo da taxa de corrosão, referente aos cupons expostos a água de poço, os resultados foram de 8,17 $\mu\text{m}/\text{ano}$ (7 dias de exposição), 9,25 $\mu\text{m}/\text{ano}$ (14 dias de exposição), 6,85 $\mu\text{m}/\text{ano}$ (21 dias de exposição) e 7,68 $\mu\text{m}/\text{ano}$ (28 dias de exposição). Já para os cupons expostos a água industrial os resultados foram de 0 $\mu\text{m}/\text{ano}$ (7 dias de exposição), 14,56 $\mu\text{m}/\text{ano}$ (14 dias de exposição), 73,04 $\mu\text{m}/\text{ano}$ (21 dias de exposição) e 79,93 $\mu\text{m}/\text{ano}$ (28 dias de exposição), sendo maior em comparação a água bruta (poço).

O potencial de corrosão para as águas em estudo apresentou um valor inicial de -0,058 V/ECS para água industrial e -0,060 V/ECS para água de poço. Ao final dos 1.200 segundos, o comportamento foi de uma pequena elevação com -0,052 V/ECS e -0,055 V/ECS para água industrial e água de poço, respectivamente. A aproximação dos valores de potencial pode indicar que a composição e comportamento durante a imersão nas águas sofre processo corrosivo com o passar do tempo para as duas águas de forma lenta e gradual. Contudo, pode-se afirmar que a água industrial possui

um tratamento pouco eficiente, podendo ocasionar sérios problemas durante o processo industrial.

Considerando que as curvas de polarização medem a capacidade do metal em conduzir corrente, foi possível observar que a corrente de corrosão (I_{CORR}) para a água industrial foi de $25,5 \mu A/cm^2$ e para a água de poço foi de $10,2 \mu A/cm^2$. Logo, concluímos que a corrente para a água industrial foi 2,5 vezes maior em comparação com a de poço, demonstrando maior facilidade de conduzir corrente.

Diante do que foi apresentado, podemos ressaltar que a água industrial apresenta riscos aos materiais em cobre, mesmo com o tratamento químico praticado, o que pode gerar sérios problemas para a indústria e até mesmo parada do processo de produção. É essencial a elaboração de um tratamento químico preventivo eficiente, das águas utilizadas no processo industrial, independentemente do tipo de indústria, levando em consideração suas características físico-químicas e microbiológicas, para garantia de uma estabilidade tendendo a estável, reduzindo assim as manutenções corretivas para troca de peças, tubulações, materiais, componentes e equipamentos fabricados em cobre que possuem contato com água bruta ou tratada e sofrem desgastes.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Monitorar a qualidade das águas de poço (bruta) e industrial (tratada) ao longo do ano, além de estudar o índice de estabilidade (Langelier e Ryznar) antes de iniciar um tratamento químico preventivo. Mapear pontos para instalação de árvores de corrosão (estações de monitoramento na linha de água) para avaliação da corrosão em corpos de prova (ou cupons de corrosão) em materiais metálicos que o circuito de água industrial possui. Além da avaliação para uma faixa de temperatura, simulando o contato dessa água com inúmeros equipamentos de troca térmica do processo fabril.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAS. Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. **Orientações para a utilização de águas subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo. 2005. 40p.

ADELOJU, S.; HUGHES, H. **The corrosion of copper pipes in high chloride-low carbonate mains water**. Corros. Sci., 26 (1986), pp. 851-870

ALFANTAZI, A. M.; AHMED, T. M.; TROMANS, D. **Corrosion behavior of copper alloys in chloride media**. Materials & Design 30 (2009) 2425–2430.

ALMEIDA, F. M. **Estudo da contaminação por hidrocarbonetos em postos de serviços do município de Abaetetuba-PA utilizando georadar**. Dissertação. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geofísica. Universidade Federal do Pará. UFPA. 2007. 142p.

AMIN, M. A.; KHALED, K. **Copper corrosion inhibition in O₂ - saturated H₂SO₄ solutions**. Corros. Sci. 52, 1194–1204. 2010.

ANA. Agência Nacional de Águas. **Poços para Captação das Águas Subterrâneas**. Brasília. DF. 2016. 21p.

ATTIA, A. A.; ELMELEGY, E. M.; EI-BATOUTI, M.; AHMED, A. M. M. **Anodic corrosion inhibition in presence of protic solvents** Asian J. Chem., 28 (2016), p. 267.

