



**Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Mecânica**

**DEGRADAÇÃO DE REVESTIMENTOS POLIMÉRICOS
APLICADOS EM TUBULAÇÕES DE ESGOTO**

DEMÓSTENES COUTINHO GOMES

UBERLÂNDIA

2026

DEMÓSTENES COUTINHO GOMES

**DEGRADAÇÃO DE REVESTIMENTOS POLIMÉRICOS APLICADOS
EM TUBULAÇÕES DE ESGOTO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Washington Martins da Silva Jr.
Coorientadora Prof^a. Dra. Sheila Cristina Canobre

UBERLÂNDIA

2026

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

G633d
2026 Gomes, Demóstenes Coutinho, 1982-
 Degradação de revestimentos poliméricos aplicados em tubulações
 de esgoto [recurso eletrônico] / Demóstenes Coutinho Gomes. - 2026.

Orientador: Washington Martins da Silva Junior.

Coorientadora: Sheila Cristina Canobre.

Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa
de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2026.5515>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia Mecânica. I. Silva Junior, Washington Martins da
(Orient.). II. Canobre, Sheila Cristina (Coorient.). III. Universidade
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-graduação em Engenharia
Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.01

André Carlos Francisco
Bibliotecário-Documentalista - CRB-6/3408



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-
MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado, nº 418, PPGEM				
Data:	23/02/2026	Hora de início:	14:00	Hora de encerramento:	18:10
Matrícula:	12123EMC002				
Nome do Discente:	Demóstenes Coutinho Gomes				
Título do Trabalho:	Degradação de revestimentos poliméricos aplicados em tubulações de esgoto				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Materiais/tribologia				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Dr. Miguel Angel Narvaez Ardila (convidado) - UFU, Prof. Dr. Cherlio Scandian - UFES; Prof. Dr. Elivelton Alves Ferreira - UFF; Profa. Dra. Regina Paula Garcia Moura - UFU; Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva - UFU; Profa. Dra. Sheila Cristina Canobre (coorientadora) - UFU e Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior - UFU; orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Prof. Dr. Washington Martins da Silva Junior, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar, foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Miguel Angel Narvaez Ardila, Usuário Externo**, em 23/02/2026, às 18:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 18:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cherlio Scandian, Usuário Externo**, em 23/02/2026, às 18:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Elivelton Alves Ferreira, Usuário Externo**, em 23/02/2026, às 18:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Regina Paula Garcia Moura, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 18:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Washington Martins da Silva Junior, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sheila Cristina Canobre, Professor(a) do Magistério Superior**, em 23/02/2026, às 18:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7038286** e o código CRC **6F1CC0ED**.

“Quem é sábio? Aquele que aprende de toda pessoa. Quem é forte? Aquele que domina sua [má] inclinação. Quem é rico? Aquele que se contenta com a sua parte. Quem é honrado? Aquele que honra aos outros.”

Pirke Avot; 4:1

“Não faça aos outros o que não quer que façam. Aí está toda a Lei. O resto é mero comentário, vai e estuda”.

Hillel (Shab. 31a)

Dedico à minha amada esposa Cláudia e minha amada filha Bella.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente agradeço ao Eterno Criador, e por toda fé inabalável cultivada durante todos os momentos difíceis.

Agradeço ao **Professor Dr. Washington Martins da Silva Jr**, ser humano fantástico e admirável profissional, que aprendi a admirar e estimar, para muito além do campo acadêmico. Agradeço a esse grande mentor por toda ajuda, motivação e ensinamentos em durante toda jornada, especialmente nos momentos mais difíceis.

À **Professora Sheila Cristina Canobre** pela ótima orientação ao compartilhar o seu avassalador conhecimento, por todo incentivo e por proporcionar todas as condições indispensáveis à execução deste trabalho.

À minha família, **Cláudia e Bella**, aos meus pais pela vida, aos meus irmãos e demais familiares que me apoiaram.

Especialmente ao **Dr. Miguel Angel Narvaez Ardila** por toda sua ajuda, conhecimento, dicas e incentivo. Seu grande conhecimento e apoio foram indispensáveis para elaboração deste trabalho.

A todos amigos da minha comunidade, **SIRP – Sociedade Israelita de Ribeirão Preto**, por todo acolhimento e amor, local onde o Eterno Criador permitiu que meu coração encontrasse a paz e que que minha alma se enchesse de alegria.

A todos os servidores e amigos do **DMAE – Departamento Municipal de Água e Esgoto de Uberlândia**, por toda ajuda e apoio incondicional.

A todos os servidores e amigos da **ARESAN – Agência de Regulação dos Serviços de Saneamento Básico de Uberlândia**, especialmente ao **Cláudio Augusto** por toda ajuda, contribuição e motivação.

Aos professores e amigos do **LaETE – Laboratório de Analítica, Eletroquímica e Tratamento de Efluentes** por toda contribuição, que foi imprescindível para a construção deste trabalho, especialmente à colega **Leticia Poggere Pinto**, por toda grande ajuda, paciência e conhecimento.

Aos professores e amigos do **LTM – Laboratório de Tribologia e Materiais** por toda estrutura, compartilhamento de informações e ajuda decisiva, especialmente ao Dr. **Paulo Lourenço Monteiro Junior** pelo avançado conhecimento, educação e decisiva ajuda.

Aos meus colegas estudantes de pós-graduação no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), especialmente ao amigo **Ronaldo Vilela Ribeiro** pelas diversas colaborações e ajuda. Agradeço imensamente aos demais estudantes e membros do

Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) que, direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos amigos da Uniube – Universidade de Uberaba, Campus Via Centro, especialmente do **Curso de Engenharia Civil** por compartilhar conhecimento, equipamentos e materiais indispensáveis à execução desta pesquisa.

À **STEELMAST METALURGICA LTDA e Zebron® do Brasil Indústria e Comércio** pelo fornecimento de materiais para realização deste trabalho.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de realizar esse curso.

Sou grato por cada pessoa que conheci, por cada experiência que vivenciei durante esse ciclo, me sinto grato até mesmo pelos momentos difíceis e angustiantes, que me proporcionaram oportunidade de buscar ajuda, fé e cultivar a resiliência.

