



Avaliação dos índices de incrustação e corrosividade em água de reúso usada em sistemas de resfriamento

**Henrique Raphael de Marchi
Matheus Carneiro de Souza**

Projeto Final de Curso

Orientadores

Ladimir José de Carvalho, D.Sc.

Leila Yone Reznik, D.Sc.

Outubro de 2021

AVALIAÇÃO DOS ÍNDICES DE INCRUSTAÇÃO E CORROSIVIDADE EM ÁGUA DE REÚSO USADA EM SISTEMA DE RESFRIAMENTO

Henrique Raphael de Marchi

Matheus Carneiro de Souza

Projeto de Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Bacharel em Química Industrial.

Aprovado por:

Prof. Lídia Yokoyama, D.Sc

Eng. Gabriel B. Leoni, D.Sc

Orientado por:

Ladimir José de Carvalho, D.Sc.

Leila Yone Reznik, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ - Brasil

Outubro de 2021

Ficha Catalográfica

De Marchi, Henrique Raphael; De Souza, Matheus Carneiro

Avaliação dos índices de incrustação e corrosividade em água de reúso usada em sistema de resfriamento/ Henrique Raphael de Marchi e Matheus Carneiro de Souza.

Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2021

xii, 71 p.; il.

Projeto Final - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2021

Orientadores: Ladimir José de Carvalho e Leila Yone Reznik

1. Água de reúso. 2. Índice de corrosividade. 3. Sistema de resfriamento. 4. Projeto Final (Graduação - UFRJ/EQ). 5. Ladimir José de Carvalho, Leila Yone Reznik. I.

Título

Agradecimentos

Agradecimentos Henrique Raphael de Marchi

Aos meus pais, Nanci e Antonio, por todo apoio, incentivo e amor dado mesmo que a distância por parte do tempo.

A minha irmã Caroline, pela companhia, ajuda e carinho durante todo esse percurso de seis anos de universidade.

Aos meus orientadores, Leila Reznik e Ladimir Carvalho, pelos conselhos, ensinamentos, por terem me dado uma oportunidade de fazer iniciação científica, e principalmente serem a inspiração de escolher a área de corrosão.

A todos os colegas da universidade, em especial Bruno, Natália, Daniel, Caroline e Carolina, pelas conversas de corredor, apoio e ajuda seja nas disciplinas, seja com a vida.

Um agradecimento especial a Maliu Rosa, por todos os ensinamentos, incentivo, ajuda, tanto na iniciação científica quanto no projeto final.

A todos do Laboratório de Corrosão Vicente Gentil, por todo auxílio dado a mim quando precisei.

E ao Matheus, pela amizade e parceria ao longo desses 6 anos de curso e por ter aceitado o desafio de fazer o projeto final, mesmo que durante a pandemia, comigo.

Agradecimentos Matheus Carneiro de Souza

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por concluir mais uma etapa da vida com saúde. Gostaria de agradecer também à minha mãe Adriana e minha avó Lia por todo o suporte ao longo da minha vida e ao longo da minha caminhada na UFRJ. Deixo aqui minha lembrança ao meu avô Adilson que sempre esteve presente em todos os momentos, e que agora está lá de cima muito feliz com mais esse passo dado.

Um agradecimento especial também a todos os amigos que estiveram sempre ao meu lado, nos momentos bons e nos mais difíceis, e tornaram a graduação um processo mais prazeroso e menos desgastante.

Também gostaria de agradecer a todos os professores por todo o conhecimento e ensinamentos repassados ao longo do curso. Cada um, sem exceção, teve sua contribuição para que eu pudesse buscar sempre o máximo do meu desempenho, e concluir minha graduação com êxito.

Em especial, um enorme agradecimento aos orientadores Leila Yone Reznik e Ladimir José de Carvalho por todos os conselhos e por todo apoio e atenção ao longo do processo de elaboração deste trabalho. Um grande agradecimento também a Malu Rosa por todo o auxílio durante as etapas de realização deste projeto.

Deixo meu agradecimento também ao meu amigo Henrique por toda a amizade ao longo desses 6 anos de graduação, e por mais essa parceria para que pudéssemos desenvolver este projeto final, concluindo mais essa etapa em nossas formações.

Por fim, gostaria de agradecer também à Escola de Química e à UFRJ por toda estrutura, suporte e acolhimento oferecidos ao longo dos anos de graduação, que foram essenciais no meu processo de formação profissional.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de bacharel em Química Industrial.

AValiação dos Índices de Incrustação e Corrosividade em Água de Reúso Usada em Sistemas de Resfriamento

Henrique Raphael de Marchi
Matheus Carneiro de Souza

Outubro de 2021

Orientadores: Ladimir José de Carvalho, D.Sc.

Leila Yone Reznik, D.Sc.

Diante do cenário atual de alerta cada vez maior em relação a disponibilidade finita de água no mundo, o setor industrial tem buscado otimizar o uso desse recurso. Desse modo, o reaproveitamento da água utilizada nos sistemas de resfriamento é um fator chave para o setor reduzir desperdícios, custos e impactos ao meio ambiente. Este trabalho visa investigar através de ensaios gravimétricos de perda de massa a capacidade de reutilização de misturas de água deionizada com diferentes percentuais de água de reúso sintética, em escala de bancada, com base na determinação das respectivas taxas de corrosão de corpos de prova de duas diferentes ligas metálicas bastante utilizadas em equipamentos e tubulações de sistemas de resfriamento: aço carbono AISI 1020 e Latão AISI CDA443, bem como avaliar a aplicabilidade teórica de índices de corrosividade em relação ao resultado experimental. As misturas estudadas apresentaram porcentagens volumétricas de água de reúso sintética de 100%, 50%, 30% e 10% v/v. Dentre as duas ligas avaliadas, constatou-se que a água de reúso sintética foi menos agressiva ao latão em todas as concentrações, com taxas de corrosão na ordem de grandeza de 10^{-2} mm/ano, de forma que, quanto maior a porcentagem volumétrica de água de reúso sintética, menor a taxa de corrosão encontrada. Por sua vez, para o aço carbono, a ordem de grandeza da taxa de corrosão foi de 10^{-1} mm/ano e não foi observado nenhum padrão no comportamento das taxas de corrosão em relação a concentração da solução. Os índices de corrosividade, por sua vez, demonstraram não serem representativos em determinadas situações, uma vez que, apenas os índices de Ryznar e Puckorius, no ensaio com aço carbono e com o latão, foram mais afins com os valores de taxa de corrosão calculados.

Palavras-chave: água de reúso; sistema de resfriamento; índice de corrosividade; taxa de corrosão

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Objetivos | 2 |
| 1.1.1. Objetivos Gerais | 2 |
| 1.1.2. Objetivos específicos | 3 |
| 2. Revisão Bibliográfica | 3 |
| 2.1. Corrosão | 3 |
| 2.1.1. Mecanismo da corrosão | 4 |
| 2.2. Custos da corrosão | 4 |
| 2.3. Aço carbono | 5 |
| 2.4. Cobre e as ligas amarelas | 6 |
| 2.4.1. Ligas de Cobre | 7 |
| 2.4.2. Latão | 7 |
| 2.5. Importância da água e tentativa de reutilização | 8 |
| 2.6. Sistema de resfriamento | 9 |
| 2.6.1. Sistema aberto de resfriamento | 9 |
| 2.6.2. Sistema semi-aberto de resfriamento | 10 |
| 2.6.3. Sistema Fechado de resfriamento | 11 |
| 2.7. Índices de incrustação e corrosividade | 12 |
| 2.7.1. Índice de Langelier (LSI) | 13 |
| 2.7.2. Índice de Larson & Skold (LS) | 15 |
| 2.7.3. Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI) | 17 |
| 2.7.4. Índice de Estabilidade de Puckorius (PSI) | 18 |
| 2.7.5. Índice de Agressividade (AI) | 19 |
| 2.8. Ensaio gravimétrico de perda de massa e normas técnicas | 20 |
| 3. Materiais e Métodos | 21 |
| 3.1. Preparação da solução sintética de água de reúso | 21 |
| 3.2. Tratamento dos corpos de prova | 22 |
| 3.3. Montagem do experimento gravimétrico de perda de massa | 24 |
| 3.3.1. Aço carbono | 24 |
| 3.3.2. Latão | 25 |
| 3.1.4. Medição dos parâmetros | 25 |

| | |
|--|----|
| 3.1.5. Perda de massa | 26 |
| 4. Resultados e discussão | 29 |
| 4.1. Aço carbono | 29 |
| 4.1.1. Resultados de Perda de massa para o aço carbono: | 38 |
| 4.1.1.1. Procedimento de decapagem para a solução “branco” | 38 |
| 4.1.1.2. Procedimento de decapagem para a solução de concentração 10% v/v | 40 |
| 4.1.1.3. Procedimento de decapagem para a solução de concentração 30% v/v | 42 |
| 4.1.1.4. Procedimento de decapagem para a solução de concentração 50% v/v | 44 |
| 4.2. Latão | 45 |
| 4.2.1. Resultados de Perda de massa para o latão: | 56 |
| 4.2.1.1. Procedimento de decapagem para a solução “branco” | 56 |
| 4.2.1.2. Procedimento de decapagem para a solução de concentração 10% v/v | 58 |
| 4.2.1.3. Procedimento de decapagem para a solução de concentração 30% v/v | 59 |
| 4.2.1.4. Procedimento de decapagem para a solução de concentração 50% v/v: .. | 61 |
| 4.3. Comparação entre os ensaios | 63 |
| 4.4. Índices de Corrosividade | 65 |
| 5. Conclusões e Recomendações | 68 |
| 6. Referências Bibliográficas | 69 |

ÍNDICES DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Corrosão eletroquímica..... | 4 |
| Figura 2: Esquema de resfriamento aberto com uma só passagem | 10 |
| Figura 3: Esquema de Sistema de resfriamento semi-aberto com recirculação de água..... | 11 |
| Figura 4: Esquema de Sistema de resfriamento fechado com recirculação de água | 12 |
| Figura 5: Resumo dos índices de corrosividade | 13 |
| Figura 6: Fração das espécies do sistema $H_2CO_3 / HCO_3^- / CO_3^{2-}$ em função do pH..... | 17 |
| Figura 7: Corpos de prova de aço carbono após jateamento abrasivo | 23 |
| Figura 8: Corpos de prova de latão após jateamento abrasivo | 23 |
| Figura 9: Gráfico exemplificando o levantamento do tempo de decapagem no ensaio de perda de massa..... | 27 |
| Figura 10: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de aço carbono (t = 0h) na solução de água sintética de concentração 10% v/v | 31 |
| Figura 11: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de aço carbono (t = 0h) na solução de água sintética de concentração 30% v/v | 32 |
| Figura 12: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de aço carbono (t = 0h) na solução de água sintética de concentração à 50% v/v | 32 |
| Figura 13: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética de concentração 10% v/v na finalização do experimento de perda de massa (120h) com aço carbono | 33 |
| Figura 14: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética de concentração 30% v/v na finalização do experimento de perda de massa (120h) com aço carbono | 33 |
| Figura 15: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética de concentração 50% v/v na finalização do experimento de perda de massa (120h) com aço carbono | 34 |
| Figura 16: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução de concentração 10% v/v no ensaio com aço carbono..... | 35 |
| Figura 17: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução de concentração 30% v/v no ensaio com aço carbono..... | 35 |
| Figura 18: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução de concentração 50% v/v no ensaio com aço carbono..... | 36 |
| Figura 19: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução de concentração 10% v/v no ensaio com aço carbono..... | 36 |
| Figura 20: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução de concentração 30% v/v no ensaio com aço carbono..... | 37 |
| Figura 21: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução de concentração 50% v/v no ensaio com aço carbono..... | 37 |
| Figura 22: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0243 de aço carbono | 39 |
| Figura 23: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0404 de aço carbono | 41 |
| Figura 24: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0416 de aço carbono | 43 |

| | |
|---|----|
| Figura 25: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0414 de aço carbono..... | 44 |
| Figura 26: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de latão (t = 0h) na solução de água sintética branco | 48 |
| Figura 27: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de latão (t = 0h) na solução de água sintética de concentração 10% v/v | 49 |
| Figura 28: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de latão (t = 0h) na solução de água sintética de concentração 30% v/v | 49 |
| Figura 29: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de latão (t = 0h) na solução de água sintética de concentração 50% v/v | 50 |
| Figura 30: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética branco na finalização do experimento de perda de massa (120h) com latão | 50 |
| Figura 31: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética de concentração 10% v/v na finalização do experimento de perda de massa (120h) latão..... | 51 |
| Figura 32: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética de concentração 30% v/v na finalização do experimento de perda de massa (120h) com latão | 51 |
| Figura 33: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética de concentração 50% v/v na finalização do experimento de perda de massa (120h) com latão | 52 |
| Figura 34: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução branco no ensaio com latão | 52 |
| Figura 35: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução de concentração 10% v/v no ensaio com latão | 53 |
| Figura 36: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução de concentração 30% v/v no ensaio com latão | 53 |
| Figura 37: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução de concentração 50% v/v no ensaio com latão | 54 |
| Figura 38: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução branco no ensaio com latão | 54 |
| Figura 39: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução de concentração 10% v/v no ensaio com latão | 54 |
| Figura 40: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução de concentração 30% v/v no ensaio com latão | 55 |
| Figura 41: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução de concentração 50% v/v no ensaio com latão | 55 |
| Figura 42: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0235 de latão..... | 57 |
| Figura 43: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0094 de latão..... | 58 |
| Figura 44: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0239 de latão..... | 60 |
| Figura 45: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0237 de latão..... | 62 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Interpretação do Índice de Langelier | 14 |
| Tabela 2: Interpretação do Índice de Larson-Skold..... | 16 |
| Tabela 3: Interpretação do Índice de Ryznar | 18 |
| Tabela 4: Interpretação do Índice de Puckorius | 19 |
| Tabela 5: Interpretação do Índice de Agressividade..... | 20 |
| Tabela 6: Massa dos componentes utilizados para preparar a solução de reuso sintética | 22 |
| Tabela 7: Identificação dos corpos de prova de aço carbono nas células eletroquímicas | 24 |
| Tabela 8: Identificação dos corpos de prova de latão nas células eletroquímicas..... | 25 |
| Tabela 9: Categorização da Taxa de corrosão para o aço carbono | 28 |
| Tabela 10: Classificação quantitativa da taxa de corrosão (mm/ano) para sistema de resfriamento aberto com recirculação de água | 28 |
| Tabela 11: Massa em triplicata dos corpos de prova de aço carbono e a média calculada | 29 |
| Tabela 12: Dimensões dos corpos de prova de aço carbono | 30 |
| Tabela 13: Parâmetros químicos e físico-químicos obtidos das soluções para o ensaio com aço carbono..... | 31 |
| Tabela 14: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0243 de aço carbono | 38 |
| Tabela 15: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução branco após a decapagem | 39 |
| Tabela 16: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0404 de aço carbono | 40 |
| Tabela 17: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução de 10% após a decapagem | 41 |
| Tabela 18: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0416 de aço carbono | 42 |
| Tabela 19: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução de 30% após a decapagem | 43 |
| Tabela 20: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0414 de aço carbono | 44 |
| Tabela 21: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução 50% após a decapagem | 45 |
| Tabela 22: Massa em duplicata dos corpos de prova de latão e a média calculada | 46 |
| Tabela 23: Dimensões dos corpos de prova de latão | 47 |
| Tabela 24: Parâmetros químicos e físico-químicos obtidos das soluções para o ensaio com latão | 48 |
| Tabela 25: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0235 de latão | 56 |
| Tabela 26: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução branco após a decapagem | 57 |
| Tabela 27: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0094 de latão | 58 |
| Tabela 28: Massa dos corpos de prova na solução de 10% após a decapagem e a taxa de corrosão calculada | 59 |

| | |
|--|----|
| Tabela 29: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0239 de latão | 60 |
| Tabela 30: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução 30% após a decapagem | 61 |
| Tabela 31: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0237 de latão | 61 |
| Tabela 32: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução 50% após a decapagem | 62 |
| Tabela 33: Taxas de corrosão e suas interpretações para todas as soluções avaliadas | 64 |
| Tabela 34: Índices de corrosividade e taxas de corrosão calculados para o aço carbono | 65 |
| Tabela 35: Índices de corrosividade e taxas de corrosão calculados para o latão | 65 |
| Tabela 36: Interpretação dos resultados dos índices de corrosividade para o aço carbono..... | 66 |
| Tabela 37: Interpretação dos resultados dos índices de corrosividade para o latão | 66 |

1. Introdução

Em função da elevada densidade demográfica nas regiões urbanizadas e o mau uso dos recursos naturais (água), associado a fortes pressões nos sistemas hídricos, já podem ser observados em algumas regiões do planeta problemas de escassez de água. Por muito tempo, acreditou-se que, devido à sua abundância, a água seria um recurso ilimitado, ou mesmo sendo limitado, que seria difícil esgotá-lo. Atualmente, com a escassez desse recurso, é de suma importância que ocorra o reaproveitamento de modo a diminuir seu desperdício. Diante desse cenário, as indústrias, que de um modo geral são as principais fontes utilizadoras de água, sentiram a necessidade de estudar sobre o reaproveitamento da mesma após sua utilização em algum processo, como uma medida ambiental e econômica, sendo denominada água de reúso.

Tal água pode conter impurezas devido ao procedimento a qual foi primeiramente utilizada, e tais impurezas podem ser fonte para contaminações nos processos ou para degradação de equipamentos (geralmente metálicos) pelo fenômeno da corrosão ou por incrustação, por exemplo.

A corrosão é um problema que afeta as mais variadas atividades, tais como nas indústrias químicas, petrolíferas, naval, de construção civil, automobilística, nos diferentes meios de transportes e até mesmo na área da medicina. Ela é responsável por diversas perdas econômicas que estão ligadas a custos com manutenções e inspeções de equipamentos, paralisações nos processos produtivos, processos de proteção das superfícies para a prevenção contra os efeitos da corrosão e multas no caso de falhas por corrosão (ROCHA FILHO, 2015).

Já a incrustação, definida por depósitos de minerais formados nas paredes dos tubos, também é responsável por prejuízos financeiros nas indústrias químicas. As substâncias precipitadas formam bloqueios que prejudicam principalmente a vazão das tubulações e as taxas de trocas térmicas em sistemas de resfriamento por exemplo.

Os materiais mais utilizados nas indústrias são o ferro, cobre e algumas ligas metálicas contendo esses materiais. O aço carbono é uma liga metálica, constituída majoritariamente de ferro e uma pequena concentração de carbono, de expressiva

importância econômica, que tem sido empregado intensivamente na composição de estruturas, em materiais de troca térmica, na confecção de tubulações industriais e de utensílios domésticos. Contudo, esse material pode estar sujeito a ambientes potencialmente corrosivos (SOUZA, 2018). Além do aço carbono, o cobre e suas ligas são bastante utilizados no meio industrial, como por exemplo, em equipamentos de troca térmica, válvulas e parafusos. Devido a sua resistência à corrosão, maleabilidade, ductibilidade e condutibilidade, as ligas de cobre, também conhecidas como ligas amarelas, são vantajosas em diversos processos, porém, apresentam um maior custo.

Dessa forma, o controle do fenômeno da corrosão deve ser feito para evitar grandes prejuízos. Existem algumas maneiras para controlar a corrosão, como a utilização de proteção anódica, proteção catódica, aplicação de revestimentos ou utilização de inibidores de corrosão. Há, também, algumas formas de prever a formação de corrosão, incrustação, que são o emprego de alguns índices de corrosividade conhecidos na literatura que utilizam dados experimentais da solução para calcular um valor e interpretá-los de acordo com suas classificações. Dentre os índices, o de Langelier é de longe o mais conhecido e o mais utilizado, podendo ser observada sua utilização em um número maior de artigos.