BAYLISS, D. A.; DEACON, D. H., **Steelwork corrosion control**. CRC Press: 2002.

BRASIL. Agência Nacional de Mineração. **Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas**. Ano Base 2017. Brasília: ANM. Versão I, 2019. 44 p.

BRUNNER, G. **Hydrothermal and Supercritical Water Processes**. Elsevier. 1st Edition. Vol. 5. United States. 2014.

BUCHANAN, R. A.; STANSBURY, E. E. **Electrochemical Corrosion**. Department of Materials Science and Engineering, University of Tennessee, Knoxville, Tennessee In **Handbook of Environmental Degradation of Materials**. 2nd Edition. Elsevier Inc. 2013.

BOCKRIS, J. O. M.; DRAŽIĆ, D. M.; DESPIĆ, A. R. **The Electrode Kinetics of the Deposition and Dissolution of Iron**. Electrochim. Acta, 4 (2-4), 325-361. 1961.

CALCUTT, V. **Copper Applications in Metallurgy of Copper & Copper Alloys**. Introduction to Copper: Applications. Copper Development Association Inc. 2001.

CARVALHO, M. L. C. B. A. **Corrosion of copper alloys in natural seawater – Effects of hydrodynamics and pH**. Chemical Sciences. Université Pierre et Marie Curie, 2014. English.

CONWAY, B. E.; BOCKRIS, J. O` M. **On the Calculation of Potential Energy Profile Diagrams for Processes in Electrolytic Metal Deposition**. *Electrochim. Acta*, 3 (4), 340-366. 1960.

CPRM. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Serviço Geológico do Brasil. **Geodiversidade do Estado do Pará**. 2013.

CRUZ, H. F. M. M.; **Estudo da Resistência a Corrosão de Absorvedores em Sistemas Solares Térmicos**. Dissertação. Faculdade de Engenharia. Engenharia Mecânica. Universidade do Porto. 2010.

DAVIS, JR.; **Copper and Copper Alloys**. ASM International. 2001.

DURET-THUAL, C. **Understanding corrosion: basic principles**. In **Understanding Biocorrosion**. Elsevier Ltd. 2014.

DRAŽIĆ, D. M.; ZEČEVIĆ, S. K. **On the Mechanism of Zinc Dissolution in Acid Solutions**. *Bull. Serb. Chem. Soc. Beograd*, 43 (4), 141-147. 1978.

DRAŽIĆ, D. M.; POPIĆ, J. P. **Anomalous dissolution of metals and chemical corrosion** (Review). *J. Serb. Chem. Soc.*, 70 (3), 489-513. 2005.

FÉRON, D.; CRUSSET, D.; GRAS, J.-M. **Corrosion Issues in Nuclear Waste Disposal**. *J. Nucl. Mater.* 2008, 379, 16–23.

FRAUCHES-SANTOS, C.; ALBUQUERQUE, M. A.; OLIVEIRA, M. C. C. **Echevarria, A. A Corrosão e os Agentes Anticorrosivos**. *Rev. Virtual Quim.*, 2014, 6 (2), 293-309, 2013.

GEMELLI, E. **Corrosão de Materiais Metálicos e sua Caracterização**. 1ª ed. LTC: Rio de Janeiro, 2001.

GENTIL, V. **Corrosão**. 5ª ed. LTC. Rio de Janeiro. 2007.

GOROVEI, M. C.; BENEÀ, L. **The Effect of Some Key Changes in the Chemistry of Water in Relation to Copper and Brass Corrosion Control**. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, Volume 374, Euroinvent ICIR 2018 17–18 May 2018, Iasi, Romania.

GRAEDEL, T. E.; NASSAU, K.; FRANEY, J. P. **Copper Patinas Formed in the Atmosphere I. Introduction.** Corros. Sci. 1987, 27, 639–657.

HUTCHISON, M. J.; ZHOU, P.; OGLE, K.; SCULLY, J. R. **Enhanced Electrochemical Cu Release From Commercial Cu–Sn Alloys: Fate of the Alloying Elements in Artificial Perspiration.** Electrochim. Acta 2017, 24, 73–88.

IBRAM. INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Informações e análises da economia mineral brasileira.** 7ª edição. 24-28. 2012.