GOMES, D. C., **Degradação de revestimentos poliméricos aplicados em tubulações de esgoto**, 2025. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

As tubulações de esgoto urbano enfrentam condições severas, incluindo corrosão química, degradação microbiológica e desgaste abrasivo. Materiais metálicos como o aço carbono ASTM A36 são altamente suscetíveis à corrosão, especialmente em ambientes ácidos ricos em sulfetos, levando a perdas de material e redução da vida útil das infraestruturas. Para mitigar esses efeitos, o uso de revestimentos poliméricos tem sido amplamente adotado, embora seu desempenho sob condições combinadas de corrosão e abrasão ainda não seja totalmente compreendido. Esta pesquisa propõe uma metodologia experimental integrada para avaliar a degradação de revestimentos poliméricos aplicados ao aço ASTM A36, utilizando um meio sintético representativo do esgoto urbano de Uberlândia (MG). Foram testados revestimentos de alcatrão de hulha-epóxi e Zebron®, com espessuras nominais de aproximadamente 0,25, 0,50 e 1,00 mm. A caracterização eletroquímica foi realizada por meio de medições de potencial de circuito aberto (OCP), curvas de polarização potenciodinâmica e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE). O aço sem proteção apresentou potenciais de corrosão inferiores a $-0,50$ V, altas densidades de corrente de corrosão na ordem de 10^{-4} A·cm⁻² e resistências de transferência de carga (R_{ct}) abaixo de 10^2 Ω·cm², indicando alta taxa de degradação. Em contraste, os revestimentos poliméricos apresentaram valores de resistência do revestimento ($R_{coating}$) de 10^4 Ω·cm² em maiores espessuras (0,5 mm e 1,0 mm), demonstrando eficácia na proteção do aço. O revestimento Zebron® manteve os valores de $R_{coating}$ entre 10^3 e 10^4 Ω·cm² após 168 h de imersão, em espessuras próximas de 1,00 mm. Já o alcatrão de hulha-epóxi apresentou uma degradação progressiva ao longo do tempo, especialmente em espessuras inferiores a 0,50 mm. Ensaios de desgaste abrasivo com roda de borracha em meio úmido revelaram perdas de espessura maiores para o alcatrão de hulha, atingindo aproximadamente 0,05 mm após 8 horas de teste. O Zebron® apresentou perdas inferiores a 0,015 mm sob condições similares. A análise revelou que a redução na espessura do revestimento diminui sua resistência à corrosão, devido à interação entre abrasão e corrosão, afetando a durabilidade do revestimento ao longo do tempo de imersão.

Palavras-chave: corrosão; desgaste abrasivo; tubulações de esgoto; revestimentos poliméricos; espectroscopia de impedância eletroquímica.

GOMES, D. C., **Degradation of polymeric coatings applied to sewage pipes**, 2025. PhD Thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Urban sewer pipelines operate under severe conditions, including chemical corrosion, microbiological degradation, and abrasive wear. Metallic materials such as ASTM A36 carbon steel are highly susceptible to corrosion, especially in acidic, sulfide-rich environments, leading to material loss and reduced infrastructure service life. To mitigate these effects, the use of polymeric coatings has been widely adopted, although their performance under combined corrosion-abrasion conditions is not yet fully understood. This research proposes an integrated experimental methodology to evaluate the degradation of polymeric coatings applied to ASTM A36 steel, using a synthetic medium representative of urban sewage from Uberlândia (MG). Coal tar-epoxy and Zebron® coatings were tested, with nominal thicknesses of approximately 0.25, 0.50, and 1.00 mm. Electrochemical characterization was performed through open circuit potential (OCP) measurements, potentiodynamic polarization curves, and electrochemical impedance spectroscopy (EIS). Uncoated steel exhibited corrosion potentials below -0.50 V, high corrosion current densities on the order of 10^{-4} A·cm⁻², and charge transfer resistances (R_{ct}) below 10^2 Ω·cm², indicating a high degradation rate. In contrast, polymeric coatings exhibited coating resistance ($R_{coating}$) values of 10^4 Ω·cm² at higher thicknesses (0.5 mm and 1.0 mm), demonstrating effectiveness in protecting the steel. The Zebron® coating maintained $R_{coating}$ values between 10^3 and 10^4 Ω·cm² after 168 h of immersion, especially near 1.00 mm thickness. The coal tar-epoxy coating showed progressive degradation over time, particularly at thicknesses below 0.50 mm. Abrasive wear tests using a rubber wheel in a wet medium revealed greater thickness loss for coal tar-epoxy, reaching approximately 0.05 mm after 8 hours, while Zebron® showed losses below 0.015 mm under similar conditions. The analysis revealed that reduced coating thickness decreases corrosion resistance due to the interaction between abrasion and corrosion, affecting long-term coating durability.

Keywords: corrosion; abrasive wear; sewage pipelines; polymeric coatings; electrochemical impedance spectroscopy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Esboço das principais trocas e reações interfaciais relacionadas a compostos voláteis na atmosfera de esgoto. Adaptado de HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013.	5
Figura 2.2. Diagrama esquemático de sistemas de esgoto por gravidade e pressurizados com os correspondentes biofilmes. Adaptado de Li <i>et al.</i> , 2019.....	7
Figura 2.3. Formação de H ₂ SO ₄ em tubulações de esgoto sanitário. Adaptado de GONEN; UYGUNOGLU, 2022.	8
Figura 2.4. Curva de polarização típica de um ensaio potenciodinâmico em aço inoxidável (SANTANDRÉA, 1999).	29
Figura 2.5. Representação do Diagrama de Nyquist (SOUZA, 2013).....	31
Figura 2.6. Circuito elétrico equivalente da interface metal pintado/solução (GENTIL, 2011).	32
Figura 2.7. (a) Diagrama de Bode do ângulo de fase de circuitos n(RC) (n = 1, 2, 3); (b) esquema dos circuitos equivalentes em (a) (HUANG <i>et al.</i> , 2016).....	33
Figura 2.8. Aparato experimental para o ensaio abrasivo tipo roda de borracha (ASTM G65, 2015).....	33
Figura 2.9. Sistema tribológico abrasivo (Adaptado de Zum Gahr, 1987).	35
Figura 2.10. Aparato experimental para o ensaio abrasivo tipo roda de borracha (ASTM G65, 2015).....	36
Figura 3.1. a) degradação da parte superior de tubos de esgoto. b) falha típica de tubos aplicados descartados da rede de transporte por gravidade. c) degradação e perdas de espessura na parte inferior do tubo. d) indicação da perda de espessura na parte inferior da tubulação de esgoto. Fonte próprio autor.....	39
Figura 3.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície das partes de aço expostas da parte superior da tubulação de esgoto. A figura mostra em a) indicação da região do tubo; em b) e c) mapeamento da região via EDS da superfície; em d) e) superfície do material; f) os principais elementos encontrados via EDS na superfície do aço ASTM A36 quando perdeu o revestimento. Fonte próprio autor.....	40
Figura 3.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície das partes de aço expostas da parte superior da tubulação de esgoto. A figura mostra em a) indicação da região	