O sistema de resfriamento é um importante processo industrial para a absorção de calor, onde o fluido geralmente aplicado para a troca térmica é a água. Porém, devido à baixa disponibilidade desse recurso, atualmente, são utilizados sistemas com recirculação de água. Entretanto, como dito anteriormente, na tentativa de sua reutilização, pode conter impurezas que podem provocar a deterioração do material. Hoje em dia, buscando prever a corrosividade do meio, são empregados softwares para o cálculo de um único índice, o de Saturação de Langelier.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos Gerais

Investigar o potencial de reaproveitamento de misturas com diferentes percentuais de água de reúso sintética na escala de bancada através dos índices que determinam, por meio de dados experimentais, o nível de corrosividade/incrustação da mesma.

1.1.2. Objetivos específicos

Com os resultados obtidos em bancada, prever o comportamento da água de reuso sintética similar à utilizada em sistemas de resfriamento. Verificar a possibilidade da utilização dos índices de incrustação e corrosividade conhecidos na literatura em processos de sistema de resfriamento, comparando-os com a taxa de corrosão obtida.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. Corrosão

GENTIL (2011) define a corrosão como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente associada ou não a esforços mecânicos. Tal degradação provoca alterações prejudiciais no metal, tornando-o, na maioria das vezes, impróprio para uso.

Os problemas de corrosão podem afetar as mais variadas atividades, como por exemplo nas indústrias química, petrolífera, petroquímica, naval, de construção civil, automobilística, nos meios de transporte, na odontologia (restaurações metálicas, aparelhos de prótese), na medicina (ortopedia) e em monumentos e esculturas (GENTIL, 2011).

Utilizando as indústrias petroquímicas, um dos setores mais importantes da economia, por exemplo, os metais que constituem os equipamentos passam por processos em que são utilizadas substâncias agressivas e condições agressivas como de temperatura e pressão. Sendo assim, as unidades de extração de petróleo, gás e refinaria são consideradas indústrias de alto risco. A combinação de vários fatores torna o petróleo, o gás e equipamentos de refinaria muito vulneráveis a uma variedade de fenômenos de corrosão que podem levar a acidentes graves (GROYSMAN, 2017).

GROYSMAN (2017) definiu algumas maneiras de controle da corrosão: seleção de materiais resistentes à corrosão ou adequados, design correto, uso de produtos químicos anticorrosivos, revestimentos e proteção catódica, proteção anódica, controle de parâmetros tecnológicos; e o que é muito importante, inspeção e controle em todas as etapas de aplicação dessas ações.

2.1.1. Mecanismo da corrosão

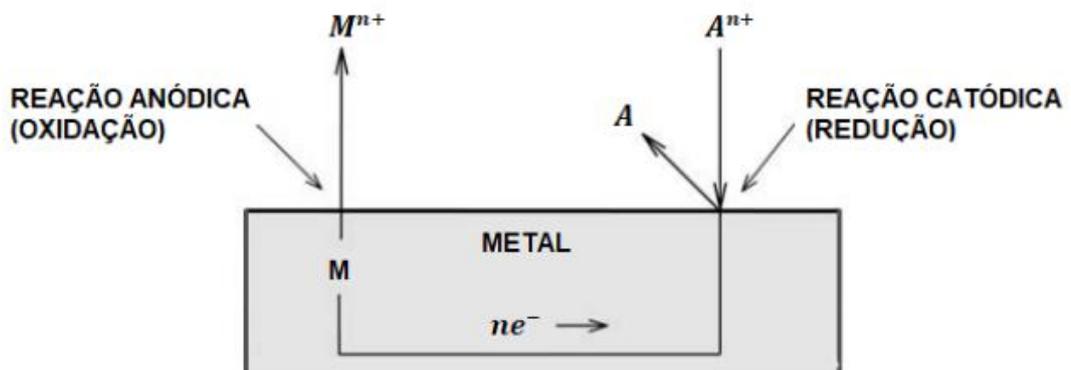
A deterioração de materiais metálicos é frequentemente um processo eletroquímico espontâneo, ocorrido na presença de um meio aquoso, onde há a migração de elétrons através de uma superfície condutora (GENTIL 2011; SOUZA, 2018).

Quando um metal (M) é imerso em uma solução suficientemente agressiva ocorre um equilíbrio de dissolução, e os elétrons (e^-) gerados pela reação anódica migram pelo metal por condução até que seja consumido pelos íons na região catódica, ou seja, ocorre a oxidação do metal, e a redução do íon presente na solução. A equação de oxirredução é mostrada na Equação 1 (SOUZA, 2018):



A Figura 1 mostra um esquema simplificado da corrosão eletroquímica:

Figura 1: Corrosão eletroquímica



Fonte: SOUZA, 2018.

Através da Figura 1, é possível observar o caminho do elétron a partir da reação anódica, onde é conduzido por uma superfície condutora (metal) até a região catódica, onde acontecerá a redução.

2.2. Custos da corrosão

À medida que o mundo foi se desenvolvendo tecnologicamente, a utilização de materiais metálicos para novos equipamentos foi aumentando, e apesar de novas tecnologias como soluções para a corrosão serem desenvolvidas, o custo com a corrosão se elevou e se tornou um fator muito importante que precisa ser considerado ainda na

fase inicial de projetos de grandes instalações industriais para evitar ou minimizar futuros processos de corrosão (GENTIL, 2011).

A empresa estadunidense CCTechnologies verificou que a porcentagem gasta do PIB em decorrência do fenômeno da corrosão gira em torno de 1 a 5%. Desde a década de 90, o custo com corrosão nos Estados Unidos é estimado em 300 bilhões de dólares. Dois estudos realizados, ainda, o relatório apresentado por Battelle (Columbus, Ohio) e *Specialty Steel Industry of North America* afirmaram que parte desse valor gasto poderia ser economizado se fosse feita a seleção de materiais mais resistentes e tecnologias conhecidas para a proteção do material desde a fase de projeto até a manutenção (GENTIL, 2011).

A entidade *International Zinc Association (IZA)*, aferiu que, para o Brasil, o gasto com corrosão equivale a 4% do PIB nacional. Em 2015, com o PIB brasileiro em cerca de R\$ 5,9 trilhões, o custo seria de R\$ 236 bilhões. Em 2019, o PIB brasileiro fechou em 7,7 trilhões aproximadamente, o que, conforme o estudo, corresponde a R\$ 308 bilhões gastos somente com corrosão. Já em 2020 o PIB sofreu uma queda de 4,1% em relação ao ano anterior, muito por conta dos reflexos da pandemia, terminando o ano em 7,4 trilhões, sendo que desse montante, R\$ 296 bilhões correspondem ao total consumido apenas pela corrosão (PORTAL FATOR BRASIL, 2016; AGÊNCIA DE NOTÍCIAS IBGE, 2021).

2.3. Aço carbono

Ligas de ferro-carbono podem receber designações de acordo com o teor de carbono contidos nas mesmas. Dentre elas, a liga que apresenta maior volume de produção no mundo e ampla versatilidade de aplicações é a que contém além de elementos residuais do processo de produção, teores de carbono entre 0,008 a 2,11%, designada de aço carbono (ARMCO, CALLISTER, 2006 e DOLABELLA, 2016).

Isto posto, pelo fato dessa liga se adequar ao que é requerido pelas indústrias tanto no aspecto mecânico e estrutural, quanto no econômico, uma vez que sua tecnologia já se apresenta bem desenvolvida, o aço carbono torna-se um material comumente utilizado pelas grandes fábricas em seus projetos, mesmo que ainda possuam um fraco

desempenho em relação a corrosão generalizada (DOLABELLA, 2016 e GOMES, 2005).

Além de ferro e carbono, essa liga também possui outros elementos em pequenas quantidades que proporcionam ao material diferentes características. A partir disto, o aço carbono recebe uma classificação para sua melhor identificação. Dentre as classificações, vale destacar a de grupo, desenvolvida pela AISI (*American Iron and Steel Institute*) e pela SAE (*Society of Automotive Engineers*), onde é utilizado o numeral 1 seguido de três algarismos (1XXX). Nesta classificação, se o material possui de 0,05 a 0,95% de carbono, então o segundo dígito será o algarismo 0 e os dois últimos dígitos indicam qual é a média percentual de composição do carbono em sua composição. Se o teor ultrapassar 1,00%, a numeração final terá cinco algarismos, sendo os três últimos referentes ao teor de carbono (utilizando duas casas decimais) (DOLABELLA, 2016).

No estudo realizado, o aço carbono utilizado foi o AISI 1020, que, levando em consideração a sua classificação, apresenta entre 0,18 e 0,23 % de carbono em sua composição, além de silício, manganês, fósforo e enxofre. Esse material geralmente é utilizado em peças e componentes de máquinas e equipamentos, como as torres de resfriamento por exemplo.

2.4. Cobre e as ligas amarelas

O cobre é um elemento químico vital para as indústrias. Ele possui características de grande importância para uma gama de processos. Dentre as características, vale destacar a resistência a corrosão, a sua condutividade térmica (o que permite sua utilização em trocadores e condutores de calor), a ductibilidade e resistência à esforços mecânicos

(MENNUCCI, 2011).

Alguns exemplos da aplicabilidade do cobre e suas ligas está na indústria de eletroeletrônicos, de transporte, de construção civil e de telecomunicações.

Quando exposto à atmosfera, o cobre pode se combinar com o oxigênio presente e formar uma camada de óxido na superfície, que auxilia na proteção do material. Se for exposto a atmosfera úmida, pode formar um hidrocarboneto de coloração verde, característica, por exemplo, da famosa Estátua da Liberdade (MENNUCCI, 2011).

2.4.1. Ligas de Cobre

O cobre é normalmente usado em sua forma pura, mas também pode ser combinado com outros metais para produzir uma enorme variedade de ligas. Cada elemento adicionado ao cobre permite obter ligas com diferentes características tais como: maior dureza, resistência à corrosão, resistência mecânica, usinabilidade ou até para obter uma cor especial para combinar com certas aplicações.

2.4.2. Latão

Uma das ligas mais importantes de cobre é o latão, que em sua composição apresenta entre 3-45% de zinco, e pode conter quantidades bem pequenas de outros elementos como chumbo (Pb), estanho (Sn), ferro (Fe), fósforo (P), alumínio (Al), níquel (Ni), manganês (Mn), arsênio (As) e outros. Esses elementos estão presentes tanto como impurezas quanto como adições de liga para melhorar propriedades específicas, como a usinabilidade (conseguida com uma concentração de Pb) quanto para retardar a corrosão seletiva do zinco (utilizando o P e As) (CHOUCRI, 2019 e MARTINS, 2009).

No trabalho realizado, o latão utilizado é o AISI CDA443, que em sua composição está presente 70-73% de cobre, 25-29% de zinco, e quantidades pequenas de chumbo, estanho, ferro, arsênio e outros. Esse material é mais aplicado para trocadores de calor, evaporadores e condensadores.

Os principais problemas com as ligas de zinco superiores são a dezincificação e a corrosão sob tensão. A dezincificação é um processo corrosivo que ocorre principalmente em ligas de cobre-zinco, onde o zinco acaba oxidando preferencialmente. Isso pode ser explicado pelo fato de o zinco ter um potencial de oxidação maior que o cobre. Para ligas de latão contendo pelo menos 15% de zinco, a corrosão seletiva do zinco deixa uma camada fraca e porosa de cobre e óxido de cobre, que permite a fuga de gases e/ou líquidos. Esse tipo de corrosão é frequente em condensadores, trocadores de calor e tubulações que carregam águas salinas (GENTIL, 2011 e MARTINS, 2009).

Após sofrer a dezincificação, as ligas de cobre-zinco acabam perdendo a ductibilidade inicial e, por consequência, podem fraturar quando forem submetidos a esforços mecânicos (GENTIL, 2011).

2.5. Importância da água e tentativa de reutilização

A água é um elemento vital para o planeta. Além de sua utilização para o consumo, a mesma é utilizada em uma variedade de processos industriais, direta ou indiretamente. Por muito tempo, acreditava-se que ela era um recurso ilimitado. Aliado a essa crença, a ausência de leis regulamentadoras eram uma das principais razões do uso sem controle do recurso hídrico.

Em face da aparente abundância, e do preço, o setor industrial consumia o insumo em grandes quantidades, e eram poucas as empresas que implantavam práticas de setorização do consumo da água.

A partir da exploração desse recurso natural, atrelada ao desenvolvimento econômico e sociais das regiões, e a dificuldade de acesso em algumas regiões, tem agravado o problema de escassez dos recursos hídricos (ESTENDER, 2015).

Em vista do atual cenário, de novas leis para uso e descarte dos recursos hídricos e no aumento do preço desse insumo, a reutilização da água passou a ser um procedimento imprescindível para as indústrias tanto do ponto de vista financeiro, quanto do ambiental.

Foi então, a partir desse momento, a utilização do termo água de reuso começou a ser mais empregado. Tendo em vista que a qualidade e o preço da água afetam o produto final, as empresas buscaram dentro de suas plantas a solução para o reaproveitamento de seus efluentes (ESTENDER, 2015).

O processo de reuso se baseia no encaminhamento da água para uma estação de tratamento. Algumas empresas não possuem espaços em suas plantas e recursos financeiros para implantação de um sistema de tratamento, e utilizam de empresas especializadas no quesito.

No tratamento, são feitas alterações para tornar o insumo em condições de consumo novamente. Depois de tratada, a água pode ser utilizada, não apenas para a função anterior, como pode ser empregada para outro fim, bastando ajustar a qualidade para tal finalidade (LEGNER, 2013).

Um dos objetivos do reúso é de preservar a água potável exclusivamente para consumo, em vista da escassez do recurso e da dificuldade que alguns locais possuem para acesso da mesma (LEGNER, 2013).

Diante disso, são necessárias mudanças para evitar um agravamento no cenário, buscando soluções viáveis que sejam capazes de diminuir os desperdícios, aumentar o reaproveitamento, diminuir os custos, os impactos ambientais e, principalmente, preservar os recursos hídricos para gerações futuras (ESTENDER, 2015).

2.6. Sistema de resfriamento

MANCUSO (2001) definiu que a forma mais comum de absorção do calor gerado em processos industriais é por meio da água, podendo-se destacar o resfriamento de um líquido qualquer por trocadores de calor, equipamentos nos quais dois fluídos trocam energia calorífica durante o escoamento em vazão uniforme.

2.6.1. Sistema aberto de resfriamento

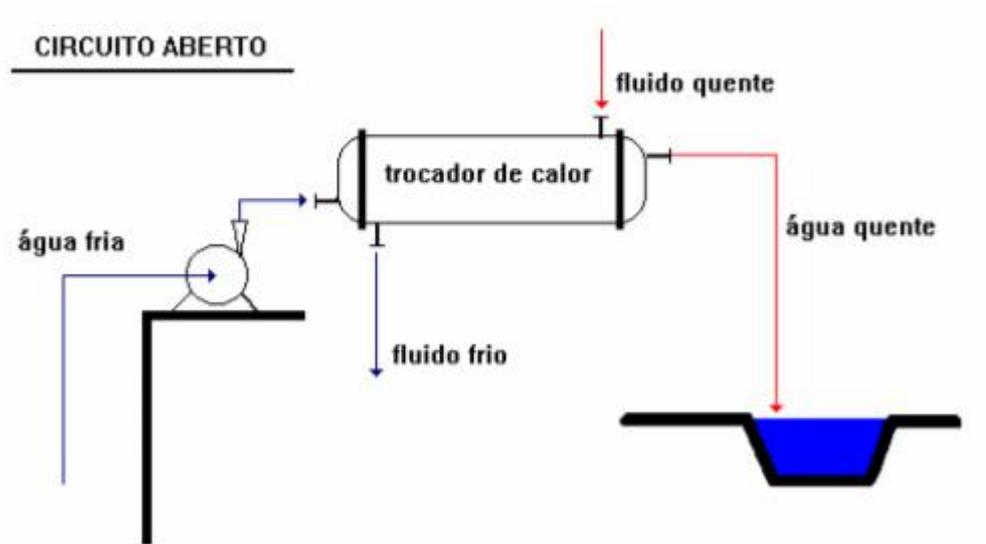
Para sistemas onde existe uma grande disponibilidade de água em temperaturas e qualidades satisfatórias, é utilizado o sistema aberto de resfriamento. Nesse modelo, a água não é recirculada, passando somente uma vez para a realização de troca térmica e depois é descartada. É utilizada em instalações móveis, tais como plataformas de petróleo, navios etc (TROVATI, 2004).

Nesse tipo de sistema, devido a alta demanda de água, é usualmente inviável a escolha de um tratamento preventivo para o fluido. E, consecutivamente, a água é retornada ao meio ambiente a uma temperatura mais alta, o que pode comprometer a utilização do recurso hídrico posteriormente (TROVATI, 2004).

Por ser utilizada em elevados volumes, a água pode apresentar quantidades maiores de microrganismos, de sólidos suspensos e gases dissolvidos, provocando problemas de incrustação e de corrosão.

A Figura 2 a seguir mostra um exemplo de um sistema aberto de resfriamento, sem recirculação de água.

Figura 2: Esquema de resfriamento aberto com uma só passagem



Fonte: MANCUSO, 2001

Na Figura 2 é mostrado percurso feito pela água, considerada fria inicialmente, e, após trocar calor, é aquecida e descartada geralmente sem tratamentos quente.

2.6.2. Sistema semi-aberto de resfriamento

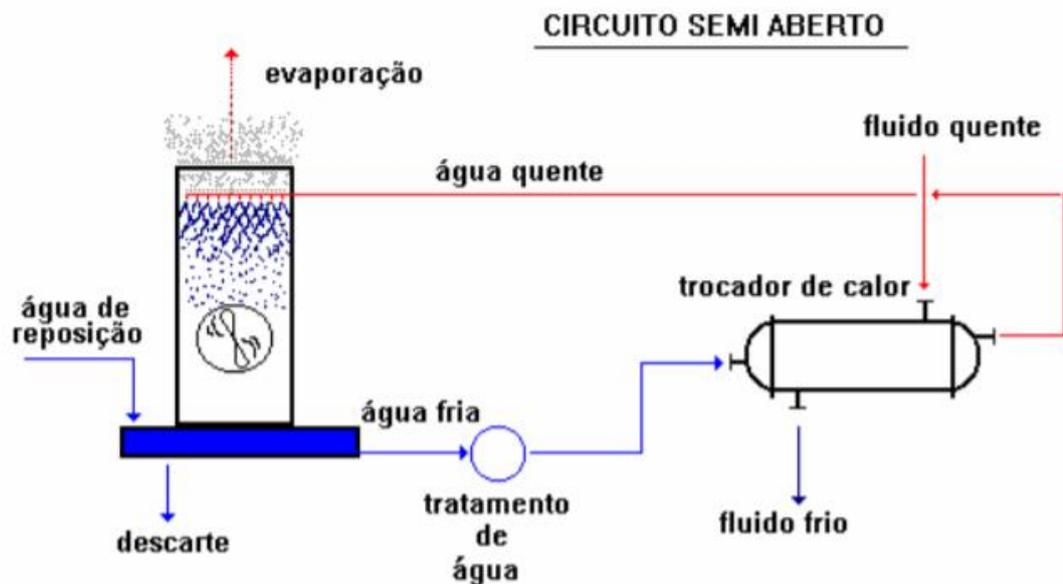
Quando a disponibilidade da água não é elevada e a qualidade da água está comprometida, é utilizado o sistema de resfriamento semi-aberto ou aberto com recirculação. Nesse processo, o fluido, após a troca térmica e estar aquecido, é circulado em uma instalação de resfriamento para diminuição da sua temperatura e poder ser reutilizado. Na etapa de resfriamento, há perdas da quantidade de água por evaporação, e, portanto, a quantidade final de água não é a mesma do que a inicial e por isso também é necessário um reabastecimento do fluido no sistema (TROVATI, 2004).