ICA. International Copper Association. Copper Alliance. **A contribuição do cobre para a economia circular.** Publicações. Institucional. 2018.

JEGDIĆ, B.; POPIĆ, J.; BOBIĆ, B.; STEVANOVIĆ, M. **Chemical corrosion of metals and alloys.** Zastita Materijala. 205-2011. 2016.

JONES, R. H. **Stress Corrosion Cracking, in ASM Handbook.** Metals Handbook, Vol. 13, Corrosion, ASM International, Ohio, p 145-161. 1998.

JUNIOR, S. O. P.; PANOSSIAN, Z.; FREITAS, S. V. N.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. **Corrosão em tubulações de cobre utilizadas para condução de água.** Artigo publicado no 6º COTEQ Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos. Salvador, BA, 2002.

JUNIOR, J. J. M. G.; RIBEIRO, M. V.; FRANCO, B. C. **Custo de manutenção de ativos numa óptica operacional e estratégica no ambiente industrial.** Artigo publicado no XII Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Resende, Rio de Janeiro, 2015.

KOCH, G. H.; BRONGERS, M. P. H.; THOMPSON, N. G.; PAUL VIRMANI, Y.; PAYER, J. H. **Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States.** Supplement to Materials Performance (2002) 4-9.

KOLOTYRKIN, Ya. M.; AGLADZE, T. R. **Osobenosti rastvoreniya marganca v kislih elektrolitakh.** Zashch. Metal., 3 (4), 413-418. 1967.

KOLOTYRKIN, Ya. M.; FLORIANOVICH, G. M. **Anomal-noe rastvorenie metallov. Eksperimentalnie fakti i ih teoreticheskoe tolkovanie.** Zashch. Metal., 20 (1), 14-24. 1984.

KUTZ, M. **Handbook of Environmental Degradation of Materials.** ScienceDirect. William Andrew. Third Edition. United States. 2018.

LI, X.; DENG, S.; FU, H. **Inhibition by *Jasminum nudiflorum* Lindl. leaves extract of the corrosion of cold rolled steel in hydrochloric acid solution.** Journal Applied Electrochemistry, v. 40, n. 9, pp. 1641-1649, Sept. 2010.

MADI, M. **Otimização do período de limpeza de trocadores de calor utilizados no refino de petróleo.** Departamento de Pesquisa e Pós-Graduação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais. UTPR. Curitiba. 102p. 2005.

MARCH, G. A.; SCHASCHL, E. **The Difference Effect and the Chunk Effect.** J. Electrochem. Soc., 107 (12), 960-965. 1960.

MAREK, M. I. Fundamentals of Corrosion: Introduction. ASM Handbook. 4 ed. Corrosion. v. 13. 1992.

MATTA, M. A. S.; ALMEIDA, F. M.; DIAS, E. R. F.; BANDEIRA, I. C. N.; FIGUEIREDO, A. B. **Geometria dos sistemas aquíferos da bacia hidrográfica do Paracuri - Belém/PA, como base para uma proposta de abastecimento de água subterrânea.** Artigo. XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2004. 17p.

MATTA, M. A. S.; COSTA, F. R.; MORAES, M. C. S. **Águas superficiais e subterrâneas da região oeste da cidade de Belém/PA.** Artigo. XI Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 2000. 13p.

MATTSON, E.; BOCKRIS, J. O'. M. **Galvanostatic studies of the kinetics of deposition and dissolution in the copper + copper sulphate system.** Trans Faraday Soc., 55, 1586-1601. 1959.

MENNUCCI, M. M. **Estudo da corrosão do cobre em meios de sulfato e de cloreto com auxílio do microeletrodo com cavidade e de uma micro célula.** Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química. São Paulo, 2011. 264 p.

METLER, R. F. **Análise de corrosão detecta a causa de falhas em tubos de caldeiras.** CCM. Novembro 2016. Ano XII. Nº 139.

MOORE, H.; BECKINSALE, S.; MALLINSON, C. E. **The Season Cracking of Brass and Other Copper Alloys.** J. Inst. Met. 1921, XXV, 59-125.

MURTY, K. L. **Materials Ageing and Degradation in Light Water Reactors: Mechanisms and Management.** ScienceDirect. Woodhead Publishing. United States. 2013.

