

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Caio César Freitas Xavier

**ESTUDO COMPARATIVO DO EFEITO DE DETERGENTES ENZIMÁTICO E
ALCALINO NA CORROSÃO DE INSTRUMENTAL CIRÚRGICO FABRICADO
COM AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L, 316L E 420**

BELO HORIZONTE - MG
2022

Caio César Freitas Xavier

**ESTUDO COMPARATIVO DO EFEITO DE DETERGENTES ENZIMÁTICO E
ALCALINO NA CORROSÃO DE INSTRUMENTAL CIRÚRGICO FABRICADO
COM AÇO INOXIDÁVEL AISI 304L, 316L E 420**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Linha de Pesquisa: Materiais e energia.

Orientadora: Vanessa de Freitas Cunha Lins.

Co-orientador: Tulio Matencio.

BELO HORIZONTE – MG
2022

X3e

Xavier, Caio César Freitas.

Estudo comparativo do efeito de detergentes enzimático e alcalino na corrosão de instrumental cirúrgico fabricado com aço inoxidável AISI 304L, 316L e 420 [recurso eletrônico] / Caio César Freitas Xavier. - 2022.

1 recurso online (86 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Vanessa de Freitas Cunha Lins.

Coorientador: Tulio Matencio.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Bibliografia: f. 78-86.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia química - Teses. 2. Instrumentos e aparelhos cirúrgicos - Teses. 3. Aço - Corrosão - Teses. 4. Aço inoxidável - Teses. 5. Detergentes - Teses. I. Lins, Vanessa de Freitas Cunha. II. Matencio, Tulio. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 66.0(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

FOLHA DE APROVAÇÃO

"ESTUDO COMPARATIVO DO EFEITO DE DETERGENTES ENZIMÁTICO E ALCALINO NA CORROSÃO DE INSTRUMENTAL CIRÚRGICO FABRICADO COM AÇO INOXIDÁVEL AISI 304, 316 E 420"

Cáio César Freitas Xavier

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos à obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA QUÍMICA**.

296ª DISSERTAÇÃO APROVADA EM 5 DE AGOSTO DE 2022 POR:



Documento assinado eletronicamente por **Vanessa de Freitas Cunha Lins, Professora do Magistério Superior**, em 05/08/2022, às 15:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Tulio Matencio, Membro de comissão**, em 05/08/2022, às 15:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Daniel Dornellas Athayde, Usuário Externo**, em 05/08/2022, às 16:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Jorgimara de Oliveira Braga, Usuário Externo**, em 06/08/2022, às 09:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1560190** e o código CRC **6FEDE5C5**.

Dedico esse trabalho a todos aqueles que lutam pelo acesso geral e irrestrito à Educação, mesmo quando os incentivos e reconhecimentos são poucos e incertos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me deu as oportunidades e o direcionamento para que eu pudesse chegar até aqui.

À minha mãe que sempre priorizou a educação, fazendo vários sacrifícios e me passando a consciência de que a maior herança que existe não é material. Por ser meu exemplo máximo de luta, garra e determinação.

Ao André, pelo carinho e cumplicidade, e por me mostrar na prática que o empenho diário é o maior agente da evolução pessoal.

À Carol pelo companheirismo e incentivo, por ser exemplo de esforço e dedicação em tudo aquilo que se propõe.

A todos os amigos que estão ao meu lado batalhando contra as adversidades, compartilhando a luta pelo progresso.

Aos meus colegas de trabalho pelos ensinamentos diários, ajudando a equilibrar eficiência com leveza e me empurrando na direção do desenvolvimento.

Ao pessoal do Labcor pela ajuda incrível, sem a qual esse trabalho com certeza não seria possível.

Aos colegas e amigos que fiz nesse período pesado de estudo e trabalho em meio à pandemia, que me ajudaram a manter a mente sã e o objetivo à vista.

A todos os professores e mestres que fizeram parte da minha formação pessoal e profissional, e de alguma forma contribuíram para meu crescimento.

A meus orientadores, em especial à Vanessa, pela paciência nos contatos sempre em dias e horários não convencionais e pela competência técnica colaborando principalmente no fim desse trabalho cheio de imprevistos e incertezas.

A todos que de alguma forma contribuíram para a execução desse trabalho, sendo na idealização, na execução ou no incentivo, agradeço imensamente.

“Se a educação sozinha não transforma a sociedade, sem ela tampouco a sociedade muda.” – Paulo Freire.

RESUMO

Instrumentais metálicos fabricados em aço inoxidável são utilizados tanto para procedimentos cirúrgicos quanto para a manufatura de dispositivos médicos. Ambas as utilizações exigem alto grau de limpeza e esterilização, sendo esses itens, portanto, submetidos a recorrentes ciclos de limpeza utilizando água e detergentes, que podem ter diferentes tipos e mecanismos de ação. E como todo aço, os itens também estão sujeitos à corrosão, que pode ser acelerada quando há ataque à camada passiva formada pelos óxidos presentes no aço inoxidável. Este estudo se propôs a testar dois tipos de detergentes, enzimático e alcalino, com diferentes propriedades, como pH de 9,0 para o primeiro e 12,3 para o segundo, e comparando seus efeitos na corrosão dos aços AISI 304L, 316L, e 420, usados na fabricação de instrumental cirúrgico. Com o auxílio da Espectroscopia de Impedância Eletroquímica e de testes de polarização potenciodinâmica foi possível identificar o melhor comportamento do aço AISI 304L dentre os três testados, tendo a maior resistência à corrosão quando em meio enzimático. O aço AISI 316L teve comportamento intermediário em solução enzimática e menor impedância quando imerso em detergente alcalino, enquanto o aço AISI 420 apresentou melhores resultados em solução alcalina quando comparado à solução enzimática, reforçando a necessidade da escolha do agente de limpeza com base no aço utilizado e nas demais condições de cada aplicação específica.

Palavras-chave: Instrumentos Cirúrgicos. Corrosão. Aço Inoxidável. Detergente Enzimático. Detergente Alcalino.

ABSTRACT

Metallic instruments made of stainless steel are used both for surgical procedures and for manufacturing medical devices. Both uses require a high level of cleaning and sterilization, and these items, therefore, undergo recurrent cleaning cycles using water and detergents, which may have different types and mechanisms to carry out the cleaning. And like all steel, the items are also subject to oxidation, which can be accelerated when there is an attack on the passive layer formed by the oxides present in stainless steel. This study aims to test two types of detergents, alkaline and enzymatic, with different properties such as pH of 9.0 to the first and 12.3 to the latter, and comparing their effects on corrosion resistance of AISI 304L, 316L and 420 stainless steels, used in the manufacturing of surgical instruments. By using Electrochemical Impedance Spectroscopy and potentiodynamic polarization tests, the AISI 304L stainless steel was found to have the best behavior among the three stainless steels tested, having the highest corrosion resistance in enzymatic medium. The AISI 316L steel had an intermediate behavior in enzymatic medium, and lower impedance when immersed in alkaline detergent, while the AISI 420 steel showed better results in alkaline medium when compared to enzymatic solution, reinforcing the need to choose the cleaning agent based on the stainless steel used, and in other conditions specific for each application.

Keywords: Surgical Instruments. Corrosion. Stainless Steel. Enzymatic Detergent. Alkaline Detergent.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Ilustração de uma micela de detergente alcalino (FONTE: KRALCHEVSKY <i>ET AL.</i> , 2014).....	34
Figura 2 - Ilustração do mecanismo de ação de uma enzima (FONTE: KRISE K. M. – ACS, 2021).....	35
Figura 3 - Comportamento de Aço Inoxidável com Passivação (FONTE: CARBÓ, 2008)	40
Figura 4 - Representação típica dos diagramas da técnica de EIE (Fonte: ZHA <i>ET AL.</i> , 2020).....	45
Figura 5 - Representação típica de uma curva de Polarização Potenciodinâmica (Fonte: KIKUTI <i>ET AL.</i> , 2004)	46
Figura 6 - Ilustração esquemática de uma curva de Polarização Cíclica típica (Fonte: ESMAILZADEH <i>ET AL.</i> , 2018).....	47
Figura 7 - Montagem da Célula Eletroquímica – Contra Eletrodo de platina, SCE e Eletrodo de Trabalho.....	51
Figura 8 - Montagem da Célula Eletroquímica – Aproximação do Eletrodo de Trabalho	52
Figura 9 - Diagramas de Nyquist para os aços em meio alcalino (a) e enzimático (b).....	53
Figura 10 - Diagramas de Bode do módulo de impedância dos aços em meio alcalino (a) e enzimático (b)	54
Figura 11 - Diagramas de Bode dos ângulos de fase dos aços em meio alcalino (a) e enzimático (b)	55
Figura 12 - Diagramas de EIE para Aço 304L nos meios alcalino e enzimático	56
Figura 13 – Diagramas de EIE para Aço 316L nos meios alcalino e enzimático	57
Figura 14 - Diagramas de EIE para Aço 420 nos meios alcalino e enzimático	58
Figura 15 - Comparação dos Módulos de Impedância de Bode a 30 mHz	59
Figura 16 - Curvas de polarização potenciodinâmica nos meios alcalino e enzimático	61

Figura 17 - Curvas de polarização potenciodinâmica para cada aço nos meios alcalino e enzimático	62
Figura 18 - Curvas de polarização cíclica nos meios alcalino e enzimático	63
Figura 19 - Curvas de polarização cíclica para cada aço nos meios alcalino e enzimático	65
Figura 20 - Corpo de prova após ensaios eletroquímicos - Aço 304L.....	67
Figura 21 - Micrografia do aço 304L para o meio Alcalino à esquerda e Enzimático à direita.	67
Figura 22 - Micrografias aproximadas para o aço 304L em meio Alcalino à esquerda e Enzimático à direita	68
Figura 23 - Corpo de prova após ensaios eletroquímicos - Aço 316L.....	68
Figura 24 - Micrografia do Aço 316L para o meio Alcalino à esquerda e Enzimático à direita	69
Figura 25 - Micrografias aproximadas para o aço 316L em meio Alcalino à esquerda e Enzimático à direita	69
Figura 26 - Corpo de prova após ensaios eletroquímicos - Aço 420.....	70
Figura 27 - Micrografia do Aço 420 para o meio Alcalino à esquerda e Enzimático à direita	70
Figura 28 - Micrografias aproximadas para o aço 420 em meio Alcalino à esquerda e Enzimático à direita	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição Química do COSA CIP 92 (FONTE: FISPQ do Fabricante)	49
Tabela 2 - Composição Química do 3M Detergente Multienzimático (FONTE: FISPQ do Fabricante)	49
Tabela 3 - Composição Química dos Aços Utilizados (FONTE: Dados do Fabricante)	50
Tabela 4 - Propriedades das Soluções de Limpeza a 2% v/v	53
Tabela 5 - Parâmetros Eletroquímicos Inferidos dos Experimentos.....	66
Tabela 6 - Tabela comparativa entre pontos de corrosão localizada nos 3 aços em relação às 2 soluções.....	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Ampere

AISI – *American Iron and Steel Institute* (do inglês, Instituto Americano de Ferro e Aço)

ANS - Agência Nacional de Saúde Suplementar

Anvisa – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

CDC - *Centers for Disease Control and Prevention* (Centros de Controle e Prevenção de Doenças, EUA.)

DNA – *Deoxyribonucleic Acid* (do inglês, Ácido desoxirribonucleico)

EIE – Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

EPI – Equipamento de Proteção Individual

FDA – *Food and Drug Administration* (Agência de Alimentos e Drogas, EUA)

FISPQ – Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico

OCP – *Open Circuit Potential* (do inglês, Potencial de Circuito Aberto)

pH – Potencial Hidrogeniônico

RDC - Resolução de Diretoria Colegiada

RE - Resolução Específica

SCE – *Saturated Calomel Electrode* (do inglês, Eletrodo Saturado de Calomelano)

SUS – Sistema Único de Saúde

UFC – Unidades Formadoras de Colônia

V - Volts

V_{RMS} – *Root Mean Square Voltage* (do inglês, Tensão da Raiz Quadrática Média, ou Tensão Eficaz)

v/v – Volume por volume

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	15
2.	OBJETIVO.....	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	INSTRUMENTOS CIRÚRGICOS	19
3.2	REPROCESSAMENTO DE ELEMENTOS MÉDICOS	20
3.3	PROCEDIMENTO DE LIMPEZA DE INSTRUMENTOS MÉDICOS.....	23
3.4	DETERGENTE	26
3.4.1	Detergentes Alcalinos	33
3.4.2	Detergentes Enzimáticos	35
3.5	AÇOS INOXIDÁVEIS.....	36
3.6	CORROSÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS.....	39
3.6.1	Técnicas Eletroquímicas	43
a)	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE).....	44
b)	Polarização Potenciodinâmica	45
c)	Polarização Cíclica	47
4.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
4.1	MATERIAIS	48
4.2	METODOLOGIA.....	50
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
5.1	ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA	53
5.2	POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA	60
5.3	POLARIZAÇÃO CÍCLICA	63
5.4	AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE	66
6.	CONCLUSÕES	74
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	76
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

1. INTRODUÇÃO

Instrumentais cirúrgicos podem ser reutilizados, sendo necessário processar (ou reprocessar) os itens através de sua limpeza e/ou reesterilização, e assim deixá-los aptos para uso novamente. Instrumentos reprocessados são submetidos repetidamente a condições agressivas com relação à temperatura, umidade e pressão. Assim, é relevante avaliar a capacidade desses produtos de resistir a essas condições adversas recorrentes. Alguns parâmetros relevantes são corrosão, integridade e funcionalidade. Além disso, também é relevante verificar se o processamento aplicado está sendo efetivo, isto é, se está atingindo níveis adequados de limpeza e esterilidade (MSC MED, 2021). A limpeza é a remoção de material estranho, como sujeira ou material orgânico, e normalmente é realizada usando água com detergentes ou produtos enzimáticos. É necessária uma limpeza completa antes da desinfecção e esterilização porque os materiais inorgânicos e orgânicos que permanecem nas superfícies dos instrumentos interferem na eficácia desses processos (CDC EUA, 2008). A limpeza pode ser feita manualmente ou de forma automatizada, com limpadores ultrassônicos ou lavadoras-desinfetadoras. Com a limpeza manual, fricção e fluidos podem ser utilizados como métodos de remover as sujidades. Fricção, como esfregar a área suja com uma escova, é um método simples e confiável (CDC EUA, 2008). Para limpeza de instrumentos, uma solução de detergente de pH próximo ao neutro é comumente usada porque tais soluções geralmente fornecem o melhor perfil de compatibilidade de material e boa remoção de sujeira (MSC MED, 2021). Enzimas às vezes são adicionadas para auxiliar na remoção de material orgânico, podendo atacar as proteínas, gorduras e carboidratos existentes. Posteriormente, as enzimas devem ser enxaguadas do equipamento ou podem ocorrer reações adversas (CDC EUA, 2008).

Soluções detergentes que contêm enzimas são compatíveis com metais e outros materiais usados em instrumentos médicos e são uma das opções mais utilizadas para limpar instrumentos médicos delicados. Agentes de limpeza alcalinos também são usados para processar dispositivos médicos porque dissolvem proteínas e resíduos de gordura de forma eficiente, no entanto, podem ser corrosivos. Alguns fornecedores de agentes de limpeza disseminaram por muito tempo que os

limpadores enzimáticos são mais eficazes do que os detergentes neutros na remoção de microrganismos das superfícies como forma de tentar consolidar um produto que ingressa em um setor estabelecido, mas dois estudos não encontraram nenhuma diferença na eficiência de limpeza entre os limpadores enzimáticos e os de base alcalina (LOUKILI *ET AL.*, 2004; ZUHLSDORF *ET AL.*, 2002). Outro estudo não encontrou nenhuma diferença significativa entre limpadores enzimáticos e não enzimáticos em termos de eficácia de limpeza microbiana (ZUHLSDORF *ET AL.*, 2004). Porém, poucos estudos investigam o impacto e a relação dos processos de limpeza, detergentes e ciclos de esterilização com a integridade do material de fabricação dos dispositivos ou instrumentos cirúrgicos, como o estudo de Xu *et al.*, que avalia o impacto do processo de descontaminação e limpeza na resistência à corrosão do aço martensítico 420 (XU *ET AL.*, 2016). Mas, de fato, até a data deste estudo, não foi identificado na literatura um relato correlacionando agentes de limpeza e a corrosão do instrumental cirúrgico.

Assim, a motivação do presente trabalho é começar a preencher essa lacuna da literatura de modo a valorizar uma discussão que pode gerar valor para a indústria médica e ajudar a prevenir a infecção de pacientes durante procedimentos cirúrgicos ou intervenções médicas. A avaliação do comportamento de diferentes classes de aço inoxidável comumente utilizadas na fabricação de instrumentos cirúrgicos frente a um detergente enzimático e um alcalino pode ser entendida como um primeiro passo na direção de um campo com ainda muito a se fazer em termos de pesquisa e geração de conhecimento. Existe a necessidade da análise de diferentes soluções, não apenas de limpeza, mas também de outra natureza, como fluidos biológicos, que venham a ter contato com o instrumental cirúrgico e possam agir sobre a camada passiva do aço inoxidável de forma a impactar sua resistência à corrosão. Como mencionado, pontos de oxidação podem dificultar a remoção de detritos orgânicos, impedindo uma esterilização eficaz, além de se tornar foco de crescimento microbiológico, podendo causar infecções e sendo inconsistências normativas. Dessa forma, estudar como a corrosão desses itens é influenciada pelo tipo de detergente se torna duplamente importante, para a avaliação deste caso em particular e para ajudar a ampliar o conhecimento eletroquímico aplicado à indústria médica, mostrando a vastidão do campo ainda a ser explorado nessa área.

2. OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento frente a corrosão de três classes de aço inoxidável – AISI 304L, 316L e 420 – associadas ao contato com detergentes alcalino e enzimático, e identificar o agente mais adequado para uso na limpeza de instrumental cirúrgico de cada classe.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar o efeito de dois tipos de detergentes – enzimático e alcalino – no aço inoxidável.
- Avaliar a resistência à corrosão de três diferentes classes de aço inoxidável: AISI 304L, 316L e 420 quando expostos a diferentes agentes de limpeza.
- Estabelecer a existência de correlações e identificar a classe de aço inoxidável mais apropriada e o tipo de detergente mais indicado para uso na fabricação e posterior limpeza de instrumental cirúrgico.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As áreas médica e de saúde requerem muitos cuidados em relação à segurança dos pacientes e profissionais envolvidos nas atividades. Quando um determinado paciente necessita de uma intervenção cirúrgica, por exemplo, várias atividades anteriores são necessárias para que a operação seja realizada sem complicações e tenha o resultado esperado. Isso vale tanto para averiguar se o paciente detém de todos os pré-requisitos que garantam sua vitalidade ao longo do procedimento, quanto para os profissionais que irão executar a intervenção avaliarem se possuem todos os equipamentos e instrumentos corretos e preparados de forma adequada para a execução da cirurgia. Isso porque uma cirurgia médica é sempre um procedimento complexo e delicado, que exige a utilização dos instrumentos corretos. Esses cuidados se estendem à indústria farmacêutica e de dispositivos médicos, por se tratarem de setores que, invariavelmente, impactam a saúde do paciente. Dessa forma, ambientes controlados, salas limpas e monitoramento de níveis de sujeira e controle microbiológico muitas vezes fazem parte do negócio desses segmentos assim como para centros cirúrgicos (GALERA *ET AL.*, 2005).

O termo "dispositivo médico" designa um vasto conjunto de produtos inseridos dentro do corpo ou sob a pele. Podem ser feitos de pele, osso, outros tecidos do corpo e até mesmo de metal, plástico ou cerâmica. Podem substituir um membro ou uma parte do corpo, liberar medicação gradativamente, monitorar funções corporais ou prover suporte a órgãos e tecidos. Stents, marca-passos, próteses, placas e parafusos são exemplos de dispositivos médicos implantáveis (ANS, 2021). Devido à sua criticidade, são cobertos por várias normas e órgãos reguladores no Brasil e no mundo. Em muitos países da Europa e nos Estados Unidos implantes podem ser reprocessados, mas não reutilizados. O regime brasileiro é mais rígido. A Resolução de Diretoria Colegiada (RDC) 156/2006 estipula regras estritas para o reprocessamento de produtos médicos e ainda há uma lista que contém diversos produtos que não podem ser reprocessados – contidos na Resolução RE 2605 de 2006 (MSC MED, 2021). Embora cada caso seja particular e possa exigir uma instrumentação específica e adequada para aquela situação, existem alguns instrumentos cirúrgicos que são considerados mais básicos e estão presentes em praticamente qualquer sala de operação ou processo de manufatura de dispositivos

médicos. O ideal é que todos esses itens sejam preparados antecipadamente e estejam disponíveis antes mesmo de serem necessários, a fim de garantir a segurança durante os procedimentos que serão realizados (GALERA *ET AL.*, 2021).

3.1 INSTRUMENTOS CIRÚRGICOS

De acordo com o DataSUS no *website* do governo brasileiro em uma consulta realizada em Abril de 2022, mais de 1,5 bilhão de internações, cirurgias e procedimentos cirúrgicos e não cirúrgicos ambulatoriais são realizados anualmente no Brasil. Para tanto, uma medida que deve ser realizada com segurança é a limpeza adequada dos milhões de dispositivos médicos reutilizáveis que entram em contato com a pele, sangue e outros fluidos e tecidos corporais do paciente a cada ano, uma vez que o processo de limpeza do instrumental é a principal barreira para garantir que potenciais agentes infecciosos presentes no instrumento ou dispositivo não sejam transferidos ao paciente final (CDC EUA, 2008; SHOEMAKE, 2007). De acordo com a Agência de Alimentos e Drogas (FDA, do inglês: *Food and Drug Administration*) dos Estados Unidos, um dispositivo médico é "um instrumento, aparelho, implemento, máquina, dispositivo, implante, reagente in vitro ou outro artigo semelhante ou relacionado" (CDC/FDA, 2021).

Após um procedimento cirúrgico, um dispositivo médico está contaminado com biocarga visível e oculta. Essa carga biológica pode conter centenas, senão milhões, de organismos potencialmente infecciosos. Qualquer sujeira deixada no dispositivo após a limpeza pode representar um risco para o paciente, podendo servir para o crescimento e desenvolvimento dessa carga microbiana. Portanto, é imperativo que as etapas adequadas sejam tomadas para garantir um processo de limpeza completo (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007). E sendo pontos de oxidação potenciais focos de retenção de sujidade e crescimento microbiano, a ocorrência da corrosão é prejudicial não somente à vida útil do instrumento, mas também ao possível carreamento de agentes infecciosos para o paciente (EVANGELISTA *ET AL.*, 2015; HUANG *ET AL.*, 2021). A maior parte da instrumentação cirúrgica é fabricada para ser reutilizada até o limite de sua efetividade ou funcionalidade, a fim de reduzir custos e resíduos gerados. Entretanto, é necessário garantir que os

dispositivos sejam seguros para o reuso após os reprocessamentos, impedindo transferência de microrganismos ou outros efeitos adversos (EVANGELISTA *ET AL.*, 2015).

É necessário que uma limpeza manual e/ou mecânica completa seja realizada cuidadosamente em todos os dispositivos médicos reutilizáveis antes da desinfecção ou esterilização. Esta etapa requer o uso de produtos e processos adequados para garantir que todas as superfícies, internas e externas, estejam completamente livres dos resíduos. Finalmente, os dispositivos devem ser bem enxaguados para remover toda a carga residual e detergente. Riscos significativos que incluem infecções em virtude da presença de sujidades, desinfecção ou esterilização inadequadas e danos ao dispositivo médico foram associados com manutenção e processos de sanitização inadequados ou impróprios (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007).

Devido à importância de infecções hospitalares, iniciativas para monitorar e prevenir sua ocorrência tem sido desenvolvidas e aprimoradas, a fim de obter maior controle, reduzir sua ocorrência e mitigar o impacto. Nos Estados Unidos, em fevereiro de 2007, 16 estados promulgaram legislação exigindo que os hospitais divulguem publicamente as taxas de infecções hospitalares. Também existem esforços legislativos para reduzir infecções hospitalares e proteger os pacientes contra dano médico. Este foco na redução de erros médicos gerou uma ênfase ainda maior na limpeza padronizada e apropriada de dispositivos médicos (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007; EVANGELISTA *ET AL.*, 2015).