do tubo; em b) e c) mapeamento da região via EDS da superfície; em d) e) superfície do material; f) os principais elementos encontrados via EDS na superfície do aço ASTM A36 quando perdeu o revestimento. Fonte próprio autor.....	41
Figura 3.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície do revestimento. a) superfície característica do polímero; b) c) aberturas na superfície do polímero e pontos de permeação; d) e) desgaste abrasivo no polímero. Fonte próprio autor.	42
Figura 3.5. Modelo da formação das duas zonas de permeação com uma vista 2D de uma seção transversal do revestimento. Adaptado de Hinderliter <i>et al.</i> (2006).....	44
Figura 3.6. Atividades do processo de desenvolvimento de substrato laboratorial que simula a água residual de Uberlândia. Fonte próprio autor.	45
Figura 3.7. Pontos de coleta de amostras de águas residuais da rede de esgoto de Uberlândia pelo período de um ano.	46
Figura 3.8. Atividades da criação do substrato laboratorial que reproduz a água residual de Uberlândia. Fonte próprio autor.	47
Figura 3.9. Curva granulométrica de partículas abrasivas do esgoto de Uberlândia. Fonte próprio autor.	51
Figura 3.10. Curva de polarização do aço ASTM A36 sem revestimento com meio eletrolítico de esgoto laboratorial com 9,5 g/L de H ₂ SO ₄ . Fonte próprio autor.	52
Figura 3.11. (a) Imagem de MEV após ensaio de polarização da amostra de aço ASTM A36 no meio eletrolítico de esgoto laboratorial com adição de 5% de H ₂ SO ₄ . (b) Amostra coletada em campo. Fonte próprio autor.....	52
Figura 3.12. Decantação de material sólido no fundo da tubulação em função de baixas vazões. Fonte próprio autor.	55
Figura 3.13. Modelo desgaste por deslizamento na parte inferior do tubo pelo escoamento de partículas duras (majoritariamente areias). Fonte próprio autor.	55
Figura 3.14. Bancada de ensaios abrasivos por roda de borracha indicando os objetos de adaptação listados pelo autor. Fonte próprio autor.	56
Figura 3.15. Desgaste total do revestimento de alcatrão de hulha, de 1 mm de espessura, pela aplicação de ensaios de roda de borracha úmido conforme a ASTM G105, utilizando partículas abrasivas de sílica com mistura tamanho de 200 µm e de 800 µm de diâmetro médio. Fonte próprio autor.	57
Figura 3.16. Comparação de mecanismos de desgaste no revestimento alcatrão de hulha: a) reprodução do desgaste em ambiente laboratorial por meio do ensaio roda de borracha úmido com parâmetros adaptados via MEV; b) Exemplo de medição da largura dos sulcos em amostra desgastada em ambiente laboratorial via MEV; c) desgaste abrasivo de amostra coletada em campo via MEV; d) Exemplo de medição da largura dos sulcos em	

amostra de campo via MEV; e) comparação de larguras dos sulcos em amostras de campo e replicada em laboratório. Fonte próprio autor.....	58
Figura 4.1. Fluxograma das etapas principais para o desenvolvimento da metodologia para avaliação de revestimento protetivos da tubulação de esgoto. Fonte próprio autor.	60
Figura 4.2. Revestimento com base epóxi ou PU para a proteção de tubulação transportadora de fluidos. Fonte próprio autor.	63
Figura 4.3. (a) Célula eletroquímica convencional impressa em 3d, com disposição de eletrodos; (b) Célula eletroquímica projetada para ensaios eletroquímicos de revestimentos espessos. Fonte próprio autor.	65
Figura 4.4. Desenho da célula eletroquímica projetada. Fonte próprio autor.	66
Figura 4.5. Variações do OCP do aço ASTM A36 na presença de revestimento de Zebron de 1 mm de espessura em meio laboratorial de esgoto. Fonte próprio autor.	67
Figura 4.6. (a) Esquema do abrasômetro roda de borracha úmido a ser utilizado nos ensaios (ASTM G105); (b) Bancada de roda de borracha úmido do Laboratório de Tribologia e Materiais - LTM. Fonte próprio autor.	69
Figura 4.7. Roda de borracha com pás de agitação usadas nos ensaios de roda de borracha úmido. Fonte próprio autor.	70
Figura 4.8. Procedimento de análise das interferometrias para obtenção do volume desgastado em amostras após ensaios de roda de borracha úmido. Fonte próprio autor.	71
Figura 5.1. Caracterizações eletroquímicas do aço ASTM A36 sem revestimento em meio esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Sendo: a) Gráfico de OCP; b) CPP; c) diagrama de Nyquist; e d) Diagrama de Bode. Fonte próprio autor.....	74
Figura 5.2. Variações do OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron, em espessura de ≈ 1,00 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto sintético contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Fonte próprio autor.	76
Figura 5.3. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de ≈ 1,00 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Amplitude de perturbação de ±20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	76
Figura 5.4. Diagrama de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de ≈ 1,00 mm após 168 h de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Amplitude de perturbação de ±20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	77
Figura 5.5. Diagramas de Bode a) log f x log Z e b) log f x ângulo de fase para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de ≈ 1 mm ao longo do tempo de imersão	

em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	77
Figura 5.6. Variações do OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de ≈ 0,50 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Fonte próprio autor.	81
Figura 5.7. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de ≈ 0,50 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Amplitude de perturbação de ±20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	81
Figura 5.8. Diagramas de Bode a) log f x log Z e b) log f x ângulo de fase para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de ≈ 0,50 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	82
Figura 5.9. Variações do OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de ≈ 0,25 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Fonte próprio autor.	83
Figura 5.10. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de ≈ 0,25 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	84
Figura 5.11. Diagramas de Bode a) log f x log Z e b) log f x ângulo de fase, para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de ≈ 0,25 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	84
Figura 5.12. Variações do OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de ≈ 1,00 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Fonte próprio autor.	87
Figura 5.13. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de ≈ 1,00 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	87
Figura 5.14. Diagramas de Nyquist isolados para o aço recoberto com alcatrão de hulha em espessura de 1 mm após 1 h e 24 h de imersão em esgoto laboratorial. Fonte próprio autor.	88
Figura 5.15. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de ≈ 1,00 mm, a) após 120 h e b) após 168 h de imersão em esgoto laboratorial	

contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Amplitude de perturbação de ±20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	88
Figura 5.16. Diagramas de Bode a) log f x log Z e b) log f x ângulo de fase para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de ≈ 1,00 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	89
Figura 5.17. Variações do OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de ≈ 0,50 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Fonte próprio autor.	90
Figura 5.18. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de ≈ 0,50 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	91
Figura 5.19. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de ≈ 0,50 mm, após 120 h e 168 h de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Amplitude de perturbação de ±0,2 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	91
Figura 5.20. Diagramas de Bode a) log f x log Z e b) log f x ângulo de fase para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de ≈ 0,50 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	92
Figura 5.21. Variações do OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de ≈ 0,25 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Fonte próprio autor.	93
Figura 5.22. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de ≈ 0,25 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	94
Figura 5.23. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de ≈ 0,25 mm, após 120 h e 168 h de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	94
Figura 5.24. Diagramas de Bode a) log f x log Z e b) log f x ângulo de fase para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de ≈ 0,25 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	95