Como é necessária a instalação de uma torre de resfriamento, condensadores ou “*spray-pounds*”, o investimento inicial da planta é mais elevado se comparado com o sistema aberto sem recirculação de água. Contudo, é resolvido o problema da menor qualidade e disponibilidade do fluido de resfriamento, e da poluição térmica causada no descarte de água aquecida no meio ambiente (TROVATI, 2004).

Os sais presentes na água de reposição, inserida no sistema quando o nível da evaporação e garnde, também são fontes para o acontecimento de incrustações e de corrosão.

A Figura 3 abaixo mostra um exemplo de sistema semi-aberto de resfriamento, com recirculação de água:

Figura 3: Esquema de Sistema de resfriamento semi-aberto com recirculação de água



Fonte: MANCUSO, 2001.

Na Figura 3 são mostradas a etapa de resfriamento da água aquecida, da inclusão da água de reposição e das perdas por evaporação.

2.6.3. Sistema Fechado de resfriamento

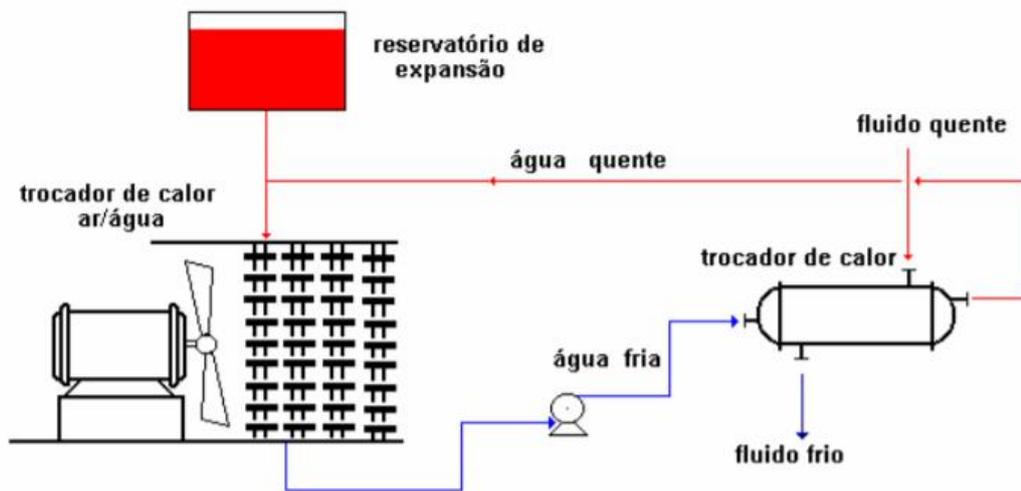
Quando são necessários utilizar menores temperaturas conseguidas tanto no sistema aberto quanto para o sistema semi-aberto, é recomendado a operação do sistema fechado de resfriamento. Nesse sistema, não ocorre evaporação, pois a troca térmica é feita em trocadores de calor refrigerados por um outro circuito de água ou por um gás, como a amônia ou fréon, ou seja, o fluido de resfriamento não entra em contato com a água (GENTIL, 2011 e TROVATI, 2004).

Assim como para o sistema semi-aberto, apresenta um alto custo para o investimento inicial, porém a perda de água é minimizada, não sendo necessária a utilização de água de compensação.

Entre suas limitações está a alta vazão de circulação. Entretanto, a quantidade de sais presentes na água é bem mais limitada, tornando a incrustação e a corrosão dois processos menos frequentes.

A Figura 4 abaixo mostra um exemplo de sistema fechado de resfriamento, com recirculação de água

Figura 4: Esquema de Sistema de resfriamento fechado com recirculação de água



Fonte: MANCUSO, 2001.

2.7. Índices de incrustação e corrosividade

Os índices de corrosão são uma medida da qualidade da água usada para determinar se a mesma causará corrosão nos tubos ou formará uma incrustação que pode criar bloqueios (CORROSION INDEX). Existem diversos índices, dentre os quais podemos citar o Índice de Larson & Skold, o Índice de Saturação de Langelier, o Índice de Estabilidade de Ryznar, o Índice de Estabilidade de Puckorius e o Índice de agressividade, cada qual com suas equações e parâmetros de classificação, explicitados resumidamente na Figura 5, a seguir. Essa Figura traz um resumo dos índices de incrustação e corrosividade a serem utilizados nesse estudo:

Figura 5:Resumo dos índices de corrosividade

| Índice | Equação | Valor do Índice | Condição da Água |
|--|---|-------------------|---|
| Índice de Saturação de Langelier (LSI) | $LSI = pH - pHs$ | $0,5 < LSI < 2$ | Incrustação forte |
| | $pHs = (9,3 + A + B) - (C + D)$ | $0 < LSI < 0,5$ | Incrustação suave |
| | $A = \frac{(\log[STD] - 1)}{10}$ | $LSI = 0$ | Balanceado |
| | $B = -13,12 \cdot [\log(T + 273,15)] + 34,55$ | $-0,5 < LSI < 0$ | Corrosão suave |
| | $C = \log[Ca^{2+}] - 0,4$ $D = \log[Alc]$ | $-2 < LSI < -0,5$ | Corrosão severa |
| Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI) | $RSI = 2 \cdot pHs - pH$ | $4 < RSI < 5$ | Incrustação severa |
| | | $5 < RSI < 6$ | Incrustação média |
| | | $6 < RSI < 7$ | Pouca incrustação ou corrosão |
| | | $7 < RSI < 7,5$ | Corrosão média |
| | | $7,5 < RSI < 9$ | Corrosão elevada |
| Índice de Incrustação de Puckorius (PSI) | $PSI = 2 \cdot pHs - pH_{EQ}$ $pH_{EQ} = 1,465 \cdot \log[Alc] + 4,54$ | $PSI < 4,5$ | Tendência à incrustação |
| | | $4,5 < PSI < 6,5$ | Baixa tendência de incrustação e corrosão |
| | | $PSI > 6,5$ | Tendência à corrosão |
| Índice de Agressividade (IA) | $IA = pH + \log[(Alc) \times (D_{Ca})]$ | $AI < 10$ | Altamente agressiva |
| | | $10 < AI < 12$ | Moderadamente agressiva |
| | | $AI > 12$ | Não agressiva |
| Índice de Larson-Skold (ILS) | $ILS = \frac{[Cl^-] + [SO_4^{2-}]}{[HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]}$ | $ILS < 0,8$ | Corrosão baixa |
| | | $0,8 < ILS < 1,2$ | Corrosão significativa |
| | | $ILS > 1,2$ | Corrosão elevada |

Fonte: SOUZA, 2019.

2.7.1. Índice de Langelier (LSI)

O índice de Langelier foi desenvolvido para prever a corrosividade ou a incrustação de uma solução aquosa. Esse índice utiliza uma relação numérica entre o pH de saturação para carbonato de cálcio (pHs) e o pH do meio. Para o cálculo do pHs, é necessário a obtenção dos parâmetros de temperatura, alcalinidade, dureza e sólidos dissolvidos totais (STD). O Índice de Saturação de Langelier é expresso pela equação:

$$LSI = pH - pHs \text{ (Equação 2)}$$

onde, pH é o pH da água medida e pHs é o pH de saturação. O pH de saturação é calculado pela equação:

$$pHs = 9,3 + A + B - C - D \text{ (Equação 3)}$$

Onde,

$$A = 0,1 * (\log (STD) - 1) \text{ (Equação 4)}$$

$$B = -13,12 * \log (T + 273) + 34,55 \quad (\text{Equação } 5)$$

$$C = \log (\text{dureza}) - 0,4 \quad (\text{Equação } 6)$$

$$D = \log (\text{alcalinidade}) \quad (\text{Equação } 7)$$

A, B, C e D são grandezas que dependem respectivamente da quantidade de sólidos totais dissolvidos na amostra (em mg/L), da temperatura T (em °C), da dureza (em mg/L) e da alcalinidade total (em mg/L de CaCO₃) (GRANJEIRO, 2014).

A interpretação dos resultados é realizada com base na Tabela 1 a seguir, que mostra a tendência de diferentes águas em função dos valores do índice de saturação de Langelier:

Tabela 1: Interpretação do Índice de Langelier

| Valores | Possível tendência da água |
|------------|---------------------------------|
| >4 | Incrustação extremamente severa |
| 3 a 4 | Incrustação moderada |
| 1 a 3 | Incrustação suave |
| 0,5 a 1 | Incrustação muito suave |
| -0,5 a 0,5 | Balanceado |
| -0,5 a -2 | Corrosão suave |
| -2 a -5 | Corrosão moderada |
| < -5 | Corrosão severa |

Fonte: CAVAZZANNA, 2012.

Embora as informações obtidas do índice de Langelier não sejam quantitativas, podem ser úteis na estimativa dos requisitos de tratamento de água para caldeiras de baixa pressão, torres de resfriamento e estações de tratamento de água, além de servir como um indicador geral da corrosividade da água.

O índice apresenta limitações, por exemplo, águas de baixa dureza, baixa alcalinidade, baixo ou pH excessivamente alto são corrosivas, porém o Índice de Saturação de Langelier não consegue prever corretamente a sua corrosividade. Como utiliza em seu desenvolvimento o pH de saturação para carbonato de cálcio, quando a mesma e consecutivamente a alcalinidade está em uma quantidade insuficiente, não é conseguido formar uma escala protetora. A formação de incrustações de proteção depende do pH,

íon bicarbonato, carbonato de cálcio, sólidos dissolvidos e temperatura; cada um pode afetar as tendências corrosivas da água de forma independente.

O mesmo pode ocorrer em situações em que a água possui um pH elevado, mas dureza e alcalinidade suficientes, situações essas que também podem ser corrosivas, mesmo se o LSI predisser o contrário. Este é o resultado de complexos de cálcio e magnésio que não podem participar ativamente do processo de formação de incrustações. Os procedimentos analíticos não distinguem entre esses complexos e o cálcio e magnésio disponíveis; portanto, o valor LSI não é preciso em tais situações (METHOD 8073).

Tendências corrosivas também podem ser exibidas por água contendo altas concentrações de sulfato, cloreto e outros íons que interferem com a formação de filme de carbonato uniforme.

Devido a essas limitações, a utilização do LSI não é recomendada para águas contendo alcalinidades menores do que 40mg/L, e pH fora do intervalo de 6,5 e 9,5. (METHOD 8073).

2.7.2. Índice de Larson & Skold (LS)

O índice de Larson-Skold (LS) foi desenvolvido para prever o comportamento da água em sistemas de resfriamento. Sua equação leva em base a concentração de cloreto e de sulfato (íons corrosivos que interferem na formação do filme de proteção) e a alcalinidade do meio (expressa pela concentração dos íons carbonato e bicarbonato). A equação de Larson-Skold é expressa a seguir (GENTIL, 2011 e GRANJEIRO, 2014)

$$LS = [C_{(Cl^-)} + C_{(SO_4^{2-})}] / [C_{(HCO_3^-)} + C_{(CO_3^{2-})}] \quad (\text{Equação 8})$$

onde as concentrações, devem ser expressas em meq/L; a alcalinidade total é obtida pelas concentrações do carbonato e bicarbonato.

A interpretação dos resultados pode ser realizada com base na Tabela 2 a seguir:

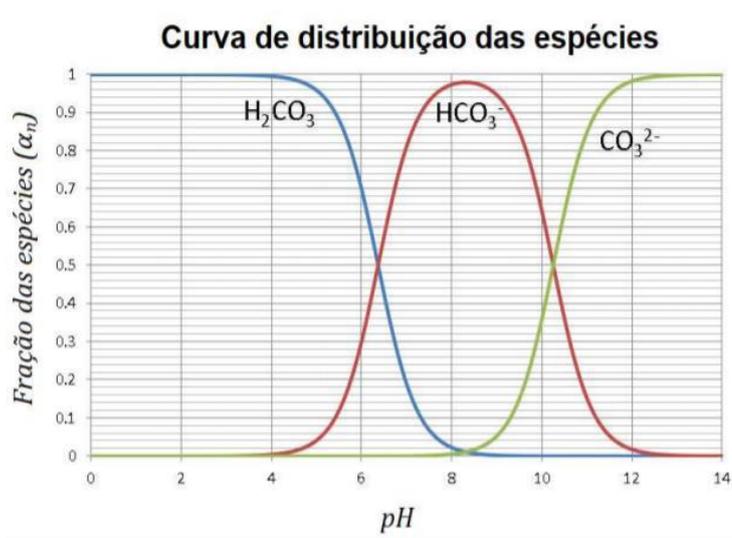
Tabela 2: Interpretação do Índice de Larson-Skold

| Valores | Significado |
|------------------|---|
| $< 0,8$ | Cloreto e sulfato provavelmente não irão interferir na formação natural do filme. |
| $0,8 < LS < 1,2$ | Cloreto e sulfato podem interferir na formação natural do filme; taxas de corrosão superiores às desejadas podem ser antecipadas. |
| $> 1,2$ | Tendência a altas taxas de corrosão deve ser esperada à medida que o índice aumenta. |

Fonte: SOUZA, 2019.

A concentração dos íons contidos no numerador da Equação 9 podem ser obtidos pela cromatografia. Já a concentração dos íons obtidos situados no denominador apresentam uma particularidade. Os compostos bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) e ácido carbônico (H_2CO_3) se encontram em equilíbrio decorrente de processos naturais. À partir de um determinado pH, um dos compostos apresenta uma concentração muito superior às concentrações dos outros dois compostos, fazendo com que ele seja predominante e portanto o único a ser considerado para a resolução dos cálculos. A Figura 6 a seguir traz o comportamento do sistema em equilíbrio entre o ácido carbônico, bicarbonato e carbonato:

Figura 6: Fração das espécies do sistema $\text{H}_2\text{CO}_3 / \text{HCO}_3^- / \text{CO}_3^{2-}$ em função do pH



Fonte: VIRGILIO, 2020.

É possível observar na Figura 6 que, para os experimentos a serem feitos no trabalho onde o pH está situado entre 7,70 e 8,40, a espécie predominante no sistema é o bicarbonato, portanto, o denominador da Equação 9 será composto apenas pela concentração desse íon.

2.7.3. Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI)

J. W. Ryznar desenvolveu um índice para a avaliação da corrosividade ou incrustação da água. Assim como para o Índice de Langelier, o Índice de Estabilidade de Ryznar utiliza o pH do meio aquoso e o pH de saturação para carbonato de cálcio (pH_s), porém a fórmula foi rearranjada, assim como a tabela para a sua interpretação com base em registro e compilação de práticas e experimentos. O RSI é expresso por:

$$\text{RSI} = 2(\text{pH}_s) - \text{pH}_a \quad (\text{Equação 9})$$

Onde pH_s é o pH de saturação em CaCO_3 e o pH_a é o pH medido da água (TROVATI, 2004).

A interpretação dos dados pode ser realizada com base na Tabela 3 a seguir:

Tabela 3: Interpretação do Índice de Ryznar

| Valores | Indicação |
|---------|--------------------|
| < 4 | Incrustação severa |
| 4 a 5 | Incrustação forte |
| 5 a 6 | Incrustação leve |
| 6 a 7 | Balanceado |
| 7 a 7,5 | Corrosão moderada |
| 7,5 a 9 | Corrosão forte |
| > 9 | Corrosão severa |

Fonte: CAVAZZANNA, 2012.

2.7.4. Índice de Estabilidade de Puckorius (PSI)

O Índice de Estabilidade de Puckorius (PSI) foi desenvolvido para prever o comportamento da água de resfriamento. Esse índice modifica a maneira de calcular os índices existentes, utilizando em sua equação o pH de equilíbrio (pH_{eq}) e novamente o pH de saturação para carbonato de cálcio (pH_s), de maneira idêntica aos cálculos feitos para os índices de Langelier ou Ryznar. O PSI é compatível com águas de torres a níveis de pH maiores que 7,5 e tão altos quanto 9 (GENTIL, 2011). É calculado pela fórmula:

$$\text{PSI} = 2 \text{pH}_s - \text{pH}_{\text{eq}} \quad (\text{Equação 10})$$

O pH de equilíbrio é calculado pela fórmula:

$$\text{pH}_{\text{eq}} = 1,465 \times \log \text{AT} + 4,54 \quad (\text{Equação 11})$$

onde: AT = alcalinidade total em ppm CaCO_3 .

A interpretação dos dados pode ser realizada com base na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4: Interpretação do Índice de Puckorius

| Valores | Indicação |
|---------|--------------------|
| < 4 | Incrustação severa |
| 4 a 5 | Incrustação forte |
| 5 a 6 | Incrustação leve |
| 6 a 7 | Balanceado |
| 7 a 7,5 | Corrosão moderada |
| 7,5 a 9 | Corrosão forte |
| > 9 | Corrosão severa |

Fonte: GONDIM, 2014

2.7.5. Índice de Agressividade (AI)

O índice de agressividade (AI), originalmente desenvolvido para monitoramento da água em tubos de amianto. Ele é expresso utilizando os parâmetros de pH da solução, alcalinidade total e a dureza do meio. É um índice considerado mais simples e consecutivamente menos preciso, visto que não leva em consideração a temperatura e os sólidos dissolvidos totais, e por isso, frequentemente substituído pelo Índice de Saturação de Langelier como indicador de corrosividade da água. Porém, onde for aplicável, é mais conveniente utilizá-lo que o LSI. Também não é um índice quantitativo (METHOD 8073).

A fórmula é dada por:

$$AI = \text{pH} + \log [(A) \times (H)] \quad (\text{Equação 12})$$

Onde:

A: Alcalinidade (em mg/l CaCO₃)

H: Dureza do cálcio (em mg/l CaCO₃)

A interpretação dos dados pode ser realizada com base na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5: Interpretação do Índice de Agressividade

| Valores | Indicação |
|-------------|------------------------------------|
| > 12,0 | Água não agressiva (não corrosiva) |
| 12,0 a 10,0 | Água moderadamente agressiva |
| < 10,0 | Água altamente agressiva |

Fonte: (METHOD 8073)

É possível observar na Tabela 5, a presença de poucas classificações e de intervalos grandes para os valores obtidos dos índices. É importante frisar que o índice foi desenvolvido para a utilização em tubos de amianto e de cimento, e, portanto, a sua parametrização funciona bem para esta ocasião.

2.8. Ensaio gravimétrico de perda de massa e normas técnicas

O ensaio gravimétrico de perda de massa é um importante experimento utilizado em escala laboratorial para avaliar a taxa de corrosão do corpo de prova (CP) metálico.

Nas superfícies dos corpos de prova, após o ensaio gravimétrico de perda de massa, há a presença de excesso de produto de corrosão. É necessário, portanto, uma etapa para limpeza dos corpos de prova, e tal etapa deve ocorrer a partir de ciclos de decapagem até a remoção completa do produto de corrosão. Para a preservação do material, é necessário utilizar uma solução decapante específica para não comprometer ainda mais os corpos de prova. Todavia, antes da realização da etapa de decapagem, é recomendada a retirada do excesso para não comprometer os resultados.

Para o acompanhamento do processo de decapagem, é necessário construir um gráfico e observar atentamente as massas para cada tempo de decapagem, pois, depois que o produto de corrosão é consumido por completo, a solução decapante começa a atacar o material.