3.2 REPROCESSAMENTO DE ELEMENTOS MÉDICOS

A utilização subsequente de itens na medicina, tanto de dispositivos médicos, instrumentos operacionais ou ferramentas de exploração cirúrgica, é uma prática comum que permite redução de custo, diminuição de lixo gerado e viabilização de procedimentos em tempo hábil. O reprocessamento de dispositivos médicos, por exemplo, requer uma limpeza cuidadosa e completa. A eficácia da limpeza de dispositivos complexos ou difíceis de limpar é particularmente crítica, pois o material residual presente no instrumento pode interferir na eficácia de esterilizantes e desinfetantes subsequentemente usados no dispositivo (CDC EUA, 2021). A

transmissão de doenças infecciosas tem sido associada a falhas na limpeza, especialmente para itens complexos, que dificultam o processo de limpeza como um item com muitas cavidades, articulações, ranhuras ou conexões (ZUHLSDORF *ET AL.*, 2002), e essa contaminação cruzada de pacientes pelo uso desses dispositivos pode levar à morte (CHAN-MYERS *ET AL.*, 1997).

A proteção do paciente e do trabalhador de saúde é uma preocupação crescente no campo médico. A exposição a riscos químicos e biológicos está se tornando cada vez mais reconhecida, e muitas das diretrizes atuais relacionadas ao reprocessamento de dispositivos médicos enfocam a necessidade de garantir a eficácia do procedimento de limpeza e da segurança de todos envolvidos durante o reprocessamento. As diretrizes, que ficam cada vez mais rígidas, podem ser específicas ao ponto de demandar um nível máximo de carga microbiana para determinadas aplicações, ou genéricas como recomendar a imersão de dispositivos médicos durante a limpeza para reduzir o risco de aerossolização (ALFA & JACKSON, 2001).

A limpeza de dispositivos geralmente é seguida por desinfecção ou esterilização, processos que dependem da qualidade da limpeza. Assim, a eficácia do detergente ou desinfetante, particularmente a atividade do detergente, é um parâmetro crítico (CHAN-MYERS *ET AL.*, 1997), principalmente porque os focos de crescimento microbiológico que se formam em acúmulos de resíduos não removidos no procedimento de limpeza são propícios para o desenvolvimento de agentes patológicos provenientes do material de contato anterior, mas também de agentes naturalmente presentes no meio ambiente (HENOUN LOUKILI *ET AL.*, 2004; CHU *ET AL.*, 1999). Chan-Myers *et al.* (1997) estudaram os procedimentos vigentes em três diferentes hospitais, incluindo lavagem manual e automatizada utilizando detergente enzimático no processo de limpeza dos itens e, no geral, os procedimentos apresentaram bons resultados de limpeza, reduzindo a carga microbiana para menos de 10^2 unidades formadoras de colônias (UFCs) – valor tipicamente adotado como limite por órgãos reguladores como a Farmacopeia dos Estados Unidos e normas como a ISO 10993 ou 11737 – em 83% dos casos. Em alguns casos, observou-se a manutenção ou até acréscimo da carga microbiana, mas uma investigação mostrou que os microrganismos encontrados após a limpeza eram diferentes daqueles encontrados pré-limpeza, permitindo a conclusão que a

contaminação dos itens pode ter sido feita durante o procedimento de limpeza ou secagem dos instrumentos e não necessariamente que a limpeza seja ineficaz na redução da carga microbiana (CHAN-MYERS *ET AL.*, 1997).

Um estudo pioneiro de Nystrom investigou a contaminação microbiana de instrumentos cirúrgicos após limpeza e/ou esterilização, sendo o processo de desinfecção composto por uma limpeza ou por submersão em fluido desinfetante, identificado em 1981 como capaz de reduzir a contaminação microbiana e proteger quem manuseia os instrumentos (NYSTROM, 1981).

Atualmente, não existe um consenso sobre qual tipo de detergente comercialmente disponível apresenta a melhor combinação de eficácia de limpeza com a eliminação de microrganismos, sendo tema de debate e alvo de diversos estudos no mundo acadêmico e industrial.

Porém, falhas identificadas em procedimentos conduziram a investigações da eficácia de processos de sanitização e descontaminação de dispositivos. Estudos indicam que o processamento inadequado de endoscópios implicou na transmissão de microrganismos como bactérias, vírus, fungos e parasitas entre pacientes. O processamento inadequado envolve não seguir corretamente os indicativos e recomendações para o processo de limpeza e desinfecção (ZUHLSDORF *ET AL.*, 2002; ZUHLSDORF *ET AL.*, 2004) e o processo corrosivo pode favorecer o crescimento de microbiota, impulsionado principalmente pelo excesso de receptores de elétrons como NO_3^- , O_2 e de SO_4^{-2} , resultantes da oxidação do metal. Assim, o excesso de oxigênio e de íons como o nitrato e o sulfato favorecem o crescimento de bactérias aeróbicas ou microrganismos capazes de sintetizar ou se beneficiar de alguma forma pela presença dos íons citados (HUANG *ET AL.*, 2021).

As diretrizes para dispositivos médicos requerem que cada etapa do procedimento de limpeza seja validada, controlando-se parâmetros como volume, temperatura, pressão, pH, dosagem e tempo de exposição ao agente de limpeza. E uma limpeza completa é necessária para uma desinfecção eficiente (ZUHLSDORF *ET AL.*, 2002; SCHMIDT *ET AL.*, 2008).

3.3 PROCEDIMENTO DE LIMPEZA DE INSTRUMENTOS MÉDICOS

A fim de deixar instrumentos médicos livres de proteínas potencialmente infecciosas em níveis que garantam a esterilização dos materiais, o processo de limpeza e descontaminação não deve apenas remover, mas, de preferência, hidrolisar a proteína infecciosa em pequenos fragmentos solúveis em água, facilmente removíveis com um enxágue. Normalmente, as proteínas são rotineiramente removidas durante a exposição dos instrumentos a detergentes alcalinos ou enzimáticos durante um procedimento de limpeza (SAVA & KRITZLER, 2011).

Rutala e colegas conduziram estudos para determinar a carga microbiana e o tipo de organismos em instrumentos cirúrgicos usados após o procedimento de limpeza padrão, que consistia no uso de uma máquina de lavar esterilizadora seguida de limpeza sônica. Determinar a eficiência de processos de limpeza e esterilização vem se tornando mais importante e necessário, uma vez que a limpeza inadequada tem sido responsabilizada pela transmissão de microrganismos e agentes patológicos de paciente para paciente por meio de dispositivos contaminados (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007; RUTALA & WEBER, 2005).

Casos documentados de transmissão de patógenos por meio de procedimentos endoscópicos gastrointestinais foram associados à violação nas recomendações e normas aceitas pelas agências reguladoras, ao uso de um germicida líquido inaceitável para desinfecção, à secagem inadequada ou a equipamentos defeituosos (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007). Em um relatório de caso semelhante, a transmissão do vírus da hepatite C para pacientes durante o procedimento de colonoscopia foi associada a uma violação das diretrizes de limpeza e desinfecção aceitas (RUTALA & WEBER, 2005).

Outro risco de infecção se desenvolve a partir de dispositivos processados incorretamente que permitem o acúmulo de biofilmes microbianos (colônias de bactérias e fungos). Esses biofilmes aderem uns aos outros e às superfícies de dispositivos médicos, podendo se desprender e causar maiores danos (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007) ou servir como acelerador do processo de corrosão, alterando a concentração, aeração ou pH entre meios (QUEIROZ *ET AL.*, 2018).

De forma semelhante, conforme já mencionado, a desinfecção ou esterilização inadequada de dispositivos médicos também pode ocorrer devido a uma limpeza inadequada. Todas as tecnologias de alto nível disponíveis para desinfecção e esterilização atualmente agem na superfície do material, de modo que quaisquer resíduos deixados no dispositivo, incluindo sujeira medicinal, contaminantes provenientes da corrosão do metal e resíduos de detergente, podem interferir nesse contato direto. Além disso, a interação dos resíduos com o desinfetante ou esterilizante pode diminuir a eficácia desses agentes. Se o erro no reprocessamento não for identificado antes da cirurgia, podem ocorrer complicações graves para o paciente (RUTALA & WEBER, 2005; AORN, 2006). Dessa forma, o processo de limpeza deve visar a remoção da sujeira visível e, por consequência, a retirada da carga microbiana inicial. Esse processo é indispensável para o reprocessamento de todos os artigos médico-hospitalares e deve preceder os processos de desinfecção e esterilização (SCHMIDT *ET AL.*, 2008).

Um dispositivo médico pode ser danificado por soluções de limpeza ou sujeira médica que não são removidos corretamente após o processo de limpeza. Os tipos de danos que o dispositivo pode sofrer incluem manchas, corrosão, turvação ou podem resultar em função inadequada devido ao acúmulo de detritos. A fim de reduzir os riscos associados à limpeza inadequada ou ineficaz de dispositivos médicos reutilizáveis, os componentes básicos e tipos de soluções de limpeza, bem como os fatores para o uso assertivo de soluções de limpeza, devem ser compreendidos (ANSI, AAMI ST45:2003).

Basicamente dois métodos de limpeza podem ser utilizados: automatizado ou manual. Porém, inúmeras variações podem existir entre cada um desses dois métodos, podendo haver alteração de temperatura, pH, tempo de exposição à solução de limpeza, qualidade da água, inserção ou remoção de etapas de imersão, escovação, enxágue, desinfecção, e até mesmo o ambiente em que é feita a limpeza. Cada variação possui uma solução de limpeza mais adequada (LOUKILI *ET AL.*, 2004; ZUHLSDORF *ET AL.*, 2002; ALFA & JACKSON, 2001; GONZALEZ *ET AL.*, 2019) e nem todas se comportam da mesma forma frente a uma alteração, dificultando generalizações (EVANGELISTA *ET AL.*, 2015; GONZALEZ *ET AL.*, 2019).

Em um estudo sobre limpeza de instrumentais foi verificado que os instrumentos sujos com sangue ou muco apresentavam limpeza eficiente após imersão em solução enzimática, porém, quando se tratava da presença de óleo ou antibiótico, necessitavam de limpeza manual. A limpeza e eficiência do processo estão relacionadas também ao tempo adequado de imersão dos instrumentos na solução de limpeza (SCHMIDT *ET AL.*, 2008).

O estudo pioneiro de Nystrom conclui que é razoável acreditar que uma limpeza mecânica deve ser adicionada para atingir um melhor resultado de limpeza, e que apenas a imersão em líquido desinfetante não elimina o nível de contaminação do material. O melhor resultado obtido em seu estudo foi com o uso de um equipamento de limpeza, que deve ser vedado para evitar a contaminação do ambiente por aerossol (NYSTROM, 1981).

É importante realizar avaliações e inspeções regulares, readequando o método de limpeza sempre que necessário. Normalmente, é realizada uma inspeção visual, porém esse processo também vem sendo tema de estudo e algumas alternativas já existem. No estudo de Lipscomb *et al.*, os autores analisam o uso da inspeção visual como forma de avaliar o grau de limpeza de instrumentos e a confiabilidade desse método para uso no dia a dia em comparação com um novo método proposto que se vale de um protocolo bem estabelecido, com pontuação para cada quesito definido como importante para avaliação de infecção dos itens. Identificaram alta correlação entre os resultados obtidos pela inspeção visual e o pelo procedimento apresentado em seu estudo para dispositivos simples, enquanto que para dispositivos complexos, grande quantidade de contaminação pode passar despercebida usando apenas a inspeção visual (LIPSCOMB *ET AL.*, 2008).

Assim como todas as outras etapas do processo de limpeza, a desinfecção também vem sendo tema de investigações que propõem rotas para aprimoramento. De fato, estudos para determinar a carga microbiana e o tipo de organismos em instrumentos cirúrgicos usados após a limpeza padrão, que consistia no uso de uma máquina de limpeza esterilizadora seguida de limpeza sônica, concluíram que a maioria dos instrumentos cirúrgicos não complexos usados contém menos de 100 Unidades Formadoras de Colônia (UFC) de microrganismos relativamente não-patogênicos após a limpeza. Esses dados sugerem que as novas tecnologias de esterilização de baixa temperatura são eficazes na prevenção da transmissão

cruzada de infecções por meio de instrumentos médicos (PUGLIESE & FAVERO, 1998).

Órgãos de saúde exigem que os fabricantes de sistemas de esterilização de baixa temperatura empreguem um alto grau de conservadorismo ao projetar os ciclos de esterilização como, por exemplo, inserir uma alta carga biológica em um dispositivo e usar esporos bacterianos mais resistentes ao processo de esterilização, avaliando em que grau esses microrganismos foram eliminados após o ciclo como forma de testar e validar a eficiência do processo mesmo em cenários conhecidamente mais desafiadores que a rotina para os quais os sistemas de esterilização são desenvolvidos. Também desafiam o processo de esterilização exigindo a colocação de esporos nos locais menos acessíveis do dispositivo, sendo esses esporos os mais comuns contidos nos detritos orgânicos ou simulando as condições de uso do dispositivo. Depois, analisam a redução dos esporos após meio ciclo de esterilização, além de documentar o que um ciclo produz com relação à morte de microrganismos com a respectiva probabilidade de que um esporo sobreviva (PUGLIESE *ET AL.*, 1998). Então já existe um fator de segurança em cada etapa do processo, mas, ainda assim, a recomendação é sempre tomar o caminho mais conservador.

3.4 DETERGENTE

É essencial que uma solução de limpeza adequada seja escolhida e que seja usada corretamente para garantir a limpeza ideal dos dispositivos médicos. Para fazer isso é necessário compreender os componentes básicos das soluções de limpeza. Somente as soluções de limpeza especificamente formuladas e rotuladas para uso em dispositivos médicos devem ser usadas no reprocessamento. A formulação de cada solução de limpeza é única, no entanto, a maioria conterá alguma combinação dos seis componentes a seguir (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007):

- A água é o solvente mais comum e atua como base para a maioria das soluções de limpeza.

- O detergente, no geral, ajuda a soltar os detritos das superfícies e a manter os resíduos em suspensão, evitando que eles se depositem novamente no instrumento que passa pelo processo de limpeza e permitindo que sejam facilmente enxaguados.
- Os surfactantes aumentam a eficácia da limpeza reduzindo a tensão superficial, facilitando a penetração na sujidade.
- As soluções tampão fornecem melhor compatibilidade com os materiais e atuam para inibir a corrosão através do controle do pH do meio.
- Os agentes quelantes se ligam aos minerais presentes na água para evitar que eles se depositem no dispositivo ou reajam de maneira adversa com a solução de limpeza, auxiliando na redução dos potenciais efeitos negativos da dureza da água usada para diluir a solução de limpeza ou para o enxágue. Sem eles, a água dura pode causar manchas ou deixar depósitos no dispositivo.
- As enzimas quebram proteínas, gordura, açúcares, aumentando a eficácia do detergente, acelerando o processo de limpeza e ajudando a minimizar a necessidade de escovação manual. Há uma variedade de enzimas disponíveis, cada uma direcionada a um tipo específico de detrito. A enzima mais comumente encontrada em soluções usadas para limpeza de instrumentos cirúrgicos é a protease, que ajuda a quebrar as sujeiras constituídas de proteínas, como sangue e fezes. Também estão disponíveis a amilase para quebrar amidos, como os encontrados no tecido muscular, a celulase para quebrar carboidratos, como aqueles encontrados no fluido conjuntivo e tecido articular, e lipase para quebrar gorduras, como as encontradas no tecido adiposo. Qualquer combinação dessas enzimas pode estar presente em uma solução detergente, a depender da aplicação. Soluções contendo enzimas normalmente podem ser usadas em um pH mais neutro e em temperaturas mais brandas do que aquelas sem enzimas (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007).

As categorias de formulação mais comuns das soluções de limpeza são enzimáticas e não enzimáticas. Normalmente, as soluções de limpeza para dispositivos médicos são simplesmente referidas como 'detergentes'. Detergentes enzimáticos são comumente usados para limpeza manual e incluem formulações de

enzimas simples, duplas e múltiplas. Os detergentes de enzima única contêm, na maioria das vezes, a enzima protease, enquanto os detergentes de enzimas duplas e multi-enzimas podem ter uma combinação de amilase, lipase e/ou celulase. Essas soluções são frequentemente projetadas para serem usadas em temperaturas ambiente ou ligeiramente mais altas e fornecem ação rápida em um pH neutro. Devido à seletividade de cada enzima, o detergente enzimático escolhido deve ser específico para o tipo de partículas de sujeira presentes (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007). A presença dessas enzimas contribui para a natureza proteica do detergente enzimático. A remoção adequada dessas proteínas após a limpeza requer um enxágue completo. Além disso, muitos dos detergentes enzimáticos usados para o reprocessamento de dispositivos médicos requerem controle de tempo e temperatura de contato para permitir a remoção adequada da sujeira, trazendo especificidade ao procedimento de limpeza, demandando que algumas regras sejam seguidas e alguns parâmetros sejam acompanhados. Outro ponto importante é o fator microbiológico, uma vez que detergentes enzimáticos usados para o reprocessamento de dispositivos médicos normalmente não são eficazes na eliminação de microrganismos (CHAN-MYERS *ET AL.*, 1997).

Estudos estimam que, durante um ciclo de lavagem comum, um detergente com atividade multi-enzimática validada pode clivar um número 200-1000 vezes maior de ligações peptídicas do que um detergente alcalino comparável. Isso levaria, teoricamente, a uma maior facilidade de arraste das partículas da superfície com água (SAVA & KRITZLER, 2011). Detergentes não enzimáticos são mais comumente utilizados em lavadoras automatizadas. Eles podem ser de pH neutro ou alcalino e fornecem limpeza eficaz em temperaturas elevadas (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007).

O estudo de Shoemake & Stoessel, que trata de boas práticas na limpeza de dispositivos médicos reutilizáveis, indica uma série de fatores que deve ser considerada para que uma solução de limpeza seja eficaz, incluindo (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007):

1. Treinamento de pessoal - É essencial para o uso eficaz das soluções de limpeza. É fundamental que o pessoal responsável por qualquer parte do reprocessamento do dispositivo seja devidamente treinado e provido das

ferramentas necessárias para completar suas tarefas com eficácia e segurança.

2. Uso adequado de equipamento de proteção individual (EPI) - Ao manusear dispositivos contaminados, os profissionais médicos devem usar EPIs adequados com base no grau de risco. Na área de descontaminação, uniformes limpos devem ser colocados nas instalações. Além do equipamento de proteção individual, a lavagem das mãos é imprescindível para minimizar a transferência de organismos entre pessoas, pacientes e objetos.
3. Preparação adequada do dispositivo - Antes da limpeza, a preparação adequada ajuda a expor todas as superfícies do dispositivo à solução de limpeza. Isso inclui a abertura de tesouras e dispositivos com alguma trava de segurança ou proteção, desmontagem de dispositivos complexos e algum procedimento pré-limpeza, como a imersão em solução para facilitar a remoção da sujidade.
4. Qualidade da água usada - Água de boa qualidade é essencial. A maioria das soluções de limpeza é embalada concentrada para posterior diluição em água. A má qualidade da água pode reduzir a eficácia da solução de limpeza e causar manchas nos dispositivos. Idealmente, a água deve ser filtrada através de um filtro de 0,2 μm . Água potável da torneira também pode ser usada, mas a água filtrada ou estéril é preferível para enxaguar os dispositivos.
5. Aderência às diretrizes e instruções do fabricante para uso - É importante seguir as instruções de uso do fabricante e diretrizes aplicáveis, isso garantirá o desempenho ideal da solução. Averiguar parâmetros de uso corretos, incluindo temperatura, razão de diluição e tempo de imersão, bem como requisitos de enxágue e secagem, de acordo com o recomendado pelo fabricante. Normalmente, uma temperatura mínima é necessária para que a solução se torne ativa e forneça a ação de limpeza adequada. O uso de água mais quente do que o recomendado não é aconselhável, pois pode inativar as enzimas contidas na solução ou causar a desnaturação de sujidades à base de proteínas, tornando-as mais difíceis de remover. A razão de diluição precisa ser medida com precisão com base nas especificações que podem incluir diferentes taxas de diluição para limpeza manual versus limpeza

automática. Para a limpeza manual, é necessário medir o volume da pia ou bacia que está sendo utilizada para a limpeza, lembrando que o recipiente deve ser profundo o suficiente para imergir totalmente os dispositivos na solução. A quantidade apropriada de solução de limpeza deve então ser adicionada com base nesse volume específico de água.

Isso quer dizer que mesmo que o detergente seja o mais indicado para aquela atividade específica, apenas a seleção do detergente correto não garante que o processo será eficiente, sendo necessário seguir regras, normas e recomendações para obter uma limpeza eficaz. Usar menos solução do que o recomendado pode diminuir a eficácia da limpeza, e um volume maior de solução não é necessariamente melhor, pois pode dificultar o enxágue completo. No entanto, dispositivos muito sujos podem exigir concentrações mais altas da solução de limpeza. É importante mergulhar os dispositivos pelo tempo mínimo recomendado pelo fabricante, pois isso permite que os componentes da solução quebrem as sujeiras presentes. Observe que o fabricante pode recomendar um tempo de imersão mais longo quando há muita sujeira ou quando ela está seca. Não é, no entanto, recomendado o uso de soluções de limpeza para armazenar os dispositivos, pois a imersão por longos períodos de tempo pode danificar os dispositivos, causando corrosão ou permitindo o crescimento microbiano na solução (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007).

O enxágue completo é vital para preparar um dispositivo para processamento posterior. Detritos ou soluções residuais podem levar à desinfecção ou esterilização incompleta e também podem causar danos ao dispositivo. Portanto, deve-se sempre usar água suficiente para enxaguar completamente as superfícies do dispositivo, tanto externas quanto internas, com atenção extra para lumens, dobradiças e fendas (SHOEMAKE & STOESSEL, 2007; CDC EUA, 2021; MSC MED 2021).

Os dispositivos devem ser secos para remover o excesso de umidade antes da desinfecção ou esterilização. O excesso de umidade pode causar diluição excessiva de desinfetantes, reduzindo sua eficácia abaixo da concentração mínima efetiva, além do cancelamento do ciclo em algumas tecnologias de esterilização. Deixar umidade sobre ou dentro dos dispositivos por longos períodos, especialmente em lumens e superfícies internas, pode promover a colonização de microrganismos transmitidos pela água, o crescimento de biofilmes (SHOEMAKE & STOESSEL,

2007), e favorecer o processo de corrosão, se o instrumento for metálico (QUEIROZ *ET AL.*, 2018).

O efeito da enzima na remoção de biofilme é bem conhecido e os detergentes enzimáticos são geralmente considerados melhores do que detergentes não-enzimáticos, particularmente por seus fornecedores. No entanto, estudos não mostram convergência de resultados. O estudo de Henoun *et al.* indicou que as enzimas melhoraram a atividade detergente de apenas alguns dos agentes testados, enquanto as atividades dos outros foram equivalentes tanto para a formulação enzimática quanto para a não enzimática. Condições de trabalho, particularmente temperatura e pH, também são conhecidos por afetar o desempenho da enzima (HENOUN LOUKILI *ET AL.*, 2004).

Nos anos 2000, houve um aumento significativo do uso de detergentes enzimáticos nos hospitais alemães porque o pH neutro é associado a um menor dano aos dispositivos quando comparado ao detergente alcalino, ainda que este último seja recomendado para o processamento de dispositivos médicos por dissolverem resíduos de proteína e gordura com muita facilidade. Estudos da literatura não encontraram diferença entre os dois tipos de detergente em termos de limpeza (ZUHLSDORF *ET AL.*, 2002; ZUHLSDORF *ET AL.*, 2004; HENOUN LOUKILI, 2004).

Os fornecedores tendem a considerar os detergentes enzimáticos, geralmente com custo mais elevado, como melhores do que os não-enzimáticos. No entanto, no estudo de Heunon *et al.*, dois dos detergentes não enzimáticos testados mostram alta eficiência de limpeza. Assim, apenas a avaliação individual do detergente associado ao método, equipamento e instrumento pode indicar a eficiência real e sugerir uma classificação adequada do agente (HENOUN LOUKILI *ET AL.*, 2004).

De fato, o estudo realizado por Zühlsdorf *et al.* conclui que entre nove diferentes agentes de limpeza testados, poucos apresentaram resultado melhor que a água pura, mas ainda assim não recomendam não utilizar detergentes, já que seus resultados podem ter sofrido influência do método usado e porque houve resultados inconsistentes (ZUHLSDORF *ET AL.*, 2002). De forma semelhante, o estudo de Henoun *et al.*, realizado em 2004, afirma que enzimas nem sempre melhoram a atividade do detergente, sendo que alguns agentes apresentam a mesma eficácia da água pura. Com base nesse fato, desenvolveram uma metodologia de avaliação dos

detergentes de forma reprodutível, simples de executar e com boa relação custo-benefício, que afirmaram poder ajudar os hospitais, clínicas e centros médicos a escolherem os detergentes mais adequados ao seu uso com base em suas atividades detergentes e bactericidas (HENOUN LOUKILI *ET AL.*, 2004).