Figura 5.25. Circuitos eletroquímicos obtidos a partir dos ajustes das amostras recobertas por Zebron®. Fonte próprio autor.	98
Figura 5.26. Circuitos eletroquímicos obtidos a partir dos ajustes das amostras recobertas por Alcatrão de hulha. Fonte próprio autor.	100
Figura 5.27. Medição do volume desgastado via interferometria laser em amostras de revestimento de Zebron® submetidas em roda de borracha úmido. Interferometria da amostra com: (a) 10 min de teste; (b) 20 min de teste; (c) 30 min de teste; (d) 40 min de teste; e (e) 50 min de teste. Fonte próprio autor.	103
Figura 5.28. MEV das superfícies desgastadas via roda de borracha úmido para; (a) alcatrão de hulha; (b) Zebron®. Fonte próprio autor.	104
Figura 5.29. (a) Coeficiente de desgaste (k) dos revestimentos para tubulação ao longo do tempo em ensaios de roda de borracha úmido; (b) Coeficiente de desgaste (k) médio dos revestimentos. Fonte próprio autor.	105
Figura 5.30. (a) Dureza dos revestimentos; (b) Comparação do coeficiente de desgaste versus dureza do revestimento. Fonte próprio autor.	106
Figura 5.31. Gráfico mostrando os valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 , considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Fonte próprio autor.	108
Figura 5.32. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 , considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 1 Hz. Fonte próprio autor.	108
Figura 5.33. Diagramas de Bode a) $\log f \times \log Z $ e b) $\log f \times$ ângulo de para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 , considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.	109
Figura 5.34. Gráfico mostrando os valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 , considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Fonte próprio autor.	111
Figura 5.35. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 , considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 1 Hz. Fonte próprio autor.	111

- Figura 5.36. Diagramas de Bode a) $\log f \times \log |Z|$ e b) $\log f \times$ ângulo de para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 , considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor. 112
- Figura 5.37. Circuito elétrico proposto para as amostras desgastadas. Fonte próprio autor. 114
- Figura 5.38. Perda de espessura no tempo em revestimentos de Alcatrão de hulha (azul) e Zebron® (vermelho) submetidos ao desgaste abrasivo tipo roda de borracha úmido em ambiente de esgoto urbano representado laboratorialmente e baseado na condição de Uberlândia. Fonte próprio autor. 115
- Figura 5.39. Resistência do revestimento (R_{coating} de Alcatrão de hulha (azul) e Zebron® (vermelho) imersos em ambiente de esgoto urbano representado laboratorialmente e baseado na condição de Uberlândia para diferentes espessuras de revestimento, após 120 h e 168 h de imersão em esgoto laboratorial. Fonte próprio autor. 116
- Figura 5.40. Gráfico da resistência do aço revestido com Alcatrão de hulha (azul) e Zebron® (vermelho) em função do tempo de desgaste em ambiente de esgoto urbano representado laboratorialmente e baseado na condição de Uberlândia. Fonte próprio autor. 117
- Figura 5.41. Comparação do custo acumulado do ciclo de vida (LCC) dos revestimentos Zebron® e alcatrão de hulha-epóxi ao longo de 10 anos de operação. Fonte próprio autor. 122

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre os revestimentos de epóxi vs. poliuretanos. Adaptado de REALITY PATHING, 2024.	22
Tabela 2.2 – Parâmetros de qualidade das águas residuais domésticas (ARD) (HENZE; LEDIN, 2001; GARCÍA; LÓPEZ, 2005; MARTÍNEZ DEUSA; PASCICHANÁ HERNÁNDEZ, 2019).	25
Tabela 2.3 – Composição de substratos sintéticos utilizados por diversos autores.	26
Tabela 2.4 – Os parâmetros dos procedimentos recomendados na norma ASTM G65, 2015.	34
Tabela 3.1 – Componentes característicos da água residual do efluente DMAE Uberlândia, conforme os dados coletados mensalmente no período de um ano.	46
Tabela 3.2 – Compostos orgânicos e inorgânicos para o desenvolvimento do substrato laboratorial. Fonte próprio autor.	48
Tabela 3.3 – Composição dos substratos laboratoriais elaborados, em g/L. Fonte próprio autor.	48
Tabela 3.4 – Resultados das análises dos substratos laboratoriais de água de esgoto de Uberlândia. Fonte: próprio autor.	49
Tabela 4.1 - Recomendações para aplicação do alcatrão de hulha conforme as recomendações da Norma Sueca SIS-05 5900 (1967). Fonte próprio autor.	62
Tabela 4.2 – Composição química do aço A36 (% em peso) que será utilizado com substrato dos revestimentos. Fe elemento de balanço.	63
Tabela 4.3 – Parâmetros de ensaio do teste roda de borracha. Fonte próprio autor. ...	70
Tabela 5.1 – Parâmetros eletroquímicos obtidos para o aço ASTM A36 em meio de esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ , comparado com alguns valores encontrados na literatura.	74
Tabela 5.2 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de ≈ 1,00 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Fonte próprio autor.	78
Tabela 5.3 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de ≈ 0,50 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H ₂ SO ₄ . Fonte próprio autor.	82