Há diferentes normas utilizadas para a etapa de decapagem, e elas não entram sempre em consenso. A partir disto, foi escolhida a ISO 8407, que é a mais recomendada em situações similares às presentes no determinado estudo.

A norma ISO 8407 estabelece que, caso os ciclos de limpeza não sejam iguais durante o procedimento de decaagem, o eixo da abscissa deve ser expresso em unidades de tempo. Neste caso, o valor final da massa do corpo de prova, referente ao fim da retirada do produto de corrosão, vai estar compreendido entre o valor da intersecção das duas retas obtidas pelo gráfico e a extrapolação de uma reta referente ao patamar horizontal, que indicaria somente a presença do metal base (REIS, 2016).

3. Materiais e Métodos

3.1. Preparação da solução sintética de água de reúso

A solução de água sintética de reúso foi preparada com base de água deionizada. Com o auxílio de uma balança eletrônica analítica Shimadzu, foram pesados os respectivos solutos: carbonato de sódio (Na_2CO_3), acetato de amônia ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$), cloreto de ferro III (FeCl_3), cloreto de cálcio (CaCl_2), cloreto de sódio (NaCl), bicarbonato de sódio (NaHCO_3), nitrato de sódio (NaNO_3), sulfato de magnésio (MgSO_4), fosfato de potássio monobásico (KH_2PO_4), acetato de sódio (CH_3COONa), silicato de sódio (NaSiO_3) e cloreto de amônia (NH_4Cl). A composição da solução sintética de água de reúso foi obtida através de análises químicas de soluções representativas em sistemas de resfriamento semi-aberto. A Tabela 6 a seguir traz os pesos dos compostos utilizados para o preparo de 2 litros de solução:

Tabela 6: Massa dos componentes utilizados para preparar a solução de reúso sintética

| Espécie | Massa (g) |
|------------------------------------|-----------|
| Na ₂ CO ₃ | 0,1800 |
| CH ₃ COONH ₄ | 0,0100 |
| FeCl ₃ | 0,0010 |
| CaCl ₂ | 0,2000 |
| NaCl | 0,0500 |
| NaHCO ₃ | 0,1200 |
| NaNO ₃ | 0,3300 |
| MgSO ₄ | 0,1500 |
| KH ₂ PO ₄ | 0,0014 |
| CH ₃ COONa | 0,0300 |
| Na ₂ SiO ₃ | 0,0300 |
| NH ₄ Cl | 0,1100 |

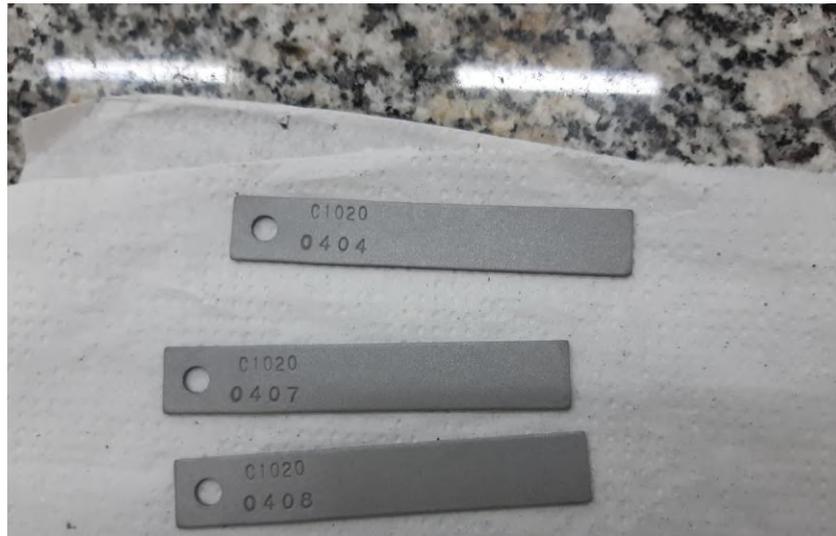
Fonte: Autor

3.2. Tratamento dos corpos de prova

Doze corpos de prova (CP) de aço carbono AISI 1020 e doze corpos de prova (CP) de latão AISI CDA443 foram preparados por meio de jateamento abrasivo com granalha de óxido de alumínio, utilizando-se do gabinete para jateamento Polo-Ar, para a limpeza dos mesmos.

As Figuras 7 e 8 a seguir mostram a aparência de alguns corpos de prova utilizados, após o jateamento abrasivo:

Figura 7: Corpos de prova de aço carbono após jateamento abrasivo



Fonte: Autor

Figura 8: Corpos de prova de latão após jateamento abrasivo



Fonte: Autor

Após esse procedimento, os corpos de prova foram pesados com o auxílio da balança eletrônica analítica Shimadzu, e suas dimensões (comprimento, largura, espessura e diâmetro do furo) foram medidas com a utilização do paquímetro digital Ford.

3.3. Montagem do experimento gravimétrico de perda de massa

3.3.1. Aço carbono

A solução descrita no **Capítulo 3.2.1.** foi preparada duas vezes, sendo que na primeira vez foi adicionada água deionizada de forma a obter as concentrações de 10%, 30% e 50% v/v de água de reuso sintética, de modo que o volume final das soluções também fosse 2 litros. Já na segunda vez, foi feita sem a utilização de água deionizada, e, portanto, com 100% v/v de água de reuso, sendo utilizada como branco. Uma alíquota de aproximadamente 30 mL foi retirada de cada solução para medições dos parâmetros pH, alcalinidade e condutividade e concentração dos íons. As soluções foram introduzidas em cuba ou célula eletroquímica e os corpos de prova foram pendurados com auxílio de fios de nylon na tampa contendo furos de modo que esses ficassem totalmente mergulhados na solução, considerando-se as perdas por evaporação, observadas verificando o nível da célula eletroquímica diariamente. Foram introduzidos 3 corpos de prova selecionados previamente em cada uma das cubas, sendo que esses corpos de prova foram marcados com uma numeração para o auxílio de sua identificação. As células, depois de montadas, foram mantidas em agitação com o auxílio de placas de agitação magnética IKA e Fisatom. A duração do ensaio foi de 5 dias.

A indicação da distribuição dos corpos de prova (CPs) nas cubas está descrita na Tabela 7 a seguir, com a numeração dos CPs utilizados:

Tabela 7: Identificação dos corpos de prova de aço carbono nas células eletroquímicas

| Solução | Numeração dos CPs de Aço Carbono AISI 1020 |
|---------|--|
| Branco | 0243, 0247, 0401 |
| 10% | 0404, 0407, 0408 |
| 30% | 0413, 0414, 0416 |
| 50% | 0413, 0414, 0416 |

Fonte: Autor

3.3.2. Latão

O mesmo procedimento para o aço carbono citado no item anterior 3.3.1 foi também realizado para a montagem do ensaio gravimétrico para o latão.

A indicação da distribuição dos corpos de prova nas cubas está descrita na Tabela 8 a seguir, com a numeração dos CPs utilizados:

Tabela 8: Identificação dos corpos de prova de latão nas células eletroquímicas

| Solução | Numeração dos CPs de Latão AISI CDA443 |
|---------|--|
| Branco | 0078, 0235, 0236 |
| 10% | 0094, 0095, 0233 |
| 30% | 0238, 0239, 0240 |
| 50% | 0080, 0093, 0237 |

Fonte: Autor

3.1.4. Medição dos parâmetros

A partir das alíquotas retiradas de cada solução, foi realizada a medição dos parâmetros pH, condutividade, alcalinidade e concentração dos íons.

O pH foi medido com a utilização do pHmetro Shanghai San-Xin Instrumentation, modelo PHS-3D-02 de bancada digital já calibrado.

A condutividade foi medida com a utilização do condutivímetro MS Tecnopon, modelo mCA 150, onde foi feita a calibração mergulhando o eletrodo em uma solução tampão de condutividade já conhecida. A partir do valor obtido de condutividade, o valor de sólidos totais dissolvidos (STD) é determinado a partir da equação:

$$\text{STD} = \text{Condutividade} * 0,64 \quad (\text{Equação 13}) \quad (\text{LIMA, 2017})$$

A alcalinidade foi medida pelo método de titulação automática, no qual se coloca em um béquer 20mL da amostra e um agitador magnético, sobre uma placa de agitação IKA lab disc. Ao béquer, é titulado, de modo automático, H₂SO₄ até que o pH final da solução seja 4,5. Ao atingir esse valor, o aparelho mede a alcalinidade da solução.

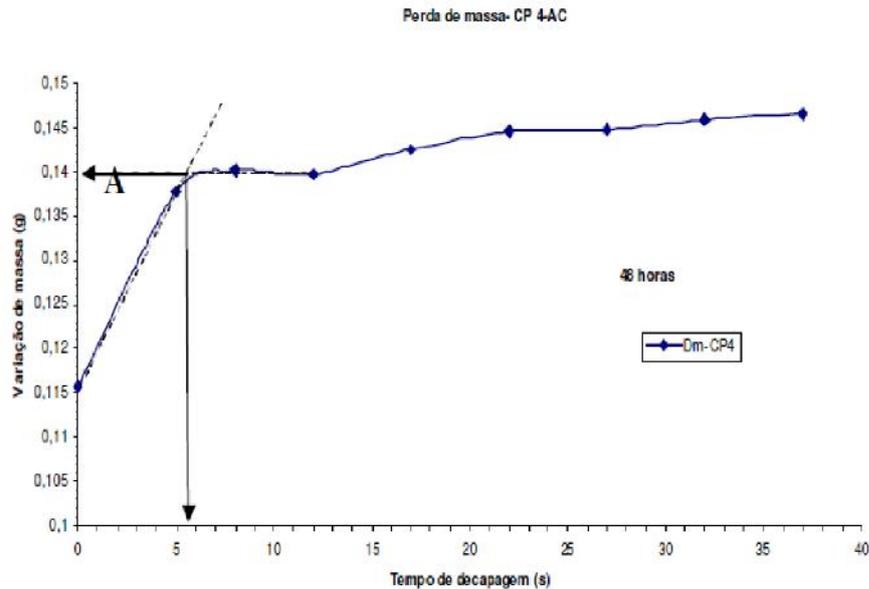
Os cátions e ânions foram medidos utilizando o cromatógrafo Metrohm modelo 930 Compact IC Flex.

3.1.5. Perda de massa

Passados 5 dias de experimento (aproximadamente 120 horas), o experimento foi finalizado, e os corpos de prova foram retirados das células eletroquímicas para a realização da etapa de decapagem do ensaio de perda de massa. Foi retirado da superfície dos corpos de prova o produto de oxidação excedente com o auxílio de um pincel e água corrente, e posteriormente os mesmos foram pesados em triplicata em balança eletrônica analítica Shimadzu modelo ATY224.

Após essa etapa, foi iniciado o processo de decapagem, realizado mergulhando-se um corpo de prova em uma solução de HCl 20% por aproximadamente 5 segundos, lavando o mesmo em seguida em água destilada, secando com um jato de ar quente com auxílio de um secador de cabelo Cadence e anotando a massa obtida. Para o primeiro corpo de prova, é realizado esse processo até a obtenção de massa aproximadamente constante, ensaio este com o intuito de obter o tempo ideal de decapagem que corresponde ao tempo mínimo necessário para que sejam retirados apenas os produtos de corrosão da superfície do metal. O processo é realizado com um corpo de prova retirado de cada uma das quatro células eletroquímicas, onde se encontram as soluções de concentração 10% v/v, 30% v/v, 50% v/v e 100% v/v. Após a identificação do tempo de decapagem, os corpos de prova restantes presentes na célula são decapados diretamente já nesse tempo determinado. A Figura 16 a seguir mostra um exemplo de um gráfico de perda de massa:

Figura 9: Gráfico exemplificando o levantamento do tempo de decapagem no ensaio de perda de massa



Fonte: CARVALHO, 2006.

Como pode ser observado na Figura 9 anterior, o tempo ideal de decapagem é determinado no ponto de interseção entre as duas retas constatadas no gráfico.

À partir da obtenção da massa após a decapagem total, é calculada a taxa de corrosão utilizando a seguinte fórmula:

$$\text{Taxa de Corrosão (mm/ano)} = (K \times DM) / (A \times T \times D) \quad (\text{Equação 15})$$

Onde:

K = $8,76 \times 10^4$ (fator de conversão)

T = tempo de imersão no eletrólito (h)

A = área total do corpo de prova (cm^2)

DM = variação da massa do corpo de prova durante o teste (g) (determinado na curva de decapagem)

D = densidade do metal (g/cm^3) (aço carbono: $7,86 \text{ g/cm}^3$ ou latão: $8,73 \text{ g/cm}^3$)

(CARVALHO, 2006)

O ensaio foi realizado em triplicata para uma análise mais precisa da taxa de corrosão. A partir do resultado calculado para taxa de corrosão, foi feita uma análise de desvio de acordo com o valor intermediário, onde foram excluídos valores iguais ou maiores que 5%. Em geral, o desvio aceitável utilizado para taxas de corrosão é de 10%, porém para

se adotar um caráter mais conservador aos resultados esse percentual tolerável de desvio foi mais restrito.

A interpretação dos valores de taxas de corrosão segue a Tabela 9 a seguir:

Tabela 9: Categorização da Taxa de corrosão para o aço carbono

| Faixa considerada (mm/ano) | Intensidade da corrosão |
|----------------------------|-------------------------|
| < 0,025 | Baixa |
| 0,025 a 0,12 | Moderada |
| 0,13 a 0,25 | Alta |
| > 0,25 | Severa |

Fonte: NACE STANDARD RP0775-2005

Já a Tabela 10 traz a interpretação da corrosividade da água de acordo com os valores de taxa de corrosão considerando o sistema de resfriamento aberto com recirculação de água para o aço carbono e para ligas de cobre:

Tabela 10: Classificação quantitativa da taxa de corrosão (mm/ano) para sistema de resfriamento aberto com recirculação de água

| Descrição | Aço carbono | Ligas de cobre |
|------------------------|----------------------|----------------------|
| Insignificante | < 0,02540 | < 0,00254 |
| Baixa | 0,02540 a 0,07620 | 0,00254 a 0,00635 |
| Baixa a | 0,07620 a | 0,00635 a |
| Moderada | 0,12700 | 0,00889 |
| Moderada | 0,12700 a 0,20320 | 0,00889 a 0,01270 |
| Alta | 0,20320 a 0,25400 | 0,01270 a 0,02540 |
| Muito alta a severa | > 0,25400 | > 0,02540 |

Fonte: BOFFARDI, 2000.

Além da classificação da corrosividade da água, há também um limite máximo aceitável para as taxas de corrosão em sistemas de resfriamento aberto em refinaria para o aço

carbono AISI 1020, cujo valor é de 2 milésimos de polegada por ano ($\cong 0,0508$ mm/ano), e para ligas de cobre, cujo valor é de 0,5 milésimos de polegada por ano ($\cong 0,01270$ mm/ano).

4. Resultados e discussão

4.1. Aço carbono

Os valores obtidos da massa para os CPs de aço carbono 1020 após o jateamento abrasivo estão descritos na Tabela 11 abaixo:

Tabela 11: Massa em triplicata dos corpos de prova de aço carbono e a média calculada

| Concentração v/v | CP (número) | Massa ₁ (g) | Massa ₂ (g) | Massa ₃ (g) | Média das massas (g) | Desvio padrão |
|---------------------|----------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------|
| 10% | 0404 | 10,5468 | 10,5467 | 10,5469 | 10,5468 | 0,0001 |
| | 0407 | 10,4841 | 10,4839 | 10,4838 | 10,48393 | 0,0001 |
| | 0408 | 10,3960 | 10,3961 | 10,3959 | 10,3960 | 0,0001 |
| 30% | 0413 | 9,3928 | 9,3928 | - | 9,3928 | 0 |
| | 0414 | 9,6664 | 9,6666 | - | 9,6665 | 0,0001 |
| | 0416 | 9,8515 | 9,8513 | - | 9,8514 | 0,0001 |
| 50% | 0413 | 9,5169 | 9,5164 | 9,5168 | 9,5167 | 0,0003 |
| | 0414 | 9,7893 | 9,7891 | 9,7890 | 9,78913 | 0,0002 |
| | 0416 | 9,9859 | 9,9860 | 9,9861 | 9,9860 | 0,0001 |
| 100% (branco) | 0243 | 10,8321 | 10,8322 | - | 10,83215 | 0,0001 |
| | 0247 | 10,6921 | 10,6921 | - | 10,6921 | 0 |
| | 0401 | 10,6178 | 10,6178 | - | 10,6178 | 0 |

Fonte: Autor

Algumas pequenas variações nos valores das triplicatas observadas na Tabela 11 podem ser resultados da influência da temperatura local ou da instabilidade da própria balança. Não foi realizada a medida da massa em triplicata para todos os corpos de prova porque os valores resultantes apresentaram um valor semelhante, e, por isso,

para as soluções de 30% e de 50% foi feito apenas duplicata. Há a mesma numeração em dois corpos de prova, porém os experimentos não foram realizados no mesmo dia.

Os valores obtidos das dimensões dos corpos de prova de aço carbono após o jateamento abrasivo estão descritos na Tabela 12 a seguir:

Tabela 12: Dimensões dos corpos de prova de aço carbono

| Concentração v/v | CP (número) | Largura (cm) | Comprimento (cm) | Espessura (cm) | Diâmetro do furo (cm) | Área total (cm ²) |
|---------------------|----------------|-----------------|---------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 10% | 0404 | 1,27 | 7,63 | 0,14 | 0,48 | 20,42 |
| | 0407 | 1,26 | 7,62 | 0,14 | 0,49 | 20,18 |
| | 0408 | 1,27 | 7,62 | 0,14 | 0,49 | 20,33 |
| 30% | 0413 | 1,24 | 7,61 | 0,13 | 0,49 | 19,66 |
| | 0414 | 1,24 | 7,62 | 0,13 | 0,49 | 19,69 |
| | 0416 | 1,25 | 7,61 | 0,13 | 0,49 | 19,82 |
| 50% | 0413 | 1,25 | 7,62 | 0,13 | 0,50 | 19,78 |
| | 0414 | 1,27 | 7,61 | 0,13 | 0,50 | 20,07 |
| | 0416 | 1,26 | 7,62 | 0,13 | 0,49 | 20,00 |
| 100% | 0243 | 1,26 | 7,63 | 0,15 | 0,48 | 20,45 |
| | 0247 | 1,28 | 7,66 | 0,14 | 0,49 | 20,60 |
| | 0401 | 1,26 | 7,63 | 0,15 | 0,49 | 20,39 |

Fonte: Autor

Como pode ser observado na Tabela 12, os valores das áreas dos CPs são próximos, o que permite a comparação entre os corpos de prova e inferir que os mesmos apresentarão uma exposição semelhante.