Ainda existem outros agentes de limpeza que podem ser usados tanto no processo de limpeza quanto na etapa de esterilização, quando esta é feita de forma química, usando compostos fenólicos, clorexidina, halogênios, álcoois, peróxidos, óxido de etileno, formaldeído, glutaraldeído ou ácido peracético. O peróxido de hidrogênio, por exemplo, atua como um oxidante cujos radicais livres hidroxila matam uma ampla gama de microrganismos atacando componentes celulares essenciais, que incluem lipídios, proteínas e DNA. Este composto tem atividade esporocida em altas concentrações e tempos de contato prolongados, e é amplamente utilizado como um biocida. O valor do peróxido de hidrogênio estabilizado como um agente de limpeza ambientalmente correto foi relatado, embora possa ser corrosivo para o alumínio, cobre, latão ou zinco (ALFA & JACKSON, 2001).

O detergente a base de peróxido de hidrogênio tem a capacidade de matar microrganismos e limpar resíduos orgânicos de dispositivos médicos, enquanto não apresenta toxicidade ou maiores riscos a quem o manipula. Isso sugere que seria o detergente ideal para garantir a proteção dos profissionais de saúde e, ao mesmo tempo, fornecer uma limpeza excelente. A necessidade de garantir proteção adequada aos profissionais de saúde durante o reprocessamento de dispositivos médicos tem sido amplamente enfatizada. De fato, o equipamento de proteção individual (incluindo aventais, luvas e protetores faciais) é recomendado para reduzir o risco de profissionais de saúde. Porém, o fato de ser um oxidante e ter o potencial de atacar a integridade do instrumento ou dispositivo médico o impede de ter uma utilização maior e mais ampla (ALFA & JACKSON, 2001), o que mostra que já há uma atenção entre o agente sanitizante usado e seu efeito no item que será limpo.

A avaliação de diversos estudos leva a conclusões diferentes, como os resultados de Gonzalez *et al.*, que indicaram maior eficácia do detergente enzimático, porém com os autores destacando a impossibilidade de generalização do resultado, já que se notou a necessidade de se analisar outras variáveis, como o tipo de detergente, sugerindo estudos posteriores para a comparação com

detergente ligeiramente alcalino, teste em outros centros médicos e a variação dos instrumentos a serem limpos (GONZALEZ *ET AL.*, 2019). Enquanto a investigação de Evangelista *et al.* sugere ter havido saturação do detergente enzimático, razão pelo insucesso do método automatizado para análise do estudo (EVANGELISTA *ET AL.*). Isso apenas reforça a especificidade de cada processo e a necessidade de cada um ser estudado completa e independentemente.

3.4.1 Detergentes Alcalinos

Detergentes alcalinos apresentam em sua composição substâncias alcalinas, cuja função principal é atuar quimicamente na remoção de compostos orgânicos das superfícies dos equipamentos. Ingredientes para causar hidrólise alcalina são comumente usados na formulação de detergentes. Entre os principais ingredientes estão: álcalis, fosfatos, umectantes, agentes quelantes e sequestradores. Os álcalis, como o hidróxido de sódio e carbonato de sódio, promovem a saponificação da gordura, enquanto os fosfatos auxiliam na redução da dureza da água, e atuam como emulsificantes e dispersantes. Os agentes umectantes facilitam a penetração da solução e auxiliam na remoção da proteína (SANTOS, 2012).

A hidrólise alcalina é uma reação química que ocorre quando resíduos orgânicos resistentes são expostos a uma solução alcalina, que atua na quebra desses resíduos em moléculas menores, mais solúveis em água e mais facilmente emulsificadas (ALCONOX, 2019). É um mecanismo rápido que pode acontecer durante o curto período de tempo em que uma gota de solução de limpeza está em uma superfície antes que a próxima gota apareça e a varra.

Ésteres e amidas são dois dos tipos mais comuns de resíduos que são decompostos por detergentes alcalinos. Os íons hidróxido se ligam ao resíduo e, essencialmente, o decompõem por meio de uma substituição nucleofílica. Os íons hidróxido quebram os ésteres em ácidos carboxílicos e álcoois, e as amidas em ácidos carboxílicos e aminas. As moléculas polares menores são mais facilmente dissolvidas ou emulsificadas, se ligando mais facilmente ao detergente para posterior enxágue, que irá remover detergente e as partículas de sujeira ligadas a ele (ALCONOX, 2019).

Um detergente é composto por uma extremidade de hidrocarbonetos, hidrofóbica, e uma extremidade iônica, hidrofílica. Devido ao caráter apolar do hidrocarboneto, uma molécula de detergente não é completamente solúvel em água, mas suspende imediatamente em água devido à formação de micelas. Neste caso, uma micela é um aglomerado esférico de moléculas de detergente com extremidades iônicas hidrofílicas voltadas para fora e extremidades apolares na parte interior. Esse arranjo permite que o detergente envolva sujeira oleosa, gorduras e outros resíduos dentro da micela. Desta forma, o interior da micela interage com as partículas oleosas, apolares, enquanto o exterior interage com a água e partículas polares, permitindo a remoção de sujeira, o enxágue e a consequente limpeza das peças (HILL, 2003; MEYERS, 2001). Um desenho esquemático de uma micela de detergente alcalino pode ser observado na Figura 1.

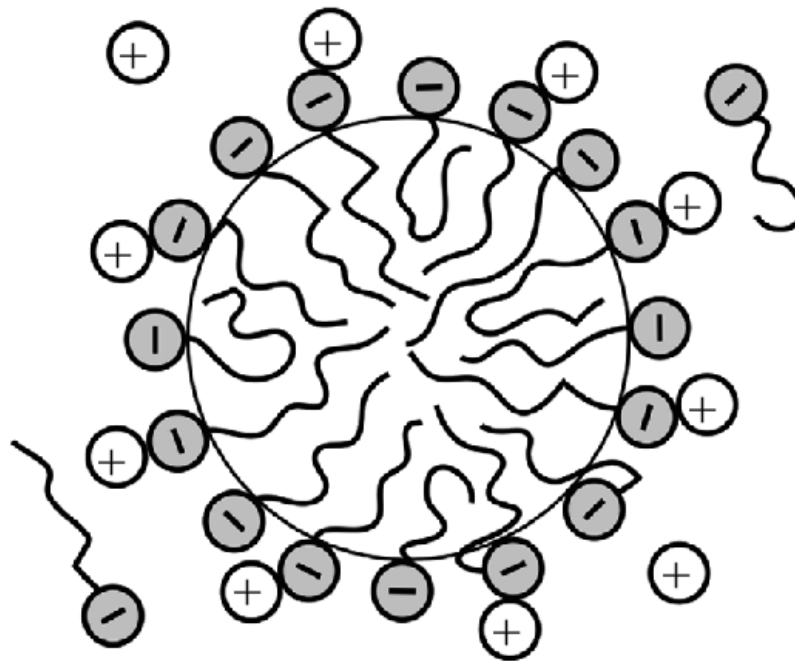


Figura 1 - Ilustração de uma micela de detergente alcalino (FONTE: KRALCHEVSKY *ET AL.*, 2014).

Muitos compostos biológicos possuem ésteres ou amidas em sua composição, portanto a hidrólise alcalina é uma técnica eficaz de remoção de resíduos biológicos. Por isso, indústrias de dispositivos médicos, saúde, alimentos e bebidas, farmacêutica e biotecnologia muitas vezes optam por detergentes alcalinos, por sua potente capacidade de emulsificar resíduos orgânicos e oleosos (ALCONOX, 2019).

3.4.2 Detergentes Enzimáticos

Enzimas são substâncias orgânicas catalisadoras, de natureza geralmente proteica, agindo de forma a acelerar reações. Durante a limpeza, as enzimas agem quebrando ligações moleculares tornando menores as estruturas complexas, conforme mostra a Figura 2, até que sejam suficientemente pequenas para a sua dissolução. Porém, enzimas são específicas para cada tipo de composto, sendo necessário ao detergente enzimático incorporar, normalmente, mais de um tipo de enzima, específicas para proteínas, lipídeos ou carboidratos, por exemplo. Cada enzima empregada apresenta um formato específico, que se ligará a um tipo de sujidade ou substrato acelerando sua quebra. Após a quebra do substrato, seus fragmentos se desprendem e a enzima poderá ser reutilizada, até que haja uma saturação por aquela enzima e ela perca sua atividade. Soluções enzimáticas, compostas por água mais enzima somente, não propiciariam um bom contato com superfícies sujas. Assim, para auxiliar na interação enzimática com as sujidades é necessária a presença de compostos tensoativos nas formulações (3M, 2016).

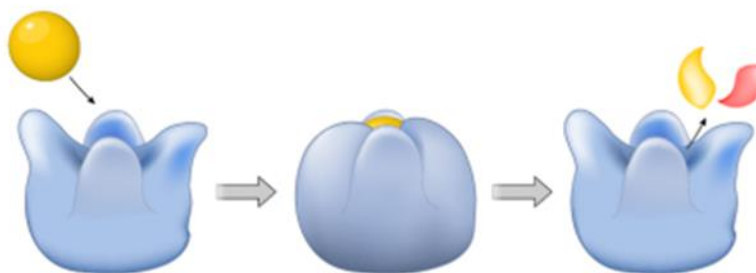


Figura 2 - Ilustração do mecanismo de ação de uma enzima (FONTE: KRISSE K. M. – ACS, 2021)

O mecanismo de ação da detergentência é composto por três etapas (SHAW, 1992):

- Molhabilidade: reduzir a tensão superficial, a fim de permitir maior contato da solução com as superfícies e sujidades, com o objetivo de atingir pequenas fissuras dos instrumentais de conformação complexa.
- Remoção da sujidade: garantir à solução maior força de contato com a superfície que a sujidade, desprendendo-a.

- Suspensão: nesta etapa, os tensoativos auxiliam a evitar a redeposição da sujeira sobre a superfície.

A presença de enzimas em uma formulação não garante a atividade enzimática, já que elas podem não estar ativas ou ter baixa atividade nas condições de uso, mesmo que sua concentração na formulação seja alta. Para viabilizar sistemas contendo enzimas, agentes estabilizantes são adicionados à formulação para atuar inibindo a atividade enzimática reversivelmente na forma concentrada, retomando sua atividade normal depois de diluída em água. As enzimas têm atividade química muito frágil e, quando não adequadamente estabilizadas, podem ter sua atividade irreversivelmente destruída (3M, 2016).

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) rege os detergentes enzimáticos, determinando testes e critérios para sua liberação de uso. Entre as exigências da agência estão a indicação no rótulo de alguns parâmetros críticos para o desempenho ótimo das enzimas daquele determinado detergente, como o pH, o tempo de ação e a temperatura da água de diluição (RDC 55, Anvisa. 2012).

3.5 AÇOS INOXIDÁVEIS

Os aços inoxidáveis são ligas de ferro, carbono, cromo, podendo haver outros elementos metálicos como níquel, molibdênio, titânio ou nióbio, integrando o material. A presença de diferentes metais e a sua composição final é que determinam suas diferentes classes (CARBÓ, 2008). Estão entre os principais materiais utilizados na fabricação de peças críticas para plantas químicas e de energia, devido à combinação de boas propriedades mecânicas e alta resistência à corrosão (ROSA *ET AL.*, 2017). Uma das classes mais estudadas, o aço inoxidável 316 é uma liga austenítica amplamente utilizada em aplicações industriais devido à sua alta resistência à corrosão aliada a boas propriedades mecânicas. A presença de molibdênio em sua composição química garante bom desempenho contra os ataques da corrosão associada à presença de cloretos quando comparada a outras classes de austeníticos como o aço 304 e 304L. Além disso, o baixo teor de carbono de ligas como 304L e 316L favorecem o processo de soldagem por diminuir a precipitação de carbonetos nos contornos de grão (AL-AMR, 2005). Assim, o aço

AISI 316 é uma boa opção para as indústrias marinha, médica e alimentícia, por exigirem excelentes propriedades anticorrosivas. O aço AISI 420 é um aço inoxidável martensítico, cujas propriedades podem ser ajustadas pelo processo de tratamento térmico. Devido à sua boa resistência à tração, alta dureza e razoável resistência à corrosão, ele também é comumente usado na indústria (ETTEFAGH *ET AL.*, 2021).

Os martensíticos foram a primeira classe de aço inoxidável a ser desenvolvida, e eles diferem dos outros grupos devido ao seu conteúdo de cromo superior a 12%, o que permite virtualmente 100% da microestrutura martensítica em qualquer taxa de resfriamento, adequado para aplicações que exigem maior força de tração, resistência à fadiga, à temperatura, além de uma resistência à corrosão moderada. Aços martensíticos com alto teor de carbono, como 420C e 440C, são usados para melhorar as propriedades mecânicas dos aços AISI 420 e 440, que ocorrem ao custo de resistência à corrosão. O aço 420C é muito utilizado para componentes de precisão de fabricação, como utensílios de cutelaria, fusos, bombas e peças de válvula, moldes de plástico e indústria do vidro. Devido à sua boa usinabilidade, o aço 420C também é comumente utilizado como instrumentos cirúrgicos (ROSA *ET AL.*, 2017).

O aço inoxidável AISI 420 é muito utilizado em instrumentos cirúrgicos devido às suas propriedades mecânicas e boa resistência à corrosão, porém apresenta baixa maleabilidade, demandando estudos mais específicos sobre as propriedades do material após uso para determinar o impacto que diferentes modos de utilização podem ter na vida útil do instrumento (ROSA *ET AL.*, 2017).

Os aços inoxidáveis austeníticos contêm grandes quantidades de níquel ou níquel mais manganês. Esses tipos de aços austeníticos são estáveis à temperatura ambiente, não são magnéticos e não podem ser endurecidos por tratamento térmico (SOLTANI & TAYEBI, 2018).

A soldagem de aços inoxidáveis austeníticos é importante devido à resistência à corrosão e à formação de trincas. A soldabilidade adequada é uma das propriedades significativas desse tipo de aço sendo, conseqüentemente, amplamente utilizado na fabricação de vasos de alta pressão e fábricas de produtos químicos. As juntas soldadas de aços inoxidáveis austeníticos geralmente têm composição química, propriedades mecânicas e tenacidade comparáveis aos metais de base. Esses aços

normalmente não são sensíveis ao trincamento a frio e, devido à microestrutura austenítica estável, não requerem tratamento térmico após a soldagem. Embora os aços inoxidáveis sejam adequadamente flexíveis e possam suportar quantidades significativas de contração, as juntas podem rachar durante o resfriamento. Um dos problemas mais comuns durante a soldagem de aços inoxidáveis austeníticos é a precipitação de carbonetos. Carbonetos de cromo são normalmente formados em contornos de grão, portanto, o teor de Cr diminui nas regiões próximas aos contornos do grão e reduz a resistência à corrosão dessas regiões devido ao fenômeno da sensitização (SOLTANI & TAYEBI, 2018).

Devido à sua excelente resistência à corrosão com boas propriedades mecânicas, disponibilidade e custo razoável, a aplicação de aços inoxidáveis tem crescido muito para implantes médicos (ROLAND *ET AL.*, 2006). Essas aplicações incluem dispositivos ortopédicos de fixação óssea, fios ortodônticos, placas e parafusos usados em aplicações craniofaciais, ortopedia para substituição de articulações e reparo de fraturas, implantes cardiovasculares (*stents*, válvulas artificiais), *stents* coronários e pulmonares, prótese de quadril e tímpanos artificiais (HERMAWAN *ET AL.*, 2011). As reações eletroquímicas dentro do corpo humano podem causar a corrosão dessas peças. A oxidação em aplicações biológicas é uma questão importante, pois não afeta apenas a vida útil e a estabilidade estrutural da própria peça, mas também causa reações inflamatórias e anafiláticas (ASRI *ET AL.*, 2017). Por exemplo, a liberação de íons Mo, Cr e Ni de *stents* feitos de aço inoxidável pode causar reações imunes e inflamação podendo gerar diversos problemas ao paciente, incluindo a rejeição do implante ou dispositivo pelo organismo. Recentemente casos de reações autoimunes e distúrbios neurológicos devido à presença de cobalto em dispositivos médicos foram reportados e investigados, gerando a necessidade de exclusão de ligas com a presença desse elemento de diversos produtos e linhas de produção (GARCIA *ET AL.*, 2020; FDA, 2019).

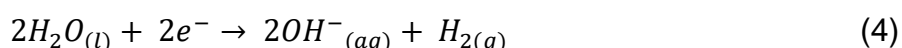
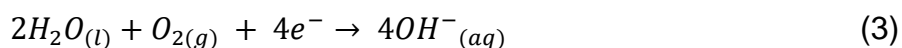
3.6 CORROSÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS

A corrosão do aço é um processo eletroquímico que envolve a movimentação de elétrons e íons pela interação de um agente oxidante, que irá perder elétrons, nesse caso o metal, e um agente redutor, que irá receber íons ou elétrons. Como a corrosão leva à saída de elétrons e íons do metal, gera perda de massa e enfraquecimento do material, além de outros inconvenientes potenciais, como a necessidade de substituição do item ou, no caso em questão, gera risco ao processo, dispositivo ou pessoa que teve contato com o metal comprometido (GENTIL, 1997). A corrosão necessita da presença de um catodo, um anodo e um meio no qual as espécies envolvidas possam se movimentar (CENSUS, 2001).

O aço inoxidável apresenta uma condição natural de proteção devido à formação de uma camada passiva constituída de óxidos dos componentes adicionados ao aço que protege o metal do ataque por parte do oxidante (McCAFFERTY, 2010). Essa camada passiva pode ser deteriorada por diversos fatores, como pHs extremos e presença de íons cloreto, possibilitando o ataque ao ferro presente no aço, e conseqüentemente causando a perda de seção do metal por oxidação (McCAFFERTY, 2010; ZHOU *ET AL.*, 2012). A semi-reação que ocorre no anodo é exibida na equação 1.



Já para a região catódica, há recepção de elétrons podendo haver a redução de íons hidrogênio ou oxigênio, dependendo do pH do meio, como mostram as equações 2, 3 e 4.



Naturalmente, os metais sofrem reação espontânea formando óxidos e hidróxidos, e são exatamente esses materiais que garantem o caráter inoxidável ao aço. Isso porque compostos de metais como cromo, níquel, titânio e nióbio formam um fino filme bastante aderido à superfície do aço, separando-o, assim, do meio e

agindo como uma proteção anti-corrosão. Esse filme é chamado de camada passiva e é constituído de óxidos ou hidróxidos dos metais. É extremamente fina, chegando a 30-50 angstroms, e tem sua formação favorecida pela presença de meios oxidantes. Em um material que não apresenta o fenômeno da passividade, à medida que a concentração do oxidante aumenta, a velocidade de corrosão também aumenta. Um aço inoxidável presente em meio oxidante também sofrerá oxidação (ponto A na Figura 3), que aumenta com pequenos aumentos na concentração do oxidante (ponto B), em um comportamento semelhante ao que ocorre em um metal sem a camada passiva. Porém, quando a concentração do oxidante é suficiente para a formação da camada passiva, a velocidade de corrosão cai bruscamente não voltando a aumentar com novos aumentos da concentração do oxidante, até que esta seja tão alta que ela rompa a camada passiva em um fenômeno conhecido como transpassividade e volte a aumentar a velocidade de corrosão (CARBÓ, 2008; FONTANA & GREENE, 2002). Isso pode ser observado na Figura 3.

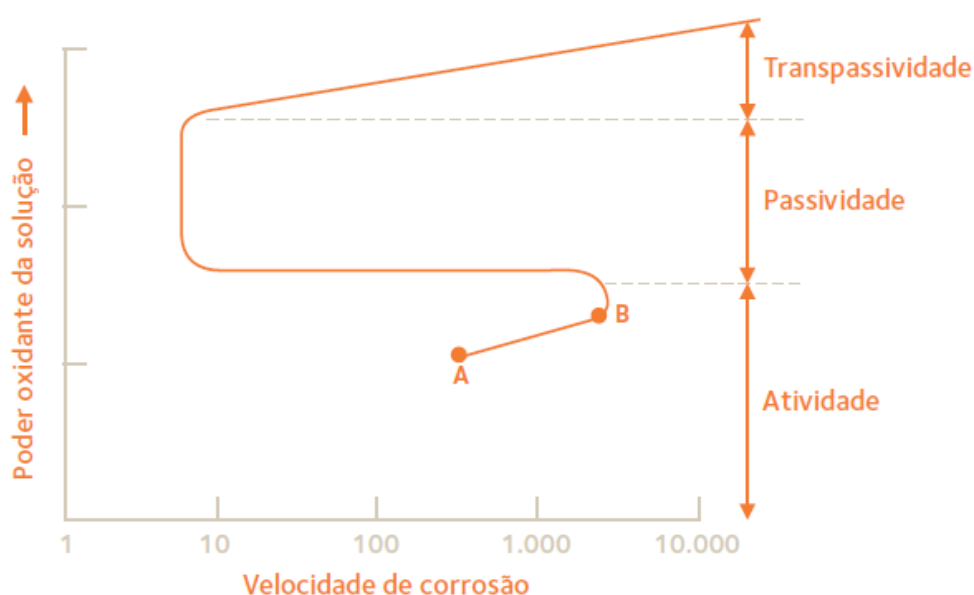


Figura 3 - Comportamento de Aço Inoxidável com Passivação (FONTE: CARBÓ, 2008)

A formação da camada passiva é reconhecida como a razão para o bom desempenho frente à corrosão dos aços inoxidáveis. Apesar das diferenças relatadas, vários trabalhos de pesquisa convergem que o filme passivo consiste em duas camadas de óxidos e hidróxidos de ferro (III) e cromo (III) (MASSOUD *ET AL.*, 2013; VIGNAL *ET AL.*, 2013; CHENG *ET AL.*, 2013, APUD ETTAFAGH *ET AL.*, 2021). A maioria dos pesquisadores acredita que o Fe pode se difundir mais para

fora, uma vez que tem maior mobilidade em comparação com o Cr, assim, a camada externa é principalmente formada pelos compostos de ferro e a camada interna pelos grupos de cromo (LORANG *ET AL.*, 1994; FREIRE *ET AL.*, 2010, APUD ETTEFAGH *ET AL.*, 2021). Os óxidos e hidróxidos de ferro e cromo possuem importâncias variáveis na função da camada protetora e a resistência à corrosão depende muito do crescimento e estabilidade do filme passivo, que varia com o meio, composição da liga, microestrutura, entre outros (FATTAH-ALHOSSEINI *ET AL.*, 2010). Em soluções com valores de pH mais elevados, a camada passiva formada é mais espessa e estável devido à maior estabilidade do óxido de ferro (camada externa) em soluções alcalinas. Por sua vez, a camada interna de óxido de cromo é mais resistiva em soluções ácidas, então o filme passivo pode se tornar apenas uma monocamada de compostos de cromo em pH muito baixo. Por outro lado, defeitos na camada aumentam a corrosão localizada pelo esgotamento de Cr de uma região, diminuindo sua capacidade de re-passivação (SUN *ET AL.*, 2009).

A adição de outros elementos não garante modificação apenas na resistência à corrosão, mas também na dureza, ductilidade, estabilidade de fases, de forma que é necessário avaliar múltiplos componentes e as respectivas propriedades, mais ou menos indicadas para cada processo (SEDRICKS, 1996). De um modo geral, os aços inoxidáveis não são recomendados para condições altamente ácidas, devido à falta de homogeneidade e instabilidade da camada de filme passivo nesses meios (WIJESINGHE & BLACKWOOD, 2007). No entanto, seu desempenho em condições ácidas deve ser analisado individualmente, pois algumas classes conseguem resistir bem a pH baixo para algumas aplicações. Por exemplo, bactérias oxidantes de enxofre podem existir no ambiente e produzir ácido sulfúrico, causando corrosão microbiana mesmo em um ambiente não ácido, o que é relativamente imprevisível e altamente localizado (OKABE *ET AL.*, 2007). Outro problema associado é a fragilização por hidrogênio, fenômeno em que os átomos de hidrogênio se difundem para a amostra com relativa facilidade para formar hidreto frágil ou gás hidrogênio. A gravidade desse fenômeno é conhecida por estar diretamente relacionada a defeitos estruturais que atuam como locais de captura de hidrogênio (HE *ET AL.*, 1997).