Tabela 5.4 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de $\approx 0,25$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.	85
Tabela 5.5 – Valores de R_{ct} e de Eficiência de Inibição à Corrosão para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de $\approx 0,25$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.	85
Tabela 5.6 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 1,00$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.	89
Tabela 5.7 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 0,50$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.	92
Tabela 5.8 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 0,25$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.	95
Tabela 5.9 – Parâmetros eletroquímicos obtidos para o aço revestido com Zebron® em diferentes espessuras (1,00, 0,50, 0,25 mm) e tempos de imersão em esgoto laboratorial. Fonte próprio autor.	96
Tabela 5.10 – Parâmetros eletroquímicos obtidos para o alcatrão de hulha em diferentes espessuras e tempos de imersão em esgoto laboratorial.....	97
Tabela 5.11 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 , considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Fonte próprio autor.	109
Tabela 5.12 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 , considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Fonte próprio autor.	112
Tabela 5.13 – Parâmetros eletroquímicos obtidos para o revestimento Alcatrão de hulha em diferentes tempos de desgaste. Fonte próprio autor.	113
Tabela 5.14 – Parâmetros eletroquímicos obtidos para o revestimento Zebron® em diferentes tempos de desgaste. Fonte próprio autor.	113
Tabela 5.15 – Valores de $R_{coating}$ obtidos na literatura para revestimentos de poliuretano e epóxi, em diferentes meios. Fonte próprio autor.	120

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$ - graus Celsius

% - percentual

I_c - corrente crítica de corrosão

I_p - densidade de corrente de passivação

E_c - potencial de corrosão

E_p - potencial de passivação

E_t - potencial de pite

Z - impedância

Z' - componente real da impedância

Z'' - componente imaginário da impedância

t - tempo

I_o - amplitude de corrente

E_o - amplitude de potencial

ω - frequência angular

f - frequência de oscilação

Hz - hertz

Φ - diferença de fase

j - unidade imaginária

C - capacitância

F - farad

L - indutância

H - henry

v - tensão

V_m - valor máximo da tensão

RC - resistência-capacitância

σ - tensão trativa

Pa - Pascal

V - volume desgastado

m^3 - metro cúbico

FN - força normal

N - newton

h - hora

k - taxa de desgaste

kg - quilograma

LTM – Laboratório de Tribologia e Materiais

m - metro

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

min - minuto

mm - milímetro

N - Newton

nm - nanômetro

Ld - comprimento deslizado

Pa - Pascals

pH – potencial Hidrogênio

v - fração volumétrica de partículas abrasivas

V - Volts

W - Watt

μm – micrometro

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	Contextualização de redes e sistemas de esgoto urbano	4
2.2	Degradação de sistemas de esgotos.....	6
2.2.1	Mecanismo principal: Degradação por ácido sulfúrico biogênico	6
2.2.2	Mecanismos adicionais: Degradação microbiológica e química complementar ...	9
2.2.3	Intensificação da degradação: Transporte de água em massa	9
2.3	Materiais utilizados em redes de esgoto	10
2.3.1	Aço baixo carbono ASTM A36	14
2.3.2	Polímeros e Aplicações Tribológicas	17
2.3.3	Alcatrão de Hulha-resina epóxi	19
2.3.4	Zebtron® 486/9000.....	20
2.3.5	Comparação entre alcatrão de hulha e revestimentos de poliuretano	21
2.3.6	Corrosão do aço ASTM A36 em esgoto doméstico.....	22
2.4	Reprodução e técnicas laboratoriais.....	24
2.4.1	Reprodução de esgoto em laboratório	24
2.4.2	Análise de Potencial de Circuito Aberto (OCP)	27
2.4.3	Curva de polarização potenciodinâmica	27
2.4.4	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)	29
2.4.5	Ensaio de desgaste abrasivo tipo roda de borracha	33
3.	ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DA TUBULAÇÃO E AMBIENTE DO SISTEMA DE ESGOTO DE UBERLÂNDIA.....	38
3.1	Introdução	38

3.2	Caracterização do processo de degradação e desgaste da tubulação de redes de esgoto de Uberlândia	38
3.3	Desenvolvimento laboratorial de esgoto característico de Uberlândia	45
3.4	Mecanismos de degradação em laboratório	51
3.4.1	Reprodução em laboratório da corrosão generalizada do aço ASTM A36	51
3.4.2	Características de desgaste abrasivo do revestimento polimérico pelo escoamento de partículas abrasivas.....	54
3.5	Conclusões parciais e resumo.....	59
4.	METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS PARA A TUBULAÇÃO DE ESGOTO	60
4.1	Materiais.....	61
4.1.1	Medição de dureza dos revestimentos.....	63
4.2	Análise de degradação química e permeação	64
4.2.1	Desenvolvimento de célula eletroquímica para ensaios de amostras desgastadas e com grande espessura de revestimento	65
4.2.2	Potencial de circuito aberto (OCP).....	67
4.2.3	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)	68
4.3	Análise de perda de massa por desgaste abrasivo.....	68
4.4	Análises e avaliação de resultados.....	72
5.	AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS PARA REDE DE ESGOTO	73
5.1	Caracterizações eletroquímicas.....	73
5.1.1	Material da tubulação sem revestimento - Aço A36	73
5.1.2	Zebron®	75
5.1.3	Alcatrão de hulha (AH)	86
5.1.4	Conclusões parciais e resumo	101
5.2	Avaliação dos revestimentos submetidos ao desgaste abrasivo.....	102
5.2.1	Desgaste abrasivo via roda de borracha úmido	102
5.2.2	Avaliação da influência das características do desgaste abrasivo na resistividade dos revestimentos	107
5.2.3	Conclusões parciais e resumo	114

5.3 Avaliação dos revestimentos para aplicação em tubulação de esgoto urbano de Uberlândia	115
5.3.1 Análise de viabilidade técnico-econômica e custo do ciclo de vida (LCC) dos revestimentos	121
6. CONCLUSÕES.....	124
7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	127
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
9. ANEXO 1	139
10. ANEXO 2.....	141
11. ANEXO 3.....	142

CAPÍTULO I

1. INTRODUÇÃO

As tubulações de esgoto constituem a espinha dorsal dos sistemas de saneamento básico, sendo responsáveis pelo transporte de águas residuais domésticas e industriais até as estações de tratamento. Tradicionalmente, materiais como concreto, ferro fundido e aço carbono têm sido empregados em sua construção devido à disponibilidade, custo e propriedades mecânicas. Contudo, essas tubulações estão expostas a um ambiente altamente agressivo, no qual atuam simultaneamente processos de degradação química, microbiológica e mecânica. A oxidação de compostos de enxofre a ácido sulfúrico biogênico, o contato com soluções de baixa alcalinidade e o impacto de partículas sólidas transportadas pelo fluxo de esgoto são fatores que aceleram a deterioração, reduzindo a vida útil da infraestrutura. Neste trabalho, foram realizadas análises de campo em tubulações do sistema de Uberlândia e ensaios laboratoriais controlados, de forma a caracterizar os principais mecanismos de desgaste e propor metodologias de avaliação aplicáveis a esse tipo de ambiente.