NACE RP0775. **Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations.** Houston, TX: NACE International. 16p. 2005.

NAPPORN, T. W.; KARPENKO-JEREB, L.; PICHLER, B. E.; HACKER, V. (2018). **Polymer Electrolyte Fuel Cells**. In HACKER, V.; MITSUSHIMA, S. (Eds.), **Fuel Cells and Hydrogen: From Fundamentals to Applied Research** (pp. 63-90). Amsterdam: Elsevier B.V.

NASCIMENTO, O. L.; MANSUR, A. A. P.; MANSUR, H. S. **Avaliação de Incrustação em Tubulação de PVC**. XV Congresso Brasileiro de Engenharia de Avaliações e Perícias. São Paulo. 26p. 2009.

NMAI, C. K.; KRAUSS, P. D. **Comparative Evaluation of Corrosion-Inhibiting Chemical Admixtures for Reinforced Concrete**. Durability of Concrete, v. SP- 145, p. 245-262. 1994. Detroit, American Concrete Institute. 1994.

OLIVEIRA, A. R. **Corrosão e tratamento de superfície**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Belém do Pará. Universidade Federal de Santa Maria. Rede e-Tec Brasil. Belém, Pará. 2012. 104p.

PANOSSIA, Z.; SANTOS, C. A. L.; CARDOSO, J. L.; SILVA, A. L. N.; CAMARGO, R. A. **Interpretação de curvas de polarização**. Trabalho apresentado durante o INTERCORR. Fortaleza. CE. 2014. 28p.

PEARSON, B. R.; BROOK, P. A. **The synthesis of electrode polarization curves**. Corrosion Science. v.32, n.4, p.387-398, 1991.

POLAN, N. W. **Copper and Copper Alloy**. ASM Handbook - Corrosion, ASM International (1987) 610 – 616.

PONTE, H. A. **Fundamentos da Corrosão. Eletroquímica Aplicada e Corrosão**. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Engenharia Química. Curitiba, Paraná. 2003.

POPOV, B. N. **Corrosion Engineering**. Elsevier. United States. 2015.

PRAŽAK, M. **The Polarization Resistance Method for Corrosion Testing**. *Verst. Korros.*, 25 (2), 104-112. 1974.

REHM, B.; HAGSHENAS, A.; PAKNEJAD, A. S.; AL-YAMI, A.; HUGHES, J. **Underbalanced Drilling: Limits and Extremes**. 1st Editon. Gulf Publishing Company. Elsevier Inc. All. 629p. 2012.

RIBEIRO, B. R. **Efeito das incrustações em condensadores do tipo casco e tubo. Prejuízo ou Oportunidade?** Artigo Técnico. Biblioteca Virtual da ASBRAV. Fator Incrustação, 2011.

ROHM AND HAAS: ACUMER® **1000, 1020, 1100, 1110 SCALE INHIBITORS**. Technical Bulletin. Rohm and Haas Company. Philadelphia. 1997.

ROSSETTI, D. F.; GÓES, A. M.; SOUZA, L. S. B. **Estratigrafia da sucessão sedimentar Pós Barreiras (Zona Bragantina, Pará) com base em radar de penetração no solo**. Revista Brasileira de Geofísica, 19 (2):113-130. 2001.

SCHIPPER, B. W.; LIN, H. C.; MELONI, M. A.; WANSLEEBEN, K.; HEIJUNGS, R.; VOET, E. V. **Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics**. Elsevier. Resources, Conservation & Recycling 132 (2018) 28-36.

SEQUEIRA, C. A. C. **Copper and Copper Alloys**. In Uhlig's Corrosion Handbook; Revie, R. W., Ed., 3rd ed.; John Wiley & Sons, Inc.: New York, 2011; pp 757–786.

SILVA, E. R. M., COSTA, L. G. S., SILVA, A. S., SOUZA, E. C., BARBOSA, I. C. C. **Caracterização Físico-Química, Química e Quimiométrica de Águas Subterrâneas dos Aquíferos Pirabas e Barreiras em Municípios do Estado do Pará**. Revista Brasileira de Geografia Física v.11, n.03. 1026-1041. 2018.

SILVA, G. B. S. **Caracterização de cupons de corrosão através de diferentes técnicas comparativas**. Dissertação (Mestrado). Centro de Ciência e Tecnologia. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro. 2016.