Uma grande parte dos trabalhos publicados estuda a passividade do aço inoxidável em solução ácida, onde os óxidos de ferro e cromo não são termodinamicamente estáveis, ou com presença de cloreto, que também afetam

negativamente a camada passiva. No entanto, o aço inoxidável também pode entrar em contato com meios alcalinos, logo é interessante estudar seu comportamento em pH alto (MACDONALD, 2011; TRANCHIDA *ET AL.*, 2018). Tranchida *et al.* conduziram um trabalho comparando os comportamentos do aço em soluções com larga variação de pH, e concluíram que a polarização potencioestática de diferentes graus de aço inoxidável abaixo do potencial transpassivo em solução ácida e alcalina induz a formação de filmes passivos mais estáveis e mais amplos em relação ao cromo puro. A largura da faixa do potencial de passivação depende tanto da composição do aço inoxidável quanto do eletrólito. Para os aços AISI 304 e 316 a polarização em meio ácido induz a formação de filmes finos passivos com uma faixa de potencial de passivação mais larga, sugerindo a formação de uma camada de Cr_2O_3 . Por outro lado, a faixa mais baixa de potencial de passivação nos filmes passivos desenvolvidos em meio alcalino sugere a formação de uma camada de óxido de ferro quase pura sendo, portanto, menos protetora que a camada desenvolvida em meio ácido (TRANCHIDA *ET AL.*, 2018).

A elevação de preços de vários elementos de liga forçou os fornecedores de aço inoxidável a propor novas soluções que minimizem ou eliminem esses elementos, principalmente níquel e molibdênio. Esta mudança deve-se principalmente a razões econômicas, uma vez que há um consenso que a inserção de Mo resulta em aumento da resistência à corrosão, ainda que o mecanismo não seja completamente compreendido (MESQUITA *ET AL.*, 2011). Essa falta de conhecimento científico pode ser ilustrada por uma discordância fundamental na literatura sobre se o molibdênio é um componente de filmes passivos (MONTEMOR *ET AL.*, 1999; SUGIMOTO & SAWADA, 1977) ou não (ADDARI *ET AL.*, 2008; YANIV *ET AL.*, 1977, TAN *ET AL.*, 1997 APUD MESQUITA *ET AL.*, 2011), ainda que haja consenso que seu efeito seja positivo em meios ácidos (PARDO *ET AL.*, 2008; LEMAITRE *ET AL.*, APUD MESQUITA *ET AL.* 2011).

O trabalho de Mesquita *et al.*(2011) mostrou o efeito muito positivo da presença de molibdênio no aço inoxidável em meio ácido, comparando os resultados de um aço AISI 304, sem a presença do Mo, com um aço AISI 316, que contém este elemento. Já para o meio alcalino, o aço AISI 304 se apresentou mais resistente à corrosão que o aço inoxidável 316, sendo considerado comportamento anômalo e potencialmente relacionado pelos autores ao mecanismo de reação associado ao

efeito do Mo, por exemplo, um estado de carga dependente do pH que poderia permitir a captura de Cl^- por cátions de Mo em soluções ácidas, mas não em meio alcalino. Os autores, porém, afirmam que esse mecanismo ainda está longe de ser totalmente pesquisado e compreendido. Isso poderia levar à conclusão de que o molibdênio é ineficaz em meio alcalino, mas isso não estaria correto. No mesmo trabalho, os autores testaram a corrosão de aços duplex com presença do elemento Mo em meio alcalino e o material não apresentou sinais de oxidação. Concluem, então, que o molibdênio pode se dissolver preferencialmente na ferrita, o que explicaria o melhor resultado no aço duplex do que no aço 316, provavelmente mais associado a uma inibição do início do pit do que por aspectos cinéticos (MESQUITA *ET AL.*, 2011).

O trabalho de Freire *et al.* (2010) respalda esse resultado, identificando um enriquecimento de espécies com Cr(III) e Fe(III) e esgotamento de espécies com Fe(II) e Ni à medida que o pH reduz de 13 a 9. Respalda também a estrutura do filme passivo em duas camadas, uma mais externa com maior presença de ferro e uma mais interna composta majoritariamente de Cr e Ni. Também observa o caráter semicondutor do filme na superfície do aço 316, e seu crescimento com o passar do tempo (FREIRE *ET AL.*, 2010). Porém os trabalhos que expõem o aço inoxidável a meios alcalinos majoritariamente também possuem quantidades consideráveis de cloreto nas composições dos meios, muitas vezes na tentativa de simular o comportamento do aço nos interstícios do concreto, constituindo uma diferença substancial ao presente trabalho.

3.6.1 Técnicas Eletroquímicas

O conhecimento do comportamento eletroquímico de um metal, avaliando seu comportamento em potenciais diferentes do potencial de corrosão ou de equilíbrio, apresenta interesse tanto prático como teórico. Um controle adequado do potencial pode ser obtido com um potenciostato, através do qual é possível impor ao eletrodo de trabalho o potencial desejado com relação ao eletrodo de referência, medir e registrar a corrente de polarização em função da tensão, obtendo curvas de polarização que representam a relação entre o potencial aplicado e a

correspondente corrente medida no potenciostato (WOLYNEC, 2003). Para avaliar o comportamento de materiais metálicos frente a processos de oxi-redução, é usual utilizar as técnicas eletroquímicas e ensaios de corrosão acelerada. Essas técnicas podem garantir um entendimento mais profundo dos mecanismos de corrosão e, assim, ajudar a planejar os próximos passos de acordo com o objetivo pretendido (MCCAFFERTY, 2010). Quando o potencial de equilíbrio de um eletrodo é alterado pela imposição de um potencial externo, diz-se então que o eletrodo sofreu polarização. A diferença entre a polarização e o potencial de equilíbrio é chamada de sobretensão ou sobrepotencial. A determinação do potencial de corrosão e a análise das curvas de polarização auxiliam tanto na investigação de processos corrosivos como na avaliação e acompanhamento de sistemas de proteção anticorrosiva (WOLYNEC, 2003). A aplicação de técnicas eletroquímicas, como polarização linear, resistência de polarização e polarização potenciodinâmica, tem sido frequentemente usadas na avaliação de alguns fenômenos básicos como passividade de óxidos, efeitos de elementos de liga, cinética de reação, uso de inibidores para controlar o comportamento de corrosão, entre outros. Mais recentemente, a Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) também passou a ser usada para estudos de corrosão (HERNÁNDEZ *ET AL.*, 2020).

a) *Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE)*

A impedância é definida como a medida da habilidade de um determinado circuito em resistir ao fluxo de corrente elétrica, então a impedância eletroquímica é a relação entre a diferença de potencial energético e o fluxo de elétrons gerado por um sinal de onda aplicado em meio aquoso (HERNANDEZ *ET AL.*, 2020). Assim, a EIE é a técnica que aplica um sinal de corrente alternada de baixa amplitude ou potencial em um eletrodo de trabalho em contato com um eletrólito, em que a relação entre o sinal aplicado e sua resposta pode ser avaliada em função da frequência ou do tempo com o auxílio de um analisador de espectro ou um medidor de resposta de frequência (FRA, do inglês *Frequency Response Analyzer*) (RIBEIRO, 2016). Os dois tipos mais comuns de representação gráfica são: o diagrama de Nyquist, que relaciona os valores de Impedância Real e Imaginária, e

os diagramas de Bode, que relacionam os dados do Módulo de Impedância ou do Ângulo de Fase com a frequência aplicada na base logarítmica (DOLABELLA, 2016). Representações típicas da técnica de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica são apresentadas na Figura 4, com o diagrama de Nyquist exibido em (a) e os diagramas de Bode, com o módulo de impedância no eixo da esquerda e o ângulo de fase no eixo da direita, exibidos em (b).

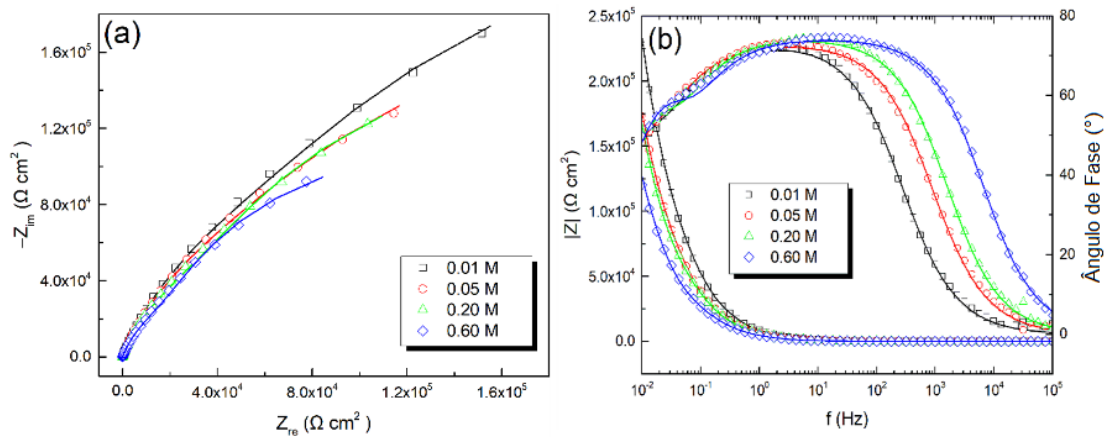


Figura 4 - Representação típica dos diagramas da técnica de EIE (Fonte: ZHA *ET AL.*, 2020)

A estabilidade da camada passiva do aço inoxidável pode ser estudada com a técnica de EIE correlacionando os valores do potencial de circuito aberto (OCP, do inglês *Open Circuit Potential*) com os comportamentos da impedância em baixas frequências (abaixo de 1 Hz) e do ângulos de fase em médias frequências (na faixa de 1-100 Hz), de forma que elevados valores de impedância em baixa frequência e maiores valores de ângulo de fase em média frequência indicam boa estabilidade do filme de óxido na superfície metálica (GHODS *ET AL.*, 2009).

b) Polarização Potenciodinâmica

A polarização potenciodinâmica constitui a técnica de aplicar potenciais em uma faixa que compreenda o potencial de corrosão (WOLYNEC, 2003). As medidas de resistência de polarização são obtidas através da técnica de polarização linear, em que é feita a polarização de no máximo 20 mV em torno do potencial de corrosão. Essa técnica possibilita obter a razão entre a variação de potencial e a variação de

corrente que pode ser evidenciada com uma representação da evolução da corrente em função da variação do potencial, permitindo a inferência da resistência de polarização (BERTOLINI *ET AL.*, 2013). Uma representação típica da técnica de Polarização Potenciodinâmica é apresentada na Figura 5.

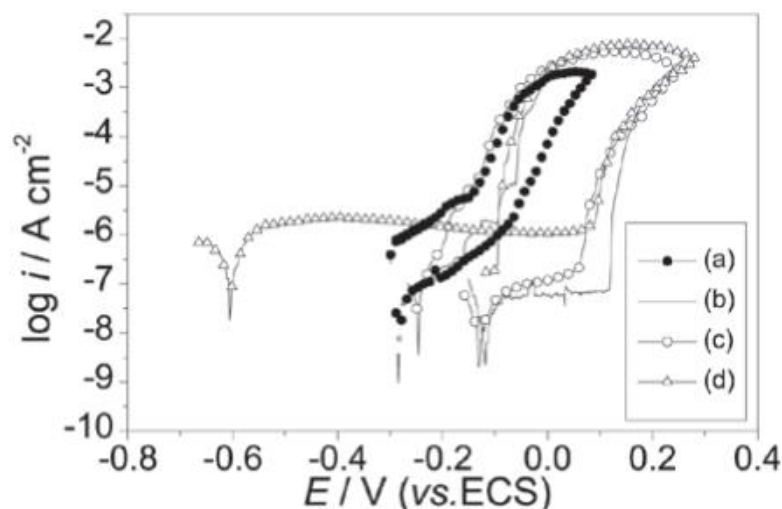


Figura 5 - Representação típica de uma curva de Polarização Potenciodinâmica (Fonte: KIKUTI *ET AL.*, 2004)

Enquanto o teste em que se aplica um potencial por certo tempo e se mede a corrente é denominado polarização potencioestática, pode-se fazer uma varredura de potenciais para a polarização potenciodinâmica (POURSAEE, 2016). A polarização potenciodinâmica fornece para os aços inoxidáveis que passivam no meio estudado o potencial de transpassivação ou potencial de pite e a densidade de corrente passiva. Em um metal passivado, normalmente a densidade de corrente passiva é da ordem de 10^{-5} a 10^{-7} A/cm² e varia muito pouco com o aumento do potencial na região passiva. Quando se atinge o potencial de pite, ocorre um brusco aumento do valor da densidade de corrente. A maioria dos metais que se passivam apresenta uma película fina de óxido na sua superfície. Quando esse metal é imerso numa solução corrosiva, pode ocorrer a dissolução dessa película, etapa acompanhada por uma queda acentuada do potencial de corrosão. Em alguns meios essa película passiva pode se formar após a imersão aumentando consideravelmente o potencial de corrosão. Curvas de polarização experimentais são altamente dependentes da microestrutura do material (WOLYNEC, 2003).

c) *Polarização Cíclica*

A técnica potenciodinâmica pode ser estendida para a polarização potenciodinâmica cíclica, a qual pode determinar, além do potencial de pite, o de repassivação, no ponto em que a curva descendente cruza o eixo dos potenciais de eletrodo, isto é, quando a densidade de corrente assume valor nulo (WOLYNEC, 2003). A polarização cíclica executa a varredura de potencial em torno do potencial de corrosão elevando o potencial em direção a reações anódicas em uma taxa constante até atingir a densidade de corrente de reversão, quando ocorre a reversão da taxa e a varredura passa a ocorrer no sentido oposto, reduzindo o potencial aplicado até atingir o potencial de corrosão novamente. Nessa etapa, pode haver o cruzamento com a curva de passivação em um ponto chamado de Potencial de Proteção, equivalente ao potencial de repassivação. O potencial de pite representa o potencial no qual há o início da formação de pites no material, de forma que quanto maior o seu valor, maior é a resistência do material à corrosão localizada (McCAFFERTY, 2010). Uma curva típica da técnica de Polarização Cíclica é apresentada na Figura 6.

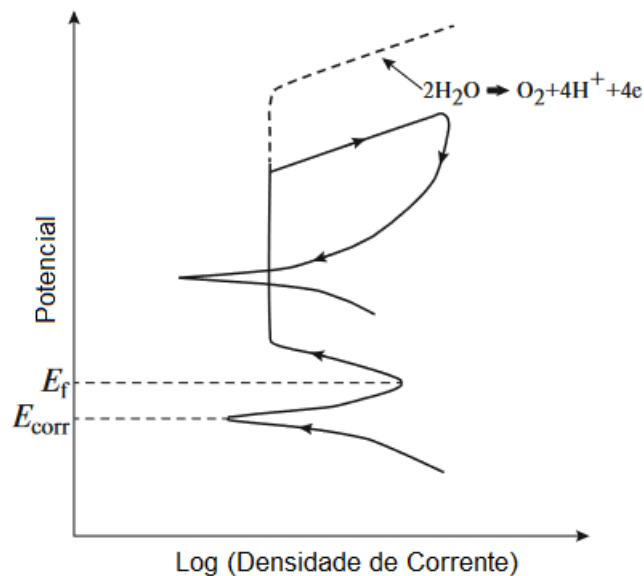


Figura 6 - Ilustração esquemática de uma curva de Polarização Cíclica típica (Fonte: ESMAILZADEH ET AL., 2018)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Dado esse cenário, o trabalho se propõe a estudar o impacto de duas soluções de limpeza em diferentes classes de aço inoxidável, sendo elas: os aços austeníticos AISI 304L, 316L e o aço martensítico AISI 420. Para tanto, foram usadas chapas de cada uma dessas classes como corpos de prova em testes eletroquímicos.

4.1 MATERIAIS

A escolha dos materiais utilizados nesse estudo foi realizada após pesquisa de mercado para identificar quais as classes de aço inoxidável e os tipos de detergentes são mais comumente empregados em indústrias de dispositivos médicos e hospitais na região metropolitana de Belo Horizonte.

Os agentes de limpeza foram selecionados de forma a representar toda a classe de detergentes enzimático e alcalino, porém, como mencionado anteriormente, sabe-se que há muita variação dependendo das características de cada agente e do processo que ele integra. Apesar disso, como cada tipo de detergente tem seu mecanismo de ação bem definido, apesar de eventuais diferenças, espera-se que os resultados sigam o mesmo padrão aqui apresentado. Assim, apenas para fim de conhecimento, os detergentes aqui usados foram:

- Alcalino: Ecolab CIP 92 COSA™.
- Enzimático: 3M™ Detergente Multienzimático – 5 enzimas.

Os agentes de limpeza são misturas complexas de diversos compostos químicos e, por serem produtos comerciais bem estabelecidos, possuem suas formulações específicas como segredo de negócio. Porém, as Fichas de Informação de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) trazem uma formulação com faixas de componentes para suas composições, conforme mostram as Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Composição Química do COSA CIP 92 (FONTE: FISPQ do Fabricante)

Nome Químico	Nº CAS	Concentração (%)
Álcool Etoxilado	68439-51-0	10 – 30
Ácido Octanóico, sal de sódio	1984-06-1	5 – 10
Trietanolamina	102-71-6	5 – 10
Aminas, alquil de coco, etoxilado	61791-14-8	5 – 10
Hidróxido de sódio	1310-73-2	1 – 5

Tabela 2 - Composição Química do 3M Detergente Multienzimático (FONTE: FISPQ do Fabricante)

Nome Químico	Nº CAS	Concentração (%)
Água	7732-18-5	40 – 60
Surfactante	Segredo Comercial	10 – 20
(2-Metoximetiletoxi)propanol	34590-94-8	5 – 15
Ácido benzenesulfônico, C10-16-derivados de alquil	68584-22-5	1 – 10
Etilenoglicol	107-21-1	1 – 10
Glicerol	56-81-5	1 – 10
Tetraborato dissódico decahidratado	1303-96-4	1 – 10
Propano-1,2-diol	57-55-6	<5
1-dodecil-2-pirrolidona	2687-96-9	<1
Enzima Amilase	9000-90-2	<1
Ácido 4-formilfenilborônico	87199-17-5	<1
Enzima Protease	9014-01-1	<1
5-cloro-2-metil-2H-isotiazol-3-ona	26172-55-4	<0,1
2-metil-2H-isotiazol-3-ona	2682-20-4	<0,01
Enzima Celulase	Segredo Comercial	<0,01
Enzima Lipase	Segredo Comercial	<0,01
Enzima Carbohidrase	Segredo Comercial	<0,01

As soluções diluídas tiveram sua condutividade, pH e quantidade de oxigênio dissolvido medidas com o auxílio de um Condutivímetro Digimed DM-32 e um medidor de pH MS Tecnopon mPA210, respectivamente.

Os substratos metálicos utilizados como corpos de prova foram chapas de aço inoxidável das três classes já mencionadas: aços AISI 304L, 316L e 420. As chapas foram gentilmente cedidas pela Aperam Brasil.

Os aços inoxidáveis usados nesse estudo também são comercialmente bem estabelecidos. Suas composições nominais são dadas pelo fabricante, e os lotes são amostrados e testados para verificação de conformidade produtiva, conforme mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Composição Química dos Aços Utilizados (FONTE: Dados do Fabricante)

Elementos	Aço 304L (% em massa)	Aço 316L (% em massa)	Aço 420 (% em massa)
C	0,02350	0,0168	0,3216
Mn	1,28700	1,3408	0,3004
Si	0,40190	0,4966	0,3551
P	0,03980	0,0361	0,0197
S	0,00160	0,002	0,0008
Cr	18,04440	16,5937	12,2102
Ni	8,00940	10,0012	0,0943
Mo	0,18330	2,0115	0,0045
Al	0,00350	0,0021	0,0035
Cu	0,27860	0,2851	0,0167
Co	0,18570	0,2058	0,0164
V	0,05900	0,0457	0,0292
Nb	0,01190	0,0155	0,0030
Pb	0,00110	0,0014	-
B	0,00050	0,001	-
Ti	0,00220	0,0028	0,0033
Sn	0,00870	0,0057	-
W	0,02780	0,0389	0,0085
N	0,000431	0,000297	0,000129

4.2 METODOLOGIA

As soluções de limpeza foram preparadas de acordo com a indicação dos fabricantes. Dessa forma, foram diluídas até obter soluções a 2% v/v, tanto para o detergente alcalino quanto para o enzimático. As soluções diluídas foram preparadas utilizando água destilada a temperatura ambiente (20-25 °C) e tiveram sua condutividade, pH e quantidade de oxigênio dissolvido medidas com o auxílio do condutímetro e do medidor de pH descritos na seção anterior.

As placas de metal tinham dimensões aproximadas de 60 x 60 x 3 mm. Elas foram preparadas, tendo suas superfícies polidas desde a lixa de granulometria 80 até 600 mesh.

Para os testes eletroquímicos, foi utilizado o potenciostato AUTOLAB, com uma célula de três eletrodos. O eletrodo de referência utilizado foi o Eletrodo Saturado de Calomelano (SCE, do inglês Saturated Calomel Electrode) e o contra eletrodo, constituído de um fio de platina enrolado sobre si mesmo a fim de maximizar a área superficial. Os eletrólitos utilizados foram os detergentes alcalino e o enzimático, e o eletrodo de trabalho foi a chapa de aço inoxidável.

A Figura 7 exibe a montagem da célula eletroquímica utilizando o contra eletrodo de platina, o Eletrodo Saturado de Calomelano (SCE) e o Eletrodo de Trabalho.

Esse esquema de montagem foi utilizado para todos os ensaios eletroquímicos, que foram realizados com no mínimo três réplicas. Para alguns ensaios, foram realizadas até sete réplicas, seja para investigar alguma divergência em algum dos resultados, corrigir alguma inconsistência identificada ou para obter maior significância e avaliar a consistência dos dados.



Figura 7 - Montagem da Célula Eletroquímica – Contra Eletrodo de platina, SCE e Eletrodo de Trabalho

Na Figura 8 é possível ver com mais clareza a área de contato entre a solução de detergente, que está dentro da célula eletroquímica, e o eletrodo de trabalho. Essa área corresponde a 1 cm^2 , de forma que os valores gerados para corrente em Amperes (A) ou para densidade de corrente em A/cm^2 , são equivalentes. O tempo de imersão antes de iniciar o ensaio foi de 60 minutos. O equipamento utilizado foi um Autolab 302 N.



Figura 8 - Montagem da Célula Eletroquímica – Aproximação do Eletrodo de Trabalho

Para o ensaio de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE), a faixa de frequências analisada foi de 10^5 Hz a 10^{-2} Hz, utilizando uma perturbação senoidal de 10 mV em relação ao potencial de circuito aberto.

Para o ensaio de Polarização Potenciodinâmica, a faixa de tensão aplicada foi de -50 mV em relação ao potencial de corrosão até 4 V, com taxa de varredura de 1 mV/s. O ensaio também era finalizado se a densidade de corrente atingisse o valor de $0,001 \text{ A/cm}^2$.

Para o ensaio de Polarização Cíclica foram utilizados os mesmos parâmetros da Polarização Potenciodinâmica, com faixa de -50 mV em relação ao potencial de corrosão até 4V e taxa de varredura de 1 mV/s, com o potencial sendo revertido ao se atingir o valor de potencial de 4 V ou quando a densidade de corrente atingiu $0,001 \text{ A/cm}^2$.

Terminados os ensaios eletroquímicos, as superfícies dos corpos de prova metálicos foram avaliadas com a utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) Quanta FEG 3D FEI e EDS acoplado do Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais, na faixa de tensão de 5 a 15 kV.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após preparar as soluções de detergente a 2% v/v, a quantidade de oxigênio dissolvido, o pH e a condutividade das duas soluções foram medidas e apresentaram os valores exibidos na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades das Soluções de Limpeza a 2% v/v

Propriedade	Solução Alcalina a 2%	Solução Enzimática a 2%
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	7,0	6,3
pH	12,33	9,01
Condutividade (mS/cm)	6,04	1,55

5.1 ESPECTROSCOPIA DE IMPEDÂNCIA ELETROQUÍMICA

As chapas de aço inoxidável AISI 304L, 316L e 420 foram submetidas à avaliação por Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE) conforme descrito na seção 4.2. A imersão da célula foi de 60 minutos em cada uma das soluções de detergente a 2% v/v para determinação do potencial de circuito aberto.

A Figura 9 apresenta o diagrama de Nyquist, e as Figuras 10 e 11, os diagramas de Bode dos aços AISI 304L, 316L e 420 nos meios de detergente alcalino e enzimático.