Os resultados dos parâmetros pH, condutividade e alcalinidade obtidos antes do mergulho dos corpos de prova para as soluções a 10%, 30%, 50% e 100% v/v de água de reúso estão descritos na Tabela 13 a seguir:

Tabela 13: Parâmetros químicos e físico-químicos obtidos das soluções para o ensaio com aço carbono

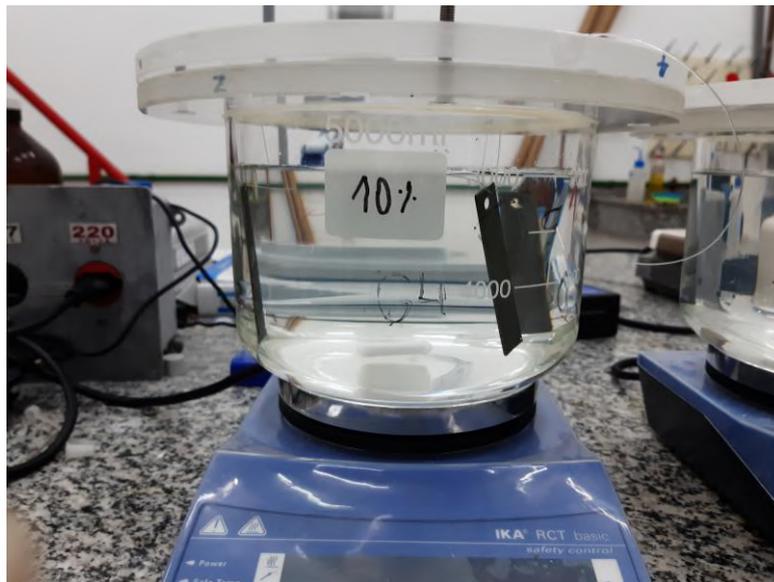
| Solução | pH | Condutividade (uS/cm) a 25°C | Alcalinidade (mg/L de CaCO ₃) | STD (Eq. 14) | [Cl ⁻] (meq/L) | [SO ₄ ²⁻] (meq/L) | [HCO ₃ ⁻] (meq/L) |
|---------|-----|---------------------------------|---|-----------------|-------------------------------|---|---|
| 10% | 7,7 | 86,13 | 14,487 | 55,123 | 0,115 | 0,117 | 1,723 |
| 30% | 8,7 | 233,6 | 37,419 | 141,056 | 0,577 | 0,336 | 4,609 |
| 50% | 8,1 | 374,8 | 41,043 | 239,872 | 1,608 | 0,613 | 7,499 |
| Branco | 8,4 | 855,2 | 83,374 | 547,328 | 3,217 | 1,231 | 17,110 |

Fonte: Autor

Como pode ser observado na Tabela 13, os parâmetros de condutividade (e por consequência o STD), alcalinidade, concentração de cloreto, sulfato e bicarbonato aumentaram de acordo com o aumento da concentração da solução.

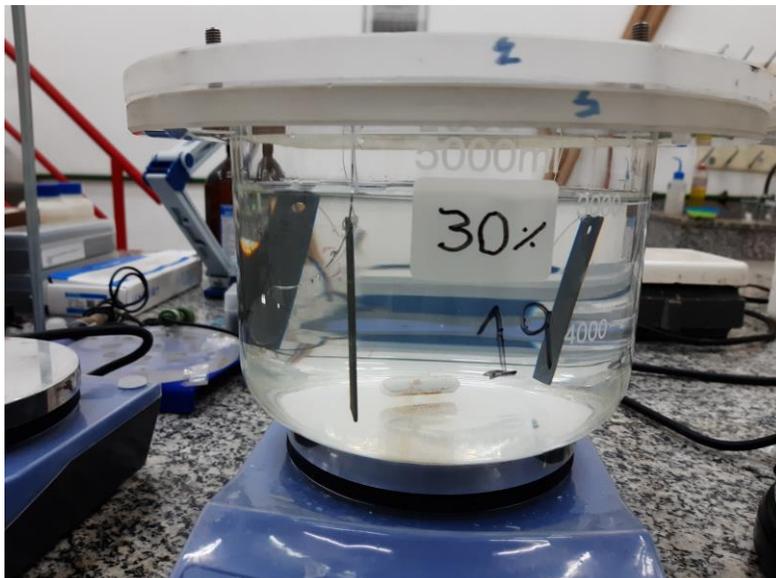
As Figuras 10 à 12 à seguir trazem a configuração do sistema já montado no início do ensaio (t = 0h), e as Figuras 13 à 15 mostram as condições após 120 horas.

Figura 10: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de aço carbono (t = 0h) na solução de água sintética de concentração 10% v/v



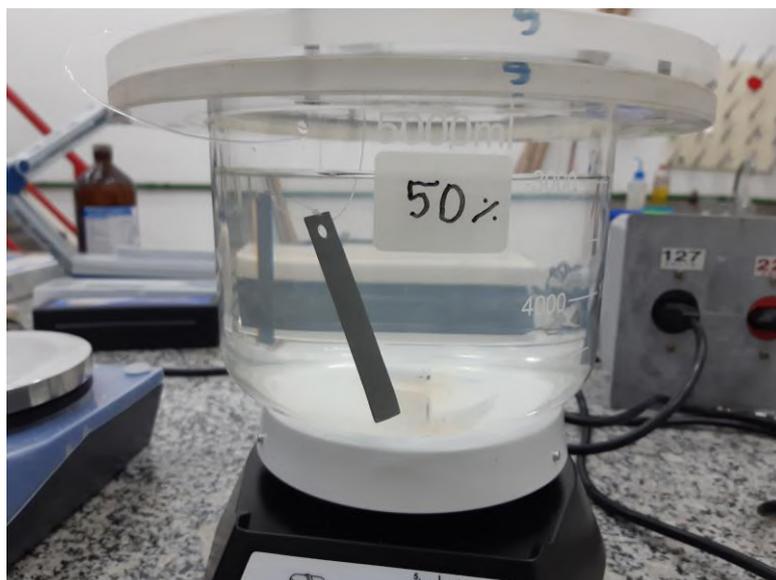
Fonte: Autor

Figura 11: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de aço carbono ($t = 0h$) na solução de água sintética de concentração 30% v/v



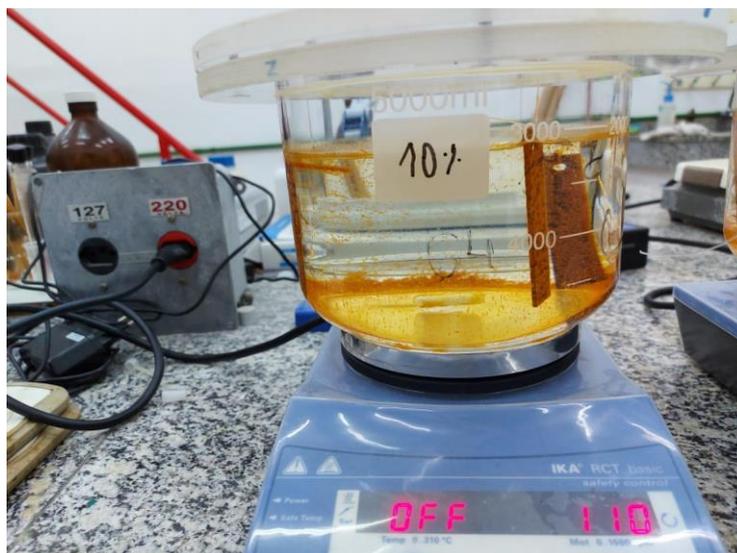
Fonte: Autor

Figura 12: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de aço carbono ($t = 0h$) na solução de água sintética de concentração à 50% v/v



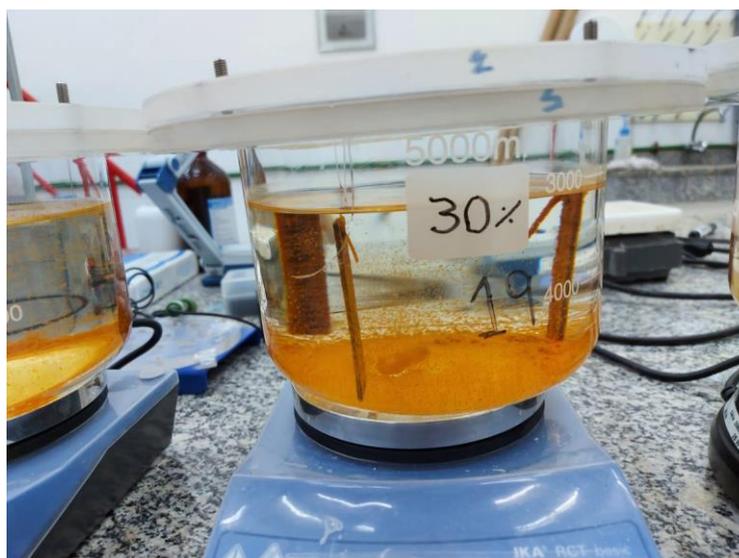
Fonte: Autor

Figura 13: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética de concentração 10% v/v na finalização do experimento de perda de massa (120h) com aço carbono



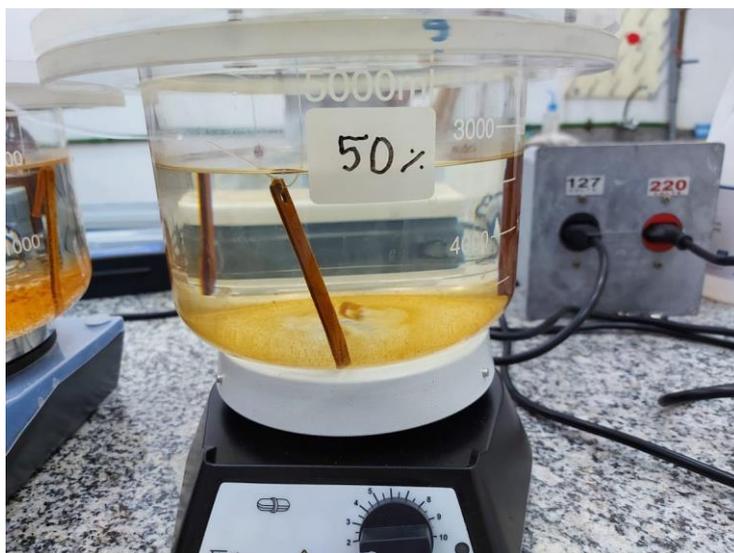
Fonte: Autor

Figura 14: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética de concentração 30% v/v na finalização do experimento de perda de massa (120h) com aço carbono



Fonte: Autor

Figura 15: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética de concentração 50% v/v na finalização do experimento de perda de massa (120h) com aço carbono



Fonte: Autor

É observado nas Figuras 13 a 15 que a solução de 50% aparenta ser a menos corrosiva das demais enquanto as soluções de 10 e 30% aparentam ser mais agressivas entre as três concentrações, devido a quantidade de produto de corrosão observado sobre corpo de prova e também observada no fundo da célula eletroquímica. Não foi possível obter fotografias na condição de solução branco por conta de problemas técnicos, porém, era possível observar que a solução também apresentava uma grande quantidade de produto de oxidação.

As Figuras 16 à 18 a seguir mostram as fotografias dos corpos de prova antes da decapagem e as Figuras 19 à 21 após a decapagem, onde é observada a quantidade do produto de corrosão acumulado durante o ensaio e o estado superficial dos corpos de prova após a retirada do mesmo através do procedimento de decapagem:

Figura 16: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução de concentração 10% v/v no ensaio com aço carbono



Fonte: Autor

Figura 17: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução de concentração 30% v/v no ensaio com aço carbono



Fonte: Autor

Figura 18: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução de concentração 50% v/v no ensaio com aço carbono



Fonte: Autor

Figura 19: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução de concentração 10% v/v no ensaio com aço carbono



Fonte: Autor

Figura 20: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução de concentração 30% v/v no ensaio com aço carbono



Fonte: Autor

Figura 21: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução de concentração 50% v/v no ensaio com aço carbono



Fonte: Autor

4.1.1. Resultados de Perda de massa para o aço carbono:

4.1.1.1. Procedimento de decapagem para a solução “branco”

No ensaio de perda de massa para a solução branco, o tempo de decapagem ideal foi determinado utilizando-se o corpo de prova “0243”, onde foram observados os valores mostrados na Tabela 14 a seguir:

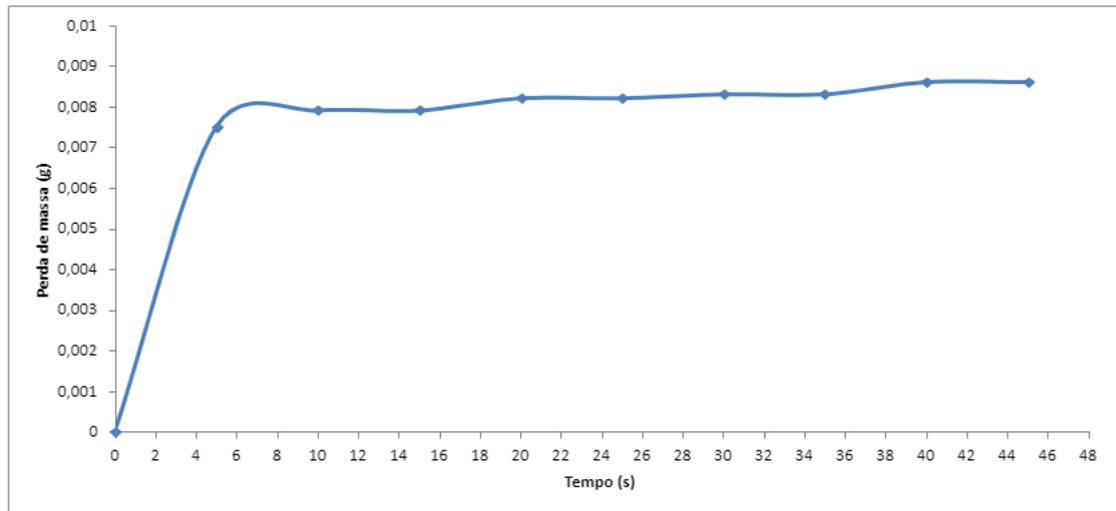
Tabela 14: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0243 de aço carbono

| Tempo (s) | Massa (g) |
|-----------|-----------|
| 0 | 10,7468 |
| 5 | 10,7393 |
| 10 | 10,7389 |
| 15 | 10,7389 |
| 20 | 10,7386 |
| 25 | 10,7386 |
| 30 | 10,7385 |
| 35 | 10,7385 |
| 40 | 10,7382 |
| 45 | 10,7382 |

Fonte: Autor

A Figura 22 a seguir traz o gráfico obtido para o ensaio de perda de massa para o corpo de prova 0243:

Figura 22:Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0243 de aço carbono



Fonte: Autor

Como pode ser observado na Figura 22, o tempo ideal de decapagem é de aproximadamente 5 segundos e este tempo foi utilizado para os outros dois corpos de prova para obter as massas e a taxa de corrosão de acordo com a Tabela 15 a seguir:

Tabela 15: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução branco após a decapagem

| Corpo de prova (número) | Massa obtida (g) | Taxa de corrosão (mm/ano) |
|-------------------------|------------------|---------------------------|
| 0143 | 10,7393 | 0,4106 |
| 0247 | 10,6145 | 0,3432 |
| 0401 | 10,5241 | 0,4144 |

Fonte: Autor

Como pode ser observado na Tabela 15, o CP 0247 apresentou um valor um 16 % menor que os outros dois, e, portanto, foi descartado na obtenção da média de taxa de corrosão calculada em 0,4125 mm/ano. Como pode-se observar, o resultado médio da taxa obtido mostrou-se bem superior ao limite máximo permitido em sistemas de resfriamento aberto em refinarias para aço carbono conforme mencionado no item 3.1.5.

4.1.1.2. Procedimento de decapagem para a solução de concentração 10% v/v

No ensaio de perda de massa para a solução de concentração 10% v/v, o tempo de decapagem ideal foi determinado utilizando o corpo de prova “0404”, onde foram observados os valores mostrados na Tabela 16 a seguir:

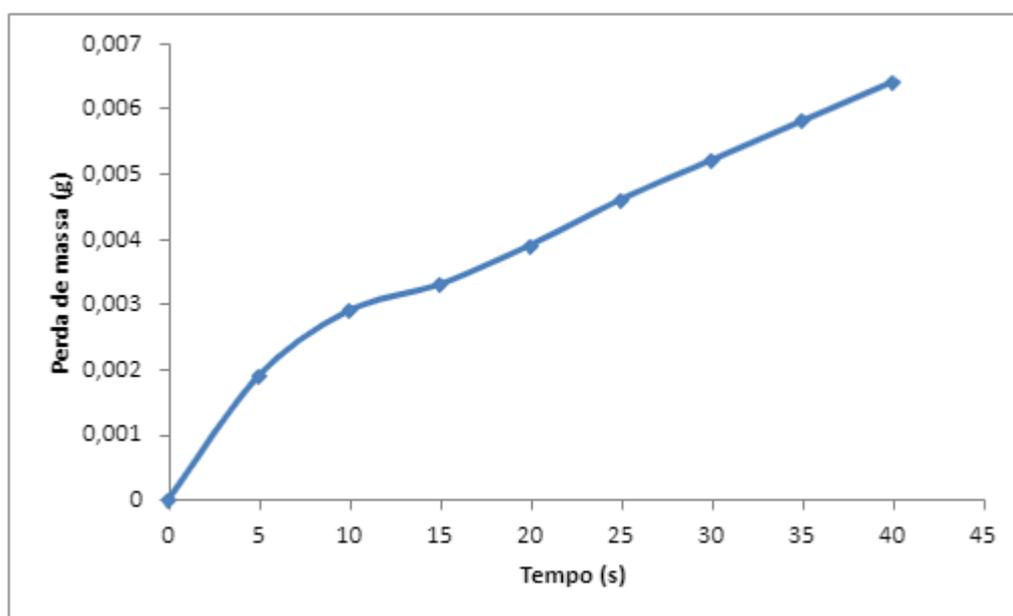
Tabela 16: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0404 de aço carbono

| Tempo (s) | Massa (g) |
|-----------|-----------|
| 0 | 10,4413 |
| 5 | 10,4394 |
| 10 | 10,4384 |
| 15 | 10,4380 |
| 20 | 10,4374 |
| 25 | 10,4367 |
| 30 | 10,4361 |
| 35 | 10,4355 |
| 40 | 10,4349 |

Fonte: Autor

A Figura 23 a seguir traz o gráfico do ensaio de perda de massa para o corpo de prova 0404:

Figura 23: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0404 de aço carbono



Fonte: Autor

Como pode ser observado na Figura 23, não se obteve um patamar constante após a subida inicial dos valores de massa, devido a problemas de estabilização da balança analítica, então foi considerado o momento em que a variação de massa diminuiu apresentando uma leve inflexão no gráfico. Com isso, conseguiu-se calcular o tempo de decapagem ideal, que foi tomado como sendo de aproximadamente 13 segundos.

A Tabela 17 a seguir traz os valores das massas obtidas além dos valores de taxa de corrosão calculados após a decapagem e as taxas de corrosão na condição de 10% v/v:

Tabela 17: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução de 10% após a decapagem

| Corpo de prova (número) | Massa obtida (g) | Taxa de corrosão (mm/ano) |
|-------------------------|------------------|---------------------------|
| 0404 | 10,4382 | 0,4803 |
| 0407 | 10,3868 | 0,4296 |
| 0408 | 10,2799 | 0,3808 |

Fonte: Autor

Como pode ser observado na Tabela 17, os valores da taxa de corrosão obtidas foram um pouco destoantes entre si. Considerando os dois valores mais próximos entre si (CP

0407 e 0408) e, portanto, excluindo o resultado obtido do CP 0404, a taxa de corrosão média obtida foi de 0,4052 mm/ano. O resultado médio da taxa obtido também foi superior ao limite máximo permitido em sistemas de resfriamento aberto em refinarias para aço carbono como mencionado no item 3.1.5.