Uma das estratégias tecnológicas mais utilizadas para mitigar tais processos é a aplicação de revestimentos poliméricos, os quais funcionam como barreira protetora entre o metal ou o concreto e o meio agressivo. Entre os mais estudados destacam-se o alcatrão de hulha-epóxi, de uso tradicional, e formulações mais recentes como o Zebron®, que, em tese, combinam elevada resistência química e propriedades tribológicas superiores. Esses materiais têm a função de reduzir a taxa de penetração de agentes corrosivos, dificultar a formação de biofilmes degradadores e minimizar o desgaste por abrasão. Todavia, embora apresentem desempenho notável em comparação aos materiais convencionais, os polímeros também sofrem degradação por processos de inchamento, dissolução parcial, fissuração e abrasão superficial, especialmente em regiões da tubulação sujeitas à deposição e remobilização de partículas sólidas.

Os resultados obtidos nesta tese evidenciaram que o aço de baixo carbono ASTM A36, quando desprotegido, apresenta intensa corrosão generalizada ao ser exposto a meio sintético de esgoto contendo H_2SO_4 (ácido sulfúrico), refletindo a severidade do ambiente real. Por outro lado, os revestimentos poliméricos analisados demonstraram significativa

capacidade de proteção, ainda que com desempenho variável conforme a espessura aplicada e o tempo de exposição. Ensaio eletroquímico de potencial de circuito aberto (OCP) e espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) mostraram que o revestimento Zebron® apresenta maior resistência à penetração de íons corrosivos do que o alcatrão de hulha, com comportamento estável mesmo após longos períodos de imersão. Complementarmente, os testes de abrasão com roda de borracha indicaram que a resistência ao desgaste mecânico é um fator crítico para a durabilidade dos revestimentos, e que a combinação entre proteção química e resistência ao desgaste define a eficiência global do sistema protetor.

Diante desse contexto, as perguntas centrais que norteiam esta tese são: como avaliar o comportamento em termos de abrasão, corrosão e abrasão-corrosão dos diferentes revestimentos poliméricos aplicados em tubulações de esgoto? Qual dos revestimentos estudados oferece maior durabilidade em condições representativas do sistema de Uberlândia?

Assim, o objetivo geral deste trabalho foi desenvolver e validar uma metodologia experimental para a avaliação da degradação de revestimentos poliméricos em tubulações de esgoto, considerando simultaneamente mecanismos eletroquímicos e tribológicos, a fim de subsidiar critérios técnicos de seleção e aplicação desses materiais em sistemas de rede de esgoto reais.

Os objetivos específicos são:

- Reproduzir em laboratório um meio sintético representativo do esgoto de Uberlândia, contendo parâmetros físico-químicos característicos;
- Caracterizar a corrosão generalizada do aço A36 sem revestimento em contato com esse meio, identificando parâmetros eletroquímicos de degradação;
- Avaliar o comportamento eletroquímico dos revestimentos poliméricos Zebron® e alcatrão de hulha em diferentes espessuras e tempos de exposição;
- Investigar os efeitos do desgaste abrasivo sobre os revestimentos por meio de ensaios normalizados de roda de borracha em meio úmido;
- Relacionar os resultados de desgaste mecânico com as propriedades eletroquímicas residuais, avaliando a perda de barreira protetora;
- Estabelecer comparações entre os revestimentos analisados, indicando vantagens, limitações e recomendações práticas para aplicação em redes de esgoto.

A estrutura desta tese foi organizada em cinco partes principais. No Capítulo II é apresentada a revisão bibliográfica, abordando os mecanismos de degradação em tubulações de esgoto e as propriedades dos materiais empregados. O Capítulo III traz a análise do ambiente real e das condições de operação das tubulações de Uberlândia, bem como a

reprodução laboratorial do esgoto característico da cidade. No Capítulo IV, descreve-se detalhadamente a metodologia experimental, contemplando ensaios eletroquímicos, tribológicos e caracterizações complementares. O Capítulo V reúne os resultados obtidos e as discussões, com ênfase na comparação entre os revestimentos poliméricos testados. Finalmente, no Capítulo VI, apresentam-se as conclusões, destacando-se os avanços alcançados e propondo recomendações para futuras pesquisas.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Contextualização de redes e sistemas de esgoto urbano

As redes coletoras de esgoto operam como sistemas reativos onde ocorrem múltiplas transformações físico-químicas e biológicas, influenciadas diretamente pela presença de substâncias voláteis, gradientes de oxigênio e interação com as superfícies internas da tubulação (HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTESEN; NIELSEN, 2013). Essas transformações não estão restritas ao escoamento da fase líquida, mas se estendem à atmosfera do esgoto, um espaço confinado e dinamicamente acoplado à zona aquosa e às paredes das tubulações. A interface ar/água e a interface parede/ar representam zonas críticas para a transferência de massa e ocorrência de reações relevantes para processos sanitários (VINCKE; BOON; VERSETRAETE, 2001; VALIX; SHANMUGARAJAH, 2015).

A presença de oxigênio dissolvido (OD) na fase líquida é um fator determinante para o tipo de metabolismo microbológico predominante no sistema (Burton *et al.*, 2013). Quando a taxa de reaeração, ou seja, a transferência de oxigênio da atmosfera para o esgoto, não é suficiente para suprir a demanda bioquímica, estabelece-se um ambiente anaeróbio, propício à formação de compostos orgânicos voláteis (COV's) e gás sulfídrico (H₂S). A produção dessas substâncias está associada principalmente a trechos como linhas de recalque e coletores por gravidade com alta taxa de ocupação, especialmente em regiões de clima quente (WU; HU; LIU, 2018; LI *et al.*, 2019).

Em trechos do sistema de esgoto que estão mais adiante no percurso do fluxo, como tubulações parcialmente cheias, poços de visita, quedas hidráulicas e estações elevatórias, a presença de superfície livre da água permite que gases dissolvidos, como o H₂S, escapem para a atmosfera. Esses gases, no entanto, geralmente são produzidos em trechos anteriores, onde o esgoto circula em condições anaeróbias, como em tubulações pressurizadas ou muito cheias, que favorecem a formação de compostos responsáveis pelos odores desagradáveis. Assim, embora a geração dos gases ocorra em regiões com pouco ou nenhum contato com o ar, é nos pontos posteriores do sistema, onde existe essa troca com a atmosfera, que a emissão dos odores se torna perceptível (HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTESEN; NIELSEN,

2013; JIANG *et al.*, 2015; CEN *et al.*, 2023). A liberação de H_2S da fase líquida para a atmosfera depende de fatores como pH, temperatura, turbulência e equilíbrio gás-líquido. Uma vez na atmosfera do coletor, o H_2S pode ser oxidado a H_2SO_4 nas superfícies úmidas das paredes da tubulação, por meio de reações microbiológicas aeróbias, especialmente na presença de oxigênio atmosférico, promovendo a degradação dos materiais da parede do tubo de esgoto (WELLS; MELCHERS, 2015).