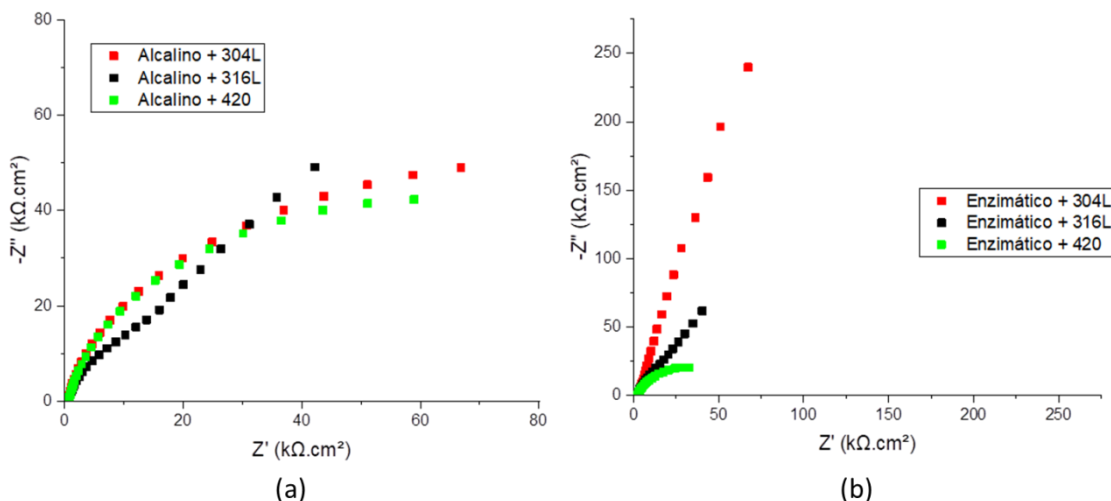


Figura 9 - Diagramas de Nyquist para os aços em meio alcalino (a) e enzimático (b)

No diagrama de Nyquist é possível observar arcos bem próximos para o detergente alcalino, sugerindo pouca diferença na resistência à corrosão dos aços,

conforme mostra a Figura 9 (a), que apresenta o diagrama de Bode do módulo de impedância dos aços no meio de detergente alcalino. Já para o detergente enzimático, o aço AISI 304L apresentou maior impedância e assim, maior resistência a corrosão neste meio, enquanto o aço AISI 420 apresentou a menor resistência a corrosão, conforme mostra a Figura 9 (b). A curva do aço AISI 304L se aproxima da encontrada por Freire *et al.* (2011) em trabalho para avaliar o comportamento desse aço em soluções alcalinas na presença de cloretos, no qual concluíram que à medida que o pH diminui de 13 para 9, a resistência do filme passivo ao ataque do cloreto também diminui. Porém ressaltam que, na ausência de cloreto, o filme formado no pH 9 apresentou maior resistência do que no meio mais alcalino, indo de encontro ao observado na Figura 9 (FREIRE ET AL., 2011). Os diagramas de Nyquist do aço AISI 316L nos dois meios indicam a presença do elemento de Warburg a baixas frequências, sugerindo o controle difusivo do processo corrosivo deste aço nos meios de solução de detergente. Assim, é possível inferir que o mecanismo de corrosão do aço 316L se difere do mecanismo apresentado pelos aços 304L e 420 nos detergentes alcalino e enzimático.

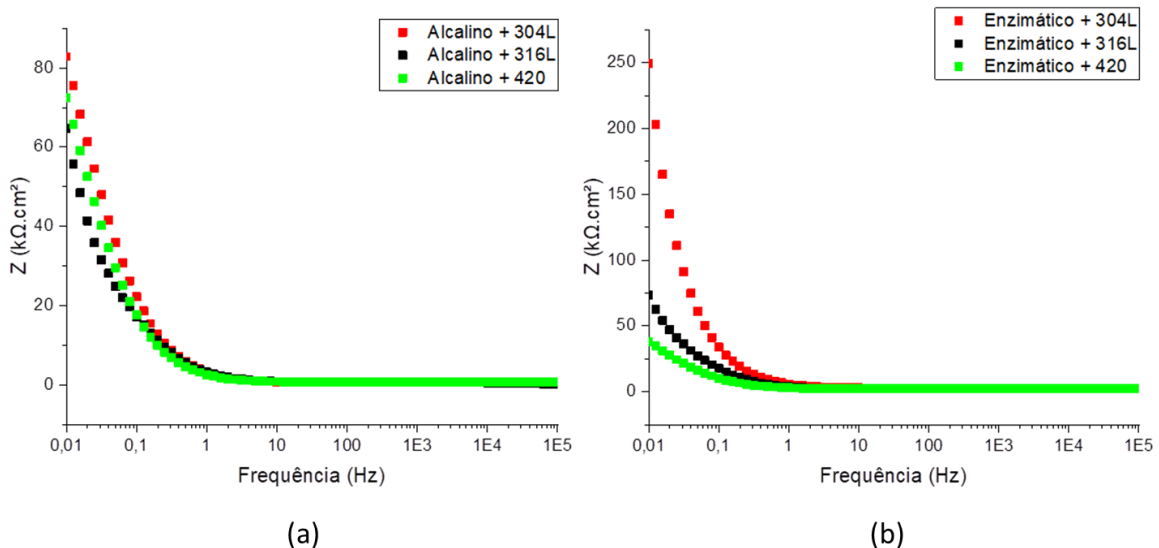


Figura 10 - Diagramas de Bode do módulo de impedância dos aços em meio alcalino (a) e enzimático (b)

É possível observar nos diagramas de Bode da Figura 10 que os módulos de impedância em baixas frequências são maiores para o aço AISI 304L para os dois detergentes, indicando um melhor comportamento do aço 304L frente à corrosão nos dois meios, sendo mais acentuado no caso do detergente enzimático, onde a

impedância do aço 304L foi uma ordem de grandeza maior que a impedância dos aços AISI 316L e 420. A Figura 11 mostra os diagramas de Bode do ângulo de fase para os aços nos detergentes alcalino e enzimático.

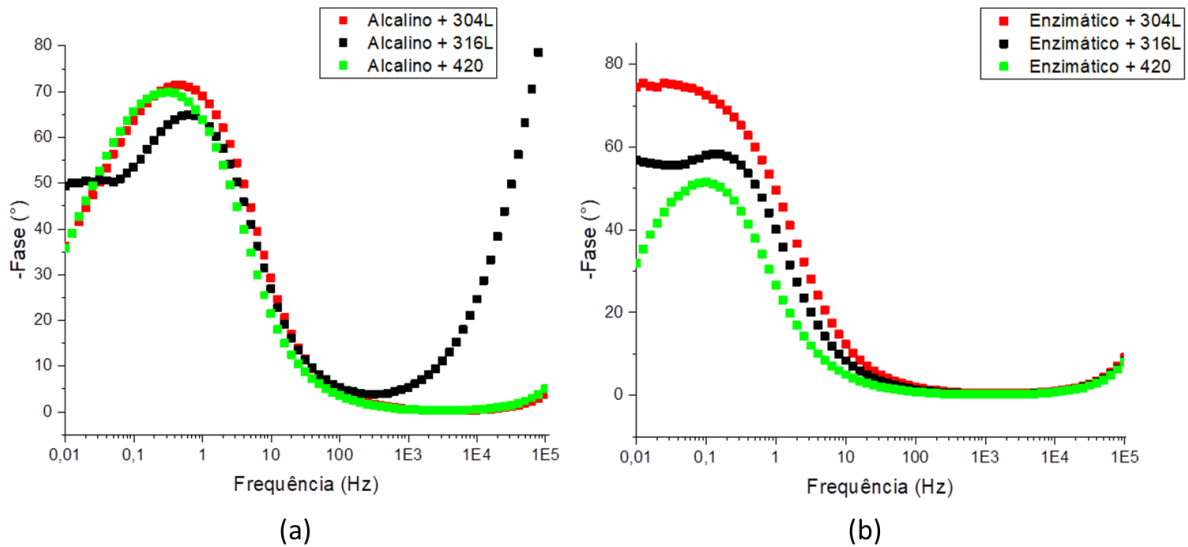


Figura 11 - Diagramas de Bode dos ângulos de fase dos aços em meio alcalino (a) e enzimático (b)

Os diagramas de Bode dos ângulos de fase indicam maior ângulo máximo a baixas frequências para o aço 304L para os dois meios, confirmando sua maior resistência à corrosão. O aço 420 apresentou a menor resistência à corrosão dentre os aços testados no meio enzimático, apresentando o menor módulo de impedância e o menor ângulo de fase associado ao máximo em baixas frequências, conforme exibido na Figura 11 (b). Já no meio alcalino, a Figura 11 (a) mostra que o aço 420 apresentou um comportamento frente à corrosão superior ao do aço austenítico 316L. O melhor resultado do aço austenítico no meio menos alcalino vai de encontro ao reportado por Freire *et al.* (2011) no qual avaliaram o comportamento passivo do aço AISI 316 em meio alcalino, concluindo que a camada passiva muda sua composição com a alteração no pH, se tornando mais protetora à medida que o pH cai de 13 para 9, quando há o favorecimento de formação do óxido de cromo em detrimento do óxido de ferro (FREIRE ET AL., 2011), respaldando o que foi apresentado no estudo bibliográfico, seção 3.6 do presente trabalho. Este aço contém molibdênio, que contribui para aumentar a resistência à corrosão do aço 316 em meios contendo cloreto, o que não é o caso das soluções de detergente. No meio alcalino, o pH acima de 12 contribuiu para garantir a passivação do aço AISI 420 mesmo com um menor teor de cromo. Este resultado também vai de encontro

com o reportado na literatura, conforme trabalho de Xu *et al.* (2016) que visava estudar o efeito do processo de descontaminação e limpeza na resistência à corrosão do aço martensítico, e concluiu que o uso de detergente alcalino tem efeito positivo no aço AISI 420 (XU ET AL., 2016).

As Figuras 12, 13 e 14 apresentam os diagramas de Nyquist e Bode separadamente para cada um dos aços testados nos dois meios.

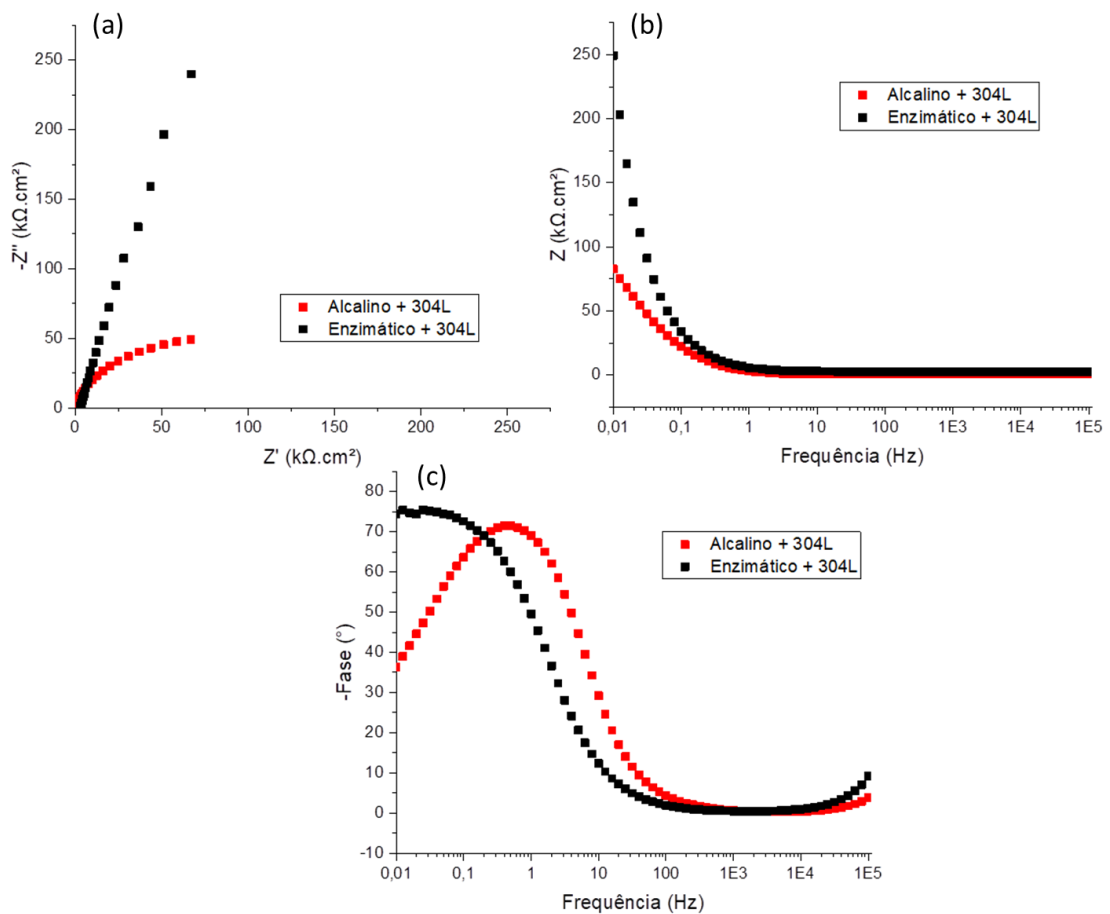


Figura 12 - Diagramas de EIE para Aço 304L nos meios alcalino e enzimático

Analisando as curvas comparativamente entre os detergentes, é possível observar maior resistência à corrosão do aço 304L no meio enzimático, já que o módulo de impedância em baixas frequências é maior para esse detergente, como pode ser observado na Figura 12 (a) e (b). O diagrama de Bode do ângulo de fases exibido na Figura 12 (c) mostra uma constante de tempo a baixas frequências para os dois meios, mas no detergente enzimático o máximo permanece com um valor alto do ângulo (75 $^\circ$) até as menores frequências, indicando maior proteção da camada passiva do aço 304L no meio enzimático.

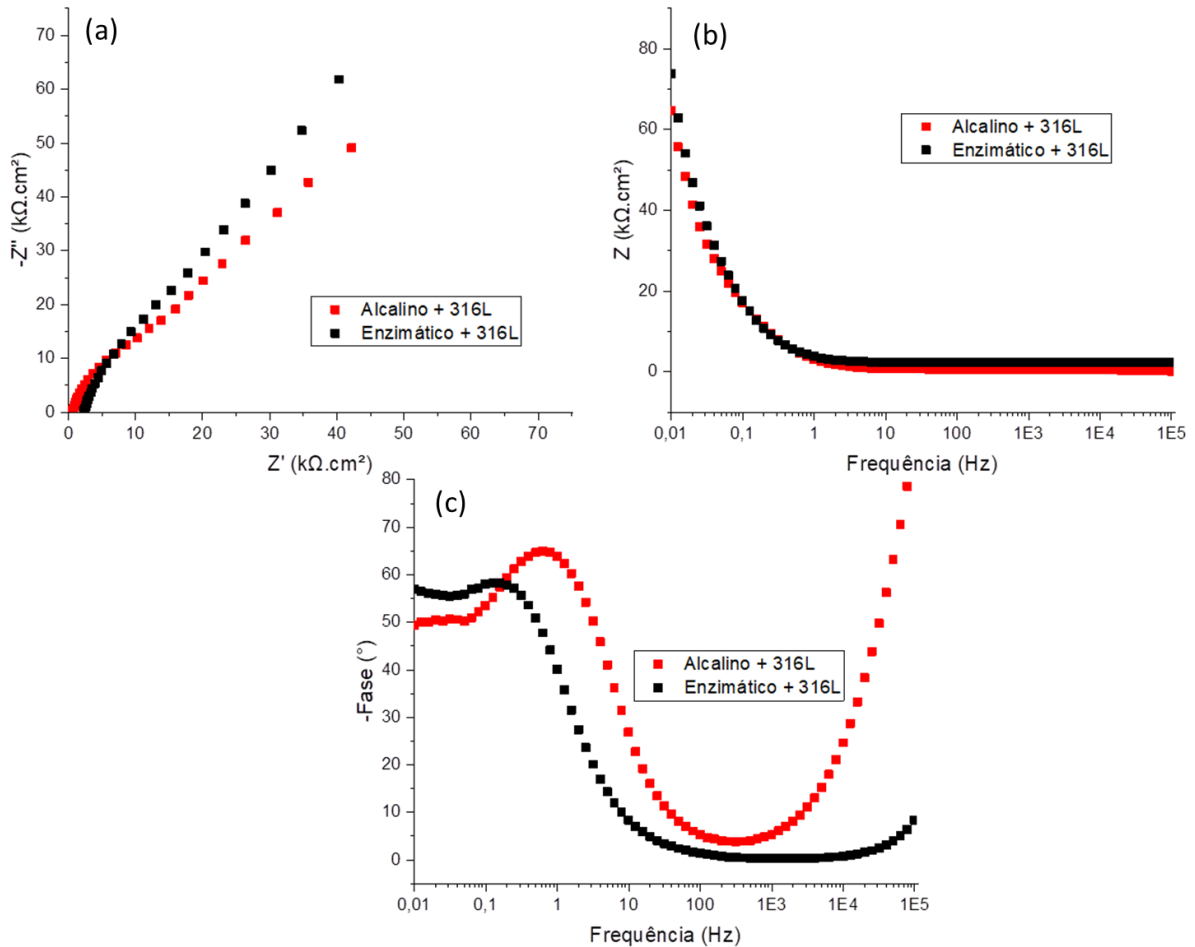


Figura 13 – Diagramas de EIE para Aço 316L nos meios alcalino e enzimático

O outro aço austenítico AISI 316L teve uma resistência à corrosão ligeiramente superior também no meio de detergente enzimático, como se vê na Figura 13 (a) e (b). A Figura 13 (c), que apresenta o diagrama de Bode do ângulo de fases, também mostra que o aço permaneceu com um valor mais alto do ângulo de fase de 57° até a região das mais baixas frequências no detergente enzimático. Para o detergente alcalino, o aço permaneceu com um ângulo de 50° na região de baixa frequência. Porém, o comportamento frente à corrosão do aço 316L nos dois detergentes foi similar.

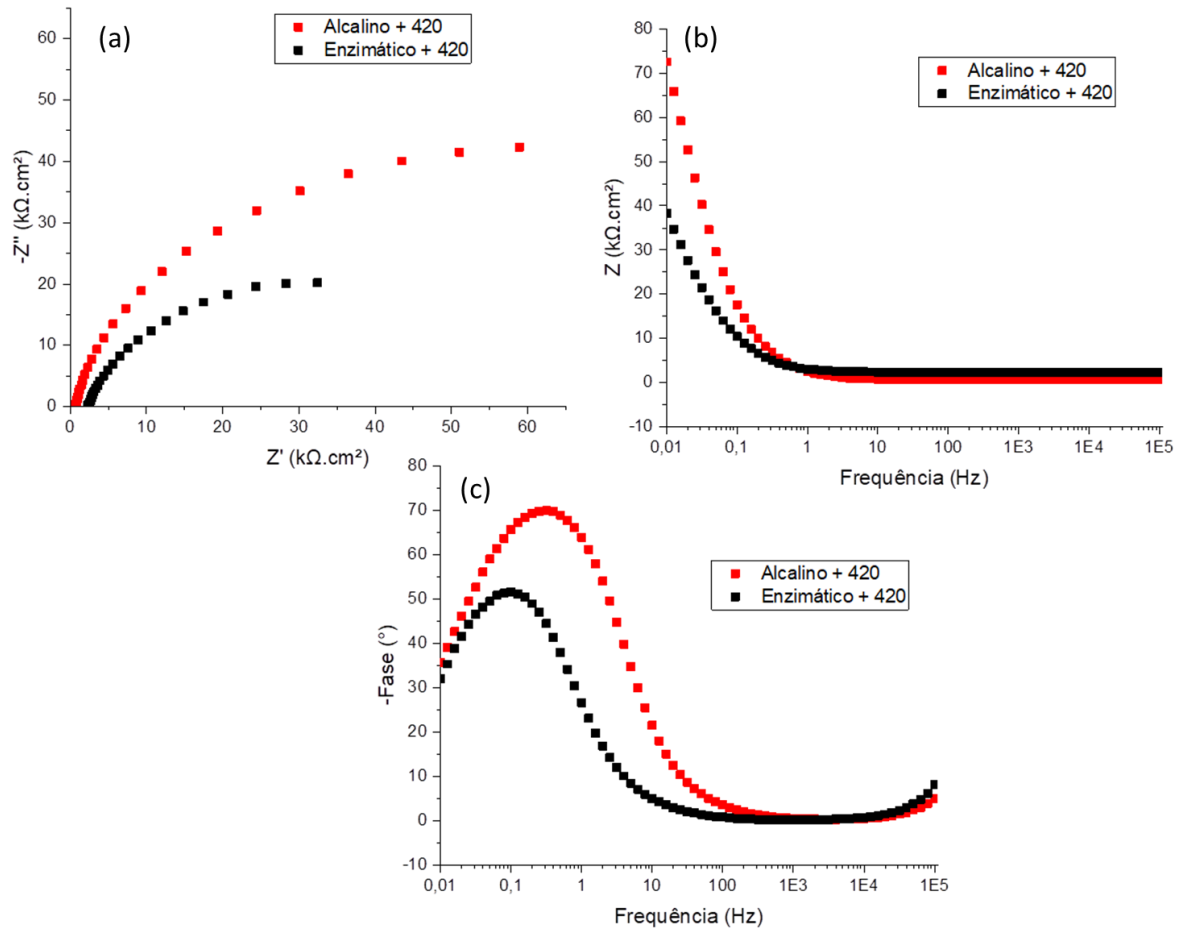


Figura 14 - Diagramas de EIE para Aço 420 nos meios alcalino e enzimático

Já o aço martensítico 420 apresentou maior módulo de impedância no detergente alcalino, exibido na Figura 14 (a) e (b). A Figura 14 (c) mostra que o aço 420 apresentou um máximo a 0,3 Hz para o meio alcalino com um ângulo de fase de 70 $^\circ$. Já no detergente enzimático, o máximo foi observado a 0,1 Hz com um ângulo de 51 $^\circ$.

Os maiores arcos capacitivos exibidos no diagrama de Nyquist para as amostras de aços austeníticos 304L e 316L na solução de detergente enzimático, apresentados nas Figuras 12 (a) e 13 (a), indicam um filme passivo mais protetor para essa classe. Já para o aço 420, o comportamento se inverte, indicando um filme passivo mais protetor na solução de detergente alcalino, como pode ser observado na Figura 14 (a). Conforme mencionado, esses três resultados vão de encontro com estudos identificados na literatura (FREIRE *ET AL.*, 2010; FREIRE *ET AL.*, 2011; XU *ET AL.*, 2016).

Essas observações podem ter relação com o pH das soluções, básico para ambas, mas mais elevado na solução alcalina (>12), sugerindo nesse caso, uma

melhor resposta do aço 420 em pHs elevados, enquanto o pH básico, porém mais baixo (~9) associado à solução enzimática, pode ser suficiente para a formação de um filme protetor para os aços austeníticos. A maior condutividade indicada na solução de detergente alcalino também favorece potencialmente a oxidação e, ao mesmo tempo, a formação de uma camada passiva mais espessa e protetora.

Depois, as impedâncias dos aços nos dois meios testados foram comparadas. De acordo com o estudo de Magalhães *et al.* (1999), as resistências e capacitâncias obtidas por medições de impedância em baixas frequências podem ser muito sensíveis mesmo a pequenas mudanças na camada de proteção, dependendo da composição do eletrólito (MAGALHÃES *ET AL.*, 1999). Assim, os valores das impedâncias referentes à frequência 30 mHz podem ser usados para a comparação da resistência à corrosão dos materiais, de acordo com a literatura (LINS *ET AL.*, 2022), como pode ser observado na Figura 15.