4.1.1.3. Procedimento de decapagem para a solução de concentração 30% v/v

No ensaio de perda de massa para a solução à 30%, o tempo de decapagem ideal foi determinado utilizando o corpo de prova “0416”, onde foram observados os valores mostrados na Tabela 18 a seguir:

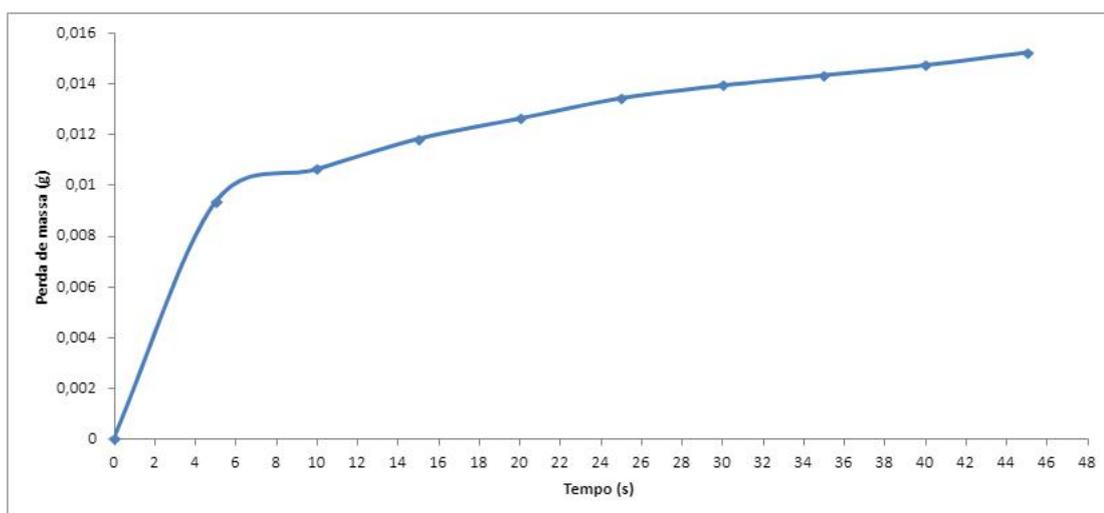
Tabela 18: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0416 de aço carbono

| Tempo (s) | Massa (g) |
|-----------|-----------|
| 0 | 9,7385 |
| 5 | 9,7292 |
| 10 | 9,7279 |
| 15 | 9,7267 |
| 20 | 9,7259 |
| 25 | 9,7251 |
| 30 | 9,7246 |
| 35 | 9,7242 |

Fonte: Autor

A Figura 24 a seguir traz o gráfico obtido para o ensaio de perda de massa para o corpo de prova 0416:

Figura 24: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0416 de aço carbono



Fonte: Autor

Como pode ser observado na Figura 31, o tempo ideal de decapagem é de aproximadamente 7 segundos, e este tempo foi utilizado para os outros dois corpos de prova para obter as massas e os valores de taxa de corrosão de acordo com a Tabela 19 a seguir:

Tabela 19: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução de 30% após a decapagem

| Corpo de prova (número) | Massa obtida (g) | Taxa de corrosão (mm/ano) |
|-------------------------|------------------|---------------------------|
| 0413 | 9,2777 | 0,5090 |
| 0414 | 9,5415 | 0,5528 |
| 0416 | 9,7285 | 0,5435 |

Fonte: Autor

Como pode ser observado na Tabela 19, a taxa de corrosão para o CP 0413 foi 7,5 a 8% menor que os demais, sendo, portanto, excluído do cálculo da média, gerando um valor médio de 0,5482 mm/ano de taxa de corrosão. Análogo aos anteriores, esse resultado médio da taxa obtido mostrou-se superior ao limite máximo permitido em sistemas de resfriamento aberto em refinarias para aço carbono conforme mencionado no item 3.1.5.

4.1.1.4. Procedimento de decapagem para a solução de concentração 50% v/v

No ensaio de perda de massa para a solução 50%, o tempo de decapagem ideal foi determinado utilizando-se o corpo de prova “0414”, onde foram observados os valores mostrados na Tabela 20 a seguir:

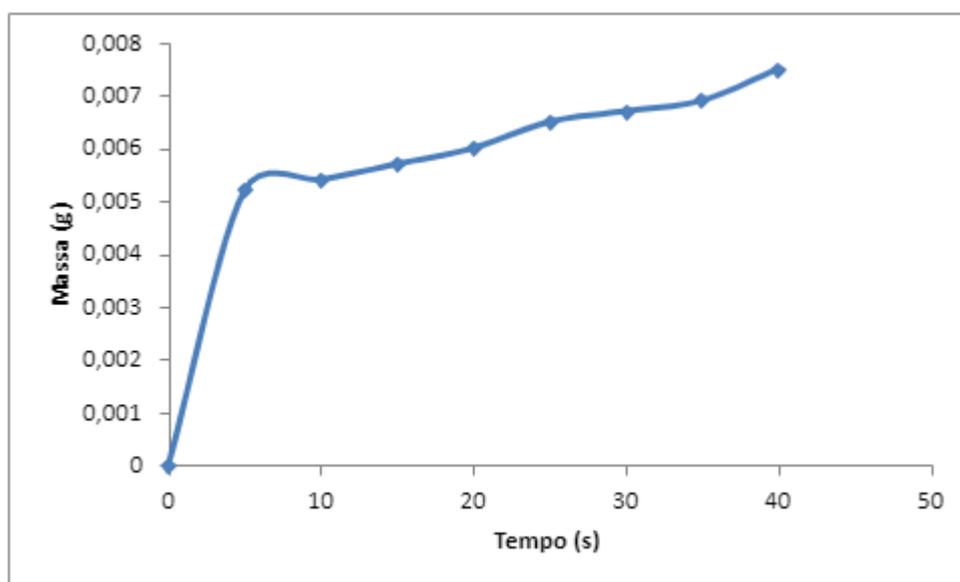
Tabela 20: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0414 de aço carbono

| Tempo (s) | Massa (g) |
|-----------|-----------|
| 0 | 9,7129 |
| 5 | 9,7077 |
| 10 | 9,7075 |
| 15 | 9,7072 |
| 20 | 9,7069 |
| 25 | 9,7064 |
| 30 | 9,7062 |
| 35 | 9,7060 |
| 40 | 9,7054 |

Fonte: Autor

A Figura 25 a seguir traz o gráfico do ensaio de perda de massa do corpo de prova 0414:

Figura 25: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0414 de aço carbono



Fonte: Autor

O tempo de decapagem calculado a partir do gráfico da Figura 25 foi de 5 segundos, e, este tempo foi utilizado para os outros dois corpos de prova para obter as massas e a taxa de corrosão (calculada com a Equação 15) de acordo com a Tabela 21 a seguir:

Tabela 21: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução 50% após a decapagem

| Corpo de prova (número) | Massa obtida (g) | Taxa de corrosão (mm/ano) |
|-------------------------|------------------|---------------------------|
| 0413 | 9,4375 | 0,3503 |
| 0414 | 9,7077 | 0,3601 |
| 0416 | 9,9035 | 0,3649 |

Fonte: Autor

Os valores obtidos na Tabela 21 para taxa de corrosão resultou em uma média de 0,3584 mm/ano. Aqui, como verificado para o branco e para as outras soluções, o resultado obtido apresentou um valor superior ao limite máximo permitido em sistemas de resfriamento aberto em refinarias para aço carbono como mencionado no item 3.1.5.

4.2. Latão

Os valores obtidos da massa para os corpos de prova de latão após o jateamento abrasivo estão descritos na Tabela 22 a seguir:

Tabela 22: Massa em duplicata dos corpos de prova de latão e a média calculada

| CP (número) | Massa 1 (g) | Massa 2 (g) | Média das massas (g) | Concentração v/v |
|-------------|-------------|-------------|----------------------|------------------|
| 0078 | 11,7150 | 11,7148 | 11,7149 | |
| 0235 | 11,7560 | 11,7558 | 11,7589 | 100% |
| 0236 | 11,8143 | 11,8142 | 11,81425 | |
| 0094 | 11,8260 | 11,8256 | 11,8258 | |
| 0095 | 11,7988 | 11,7988 | 11,7988 | 10% |
| 0233 | 11,8103 | 11,8101 | 11,8102 | |
| 0238 | 11,7397 | 11,7395 | 11,7396 | |
| 0239 | 11,8247 | 11,8247 | 11,8247 | 30% |
| 0240 | 11,7498 | 11,7498 | 11,7498 | |
| 0080 | 11,6650 | 11,6650 | 11,6650 | |
| 0093 | 11,6418 | 11,6417 | 11,64175 | 50% |
| 0237 | 11,7977 | 11,7979 | 11,7978 | |

Fonte: Autor

Os valores obtidos das dimensões dos corpos de prova de latão após o jateamento abrasivo estão descritos na Tabela 23 abaixo:

Tabela 23: Dimensões dos corpos de prova de latão

| CP (número) | Largura (cm) | Comprimento (cm) | Espessura (cm) | Diâmetro do furo (cm) | Área total (cm ²) |
|----------------|-----------------|---------------------|-------------------|--------------------------|----------------------------------|
| 0078 | 1,26 | 7,63 | 0,14 | 0,49 | 20,21 |
| 0235 | 1,27 | 7,62 | 0,14 | 0,49 | 20,33 |
| 0236 | 1,25 | 7,65 | 0,14 | 0,49 | 20,11 |
| 0094 | 1,26 | 7,62 | 0,15 | 0,49 | 20,36 |
| 0095 | 1,27 | 7,62 | 0,15 | 0,49 | 20,51 |
| 0233 | 1,27 | 7,62 | 0,15 | 0,49 | 20,51 |
| 0238 | 1,28 | 7,62 | 0,15 | 0,49 | 20,67 |
| 0239 | 1,28 | 7,62 | 0,15 | 0,50 | 20,61 |
| 0240 | 1,26 | 7,62 | 0,15 | 0,50 | 20,30 |
| 0080 | 1,26 | 7,62 | 0,14 | 0,49 | 20,18 |
| 0093 | 1,27 | 7,62 | 0,14 | 0,50 | 20,27 |
| 0237 | 1,26 | 7,61 | 0,15 | 0,49 | 20,33 |

Fonte: Autor

Como pode ser observado na Tabela 23, os valores das áreas dos CPs são próximos, o que permite a comparação entre os corpos de prova e inferir que os mesmos apresentarão uma exposição semelhante.

Os resultados dos parâmetros pH, condutividade e alcalinidade obtidos para o branco e para as soluções de concentrações 10%, 30% e 50% de água de reúso estão apresentados na Tabela 24:

Tabela 24: Parâmetros químicos e físico-químicos obtidos das soluções para o ensaio com latão

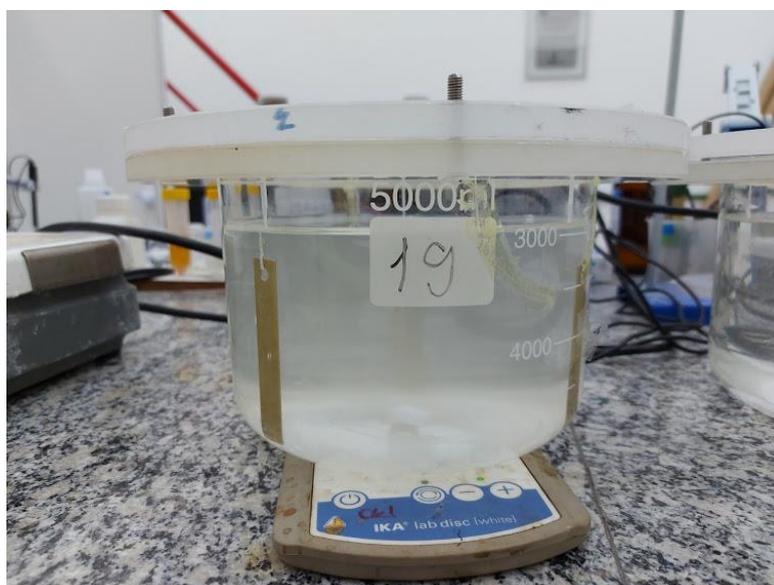
| Solução | pH | Condutividade (uS/cm) a 25°C | Alcalinidade (mg/L de CaCO ₃) | STD (Eq. 14) | [Cl ⁻] (meq/L) | [SO ₄ ²⁻] (meq/L) | [HCO ₃ ⁻] (meq/L) |
|---------|-----|------------------------------------|---|-----------------|-------------------------------|---|---|
| 10% | 7,9 | 99,6 | 51,530 | 63,763 | 0,371 | 0,146 | 1,993 |
| 30% | 8,0 | 272,5 | 57,876 | 174,40 | 0,976 | 0,378 | 5,452 |
| 50% | 8,0 | 436,3 | 64,265 | 279,23 | 1,603 | 0,623 | 8,723 |
| Branco | 8,1 | 827,5 | 87,628 | 526,60 | 2,143 | 1,122 | 16,557 |

Fonte: Autor

Como pode ser observado na Tabela 24, os parâmetros obtidos seguiram um padrão de acordo com a concentração da solução. É possível observar também, ao comparar a Tabela 24 e a Tabela 13, uma diferença considerável em alguns parâmetros, como a condutividade por exemplo. Tal diferença pode se originar do fato da solução mãe de água sintética feita para o experimento do latão não ser exatamente igual a solução mãe feita para o aço carbono.

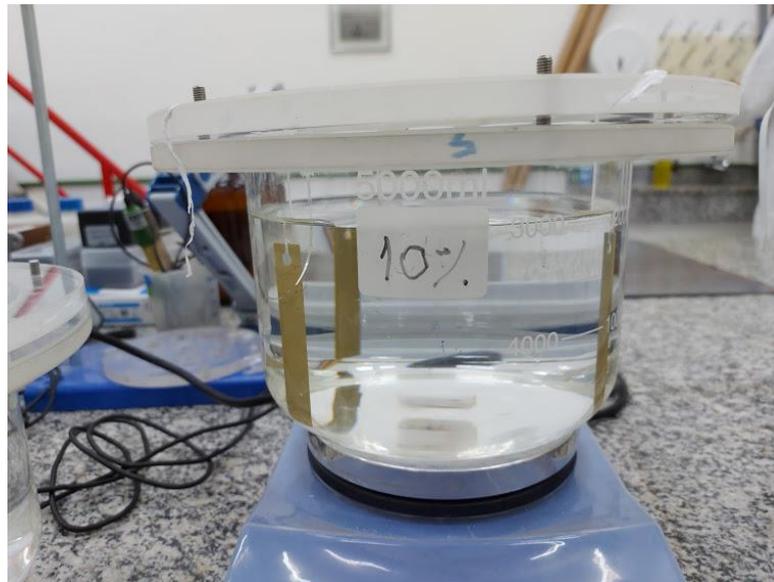
As Figuras 26 à 29 à seguir trazem a configuração do sistema já montado no início do ensaio (t = 0h), e as Figuras 30 à 33 mostram as condições após 120 horas.

Figura 26: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de latão (t = 0h) na solução de água sintética branco



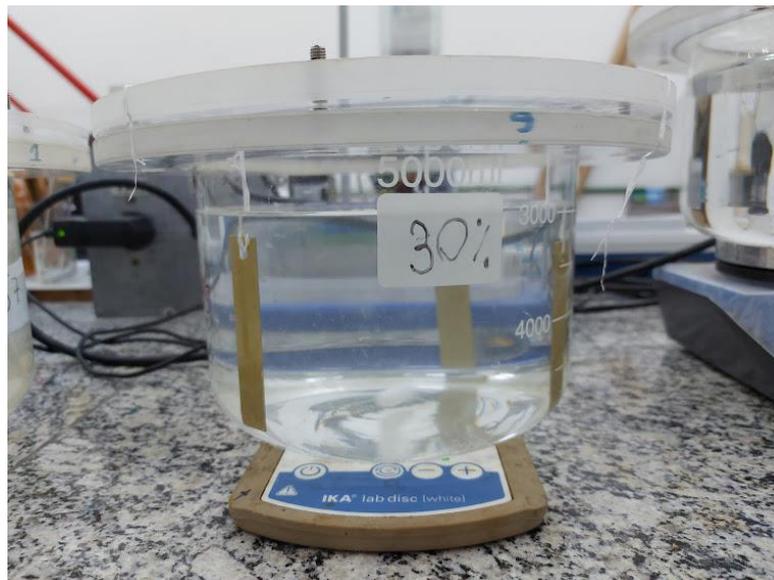
Fonte: Autor

Figura 27: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de latão ($t = 0h$) na solução de água sintética de concentração 10% v/v



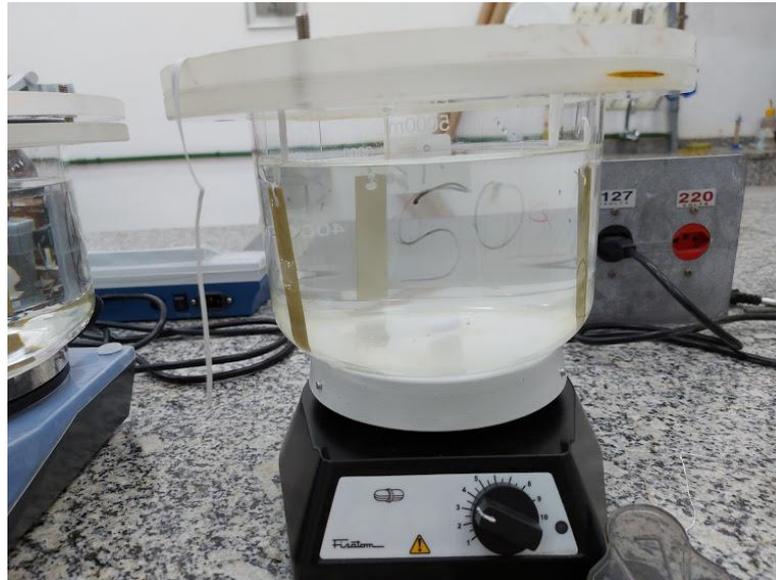
Fonte: Autor

Figura 28: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de latão ($t = 0h$) na solução de água sintética de concentração 30% v/v



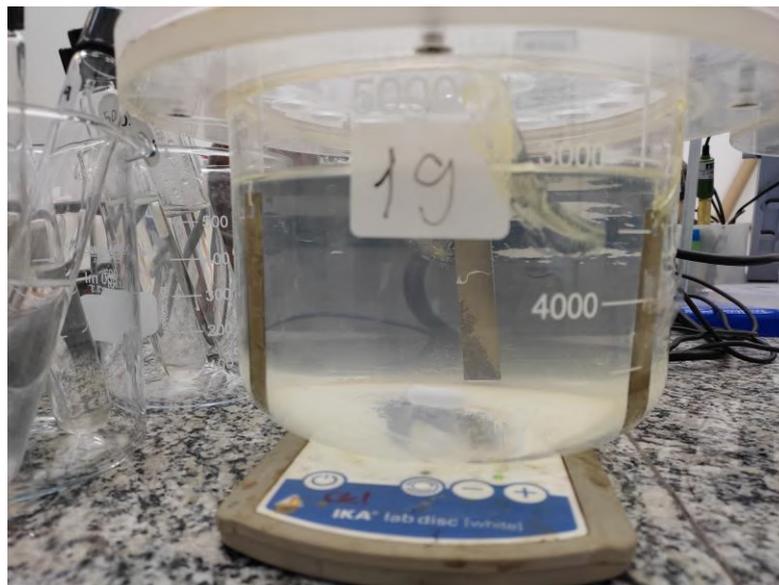
Fonte: Autor

Figura 29: Foto da cuba logo após o mergulho dos corpos de prova de latão ($t = 0h$) na solução de água sintética de concentração 50% v/v