SILVA, R. C. A.; ARAUJO, T. M. **Qualidade da água do manancial subterrâneo em áreas urbanas de Feira de Santana (BA)**. Ciênc. saúde coletiva, São Paulo, v. 8, n. 4, p. 1019-1028, 2003.

SOMERSCALES, E. F. C. **Fouling of Heat Transfer Surfaces: An Historical Review**. Heat Transfer Engineering, v. 11, nº 1, 1990.

STERN, M.; GEARY, A. L. **Electrochemical Polarization: A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves**. Journal of The Electrochemical Society. Volume 104, Number 1. 1957.

STRAUMANIS, M. E. **Valency of Ions Formed during Anodic Dissolution of Metals in Acids**. J. Electrochem. Soc., 108 (12), 1087-1092. 1961.

SUTER, T.; MOSER, E.; BÖHNI, H. **The characterization of the tarnishing of Cu-15Ni-8Sn and Cu-5Al-5Sn alloys**. Corros. Sci., 34 (1993), pp. 1111-1122.

TABOREK, J; AOKI, T; RITTER, R. B; PALEN, J. W; KNUDSEN, J. G. **Predictive methods for fouling behavior**. Chemical Engineering Progress, v. 68, p. 69-78, 1972.

TEIXEIRA, M. H. P.; SILVA, A. G. P.; PEREIRA, E. C.; FILGUEIRA, M.; PARANHOS, R. P. R. **Caracterização de cupons de corrosão**. Artigo publicado no V CONFICT. ISSN 2177-6180. Ciências Exatas e da Terra. Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 2013.

TROVATI, J. **Tratamento de Água (Sistemas de Resfriamento)**. Araraquara-SP. 2004. 89p. Disponível em <http://www.snatural.com.br/PDF_arquivos/Torre-Caldeira-Tratamento-Agua.pdf>. Acesso em 31/07/2018.

TUCK, C. D. S.; POWELL, C. A.; NUTTALL, J. **Corrosion of Copper and Its Alloys**. In Shreir's Corrosion; Richardson, T. J. A., Ed., Elsevier: Oxford, 2010; pp 1937–1973.
VORKAPIĆ, L. Ž.; DRAŽIĆ, D. M. **The dissolution of iron under cathodic polarization**. Corrosion Sci., 19 (9), 643-651. 1979.

XU, C. N. 2008. **Study on copper consumption and GDP**. *China Metal Bulletin* 29: 32–35.

ZUBAIR, M. S; ANWAR, K. S; YOUNAS, M; BUDAIR, M. O. **A risk based heat exchanger analysis subject to fouling. Part I: Performance evaluation**. Energy, v. 25, p. 427-443, 2000.

WATER MEYER^a. **Sistemas de Resfriamento**. Parte II. vol. 03. São Paulo. 44p. 2011.

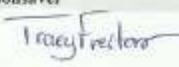
WATER MEYER. **Sistemas de Resfriamento**. Handbook. São Paulo, SP. 187p. 2009.

WATER MEYER. **Como avaliar (quantificar e analisar) a corrosão e a incrustação**. Sistema de Resfriamento. Techprint nº 33. São Paulo, SP. 10p. 2008.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: EDUSP. 166p. 2003.