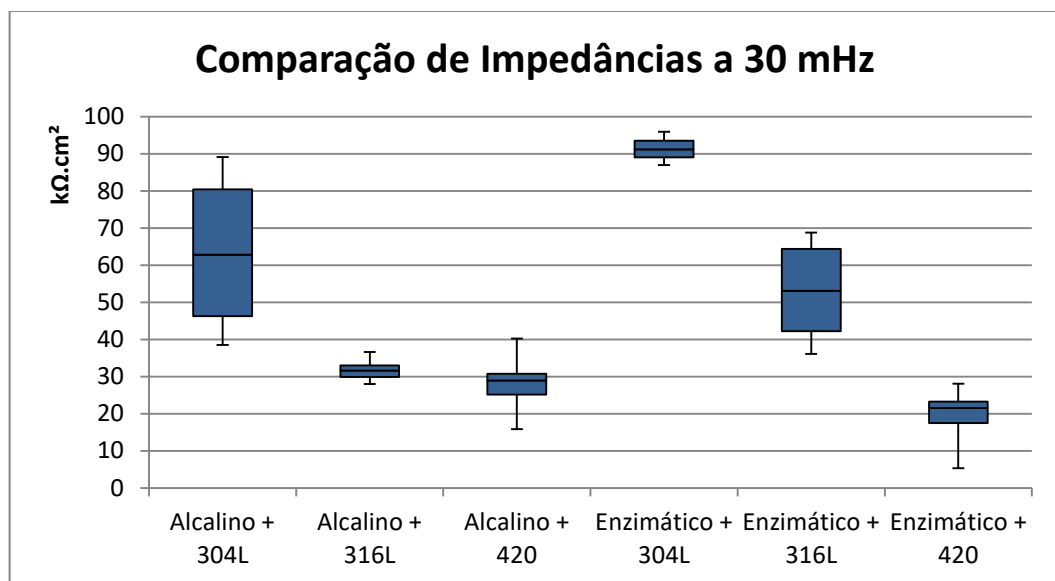


Figura 15 - Comparação dos Módulos de Impedância de Bode a 30 mHz

A Figura 15 resume as inferências numéricas que podem ser observadas nos diagramas de EIE das três classes de aço nos dois meios. Na média de todas as corridas realizadas para cada par aço-detergente, em meio alcalino, o aço AISI 304L apresentou um módulo de impedância acima de $6,0 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, enquanto os aços 316L e 420 ficaram próximos de $3,0 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$. Já em meio enzimático, o resultado do aço 304L foi ainda melhor, superando $9,0 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, enquanto o 316L e 420

apresentaram resultados próximos a $5,2 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ e $2,1 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$, respectivamente.

Duarte *et al.* (2014) avaliaram o comportamento corrosivo em barras de aço inoxidável integradas a estruturas de concreto, e identificaram que o aço 316 apresentou maior impedância do que o aço AISI 304 na presença de cloreto (DUARTE *ET AL.*, 2014). De fato, o aço 316 é muito conhecido por sua grande resistência à corrosão na presença de cloreto, porém as soluções de detergentes aqui utilizadas não apresentam cloreto em suas composições e, pelo gráfico exibido na Figura 15, é possível perceber que no geral, analisando as classes de aços inoxidáveis, o aço 304L apresentou os melhores resultados, independentemente do meio de imersão. Enquanto isso, avaliando o comportamento dos eletrólitos, o detergente enzimático se mostrou mais resistivo, menos corrosivo. De acordo com estes resultados, o instrumental cirúrgico poderia ser de aço 304L, que é mais barato do que o aço 316L, principalmente por não conter molibdênio. Isso também está de acordo com o reportado na literatura, que identificou um melhor comportamento do aço 304L quando comparado ao aço 316L em meio alcalino (MESQUITA *ET AL.*, 2011). E, considerando a resistência à corrosão dos aços frente às soluções preparadas, o detergente enzimático deveria ser selecionado como agente de limpeza durante o reprocessamento do material cirúrgico. Obviamente, porém, existem outras variáveis a serem observadas como as outras soluções com as quais os instrumentos entrarão em contato, durabilidade do instrumento com relação ao fio de corte ou especificidades de compatibilidade do processo.

5.2 POLARIZAÇÃO POTENCIODINÂMICA

Na sequência, as chapas de aço inoxidável foram submetidas a uma polarização potenciodinâmica conforme descrito na seção 4.2. A imersão da célula foi de 60 minutos em cada uma das soluções de detergente a 2% v/v. Conforme mencionado na seção 'Metodologia', os ensaios foram configurados para varrer o potencial de 0,5V até 4V ou até a densidade de corrente atingir 1 mA/cm^2 , porém foi observado que para as corridas em detergente alcalino, os testes foram interrompidos antes dos 2V, sendo um primeiro indicativo de que esse meio ataca mais os aços do que o

meio enzimático, que atingiu potenciais mais altos, próximos de 4V. A análise dos resultados é feita entre aços e entre detergentes.

A Figura 16 mostra as curvas de polarização para o detergente alcalino (a) e detergente enzimático (b).

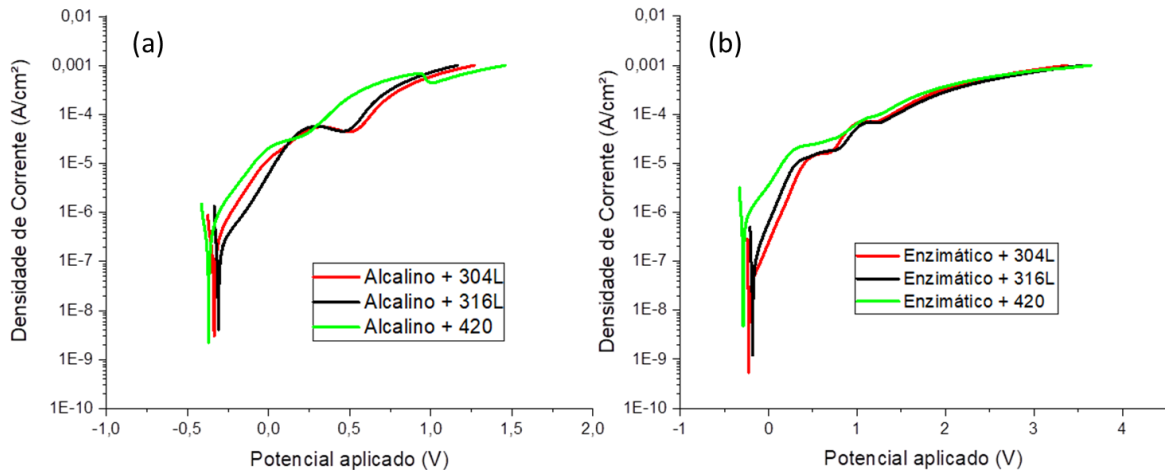


Figura 16 - Curvas de polarização potenciodinâmica nos meios alcalino e enzimático

É possível observar, nos dois meios, maior semelhança entre as curvas dos aços 304L e 316L. No meio alcalino, exibido na Figura 16 (a), os aços apresentaram valores próximos para os potenciais de corrosão, de cerca de -0,3 V. Os aços austeníticos apresentaram uma região de estabilidade de corrente entre 0,25 V e 0,5 V, quando o valor da densidade de corrente dispara. A densidade de corrente passiva é de $5 \cdot 10^{-5}$ A/cm², valor da mesma ordem de grandeza do reportado por Abreu *et al.* (2004), em trabalho que comparou o filme passivo do aço AISI 304 com um aço duplex SAF 2205 em meio alcalino e exibiu uma corrente passiva para o primeiro de aproximadamente $2 \cdot 10^{-5}$ A/cm² (ABREU ET AL., 2004). Já o aço 420 passivou a um potencial mais baixo de 0,1 V, com uma densidade de corrente passiva de $3 \cdot 10^{-5}$ A/cm², valor próximo também dos $2,5 \cdot 10^{-5}$ A/cm² reportado na literatura, conforme artigo de Morshed-Behbahani *et al.* (2021) que estuda a passivação do aço 420 submetido a diferentes tratamentos térmicos (MORSHEH-BEHBAHANI ET AL., 2021). O potencial de transpassivação do aço 420 foi próximo de 0,25 V, inferior ao dos aços austeníticos.

Já no detergente enzimático os aços austeníticos apresentaram duas regiões passivas, como pode ser notado na Figura 16 (b). A primeira iniciou em 0,5 V com uma densidade de corrente passiva de 10^{-5} A/cm². A segunda região passiva iniciou

um pouco acima de 1 V, com uma densidade de corrente próxima de 10^{-4} A/cm², mas pode ser devida à oxidação da água. Esses dois patamares também podem ser observados nas curvas de polarização potenciodinâmica exibidas no trabalho de Fattah-Alhosseini *et al.* (2011) que estuda as propriedades semicondutoras de filmes passivos em aços austeníticos (FATTAH-ALHOSSEINI *ET AL.*, 2011). Já o aço 420 apresentou uma região passiva em 0,4 V, com uma densidade de corrente superior à primeira região passiva dos aços 304L e 316L.

Analogamente ao realizado para a EIE, as curvas de polarização também foram separadas por aço para comparação do comportamento nos dois meios, conforme exibido na Figura 17.

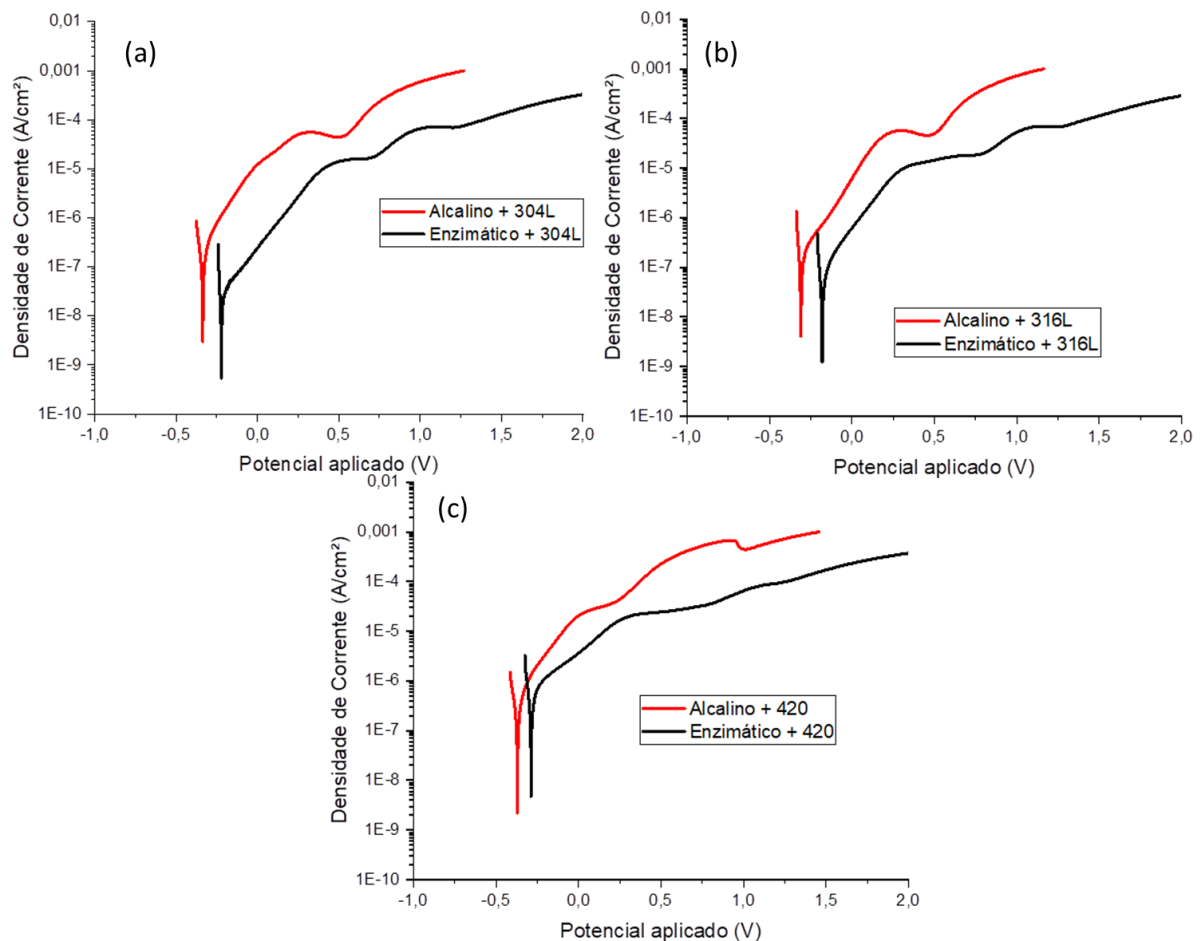


Figura 17 - Curvas de polarização potenciodinâmica para cada aço nos meios alcalino e enzimático

Os aços austeníticos 304L e 316L apresentaram menores densidades de corrente anódicas e maiores valores do potencial de corrosão no meio enzimático, como exibido na Figura 17 (a) e (b). A densidade de corrente passiva dos aços 304L e 316L em solução enzimática foi menor do que no meio alcalino. Mas,

contrariamente aos resultados de impedância, a Figura 17 (c) mostra que o aço martensítico 420 também apresentou as menores densidades de corrente anódicas no meio de detergente enzimático. Entretanto, o aço 420 passivou no meio alcalino num menor potencial em relação ao meio enzimático. A literatura indica uma maior espessura na camada passiva com a diminuição do pH (OLSSON & LANDOLT, 2003), com o enriquecimento de óxidos de cromo aumentando a estabilidade dos filmes e resultando em menores densidades de corrente passiva quando em uma faixa menor de pH, conforme relatado no artigo de Freire *et al.* (2010) (FREIRE *ET AL.*, 2010).

5.3 POLARIZAÇÃO CÍCLICA

Por fim, as chapas foram submetidas ao teste de polarização cíclica conforme descrito na seção 4.2. A imersão da célula foi de 60 minutos em cada uma das soluções de detergente a 2% v/v. De modo análogo à polarização potenciodinâmica, os ensaios foram configurados para varrer o potencial de 0,5V até 4V ou até a densidade de corrente atingir 1 mA/cm², porém novamente foi observado que para as corridas em detergente alcalino, as curvas ascendentes foram interrompidas antes dos 2V, respaldando o maior ataque desse meio nos aços quando comparado com o meio enzimático, que atingiu potenciais mais próximos de 4V. A Figura 18 apresenta as curvas de polarização cíclica nos meios alcalino e enzimático.

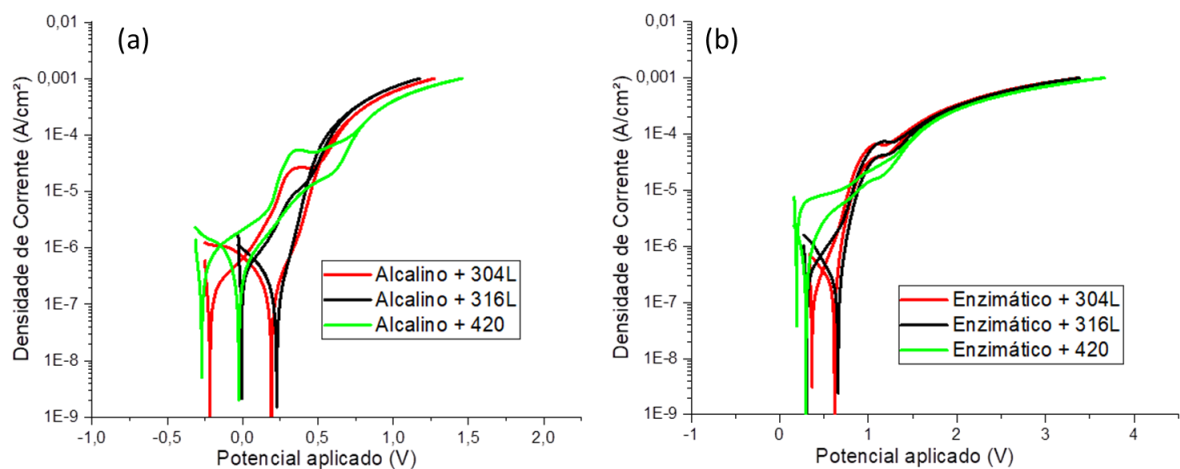


Figura 18 - Curvas de polarização cíclica nos meios alcalino e enzimático

Os resultados acima indicam comportamentos semelhantes para as três classes de aço inoxidável em cada um dos detergentes, sendo importante ressaltar que as diferenças nos potenciais de passivação para os três aços são mais perceptíveis no meio alcalino, exibido na Figura 18 (a), do que no meio enzimático, mostrado na Figura 18 (b), sugerindo a influência da diferença de pH e/ou condutividade dos meios nos mecanismos de passivação dos aços. Também é possível observar a ruptura da camada passiva em potenciais próximos a 0,5 V para o detergente alcalino e em valores maiores, próximos a 1,25 V para o detergente enzimático, corroborando as inferências retiradas das curvas de polarização potenciodinâmica. É possível encontrar na literatura valores para o *breakdown potential* dos aços austeníticos em meio alcalino em torno de 0,6 V (FENG *ET AL.*, 2020; VELEVA *ET AL.*, 2002). Pelo fato das curvas se sobreporem em vários momentos, fica mais fácil analisar os resultados na comparação entre os dois detergentes diferentes, conforme exibido na Figura 19. Nesse caso, os eixos foram invertidos para adequar ao usualmente apresentado na literatura.

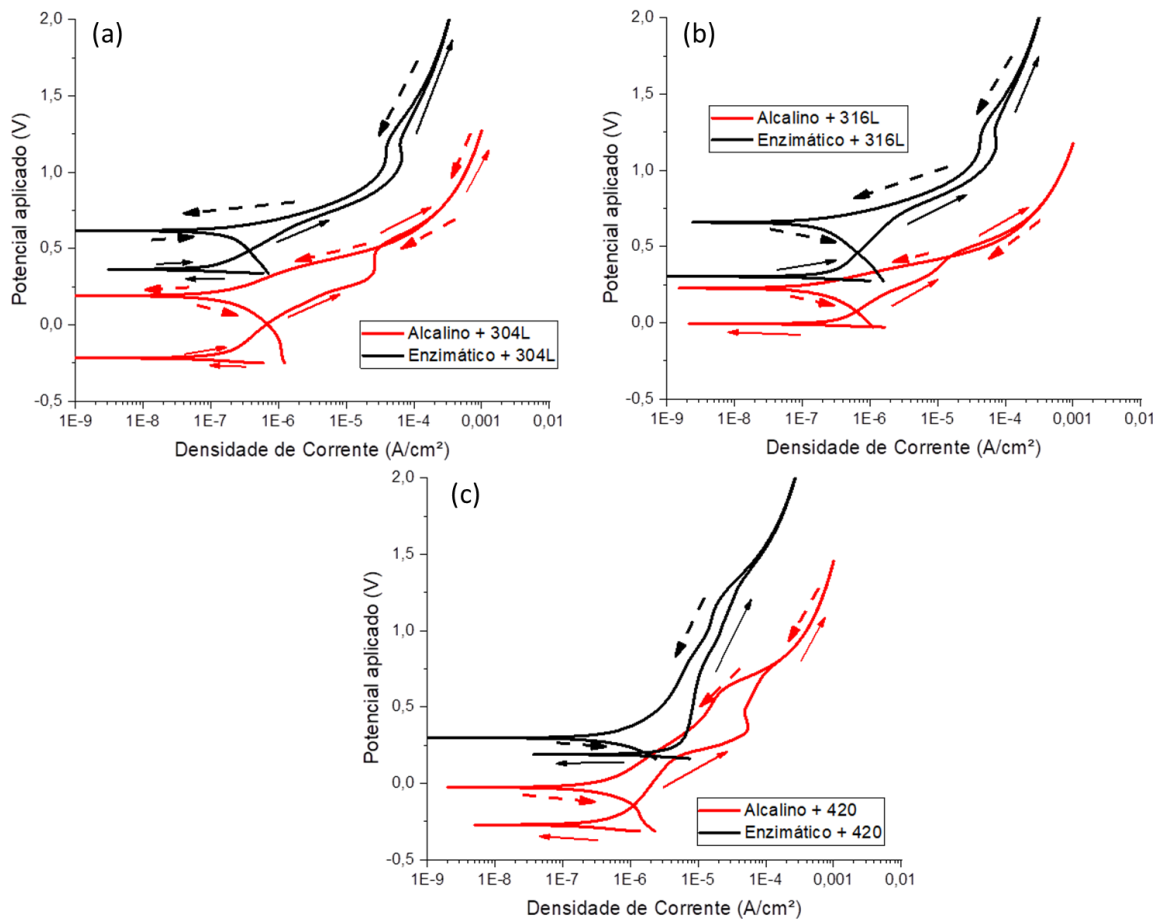


Figura 19 - Curvas de polarização cíclica para cada aço nos meios alcalino e enzimático

É possível observar na Figura 19 que a curva descendente cruza a curva ascendente para o detergente alcalino, mas não para o enzimático, gerando o chamado potencial de proteção, abaixo do qual a película passiva se regenera impedindo a formação de corrosão localizada. É possível notar também que as curvas do detergente enzimático se formaram em potenciais mais elevados para os três aços, e que os valores do potencial de transpassivação ou *breakdown potential* acontecem, por consequência, em potenciais mais elevados, sugerindo maior resistência à corrosão dos aços nesse meio, conforme avaliado anteriormente. A histerese dos três aços no detergente enzimático é negativa, indicando resistência à corrosão localizada. É possível observar no trabalho publicado por Lekatou & Tsouli em 2022 que a diferença de pH é realmente capaz de gerar comportamentos diferentes nas curvas ascendente e descendente da polarização cíclica para os aços inoxidáveis, sendo mais evidente o impacto positivo de um pH mais neutro para o aço AISI 316 (LEKATOU & TSOULI, 2022).

Com base nas observações experimentais é possível construir a Tabela 5, que sintetiza as informações inferidas dos ensaios eletroquímicos.

Tabela 5 - Parâmetros Eletroquímicos Inferidos dos Experimentos

Parâmetros		Potencial de Corrosão		Potencial de Passivação		Densidade de Corrente Passiva (10^{-5})		Potencial de Transpassivação		Potencial de Proteção	
		Média V	D.P. V	Média V	D.P. V	Média A/cm ²	D.P. A/cm ²	Média V	D.P. V	Média V	D.P. V
Solução Alcalina a 2%	304L	-0,39	0,07	0,29	0,06	4,1	0,8	0,47	0,07	0,45	0,09
	316L	-0,34	0,03	0,29	0,05	4,9	0,3	0,47	0,06	0,44	0,05
	420	-0,37	0,03	0,12	0,08	3,0	0,5	0,26	0,06	0,69	0,15
Solução Enzimática a 2%	304L	-0,22	0,01	0,48	0,05	1,4	0,2	0,72	0,05	2,09	0,04
	316L	-0,21	0,03	0,41	0,12	2,0	0,5	0,77	0,03	1,86	0,64
	420	-0,38	0,13	0,33	0,13	4,1	0,3	0,78	0,05	1,81	0,31

No detergente enzimático, os aços austeníticos apresentaram maior potencial de corrosão, menor densidade de corrente passiva e maior potencial de transpassivação que no detergente alcalino. Assim, a resistência à corrosão dos aços austeníticos foi superior no detergente enzimático em relação ao alcalino. Já o aço martensítico apresentou menor densidade de corrente passiva no detergente alcalino, mas um valor de potencial de transpassivação superior no detergente enzimático.

5.4 AVALIAÇÃO DA SUPERFÍCIE

Após os ensaios eletroquímicos, as superfícies dos corpos de prova foram investigadas a fim de avaliar o comportamento da camada passiva e observar os efeitos dos ensaios sobre a superfície do material. Após a análise visual inicial, as amostras foram avaliadas usando-se o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). A amostra do aço 304L é exibida na Figura 20.

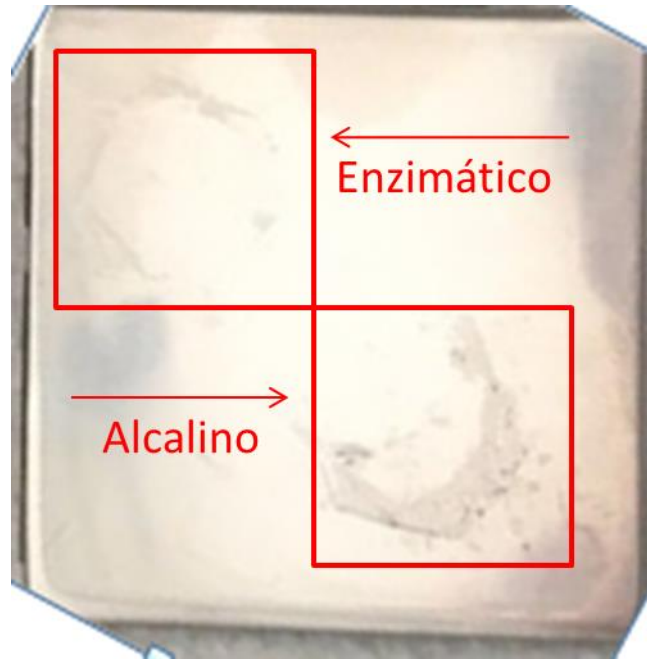


Figura 20 - Corpo de prova após ensaios eletroquímicos - Aço 304L

A micrografia do MEV pode ser observada na Figura 21 para os meios alcalino e enzimático.