O H_2S , além de ser responsável por odores indesejáveis, representa risco à saúde humana. Mesmo em baixas concentrações, pode causar sintomas como dor de cabeça e irritações respiratórias, sendo potencialmente letal em exposições a concentrações mais elevadas, o que justifica a necessidade de medidas de segurança em operações dentro de sistemas de esgoto (JIANG *et al.*, 2015; CEN *et al.*, 2023).

A Figura 2.1 ilustra, de forma esquemática, as principais trocas interficiais entre a fase líquida, a atmosfera e as paredes de uma tubulação de concreto em um sistema de esgoto. Destaca-se a entrada de oxigênio (reaeração), a emissão de COV's e H_2S e a ocorrência de reações de corrosão sobre as superfícies internas da tubulação. O esquema reforça a importância dos processos interficiais como elementos centrais na gênese da degradação química e microbiológica observada em redes de esgoto.

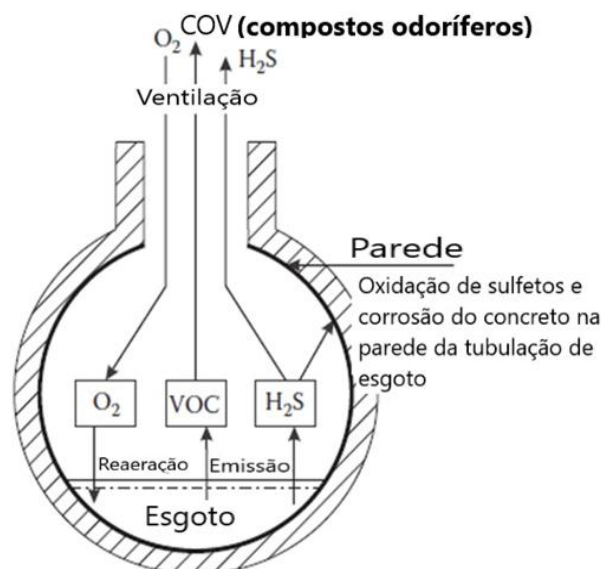


Figura 2.1. Esboço das principais trocas e reações interficiais relacionadas a compostos voláteis na atmosfera de esgoto. Adaptado de HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013.

As redes de esgoto desempenham a função essencial de coletar e conduzir os efluentes até as estações de tratamento. Os mecanismos de transporte de massa envolvem o

deslocamento de substâncias dissolvidas, partículas em suspensão e materiais sedimentáveis. Além do transporte de solutos, um fator de destaque é o movimento de partículas sólidas, como areia, fragmentos minerais e detritos orgânicos. Essas partículas, ao sedimentarem e posteriormente serem remobilizadas por eventos de alta vazão, podem se tornar agentes de abrasão mecânica durante o deslocamento, especialmente em redes com grande variação de vazão, como as combinadas, e comprometer a durabilidade de materiais e revestimentos protetores devido ao atrito (ABRAHAM; GILLANI, 1999; HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013).

2.2 Degradação de sistemas de esgotos

2.2.1 Mecanismo principal: Degradação por ácido sulfúrico biogênico

O ataque por ácido sulfúrico biogênico (Biogenic Sulfuric Acid Attack) é um dos principais mecanismos de degradação em sistemas de esgoto. Esse processo resulta da atividade microbológica no interior das tubulações, especialmente a ação combinada de bactérias redutoras de sulfato (BRS) e bactérias oxidantes de enxofre (BOE). O sulfato (SO_4^{2-}), presente normalmente no esgoto, pode ser reduzido a H_2S por ação das BRS sob condições anaeróbias. O H_2S gerado, além de tóxico e odorífero, pode ser subsequentemente oxidado pelas BOE a H_2SO_4 . Esse último é altamente corrosivo e está diretamente envolvido nos mecanismos de degradação de materiais e revestimentos em tubulações de esgoto (CARRERA *et al.*, 2016; JIANG *et al.*, 2016; LI *et al.*, 2019).

A Figura 2.2 ilustra a relação entre os modos de operação das redes de esgoto (gravidade bem ventilada, gravidade mal ventilada e pressão) e a estrutura microbológica dos biofilmes formados em suas paredes internas. A composição desses biofilmes varia de acordo com a disponibilidade de oxigênio dissolvido (OD) no esgoto e sua difusão na profundidade do biofilme (LI *et al.*, 2019). Em redes por gravidade bem ventiladas, a presença de ar sobre a superfície do esgoto líquido permite a difusão de oxigênio, resultando em biofilmes com zonas aeróbias, anóxicas e anaeróbias. Nessas condições, predominam microrganismos como as bactérias oxidantes de enxofre e bactérias desnitrificantes (BDN), que atuam na oxidação do H_2S e na redução de nitrato. Em redes por gravidade mal ventiladas, a redução na concentração de OD limita a presença de zonas aeróbias, favorecendo uma estrutura de biofilme com camadas anóxicas e anaeróbias. Nessa configuração, aumentam a abundância das bactérias redutoras de sulfato e das arqueias metanogênicas (AM), que reduzem sulfato e produzem metano. Já nas redes pressurizadas, onde o esgoto flui completamente cheio e

sem contato com o ar, o ambiente é totalmente anaeróbico, resultando em biofilmes compostos majoritariamente por BRS e AM (HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013; LI *et al.*, 2019).