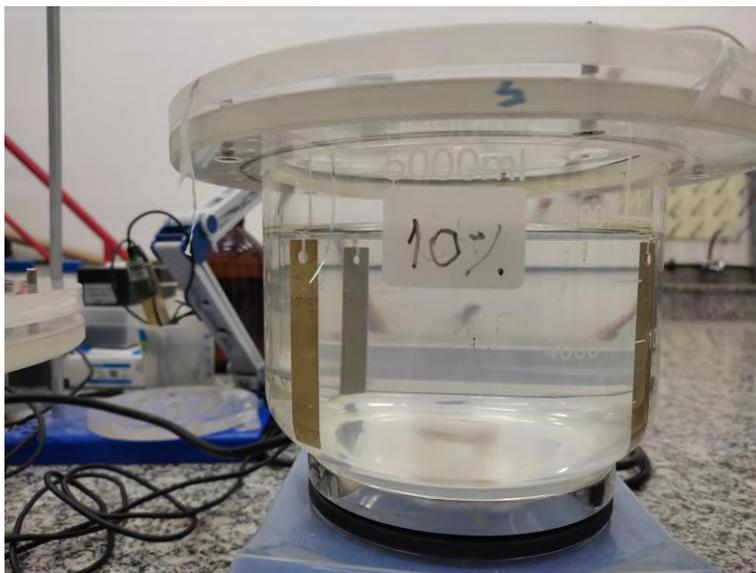
Fonte: Autor

Figura 30: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética branco na finalização do experimento de perda de massa (120h) com latão



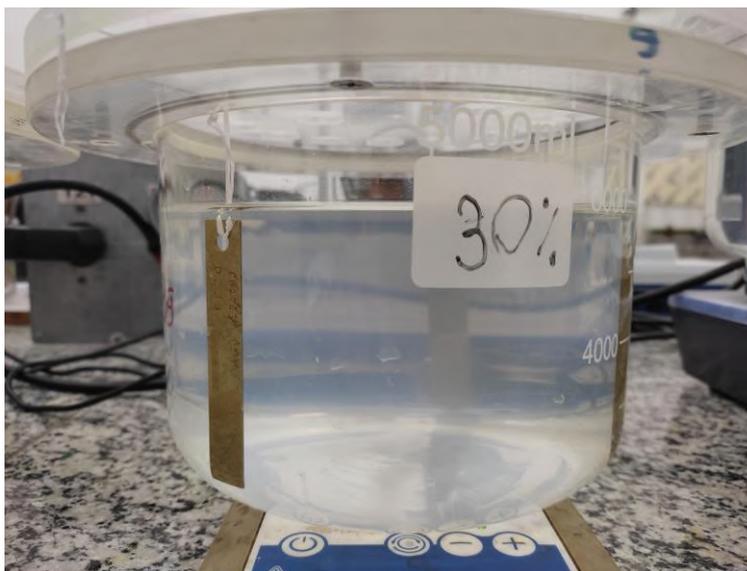
Fonte: Autor

Figura 31: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética de concentração 10% v/v na finalização do experimento de perda de massa (120h) latão



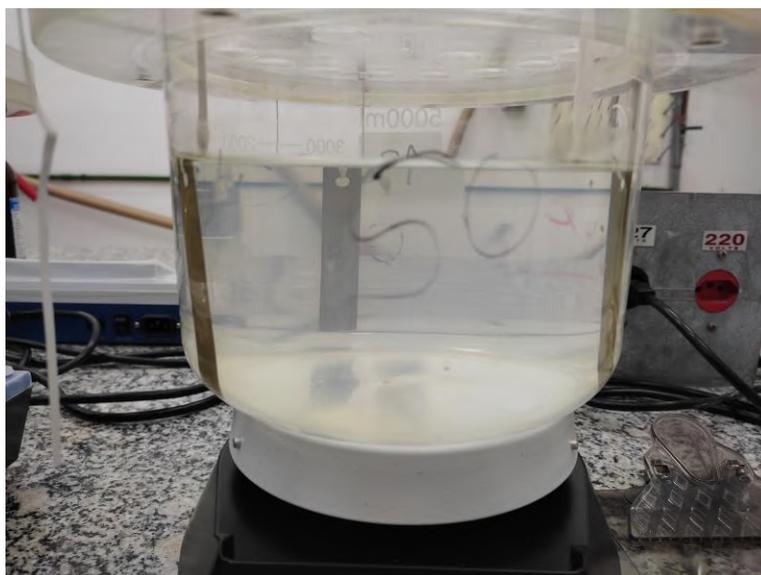
Fonte: Autor

Figura 32: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética de concentração 30% v/v na finalização do experimento de perda de massa (120h) com latão



Fonte: Autor

Figura 33: Condição visual dos corpos de prova na solução de água sintética de concentração 50% v/v na finalização do experimento de perda de massa (120h) com latão



Fonte: Autor

É possível observar a partir das Figuras 30 a 33 que as células eletroquímicas estavam com aspecto visual parecido, e, portanto, espera-se que as taxas de corrosão sejam parecidas.

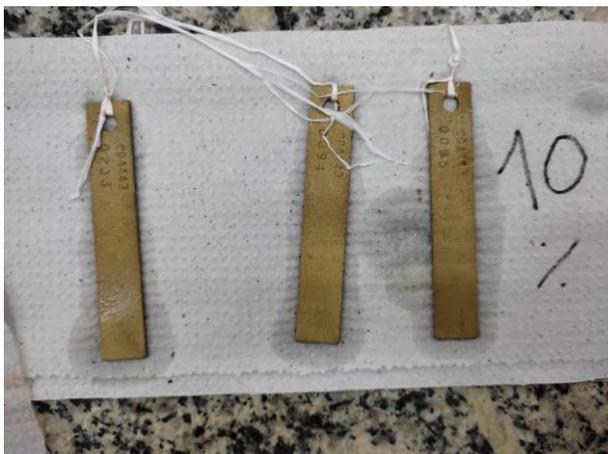
As Figuras 34 a 37 a seguir mostram as fotografias dos corpos de prova antes da decapagem em todas as condições e as Figuras 38 a 41 mostram as fotografias dos corpos de prova após a decapagem em todas as condições:

Figura 34: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução branco no ensaio com latão



Fonte: Autor

Figura 35: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução de concentração 10% v/v no ensaio com latão



Fonte: Autor

Figura 36: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução de concentração 30% v/v no ensaio com latão



Fonte: Autor

Figura 37: Foto dos corpos de prova, antes da decapagem, na solução de concentração 50% v/v no ensaio com latão



Fonte: Autor

Figura 38: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução branco no ensaio com latão



Fonte: Autor

Figura 39: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução de concentração 10% v/v no ensaio com latão



Fonte: Autor

Figura 40: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução de concentração 30% v/v no ensaio com latão



Fonte: Autor

Figura 41: Foto dos corpos de prova, após a decapagem, na solução de concentração 50% v/v no ensaio com latão



Fonte: Autor

É possível observar nas Figuras 34 a 37 que há uma baixa formação de produto de corrosão na superfície do corpo de prova, tanto que após a decapagem, o mesmo aparenta estar nas mesmas condições de início do ensaio (observado na Figura 8).

4.2.1. Resultados de Perda de massa para o latão:

4.2.1.1. Procedimento de decapagem para a solução “branco”

No ensaio de perda de massa para o branco, o tempo de decapagem ideal foi determinado utilizando-se o corpo de prova “0235”, onde foram constatados os seguintes valores descritos na Tabela 25 a seguir:

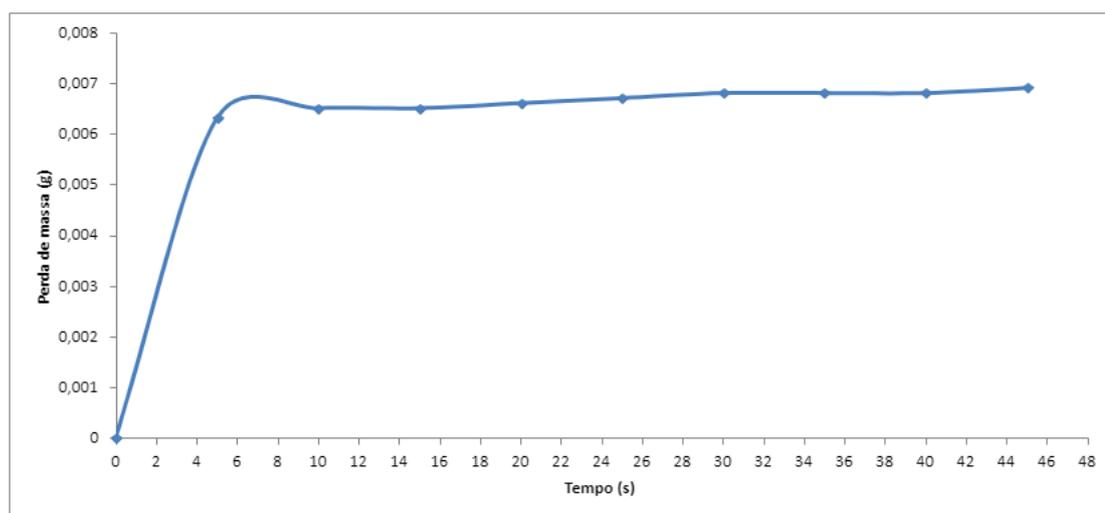
Tabela 25: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0235 de latão

| Tempo (s) | Massa (g) |
|-----------|-----------|
| 0 | 11,7547 |
| 5 | 11,7484 |
| 10 | 11,7482 |
| 15 | 11,7482 |
| 20 | 11,7481 |
| 25 | 11,7480 |
| 30 | 11,7479 |
| 35 | 11,7479 |
| 40 | 11,7479 |
| 45 | 11,7478 |

Fonte: Autor

A Figura 42 a seguir traz o gráfico obtido para o ensaio de perda de massa do corpo de prova 0235

Figura 42: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0235 de latão



Fonte: Autor

A partir do gráfico obtido na Figura 42, observa-se que o tempo de decapagem é de 5 segundos e, este tempo foi utilizado para os outros dois corpos de prova para obter as massas e taxa de corrosão de acordo com a Tabela 26 a seguir:

Tabela 26: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução branco após a decapagem

| Corpo de prova (número) | Massa obtida (g) | Taxa de corrosão (mm/ano) |
|-------------------------|------------------|---------------------------|
| 0078 | 11,7077 | 0,0287 |
| 0235 | 11,7484 | 0,0301 |
| 0236 | 11,8067 | 0,0287 |

Fonte: Autor

Considerando os valores da Tabela 26, é possível observar que os corpos de prova 0078 e 0236 obtiveram o mesmo valor para a taxa de corrosão, e mesmo que o resultado do CP 0235 tenha sido próximo, esse valor foi desconsiderado no cálculo da média da taxa de corrosão, que foi de 0,0287 mm/ano. Esse valor, contudo, é superior ao limite máximo para a taxa de corrosão em sistemas de resfriamento aberto em refinarias para ligas de cobre como mencionado no item 3.1.5.

4.2.1.2. Procedimento de decapagem para a solução de concentração 10% v/v

No ensaio de perda de massa para a solução de 10%, o tempo de decapagem ideal foi determinado utilizando-se o corpo de prova “0094”. Os valores obtidos são mostrados na Tabela 27 a seguir:

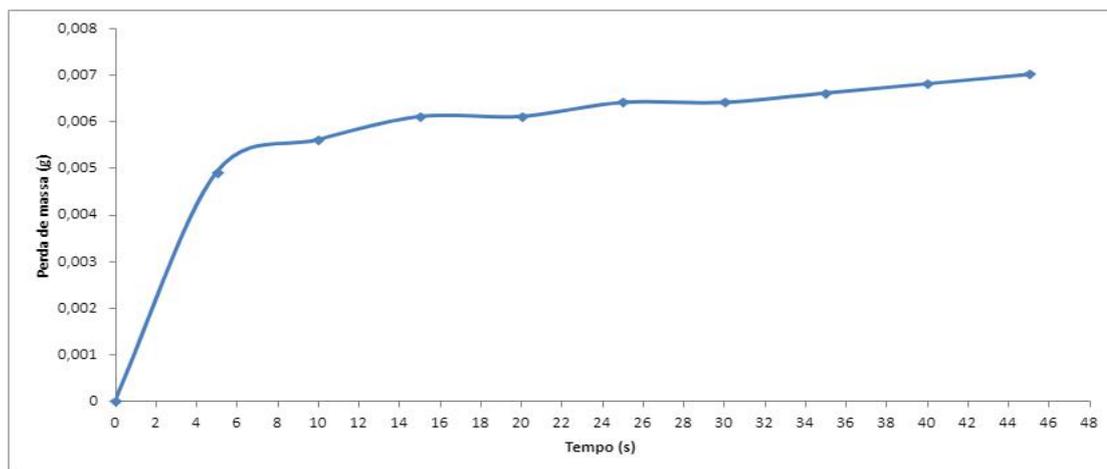
Tabela 27: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0094 de latão

| Tempo (s) | Massa (g) |
|-----------|-----------|
| 0 | 11,8247 |
| 5 | 11,8198 |
| 10 | 11,8191 |
| 15 | 11,8186 |
| 20 | 11,8186 |
| 25 | 11,8183 |
| 30 | 11,8183 |
| 35 | 11,8181 |
| 40 | 11,8179 |
| 45 | 11,8177 |

Fonte: Autor

A Figura 43 a seguir mostra o gráfico obtido no ensaio de perda de massa para o corpo de prova 0094:

Figura 43: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0094 de latão



Fonte: Autor

A partir do gráfico mostrado na Figura 43, observa-se que o tempo de decapagem é de 6 segundos e, este tempo foi utilizado para os outros dois corpos de prova para obter as massas e taxa de corrosão de acordo com a Tabela 28 a seguir:

Tabela 28: Massa dos corpos de prova na solução de 10% após a decapagem e a taxa de corrosão calculada

| Corpo de prova (número) | Massa obtida (g) | Taxa de corrosão (mm/ano) |
|-------------------------|------------------|---------------------------|
| 0094 | 11,8194 | 0,0287 |
| 0095 | 11,7928 | 0,0275 |
| 0233 | 11,8047 | 0,0251 |

Fonte: Autor

De acordo com os resultados das taxas de corrosão obtidas na Tabela 28, é possível observar que o valor obtido para o CP 0233 foi ligeiramente destoante dos demais, e, portanto, desconsiderado no cálculo da média resultante, que foi de 0,0281 mm/ano. Esse valor, mais uma vez, é superior ao limite máximo para a taxa de corrosão em sistemas de resfriamento aberto em refinarias para ligas de cobre conforme mencionado no item 3.1.5..

4.2.1.3. Procedimento de decapagem para a solução de concentração 30% v/v

No ensaio de perda de massa para a solução de 30% v/v, o tempo de decapagem ideal foi determinado utilizando-se o corpo de prova “0239”, sendo observados os valores de massa descritos na Tabela 29 a seguir:

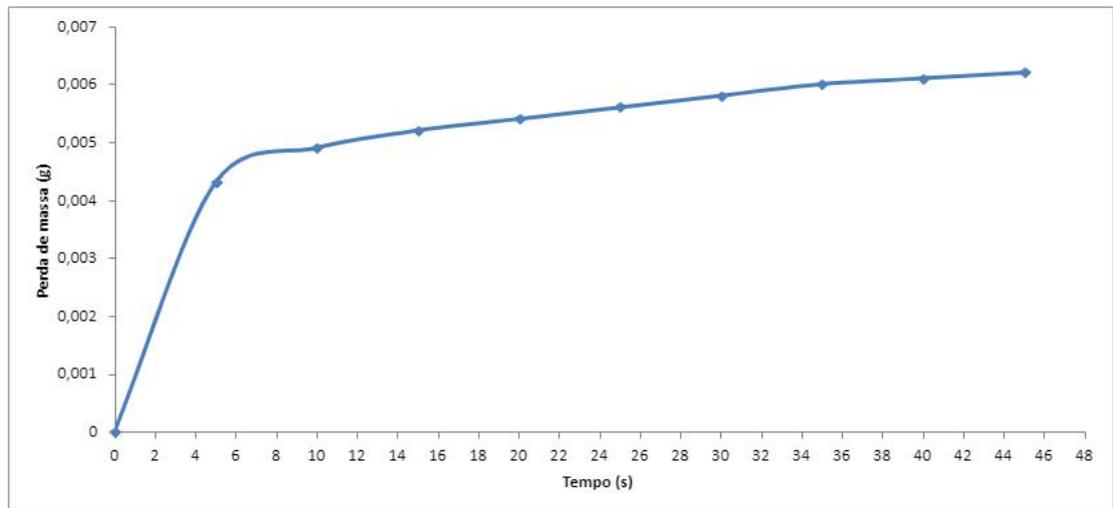
Tabela 29: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0239 de latão

| Tempo (s) | Massa (g) |
|-----------|-----------|
| 0 | 11,8234 |
| 5 | 11,8191 |
| 10 | 11,8185 |
| 15 | 11,8182 |
| 20 | 11,8180 |
| 25 | 11,8178 |
| 30 | 11,8176 |
| 35 | 11,8174 |
| 40 | 11,8173 |
| 45 | 11,8172 |

Fonte: Autor

A Figura 44 a seguir traz o gráfico do ensaio de perda de massa do corpo de prova 0239:

Figura 44: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0239 de latão



Fonte: Autor

A partir do gráfico mostrado na Figura 44, observa-se que o tempo de decapagem é de 6 segundos e este tempo foi utilizado para os outros dois corpos de prova para obter as massas e respectivas taxas de corrosão de acordo com a Tabela 30 a seguir:

Tabela 30: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução 30% após a decapagem

| Corpo de prova (número) | Massa obtida (g) | Taxa de corrosão (mm/ano) |
|-------------------------|------------------|---------------------------|
| 0238 | 11,7335 | 0,0243 |
| 0239 | 11,8187 | 0,0239 |
| 0240 | 11,7438 | 0,0239 |

Fonte: Autor

Os valores obtidos para a taxa de corrosão observados na Tabela 30 foram semelhantes, visto que a taxa de corrosão dos três corpos de prova foi próxima, gerando uma média de 0,0240 mm/ano. Esse valor também é superior ao limite máximo para a taxa de corrosão em sistemas de resfriamento aberto em refinarias para ligas de cobre como mencionado no item 3.1.5.