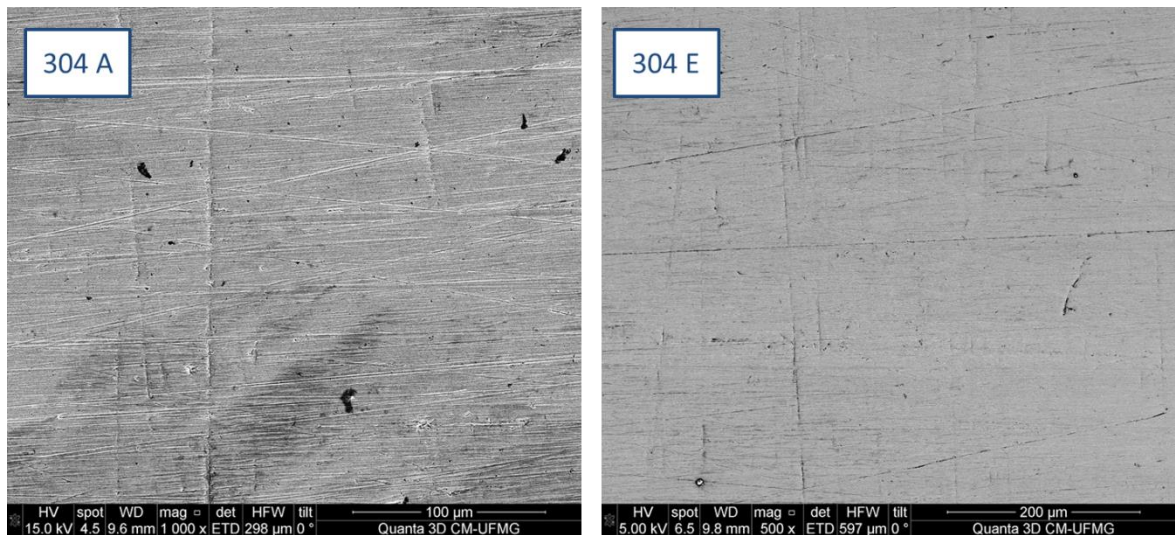


Figura 21 - Micrografia do aço 304L para o meio Alcalino à esquerda e Enzimático à direita.

Pela Figura 21 é possível identificar alguns pontos de corrosão localizada em ambos os casos, sendo maiores e mais frequentes na amostra de aço 304L em meio alcalino. A Figura 22 mostra as mesmas amostras com maior aproximação nesses pontos.

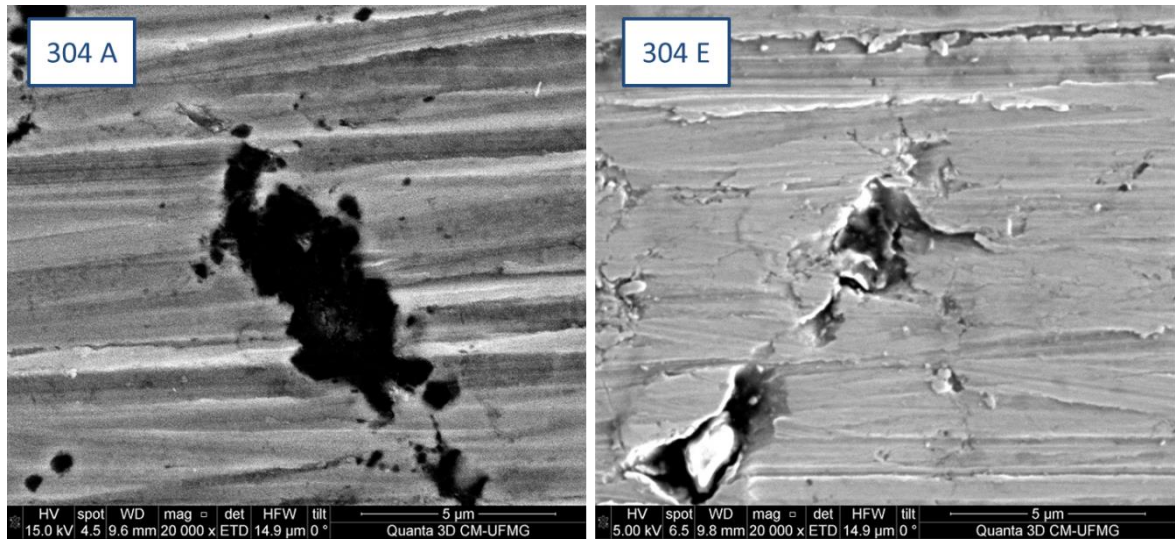


Figura 22 - Micrografias aproximadas para o aço 304L em meio Alcalino à esquerda e Enzimático à direita

A Figura 22 respalda o maior ataque na superfície do aço 304L em meio alcalino, que apresenta um início de processo corrosivo aparentemente mais avançado quando comparada à amostra do meio enzimático.

A imagem da superfície do aço inoxidável 316L pode ser observada na Figura 23.



Figura 23 - Corpo de prova após ensaios eletroquímicos - Aço 316L

O resultado pode ser avaliado de forma mais minuciosa nas micrografias do aço 316L, exibidas na Figura 24.

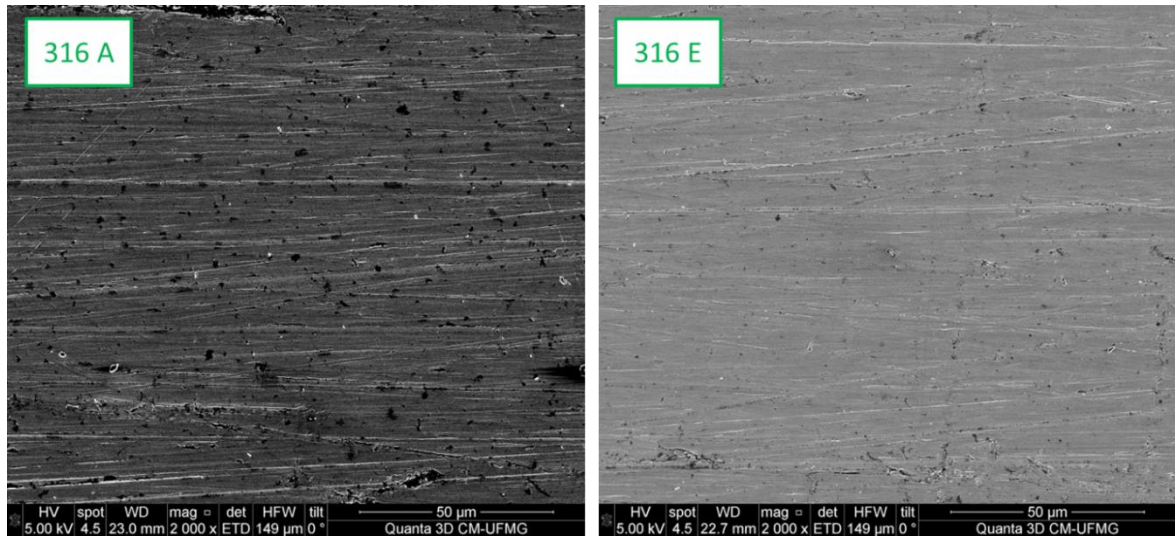


Figura 24 - Micrografia do Aço 316L para o meio Alcalino à esquerda e Enzimático à direita

Novamente é possível perceber uma maior incidência de corrosão localizada na amostra do aço 316L exposta ao meio alcalino, corroborando com os resultados encontrados nos ensaios eletroquímicos. A Figura 25 exibe os processos corrosivos referentes a cada uma dessas exposições com mais detalhes.

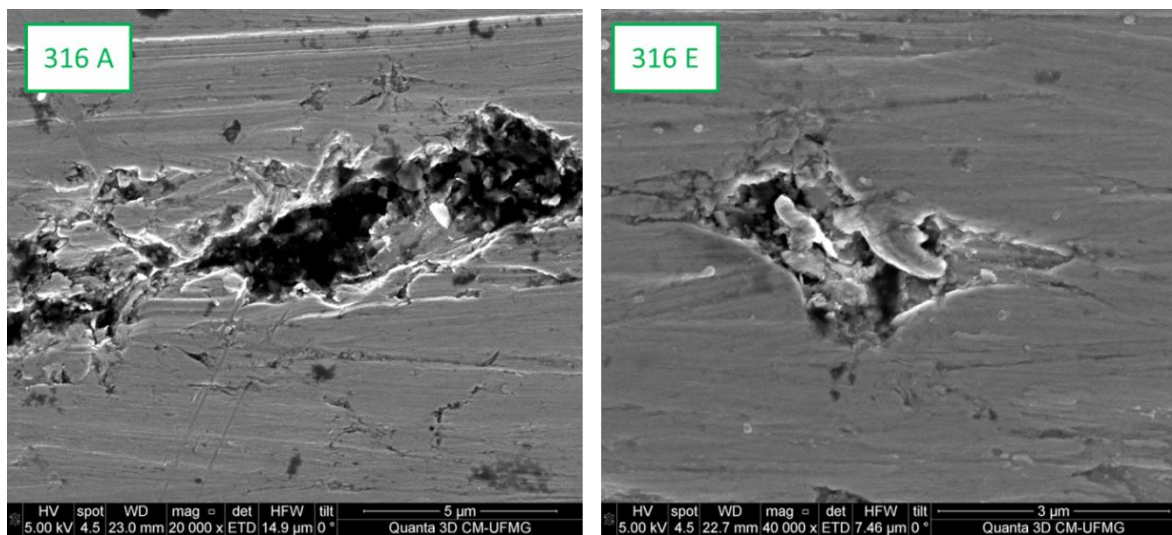


Figura 25 - Micrografias aproximadas para o aço 316L em meio Alcalino à esquerda e Enzimático à direita

De maneira semelhante, é possível perceber que o princípio de oxidação está mais avançado na amostra de aço 316L exposta ao meio alcalino, que mostra um processo corrosivo com maiores dimensões do que os exibidos na amostra de aço 316L em meio enzimático. Esse comportamento foi observado de forma consistente

em toda a área das amostras. Além disso, é possível perceber que as amostras em ambos os meios exibem um ataque superficial maior do que os apresentados pelas amostras de aço 304L nas Figuras 21 e 22.

Por fim, a imagem da placa do aço 420 pode ser avaliada na Figura 26.

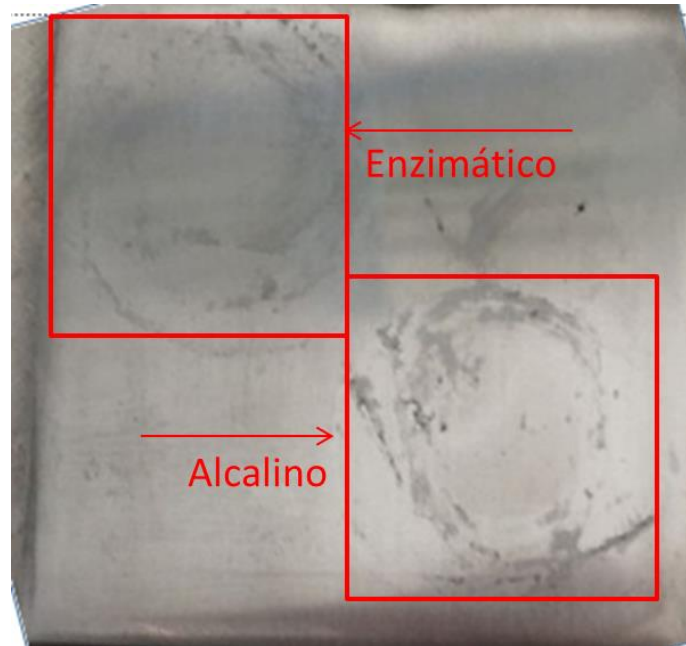


Figura 26 - Corpo de prova após ensaios eletroquímicos - Aço 420

É possível analisar as micrografias para a amostra do aço 420 exposta ao meio alcalino e enzimático, que estão exibidas na Figura 27.

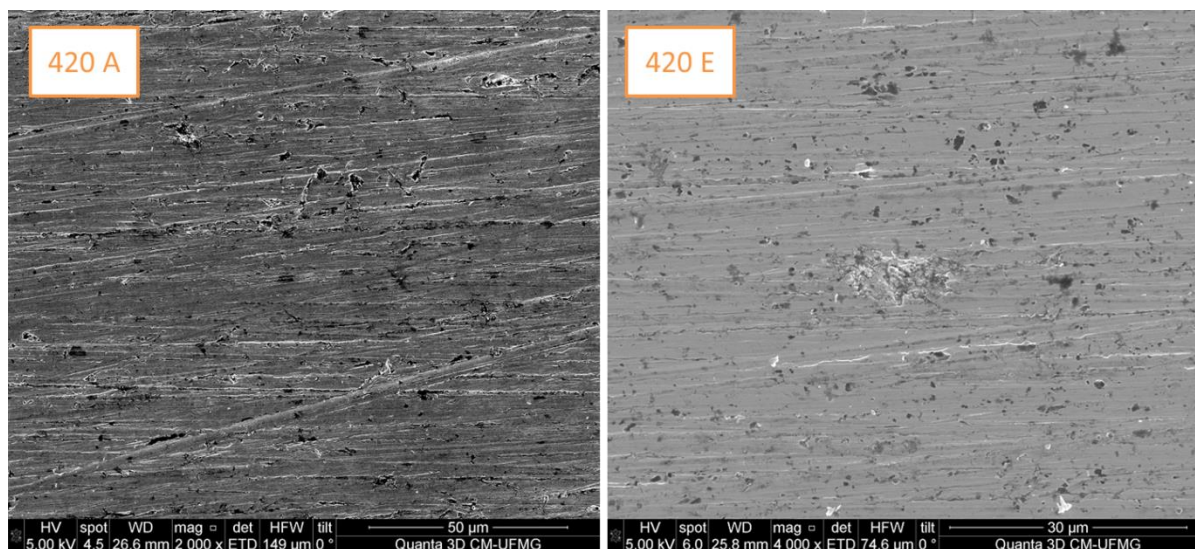


Figura 27 - Micrografia do Aço 420 para o meio Alcalino à esquerda e Enzimático à direita

Ambas as imagens exibem grande incidência de corrosão localizada, indicando sinais de um processo corrosivo mais avançado. Porém, contrariamente ao que se observou nos aços austeníticos, analisando o conjunto de imagens para o aço 420 como um todo, foi possível identificar marcas mais frequentes na amostra exposta à solução enzimática quando comparada àquela exposta ao meio alcalino. A superfície pode ser analisada com mais precisão ao avaliar as micrografias aproximadas para o aço 420 nas duas soluções, conforme exibido na Figura 28.

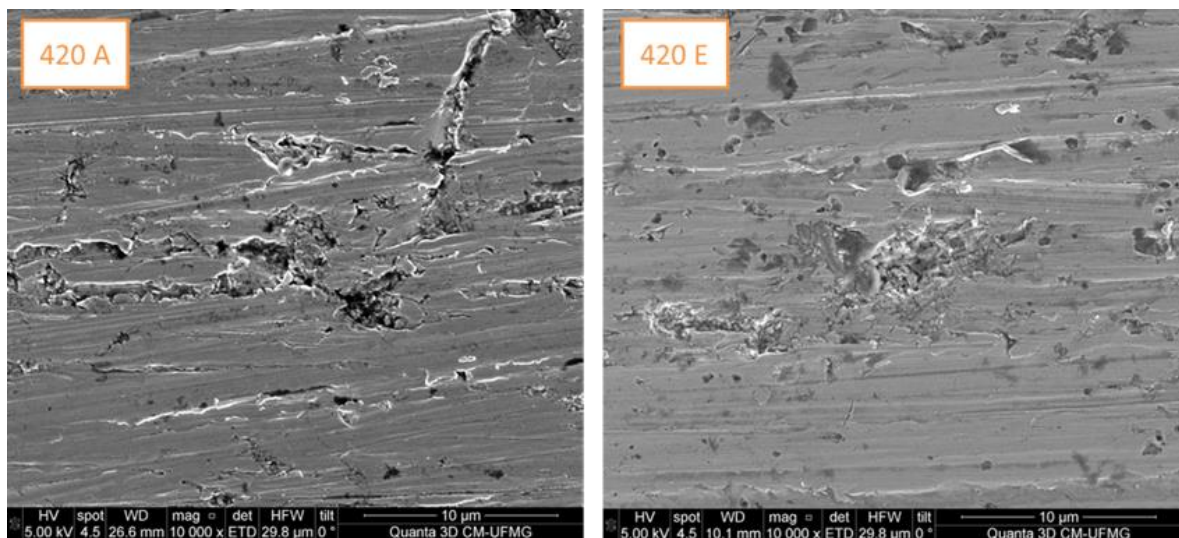
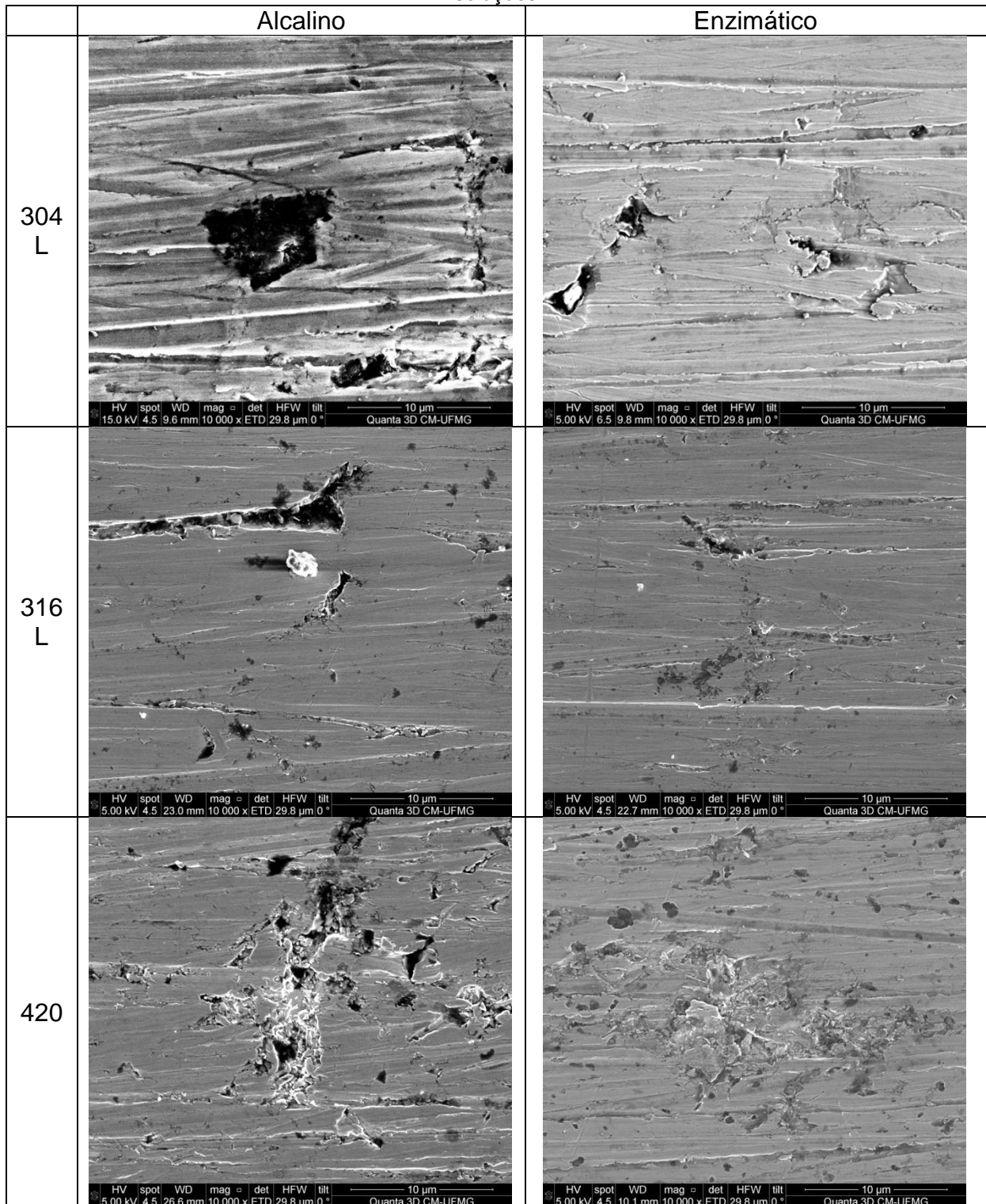


Figura 28 - Micrografias aproximadas para o aço 420 em meio Alcalino à esquerda e Enzimático à direita

A figura 28 exibe uma amostra do que foi encontrado de forma bem generalizada nas amostras do aço martensítico, com pontos de corrosão localizada visualmente maiores distribuídos por toda a amostra. Comparando as duas amostras, a exposta ao meio alcalino pareceu apresentar marcas mais profundas, porém o processo corrosivo na amostra do meio enzimático apresentava marcas com nível avançado de corrosão de forma mais generalizada. Visualmente, as amostras do aço 420 se assemelharam ao observado na amostra de aço 316L exposta ao meio alcalino, exibida à esquerda nas figuras 24 e 25. A Tabela 6 mostra a comparação entre os pontos de corrosão localizada encontrados nas seis amostras.

Tabela 6 - Tabela comparativa entre pontos de corrosão localizada nos 3 aços em relação às 2 soluções



No geral, é possível observar que os pontos de corrosão localizada formados nas amostras em solução alcalina apresentam maiores dimensões do que aqueles formados em solução enzimática. No caso do aço 420, a densidade desses pontos de corrosão foi ligeiramente superior no meio enzimático, conforme identificado após

análise do conjunto de imagens da amostra de aço 420. Também é possível observar nas micrografias a presença da camada passiva. Na imagem da amostra 304L em meio enzimático, é possível notar de forma mais clara algumas partes levemente mais atacadas que outras dentro do mesmo ponto de oxidação, evidenciando o caráter protetor da camada passiva. Também é importante destacar a diferença significativa entre as micrografias das amostras dos aços austeníticos comparando-as nos dois meios, com pontos de corrosão localizada maiores e mais frequentes nas amostras expostas ao meio alcalino, condizente com os resultados encontrados para os módulos de impedância a 30 mHz, conforme exibido anteriormente na Figura 15.

6. CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos pela análise dos aços e soluções de limpeza utilizadas como eletrólito nesse estudo, foi possível tirar uma importante conclusão sobre o agente de limpeza usado no instrumental cirúrgico: a escolha pelo detergente correto é fundamental para estender a vida útil do instrumento ao mesmo tempo em que previne contra sujidades residuais, possíveis focos de crescimento microbiológico causados pela corrosão, e a consequente potencial infecção do paciente no momento do procedimento cirúrgico.

A Espectroscopia de Impedância Eletroquímica mostrou que o aço 304L apresentou a maior impedância e, conseqüentemente, maior resistência à corrosão quando em meio enzimático, enquanto o aço 420 se comportou de forma contrária, exibindo a menor resistência à oxidação nesse meio. Os resultados de EIE exibidos pelos de aços austeníticos em solução enzimática indicam a formação de uma camada passiva mais protetora nesse meio. Já no meio alcalino, o aço 420 exibiu um comportamento melhor que o do aço 316L, sugerindo que o pH elevado é mais favorável para a passivação do aço martensítico.

Os ensaios eletroquímicos de polarização mostraram que, dentre as soluções de limpeza escolhidas, o detergente enzimático se mostrou um eletrólito mais resistivo e, portanto menos agressivo, para os aços austeníticos, com maiores valores de potencial de corrosão nesse meio. Essa classe de aço apresentou um menor valor de densidade de corrente passiva, maior potencial de transpassivação e maior impedância quando imersa no agente enzimático. Já o aço martensítico, apresentou menor densidade de corrente passiva, e maior impedância quando exposto ao detergente alcalino, apresentando passivação em um potencial menor quando imerso nesse meio. Dessa forma, pode-se inferir que o aço martensítico apresentou maior resistência à corrosão no meio alcalino.

As imagens da superfície das amostras, registradas com a utilização do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), corroboram com essas conclusões, visto que as amostras dos aços austeníticos mostraram uma superfície menos atacada quando expostas ao meio enzimático, enquanto o aço martensítico apresentou uma superfície levemente mais íntegra na amostra exposta ao meio alcalino, ainda que tenha apresentado, para os dois meios, as superfícies mais atacadas. Também foi possível observar que as amostras do aço AISI 304L, para os

dois meios, apresentaram o menor grau de oxidação visualmente, quando comparadas às amostras de aço AISI 316L e 420, com vantagem para o meio enzimático, que apresentou o menor nível visual de processos oxidativos em sua superfície, enquanto foi possível identificar uma maior densidade de marcas de corrosão no aço AISI 420 associados à solução de detergente enzimático.