ANEXO A – LAUDO PARA ÁGUA DE POÇO



Relatório de Ensaio						Laudo Nº 2018/10-12947
Código do Cliente 6970		Cliente ANDEL DENILSON MATOS LIMA				
CNPJ/CPF 91932610200		Endereço CONDOMÍNIO PLENO RESIDENCIAL, BL 06, APT 1007, Nº 5010, BR 316, KM8				
Bairro CENTRO	Cidade ANANINDEUA	UF PA	CEP 67030-000	Fone 91 98014-2211	Fax	
e-mail andeldenilson@hotmail.com		Data de Fabricação	Lote N/A	Validade		
Data - Hora da Coleta 25/10/2018 - 09:52	Temp Coleta 27°C	Data Envio Amostra 25/10/2018	Data - Hora Recb Amostra 25/10/2018 - 16:07	Temp Recb Amostra 27,4°C		
Tipo de Amostra ÁGUA BRUTA			Marca / Local DIRETO DO POÇO 02			
Responsável pela Coleta SR. ANDEL LIMA / SRA. ÉRICA LIMA		Observação AMOSTRA COLETADA PELO SOLICITANTE				
Análises Físico-Químicas						
Provas	Metodologia	Resultado	Valores de Referência *			
Alcalinidade Total	SM22 2012. Método 2320 B	4,0 mg/L em CaCO3	Não faz referência			
Condutividade	SM 22 2012. Método 2510 B	78,8 microS/cm a 25°C	Não faz referência			
Dureza Total	SM 22. Método 2340 C	20,0 mg/L em CaCO3	Não faz referência			
Ferro Total	USEPA-June 27, 1980; 45(126-43459)	4,58 mg/L	0,3 mg/L			
pH	SM 22. Método 4500 B	5,93 a 25°C	Não faz referência			
Sólidos Dissolvidos Totais	SM 22. Método 2540 C	33,25 mg/L	1.000 mg/L			
Análises Microbiológicas						
Provas	Metodologia	Resultado	Valores de Referência *			
Coliformes Totais	SM 22. Método 9221 B	Ausência em 100 ml	Não faz referência			
<p>(*) Parecer Valores de referência conforme Resolução nº 396 de 03/04/08 CONAMA.</p> <p>Obs Geral: Os resultados apresentados referem-se exclusivamente às amostras ensaiadas e condições operacionais dos processos especificados.</p>						
Data 12/11/2018	Assinatura do Técnico Responsável  Tracy Freitas Química Biotecnológica CRQ - 06500180				Página 1 de 1	

Av. Sarzedelo Correa, 370 - 1º andar - Batista Campos - CEP: 66033-265 - Belém-Pará-Brasil - Fones: +55 91 3224-8848 / 3086-1570
CNPJ: 03.936.701/0001-25 • E-mail: multianalises@multianalises.com.br • site: www.multianalises.com.br

ANEXO B – LAUDO PARA ÁGUA INDUSTRIAL



Relatório de Ensaio		Laudo Nº 2018/10-12948	
Código do Cliente 6970	Cliente ANDEL DENILSON MATOS LIMA		
CNPJ/CPF 91932610200	Endereço CONDOMÍNIO PLENO RESIDENCIAL, BL 06, APT 1007, Nº 5010, BR 316, KM8		
Bairro CENTRO	Cidade ANANINDEUA	UF PA	CEP 67030-000
		Fone 91 98014-2211	Fax
e-mail andeldenilson@hotmail.com		Data de Fabricação	Validade
		N/A	
Data - Hora da Coleta 25/10/2018 - 10:00	Temp Coleta 29,5°C	Data Envio Amostra 25/10/2018	Data - Hora Reb Amostra 25/10/2018 - 16:07
		Temp Reb Amostra 27,8°C	
Tipo de Amostra ÁGUA INDUSTRIAL		Marca / Local SAÍDA DO TANQUE DE ÁGUA INDUSTRIAL	
Responsável pela Coleta SR. ANDEL LIMA / SRA. ÉRICA LIMA		Observação AMOSTRA COLETADA PELO SOLICITANTE	

Análises Físico-Químicas

Provas	Metodologia	Resultado
Alcalinidade Total	SM22 2012. Método 2320 B	36,0 mg/L em CaCO ₃
Condutividade	SM 22 2012 Método 2510 B	231,0 microS/cm a 25°C
Dureza Total	SM 22. Método 2340 C	56,0 mg/L em Cl ₂
Ferro Total	USEPA-June 27, 1980; 45(126:43459)	1,16 mg/L
pH	SM 22. Método 4500 B	6,62 a 25°C
Sólidos Dissolvidos Totais	SM 22. Método 2540 C	93,12 mg/L

Análises Microbiológicas

Provas	Metodologia	Resultado
Coliformes Totais	SM 22 Método 9221 B	1,1 NMP/100 ml

ObsGeral:

Os valores máximos recomendados para águas industriais são baseados em informações descritas nos manuais dos equipamentos e variam de acordo com o fabricante. Dados empíricos normalmente são utilizados pelas empresas de tratamento de água. Os resultados apresentados referem-se exclusivamente às amostras ensaiadas e condições operacionais dos processos especificados.

Data 23/10/2018	Assinatura do Técnico Responsável <i>Tracy Freitas</i> Tracy Freitas Química Bacharel CRQ - 05100150
--------------------	--