4.2.1.4. Procedimento de decapagem para a solução de concentração 50% v/v:

A Tabela 31 a seguir traz os valores do ensaio de perda de massa para a solução de 50% v/v, onde o tempo de decapagem ideal foi determinado utilizando-se o corpo de prova “0237”:

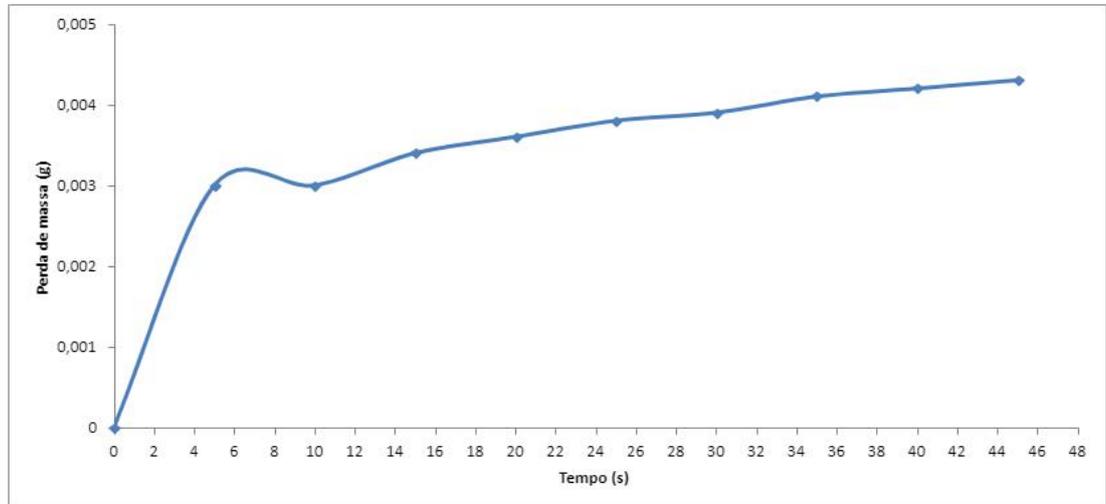
Tabela 31: Tempo de decapagem e massa obtida para o corpo de prova 0237 de latão

| Tempo (s) | Massa (g) |
|-----------|-----------|
| 0 | 11,7969 |
| 5 | 11,7939 |
| 10 | 11,7939 |
| 15 | 11,7935 |
| 20 | 11,7933 |
| 25 | 11,7931 |
| 30 | 11,7930 |
| 35 | 11,7928 |
| 40 | 11,7927 |
| 45 | 11,7926 |

Fonte: Autor

A Figura 45 a seguir traz o gráfico obtido do ensaio de perda de massa para o corpo de prova 0237:

Figura 45: Gráfico obtido para a determinação do tempo de decapagem ideal para o corpo de prova 0237 de latão



Fonte: Autor

A partir do gráfico obtido na Figura 45, observa-se que o tempo de decapagem é de 6 segundos sendo este tempo utilizado para a decapagem dos outros dois corpos de prova de forma a obter as massas e taxa de corrosão de acordo com a Tabela 32 a seguir:

Tabela 32: Massa dos corpos de prova e valores de taxas de corrosão na solução 50% após a decapagem

| Corpo de prova (número) | Massa obtida (g) | Taxa de corrosão (mm/ano) |
|-------------------------|------------------|---------------------------|
| 0080 | 11,6613 | 0,0171 |
| 0093 | 11,6381 | 0,0171 |
| 0237 | 11,7939 | 0,0179 |

Fonte: Autor

As taxas de corrosão obtidas para os corpos de prova 0080 e 0093 observadas na Tabela 32 foram exatamente iguais, e, portanto, apenas os dois valores foram considerados para o cálculo da média, que foi de 0,0171 mm/ano. Esse valor, assim como para o branco e para as outras soluções, é superior ao limite máximo para a taxa de corrosão em sistemas de resfriamento aberto em refinarias para ligas de cobre conforme mencionado no item 3.1.5.

4.3. Comparação entre os ensaios

Para o ensaio com o aço carbono, é possível observar a ausência de um padrão em relação à taxa de corrosão. A solução de 30% v/v de concentração foi a que obteve uma maior taxa de corrosão (0,5482 mm/ano), seguido da solução branco (0,4125 mm/ano), da solução de 10% v/v (0,4052 mm/ano), e a de 50% v/v (0,3584 mm/ano). É provável que em concentrações menores de água de reuso (10% e 30%), os íons que auxiliam a formação da camada protetora estejam presentes em quantidade muito inferior e não conseguem contrapor os íons que provocam a corrosão do corpo de prova.

Porém, o mesmo não foi observado para os ensaios com o latão. Para esse material, foi encontrado um padrão na taxa de corrosão, onde é observado que o branco tem a maior taxa de corrosão (0,0287 mm/ano), seguido da solução de 10% v/v de concentração (0,0281 mm/ano), a solução de 30% v/v (0,0240 mm/ano) e a solução de 50% v/v (0,0171 mm/ano).

Para esse caso, o latão é um material mais resistente e, portanto, a baixa concentração dos íons que auxiliam a formação da camada protetora (encontrados nas soluções menos concentradas) não possui tanto impacto como no aço carbono.

É possível constatar também que para ambos os materiais, a solução de 50% v/v de concentração foi a menos corrosiva. É provável que essa concentração, dentre as concentrações avaliadas, seja a que melhor apresenta um equilíbrio entre os íons corrosivos e os íons que favorecem na formação de depósitos protetores.

A Tabela 33 a seguir traz um resumo com as taxas de corrosão obtidas tanto para o aço carbono, quanto para o latão, e sua interpretação:

Tabela 33: Taxas de corrosão e suas interpretações para todas as soluções avaliadas

| Concentração | Material | Taxa de corrosão (mm/ano) | Interpretação Tabela 9 | Interpretação Tabela 10 |
|--------------|--------------------------|------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Branco | Aço carbono AISI 1020 | 0,4125 | Corrosão severa | Corrosão muito alta a severa |
| 10% | Aço carbono AISI 1020 | 0,4052 | Corrosão severa | Corrosão muito alta a severa |
| 30% | Aço carbono AISI 1020 | 0,5482 | Corrosão severa | Corrosão muito alta a severa |
| 50% | Aço carbono AISI 1020 | 0,3584 | Corrosão severa | Corrosão muito alta a severa |
| Branco | Latão AISI CDA443 | 0,0287 | - | Corrosão muito alta a severa |
| 10% | Latão AISI CDA443 | 0,0281 | - | Corrosão muito alta a severa |
| 30% | Latão AISI CDA443 | 0,0240 | - | Corrosão muito alta a severa |
| 50% | Latão AISI CDA443 | 0,0171 | - | Corrosão alta |

Fonte: Autor

É possível visualizar na Tabela 33 que a corrosão para as soluções utilizando o aço carbono foi severa em todas as concentrações, utilizando tanto a interpretação NACE-RP-07-75 (Tabela 9), quanto a interpretação do BOFFARDI (Tabela 10). Já para o latão onde apenas a classificação referente à Tabela 10 pode ser avaliada, observa-se que as taxas de corrosão, à exceção da solução de concentração 50% v/v, mantiveram-se em nível muito alto à severo. As classificações obtidas tanto para aço carbono quanto para o latão são condizentes com os meios onde não se faz a aplicação de tratamento químico à base de inibidores de corrosão.

Os resultados obtidos para a taxa de corrosão do latão apresentaram uma ordem de grandeza de 10^{-2} , enquanto para o aço carbono foi de 10^{-1} . Essa diferença era esperada visto que o cobre apresenta um menor potencial de oxidação que o ferro.

4.4. Índices de Corrosividade

As Tabelas 34 e 35 a seguir mostram os valores calculados dos índices de corrosividade para cada solução seguindo as fórmulas apresentadas no capítulo 2.7. considerando-se todos os parâmetros físico-químicos respectivos para a sua determinação. Nas Tabelas também foram incluídos os valores de taxas de corrosão para fins comparativos:

Tabela 34: Índices de corrosividade e taxas de corrosão calculados para o aço carbono

| Solução | LSI | LS | RSI | PSI | AI | TC (mm/ano) |
|---------|-------|------|-------|-------|-------|----------------|
| Branco | 0,42 | 0,26 | 7,54 | 8,58 | 12,39 | 0,4125 |
| 10% | -1,83 | 0,14 | 11,35 | 12,81 | 10,04 | 0,4052 |
| 30% | -0,75 | 0,21 | 9,54 | 10,87 | 11,15 | 0,5482 |
| 50% | -1,11 | 0,30 | 10,37 | 11,62 | 10,82 | 0,3584 |

Fonte: Autor

Tabela 35: Índices de corrosividade e taxas de corrosão calculados para o latão

| Solução | LSI | LS | RSI | PSI | AI | TC (mm/ano) |
|---------|-------|------|-------|-------|-------|----------------|
| Branco | 0,13 | 0,20 | 7,86 | 8,61 | 12,09 | 0,0287 |
| 10% | -0,94 | 0,26 | 9,79 | 10,65 | 10,93 | 0,0281 |
| 30% | -0,46 | 0,25 | 8,94 | 9,84 | 11,45 | 0,0240 |
| 50% | -1,12 | 0,25 | 10,28 | 11,13 | 10,81 | 0,0171 |

Fonte: Autor

Já as Tabelas 36 e 37 a seguir descrevem o comportamento esperado de acordo com a interpretação dos respectivos índices explicitada também no capítulo 2.7. **Índices** e da taxa de corrosão utilizando a interpretação da Tabela 10:

Tabela 36: Interpretação dos resultados dos índices de corrosividade para o aço carbono

| Solução | LSI | LS | RSI | PSI | AI | TC (mm/ano) |
|---------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Branco | Balanceado | Corrosão baixa | Corrosão forte | Corrosão forte | Não agressiva | Corrosão muito alta a severa |
| 10% | Corrosão suave | Corrosão baixa | Corrosão severa | Corrosão severa | Moderadamente agressiva | Corrosão muito alta a severa |
| 30% | Corrosão suave | Corrosão baixa | Corrosão severa | Corrosão severa | Moderadamente agressiva | Corrosão muito alta a severa |
| 50% | Corrosão suave | Corrosão baixa | Corrosão severa | Corrosão severa | Moderadamente agressiva | Corrosão muito alta a severa |

Fonte: Autor

Tabela 37: Interpretação dos resultados dos índices de corrosividade para o latão

| Solução | LSI | LS | RSI | PSI | AI | TC (mm/ano) |
|---------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------|
| Branco | Balanceado | Corrosão baixa | Corrosão forte | Corrosão forte | Não agressiva | Corrosão muito alta a severa |
| 10% | Corrosão suave | Corrosão baixa | Corrosão severa | Corrosão severa | Moderadamente agressiva | Corrosão muito alta a severa |
| 30% | Balanceado | Corrosão baixa | Corrosão severa | Corrosão forte | Moderadamente agressiva | Corrosão alta |
| 50% | Corrosão suave | Corrosão baixa | Corrosão severa | Corrosão severa | Moderadamente agressiva | Corrosão alta |

Fonte: Autor

A partir dos dados da Tabela 34 e 35 e das interpretações referidas na Tabela 36 e 37, é possível observar que, para o aço carbono, os índices de Ryznar e Puckorius foram os que mais se aproximaram do resultado experimental, conseguindo prever que houve corrosão forte e/ou severa. Os índices de Langelier e de Agressividade conseguiram prever a ocorrência do fenômeno da corrosão, porém o previram em uma intensidade menor do que a observada. Já o Índice de Larson-Skold foi o que mais se distanciou dos resultados que indicaram corrosão severa, prevendo apenas uma corrosão baixa e o não impedimento da formação do filme de proteção.

Já para o latão, os índices de Ryznar e Puckorius também foram os que mais se aproximaram do resultado experimental, porém, não com tanta precisão quanto para o aço carbono, conseguindo prever a corrosão severa para a solução de concentração 10%

v/v, e a corrosão forte ou alta para a solução 30% v/v, mas não conseguiram prever a intensidade correta para a solução 50% v/v e a solução 100% v/v.

Observamos que para o Índice de Agressividade, índice desenvolvido para medir a tendência corrosiva da água em tubos com cimento ou amianto, é provável que haja uma limitação em relação a sua interpretação. Enquanto os outros índices apresentam mais classificações ou um menor intervalo, sua parametrização não é tão eficiente para o caso avaliado de sistemas abertos de resfriamento. É bem provável que a parametrização funcione bem para casos semelhantes a tubos com cimento ou amianto.

Para o Índice de Saturação de Langelier, índice desenvolvido para águas contendo carbonatos, houve alguns desvios quanto a intensidade da corrosão. Como dito no capítulo 2.7.1, o índice apresenta limitações para alcalinidade menor que 40 mg/L de CaCO_3 , situação encontrada em alguns dos ensaios.

Já o Índice de Larson-Skold, apesar de ser prioritariamente utilizado em águas de sistemas de resfriamento e com materiais como o aço e o ferro fundido, não conseguiu prever corretamente a corrosividade para ambos os materiais. É provável que, no estudo realizado, a presença de algum componente não esperado quando o índice foi desenvolvido seja limitador para a utilização do mesmo para os ensaios com o aço e o latão.

É importante destacar também que foi utilizada a Tabela 10 como a interpretação da taxa de corrosão e não a Tabela 9, pois para investigar a utilização dos índices de corrosividade em sistemas de resfriamento aberto com recirculação de água, devemos utilizar a interpretação utilizada para tal.

Por fim, devido aos valores de taxa de corrosão em todas as concentrações terem excedido o limite para água em sistema aberto de resfriamento, nenhuma condição é recomendada sem um tratamento químico anterior. Considerando o Índice de Estabilidade de Ryznar, mais representativo para ambos os materiais, onde a faixa entre 6 e 7 corresponde a condição de balanceado, uma proposta para a reutilização seria testar a solução de 50% v/v (concentração que apresentou a menor taxa de corrosão) e realizar alguns tratamentos, como elevar o pH, elevar a alcalinidade e a dureza, até verificar se o índice de Ryznar atingiu esse intervalo alvo. Também poderiam ser feitos testes utilizando o Índice de Estabilidade de Puckorius, que para essa condição de

balanceado apresenta a mesma faixa de valores. Nesse caso, o aumento da alcalinidade traria um maior impacto para que o índice diminua até alcançar esse cenário desejado.

5. Conclusões e Recomendações

- O desenvolvimento do presente estudo permitiu avaliar a possibilidade de reutilização da água em sistemas de resfriamento. O recurso hídrico é utilizado em grande quantidade pelas indústrias e seu reaproveitamento pode trazer benefícios financeiros e ambientais.
- No ensaio de perda de massa, foi verificado que o latão é um material mais resistente à corrosão nas condições propostas de água de reúso, e os materiais, tanto o aço carbono quanto o latão, terão menor taxa de corrosão na condição de concentração 50% v/v com água deionizada.
- Através deste trabalho, foi possível validar a utilização dos índices de corrosividade para a condição proposta de água de reúso sintética. Foi observado que os índices de Puckorius e Ryznar mostram ser os mais representativos para o aço carbono AISI 1020. Já para o latão, também foram os que mais se aproximaram dos resultados experimentais, porém houve um pequeno desvio com relação a intensidade. Nesse caso, por conta dessa diferença, a realização de mais testes com outras concentrações de água de reúso, além dos tratamentos propostos pode ser uma alternativa para se ter uma maior segurança na confiabilidade dos resultados obtidos.
- É importante destacar, também, a relevância da escolha do índice de corrosividade. Através do trabalho foi possível notar que a não generalização do uso dos índices permite que a análise da corrosividade se torne mais precisa, e com isso facilitaria um tratamento químico mais adequado, levando-se em consideração as metalurgias presentes nos sistemas, evitando-se dessa forma prejuízos financeiros.
- Para ampliar a literatura disponível sobre o tema e reforçar a possibilidade de aplicação desses índices, é recomendado utilizar outros materiais disponíveis e diferentes condições de concentrações em situações próximas à realidade industrial, como em misturas de efluentes reais e água clarificada.

6. Referências Bibliográficas

Armco Steel Technology Glossary, ARMCO. Disponível em: <http://www.armco.com.br/?page_id=870> Acesso em: 06 de fevereiro de 2021.

BOFFARDI, B.P., Standards for Corrosion Rates, the Analyst, spring 2000, 60-61.

Brasil perde 4% do PIB com corrosão, diz estudo. Portal Fator Brasil, São Paulo, 22 de dez. de 2016. Disponível em: <https://www.revistafatorbrasil.com.br/ver_noticia.php?not=334281>. Acesso em: 25 de maio de 2020.

CALLISTER JR., W. D., Materials Science and Engineering: An Introduction. 7th ed.; 2006; p 848.

CARVALHO, L. J., Avaliação em laboratório da corrosividade das soluções de PAA 0,25% e 2%. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

CAVAZZANNA, G. H., et al, Análise de agressividade e incrustação das águas subterrâneas na região urbana de Campo Grande – MS, Campo Grande, 2012.

CHOUCRI, J., et al.; Corrosion Behavior of Different Brass Alloys for Drinking Water Distribution Systems; Metals Journal, MDPI; Ferrara, Italia, 2019.

Corrosion Index: Definition - What does corrosion index mean? TrenchlessPedia. Disponível em: <<https://www.trenchlesspedia.com/definition/2730/corrosion-index>>. Acesso em: 26 de maio de 2020.

DOLABELLA, L. M. P., Estudo eletroquímico sobre a corrosão de aço carbono e aço inoxidável em meio contendo cloreto na presença de extrato etanólico de própolis, Belo Horizonte - MG, Fevereiro de 2016.

ESTENDER, A. Reutilização da água na indústria, 2015. Revista de Administração da FATEA. RAF.

GENTIL, Vicente. Corrosão. 6.ed. Rio de Janeiro: LTC, p. 1, 4-5, 169-170; 2011.

GOMES, A. C. T. Análise da corrosão e da erosão-corrosão do aço carbono em meio com NaHCO₃ e CO₂. Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2005.

GONDIM, N. M. Alternativas para redução do consumo de água e energia em sistemas de água de resfriamento e geração de vapor em refinarias de petróleo do Brasil. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

GRANJEIRO, M. L., et al. Razões iônicas e índices de Langelier e Larson no estudo hidrogeoquímico das águas subterrâneas no município de Quixeré - Ceará, 2009

GROYSMAN, A. Corrosion problems and solutions in oil, gas, refining and petrochemical industry. *Koroze a ochrana material*, v.61, n.3, p.100-117, 2017.

Langelier and Aggressive Indices Method 8073 disponível em: <<https://stpnq.com/wp-content/uploads/2014/08/Langelier-index.pdf>>. Acesso em: 19 de julho de 2021.

LEGNER, C. Reuso da água e seus benefícios para a indústria e o meio ambiente, 2013.

LIMA, L. C.; OLIVEIRA, J. F. D.; SIQUEIRA, J. C.; FIA, R.; MATOS, M. P.; Determinação da concentração de sólidos dissolvidos totais por meio da medição de condutividade elétrica. XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola, 2017, Maceió.

MANCUSO, P. C. S., Reuso de água para torres de resfriamento, São Paulo, 2001.

MARTINS, A. B., Avaliação da Utilização de ligas de cobre-zinco (latão) em permutadores de calor que trabalham com água de resfriamento na UN-Recap/PETROBRAS; Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MENNUCCI, M. M., Estudo da corrosão do cobre em meios de sulfato e cloreto com auxílio do microeletrodo com cavidade e de uma microcélula, São Paulo, 2011.

NACE Standard RP0775-2005, "Preparation, Installation, Analysis, and Interpretation of Corrosion Coupons in Oilfield Operations" (Houston, TX: NACE), 2005.

PIB cai 4,1% em 2020 e fecha o ano em 7,4 trilhões. Agência de Notícias IBGE, Rio de Janeiro, 03 de mar de 2021. Disponível em:

<<https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/30165-pib-cai-4-1-em-2020-e-fecha-o-ano-em-r-7-4-trilhoes>>. Acesso em: 09/10/2021.

REIS, C. B.; CAFE, Y. H. P.; AMORIM, C.; ORDINE, A. P.; BENDINELLI, E.
Análise crítica do ensaio de perda de massa para classificação do grau de agressividade atmosférica. In: Congresso Internacional de Corrosão - InterCorr, 2016, Búzios - RJ. Anais do Congresso Internacional de Corrosão 2016, 2016.

ROCHA FILHO, F. A. M.; Estudo comparativo de resistência à corrosão entre ligas metálicas ferrosas e não ferrosas; Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

SOUZA, L. C., Inibidores de corrosão naturais: uma comparação com substâncias de uso comercial, Niterói, 2018.

SOUZA, S. O., et al., Variação em índices de tendência à corrosão e incrustação em reservatório do trópico semiárido, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019

TROVATI, J.; Tratamento de água - Sistema de resfriamento. Araraquara, 2004.

VIRGILIO, A.; Equilíbrio Ácido-Base: Cálculos com pH, grau de ionização e soluções tampão. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2020.