Isso reforça a necessidade de escolha do agente de limpeza com base no aço selecionado e demais condições para determinada aplicação. O aço 304L mostrou melhor desempenho nos dois eletrólitos, mostrando que do ponto de vista de resistência à corrosão, pode ser uma melhor escolha, principalmente por ser mais barato quando comparado ao aço AISI 316L. E o detergente enzimático se mostrou uma melhor escolha para realizar a limpeza do instrumental cirúrgico feito de aço inoxidável AISI 304L.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Há uma enorme variedade de classes de aços inoxidáveis e também de tipos de detergentes, de forma que três classes de aço e um detergente enzimático e um alcalino são pouco representativos para concluir sobre quais são as melhores opções de forma definitiva, ainda que seja possível tirar essa conclusão relativamente ao que foi testado. Dessa maneira, é bastante provável que existam outras classes de aços que apresentem melhor comportamento do que aquelas testadas aqui. Assim, é natural que trabalhos futuros testem outras classes de aço inoxidável, mais aderentes às soluções usadas ou ao processo em que o metal será empregado. Uma sugestão seria o estudo da resistência à corrosão do aço inoxidável ferrítico AISI 444 em detergentes alcalinos e enzimáticos.

De forma análoga, outros detergentes podem ser testados, não restringindo aos dois tipos aqui considerados, mas expandindo a detergentes neutros, não-iônicos ou ácidos, se aplicável. Além disso, vale ressaltar que o detergente alcalino selecionado nesse trabalho apresenta, como informado, um elevado pH, mesmo para sua classe básica. Assim, talvez um detergente alcalino, mas com pH mais brando, possa apresentar melhores resultados eletroquímicos, enquanto mantém sua capacidade de limpeza. O mesmo vale para o detergente enzimático: esse estudo utilizou um agente com pH básico (~9), ainda que essa classe se valha da prerrogativa de atuar em pH neutro. Assim, uma seleção realizada atentando para esse fato talvez possa produzir melhores resultados para esse tipo de detergente. Nesse sentido, um estudo que analise os dois fins – capacidade de limpeza e efeito do agente de limpeza no substrato metálico – pode apresentar uma resposta mais completa, fazendo a ligação entre eficiência e impacto negativo do processo de limpeza no instrumento.

Também é importante frisar que, como os instrumentos cirúrgicos podem entrar em contato com diversas outras soluções além da solução de limpeza como sangue, solventes orgânicos, solução salina e outras que dependem da atividade fim, é necessário que esse estudo seja expandido a essas soluções para que o resultado seja mais abrangente. É virtualmente impossível englobar todas em um único estudo, já que diferentes atividades que utilizam instrumentos cirúrgicos exigem diferentes tipos de soluções, consequentemente exigindo diferentes detergentes e classes de aço. Mas ao se expandir a gama de testes, o embasamento teórico para

a escolha do par aço e solução de limpeza aumenta, ampliando a chance de acertar em um par mais aderente a cada aplicação.

Por fim, recentemente tem havido um crescente interesse em associar modelos matemáticos na interpretação dos dados de impedância do sistema eletroquímico. Sem softwares computacionais capazes de ajustar os dados experimentais com valores reais de propriedades e fenômenos físicos e químicos conhecidos, essa tarefa se torna mais árdua e menos assertiva (RIBEIRO, 2020), tornando-a uma excelente alternativa como próximo passo, já que isso ajudaria a entender os mecanismos de cada etapa do processo de corrosão e formação da camada de proteção do aço inoxidável. Um software para análise da estereologia também pode ajudar a quantificar defeitos na superfície do material após os ensaios eletroquímicos, auxiliando na análise do MEV.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1- 3M™ Boletim Informativo - Detergente Multienzimático – 5 enzimas. 2016.
- 2- ABREU, C.; CRISTÓBAL, M.; LOSADA, R.; NÓVOA, X.; PENA, G.; & PÉREZ, M. Comparative study of passive films of different stainless steels developed on alkaline medium. *Electrochimica Acta*, 49(17-18), 3049–3056. 2004.
- 3- ADDARI, D.; ELSENER, E.; ROSSI, A. Electrochemistry and surface chemistry of stainless steels in alkaline media simulating concrete pore solutions. *Electrochimica Acta*, 53(27), 8078–8086. 2008.
- 4- AGÊNCIA NACIONAL DE SAÚDE SUPLEMENTAR (ANS). Dispositivos Médicos Implantáveis. Disponível em: <<http://www.ans.gov.br/temas-de-interesse/dispositivos-medicos-implantaveis-dmi>> (acessado dia 09/10/2021)
- 5- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) n. 55. 2012.
- 6- AL-AMR, A. Mechanical behavior and structure of passive films on austenitic stainless steels - Dissertation. Washington State University. School of Mechanical and Materials Engineering. Materials Science Program. May, 2005.
- 7- ALCONOX INC. Advanced Cleaning Mechanisms: Alkaline Hydrolysis. Technotes – Critical Cleaning Advice From Alconox Inc. 2019.
- 8- ALFA, M. J.; & JACKSON, M. A new hydrogen peroxide–based medical-device detergent with germicidal properties Comparison with enzymatic cleaners. *American Journal of Infection Control*, 29(3), 168–177. 2001.
- 9- AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE (ANSI), ASSOCIATION FOR THE ADVANCEMENT OF MEDICAL INSTRUMENTATION (AAMI). ST35:2003 - Safe handling and biological decontamination of reusable medical devices in health care facilities and in nonclinical settings. i-68. 3-17- Arlington, VA, Association for the Advancement of Medical Instrumentation. 2003.
- 10-AORN JOURNAL. Recommended Practices for High-Level Disinfection. In: Conner R, Reno D, editors. Standards, Recommended Practices, and Guidelines. 2006 ed. Denver: Association of PeriOperative Registered Nurses; p 469-75. 2006.

- 11-BERTOLINI, L.; ELSENER, B.; PEDEFERRI, P.; REDAELLI, E.; POLDER, R. Corrosion of Steel in Concrete: Prevention, Diagnosis, Repair. Wiley-VCH. Weinheim, Germany. 414f. 2013.
- 12-CARBÓ, H. M. Aços Inoxidáveis: aplicações e especificações. Arcelor Mittal Inox Brasil. 2008.
- 13-CENSUS, E. Coatings for Corrosion Protection : Organic. In: Boschow, K. H. J. (Org.). Encyclopedia of Materials: Science and Technology. New York: Elsevier, p.1274–1279. 2001.
- 14-CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC) / FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (FDA). Public Health Advisory website. Disponível em: <www.fda.gov/cdrh/safety/endoreprocess.html> (acessado dia 20/10/2021).
- 15-CENTERS FOR DISEASE CONTROL AND PREVENTION (CDC). Guideline for Disinfection and Sterilization in Healthcare Facilities. National Center for Emerging and Zoonotic Infectious Diseases. 2008.
- 16-CHAN-MYERS, H.; MCALISTER, D.; & ANTONOPLOS, P. Natural bioburden levels detected on rigid lumened medical devices before and after cleaning. American Journal of Infection Control, 25(6), 471–476. 1997.
- 17-CHENG, C. Q.; ZHAO, J.; CAO, T. S.; FU, Q. Q.; LEI, M. K. Facile chromaticity approach for the inspection of passive films on austenitic stainless steel, Corrosion science, 70, 235-242. 2013.
- 18-CHU, N. S.; CHAN-MYERS, H.; GHAZANFARI, N.; & ANTONOPLOS, P. Levels of naturally occurring microorganisms on surgical instruments after clinical use and after washing. American Journal of Infection Control, 27(4), 315–319. 1999.
- 19-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. Tese (doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2016.
- 20-DUARTE, R. G.; CASTELA, A. S.; NEVES, R.; FREIRE, L.; & MONTEMOR, M. F. Corrosion Behavior of Stainless Steel Rebars Embedded in Concrete: an Electrochemical Impedance Spectroscopy Study. Electrochimica Acta, 124, 218–224. 2014.

- 21-ESMAILZADEH, S.; ALIOFKHAZRAEI, M.; & SARLAK, H. Interpretation of Cyclic Potentiodynamic Polarization Test Results for Study of Corrosion Behavior of Metals: A Review. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 54(5), 976–989. 2018.
- 22-ETTEFAGH, A. H.; GUO, S.; & RAUSH, J. Corrosion performance of additively manufactured stainless steel parts: A review. *Additive Manufacturing*, 37, 2021.
- 23-EVANGELISTA, S. DE S.; DOS SANTOS, S. G.; DE RESENDE STOIANOFF, M. A.; & DE OLIVEIRA, A. C. Analysis of microbial load on surgical instruments after clinical use and following manual and automated cleaning. *American Journal of Infection Control*, 43(5), 522–527. 2015.
- 24-FATTAH-ALHOSSEINI, A.; GOLOZAR, M.; SAATCHI, A.; RAEISSI, K. Effect of solution concentration on semiconducting properties of passive films formed on austenitic stainless steels, *Corrosion Science*, 52, 205-209. 2010.
- 25-FATTAH-ALHOSSEINI, A.; SOLTANI, F.; SHIRSALIMI, F.; EZADI, B.; & ATTARZADEH, N. The semiconducting properties of passive films formed on AISI 316 L and AISI 321 stainless steels: A test of the point defect model (PDM). *Corrosion Science*, 53(10), 3186–3192. 2011.
- 26-FENG, X.; WU, T.; LUO, J.; & LU, X. Degradation of passive film on 304 stainless steel in a simulated concrete pore solution under alternating temperature condition. *Cement and Concrete Composites*, 103651. 2020.
- 27-FONTANA & GREENE. *Corrosion Engineering*. McGraw-Hill Book Company.
- 28-FOOD AND DRUG ADMINISTRATION (FDA) - *Biological Responses to Metal Implants*. 2019.
- 29-FREIRE, L.; CARMEZIM, M. J.; FERREIRA, M. G. S.; MONTEMOR, M. F. The electrochemical behaviour of stainless steel AISI 304 in alkaline solutions with different pH in the presence of chlorides. *Electrochimica Acta*, 56(14), 5280–5289. 2011.
- 30-FREIRE, L.; CARMEZIM, M.; FERREIRA, M. A.; MONTEMOR, M. The passive behaviour of AISI 316 in alkaline media and the effect of pH: A combined electrochemical and analytical study, *Electrochimica Acta*, 55, 6174-6181. 2010.

- 31-GALERA, P. D. Apostila de Técnica Cirúrgica - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária. UNB, 2005.
- 32-GARCIA, M. D.; HUR, M.; CHEN, J. J.; & BHATTI, M. T. Cobalt toxic optic neuropathy and retinopathy: Case report and review of the literature. *American Journal of Ophthalmology Case Reports*, 17. 2020.
- 33-GENTIL, V. Corrosão. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora, LTC - Livros Técnicos e Científicos, 1997.
- 34-GHODS, P.; ISGOR, O. B.; MCRAE, G.; MILLER, T. The effect of concrete pore solution composition on the quality of passive oxide films on black steel reinforcement. *Cement & Concrete Composites*, v. 31, p. 2-11. 2009.
- 35-GONZALEZ, J.; VANZIELEGHEM, T.; DUMAZY, A.; MEURIS, C.; MUTSERS, J.; CHRISTIAENS, G.; GAST, P. On-site comparison of an enzymatic detergent and a non-enzymatic detergent-disinfectant for routine manual cleaning of flexible endoscopes. *Endoscopy International Open*, 07(04), E412–E420. 2019.
- 36-HABIB, K.; DAMRA, M.; SAURA, J.; CERVERA, I.; BELLÉS, J. Breakdown and evolution of the protective oxide scales of AISI 304 and AISI 316 stainless steels under high-temperature oxidation, *International Journal of Corrosion*, 1-10. 2011.
- 37-HE, J.; HAN, G.; FUKUYAMA, S.; YOKOGAWA, K.; KIMURA, A. Effect of hydrogen on dynamic precipitation of carbide in type 304 stainless steel during creep process, *Acta materialia*, 45, 3377-3388. 1997.
- 38-HENOUN LOUKILI, N.; ZINK, E.; GRANDADAM, S.; BIENTZ, M.; & MEUNIER, O. Effectiveness of detergent–disinfecting agents on *Escherichia coli* biofilm. *Journal of Hospital Infection*, 57(2), 175–178. 2004.
- 39-HERMAWAN, H.; RAMDAN, D.; DJUANSJAH, J. R. Metals for biomedical applications, *Biomedical engineering-from theory to applications*, 411-430. 2011.
- 40-HERNÁNDEZ, H. H.; REYNOSO, A. M. R.; GONZÁLEZ, J. C. T.; MORÁN, C. O. G.; HERNÁNDEZ, J. G. M.; RUIZ, A. M.; CRUZ, R. O. Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS): A Review Study of Basic Aspects of the Corrosion Mechanism Applied to Steels. *Electrochemical Impedance Spectroscopy*. Intech Open. 2020.

- 41-HILL R. M. Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition), 2003.
- 42-HUANG, Y.; XU, D.; HUANG, L.; LOU, Y.; MUHADESI, J.-B.; QIAN, H.; JIANG, C.-Y. Responses of soil microbiome to steel corrosion. *Npj Biofilms and Microbiomes*, 7(1). 2021.
- 43-KIKUTI, E.; CONRRADO, R.; BOCCHI, N.; BIAGGIO, S. R.; & ROCHA-FILHO, R. C. Chemical and electrochemical coloration of stainless steel and pitting corrosion resistance studies. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 15(4), 472–480. 2004.
- 44-KRALCHEVSKY P.; DANOV K.; ANACHKOV S. E. Micellar Solutions of Ionic Surfactants and Their Mixtures with Nonionic Surfactants: Theoretical Modeling vs. Experiment. *Colloid Journal*, 2014, Vol. 76, No. 3, pp. 255–270. 2014.
- 45-KRISE K. M. Enzymes: Moving at the Speed of Life. American Chemical Society. ACS website. 2021. Disponível em: <<https://www.acs.org/content/acs/en/education/outreach/celebrating-chemistry-editions/2021-ncw/enzymes.html>> (acessado dia 16/07/2022)
- 46-LEKATOU, A. G.; & TSOULI, S. Cyclic Polarization of Corrugated Austenitic Stainless Steel Rebars in Acid Rain: Effect of Fly Ash, pH and Steel Type. *Corrosion and Material Degradation*, 3(1) 75-100. 2022.
- 47-LEMAITRE, C.; ABDEL MONEIM, A.; DJOUDJOU, R.; BAROUX, B.; BERANGER, G. A statistical study of the role of molybdenum in the pitting resistance of stainless steels. *Corrosion Science*, 34(11), 1913–1922. 1993.
- 48-LINS, V.; LAGE, M. D. A.; OLIVEIRA, M. D.; PEREIRA, P. H. R.; FIGUEIREDO, R. B. Corrosion behavior of Al-3Mg-0.2Sc alloy processed by high pressure torsion and annealed. *Journal of Materials Research and Technology – Manuscript*. 2022.
- 49-LIPSCOMB, I. P.; SIHOTA, A. K.; & KEEVIL, C. W. Comparison between visual analysis and microscope assessment of surgical instrument cleanliness from sterile service departments. *Journal of Hospital Infection*, 68(1), 52–58. 2008.

- 50-LORANG, G.; BELO, M. D. C.; SIMOES, A.; FERREIRA, M. Chemical composition of passive films on AISI 304 stainless steel, *Journal of The Electrochemical Society*, 141, 3347. 1994.
- 51-LOUKILI N.H.; ZINK E.; GRANDADAM S.; BIENTZ M.; MEUNIER O. Effectiveness of detergent-disinfecting agents on *Escherichia coli* 54127 biofilm. *J. Hosp. Infect.* 57:175-8. 2004.
- 52-MACDONALD, D. D. The history of the point defect model for the passive state: a brief review of film growth aspects, *Electrochim. Acta* 56(4), 1761-1772. 2011.
- 53-MAGALHÃES, A. A.; MARGARIT, I. C.; MATTOS, O. Electrochemical characterization of chromate coatings on galvanized steel. *Electrochimica Acta*, 44(24), 4281–4287. 1999.
- 54-MASSOUD, T.; MAURICE, V.; KLEIN, L. H.; MARCUS, P. Nanoscale morphology and atomic structure of passive films on stainless steel, *Journal of the Electrochemical Society*, 160, C232. 2013.
- 55-MCCAFFERTY, E. *Introduction to Corrosion Science*, Springer. 2010.
- 56-MESQUITA, T. J.; CHAUVEAU, E.; MANTEL, M., KINSMAN, N.; & NOGUEIRA, R. P. Anomalous corrosion resistance behavior of Mo-containing SS in alkaline media: The role of microstructure. *Materials Chemistry and Physics*, 126(3), 602–606. 2011.
- 57-MEYERS, R. A. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. Reference Work. Third Edition. Editor-in-Chief: Robert A. Meyers. 2001.
- 58-MONTEMOR, M. F.; SIMÕES, A.; FERREIRA, M. G. S.; BELO, M. DA C. The role of Mo in the chemical composition and semiconductive behaviour of oxide films formed on stainless steels. *Corrosion Science*, 41(1), 17–34. 1999.
- 59-MORSHED-BEHBAHANI, K.; ZAKERIN, N.; NAJAFISAYAR, P.; & PAKSHIR, M. A survey on the passivity of tempered AISI 420 martensitic stainless steel. *Corrosion Science*, 183, 109340. 2021.
- 60-MSM MED. Reprocessamento de Dispositivos Médicos. Disponível em: <<https://www.msmed.com.br/2020/09/22/reprocessamento-de-dispositivos-medicos/>> (acessado dia 09/10/2021)
- 61-NYSTROM, B. Disinfection of surgical instruments. *Journal of Hospital Infection*, 2, 363–368. 1981.

- 62-OKABE S.; ODAGIRI M.; ITO T.; SATOH H. Succession of sulfur-oxidizing bacteria in the microbial community on corroding concrete in sewer systems, *Applied and environmental microbiology*, 73, 971-980. 2007.
- 63-OLSSON, C.-O. & LANDOLT, D. Passive films on stainless steels—chemistry, structure and growth. *Electrochimica Acta*, 48(9), 1093–1104. 2003.
- 64-PARDO, A.; MERINO, M. C.; COY, A. E.; VIEJO, F.; ARRABAL, R.; MATYKINA, E. Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels – combining effects of Mn and Mo additions. *Corrosion Science*, 50(6), 1796–1806. 2008.
- 65-POURSAEE, A. *Corrosion of Steel in Concrete Structures*. 1st Ed. USA: Elsevier. 2016.
- 66-PUGLIESE, G.; & FAVERO, M. S. Levels of Microbial Contamination on Surgical Instruments. *Infection Control & Hospital Epidemiology*, 19(07), 531. 1998.
- 67-QUEIROZ, G. A. DE; ANDRADE, J. S.; MALTA, T. B. S.; VINHAS, G.; & LIMA, M. A. G. DE A. Biofilm Formation and Corrosion on Carbon Steel API 5LX60 in Clayey Soil. *Materials Research*. Queiroz, 21(3). 2018.
- 68-RIBEIRO, D. V.; ABRANTES, J. C. C. Application of electrochemical impedance spectroscopy (EIS) to monitor the corrosion of reinforced concrete: A new approach. *Construction and Building Materials*, v. 111, p. 98-104. 2016.
- 69-RIBEIRO, J. Espectroscopia de Impedância Eletroquímica: uma Ferramenta nas Investigações Eletroquímicas. *Revista Virtual de Química*, 12 (6). 2020.
- 70-ROLAND, T.; RETRAINT, D.; LU, K.; LU, J. Fatigue life improvement through surface nanostructuring of stainless steel by means of surface mechanical attrition treatment, *Scripta Materialia*, 54(11), 1949-1954. 2006
- 71-ROSA, G. C.; SOUZA, A. J.; POSSAMAI, E. V.; AMORIM, H. J.; & NEIS, P. D. Wear analysis of ultra-fine grain coated carbide tools in hard turning of AISI 420C stainless steel. *Wear*, 376-377, 172–177. 2017.
- 72-RUTALA W. A.; WEBER D. J. Cleaning, Disinfection, and Sterilization in Healthcare Facilities. *APIC Text of Infection Control & Epidemiology*. p 21-1-21-12. 2005.

- 73-SANTOS, M. V. Limpeza e Desinfecção de Equipamentos de Ordenha e Tanques. Embrapa - Qualileite/FMVZ-USP - Laboratório de Pesquisa em Qualidade do Leite. 2012.
- 74-SAVA, A.; & KRITZLER, S. Efficacy of prion decontamination of medical instruments using alkaline and enzymatic detergents. BMC Proceedings, 5(Suppl 6), P314. 2011.
- 75-SCHMIDT, D. R. C.; YONEKURA C. S. I.; GIL R. F. Instrumento para avaliação de detergentes enzimáticos. Revista Da Escola de Enfermagem Da USP, 42(2), 282–289. 2008.
- 76-SEDRIKS, A.J. Corrosion of stainless steel, 2. 1996.
- 77-SHAW D. Introduction to Colloid and Surface. 4th Edition Elsevier. 1992
- 78-SHOEMAKE, S.; STOESSEL, K. M. S. Cleaning Reusable Medical Devices: A Critical First Step. Kimberly Clark Healthcare Education. 2007.
- 79-SOLTANI, H. M.; & TAYEBI, M. Comparative study of AISI 304L to AISI 316L stainless steels joints by TIG and Nd:YAG laser welding. Journal of Alloys and Compounds, 767, 112–121. 2018.
- 80-SUGIMOTO, K.; SAWADA, Y. The role of molybdenum additions to austenitic stainless steels in the inhibition of pitting in acid chloride solutions. Corrosion Science, 17(5), 425–445. 1977.
- 81-SUN, M.; WU, X.; ZHANG, Z.; HAN, E-H. Oxidation of 316 stainless steel in supercritical water, Corrosion science, 51, 1069-1072. 2009.
- 82-TAN, M. W.; AKIYAMA, E.; HABAZAKI, H.; KAWASHIMA, A.; ASAMI, K.; HASHIMOTO, K. The effect of molybdenum on the stability of passive films formed on amorphous Fe-Cr-Mo-P-C alloys by potentiostatic polarization in deaerated 1 M HCl. Corrosion Science, 39(3), 589–603. 1997.
- 83-TRANCHIDA, G.; CLESI, M.; DI FRANCO, F.; DI QUARTO, F.; & SANTAMARIA, M. Electronic properties and corrosion resistance of passive films on austenitic and duplex stainless steels. Electrochimica Acta, 273, 412–423. 2018.
- 84-VELEVA, L.; ALPUCHE-AVILES, M. A.; GRAVES-BROOK, M. K.; & WIPF, D. O. Comparative cyclic voltammetry and surface analysis of passive films grown on stainless steel 316 in concrete pore model solutions. Journal of Electroanalytical Chemistry, 537(1-2), 85–93. 2002.

- 85-VIGNAL, V.; KRAWIEC, H.; HEINTZ, O.; MAINY, D. Passive properties of lean duplex stainless steels after long-term ageing in air studied using EBSD, AES, XPS and local electrochemical impedance spectroscopy, *Corrosion science*, 67, 109-117. 2013.
- 86-WIJESINGHE, T. S .L.; BLACKWOOD, D. J. Real time pit initiation studies on stainless steels: the effect of sulphide inclusions, *Corrosion Science*, 49, 1755-1764. 2007.
- 87-WOLYNEC, S. *Técnicas Eletroquímicas em Corrosão*. EDUSP. 2002.
- 88-XU, Y.; HUANG, Z.; & CORNER, G. A study of the effect of clinical washing decontamination process on corrosion resistance of Martensitic Stainless Steel 420. *Bio-Medical Materials and Engineering*, 27(4), 341–351. 2016.
- 89-YANIV, A. E.; LUMSDEN, J. B.; STAEHLE, R.W. J. The Composition of Passive Films on Ferritic Stainless Steels. *Journal of The Electrochemical Society*, 124(4), 490. 1977.
- 90-ZHA, L.; LI, H.; & WANG, N. Electrochemical Study of Galena Weathering in NaCl Solution: Kinetics and Environmental Implications. *Minerals*, 10(5), 416. 2020.
- 91-ZHOU, X.; YANG, H.; WANG, F. Investigation on the inhibition behavior of a pentaerythritol glycoside for carbon steel in 3.5% NaCl saturated Ca(OH)₂ solution. *Corrosion Science*, v, 54, p.193-200, 2012.
- 92-ZUHLSDORF B. E. M.; FLOSS H.; MARTINY H. Cleaning efficacy of nine different cleaners in a washer-disinfector designed for flexible endoscopes. *J. Hosp. Infect.*52:206-11. 2002.
- 93-ZUHLSDORF B.; FLOSS H.; MARTINY H. Efficacy of 10 different cleaning processes in a washer-disinfector for flexible endoscopes. *J. Hosp. Infect.* 56:305-11. 2004.