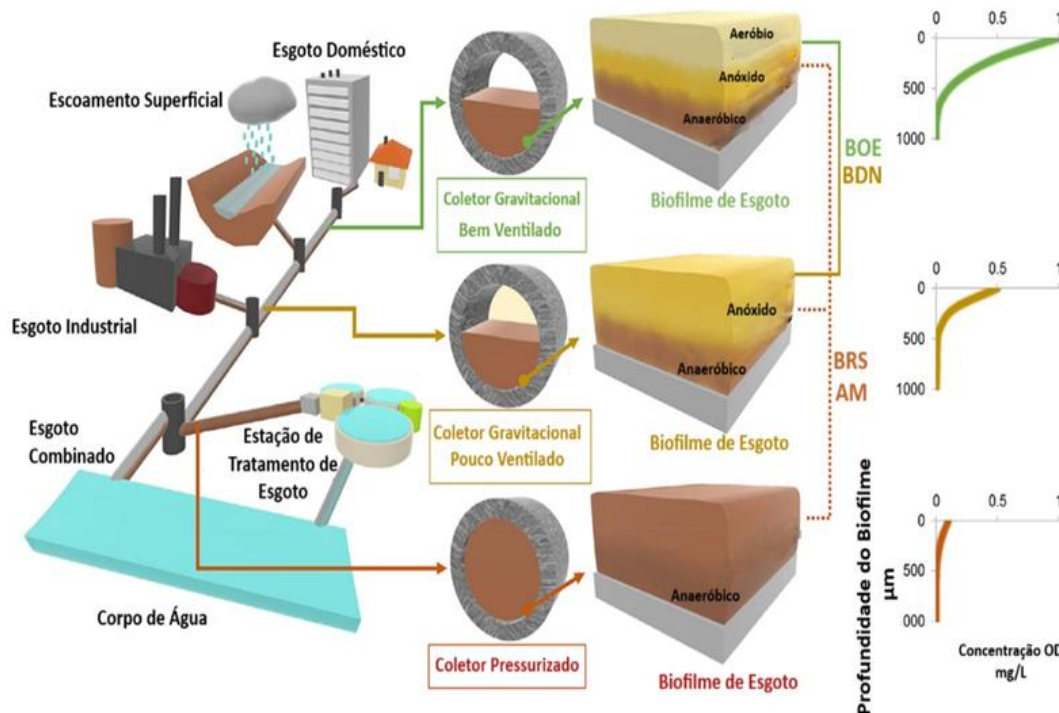


Figura 2.2. Diagrama esquemático de sistemas de esgoto por gravidade e pressurizados com os correspondentes biofilmes. Adaptado de Li *et al.*, 2019.

A Figura 2.2 mostra, ainda, à direita, a distribuição de oxigênio dissolvido nos biofilmes, evidenciando sua redução com o aumento da profundidade e a dominância de microrganismos anaeróbios em sistemas com baixa ou nenhuma ventilação.

O gênero *Thiobacillus* é amplamente identificado em ambientes de tratamento de esgoto, sendo composto por espécies capazes de oxidar diferentes formas de enxofre, como sulfetos e enxofre elementar. A formação de ácido sulfúrico é o principal problema associado à presença de *Thiobacillus*. Essas bactérias se desenvolvem preferencialmente em temperaturas entre 25 °C e 35 °C. Essas transformações microbiológicas reduzem significativamente o pH do microambiente onde os microrganismos se desenvolvem, podendo levar à dissolução dos componentes minerais do concreto e à corrosão dos elementos metálicos das estruturas (STANASZEK-TOMAL; FIERTAK, 2016; CONI *et al.*, 2022).

A formação de H_2SO_4 em esgotos sanitários é um processo de duas etapas, ou seja, as bactérias produzem íons sulfeto e sulfeto de hidrogênio, e então os produtos são metabolizados por outras bactérias para produzir compostos de enxofre oxidados, que reagem com o oxigênio para formar o ácido (CORTÉS; VERA, 2019).

O ataque do ácido sulfúrico de origem biológica tem início com a geração de H_2S por microrganismos anaeróbicos responsáveis pela redução de compostos de enxofre, como a *Desulfovibrio desulfuricans*, que se encontra em uma das camadas do lodo acumulado no fundo do esgoto. Em ambientes onde a concentração de oxigênio dissolvido é inferior a 0,1 mg/L, essas bactérias promovem a conversão de compostos sulfurados em ácido sulfídrico aquoso. Uma fração desse H_2S dissolvido é transferida para a fase gasosa, na região acima da superfície do esgoto. Uma vez liberado, o H_2S se deposita nas superfícies internas da tubulação onde passa por sucessivas etapas de oxidação promovidas por microrganismos aeróbicos do grupo *Thiobacillus*. Atuando em diferentes faixas de pH, essas bactérias transformam o H_2S em ácido sulfúrico, contribuindo diretamente para a corrosão química da infraestrutura (WU; HU; LIU, 2018; CONI *et al.*, 2022; GONEN; UYGUNOGLU, 2022).

A Figura 2.3 ilustra o processo de formação de ácido sulfúrico em uma tubulação de esgoto sanitário. O H_2S é separado do esgoto devido a fatores como o equilíbrio químico, o movimento e a turbulência do ambiente, e se dissolve na umidade presente nas paredes do sistema de esgoto. O H_2S liberado pode se combinar com o O_2 do ar e formar o H_2SO_4 (GONEN; UYGUNOGLU, 2022). Esse ciclo sucessivo de colonização bacteriana, caracterizado pela acidificação contínua do substrato, pode reduzir o pH até valores próximos de 1. Nessas condições extremas, ocorre corrosão acelerada de concretos, revestimentos e metais.

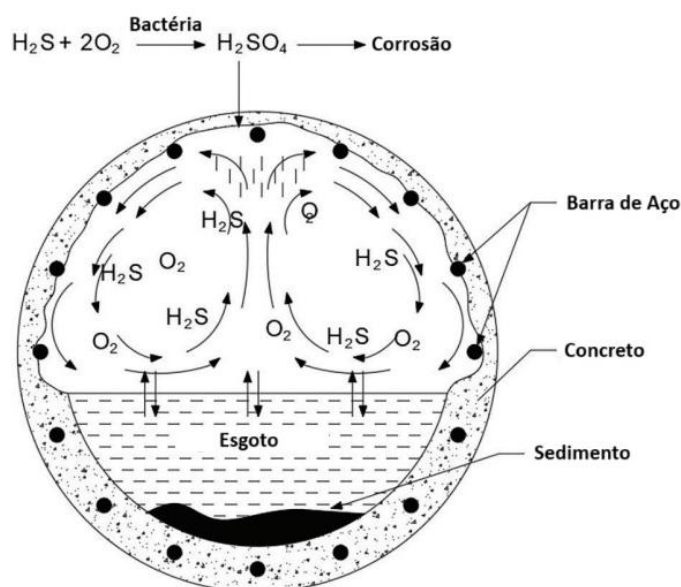


Figura 2.3. Formação de H_2SO_4 em tubulações de esgoto sanitário. Adaptado de GONEN; UYGUNOGLU, 2022.

2.2.2 Mecanismos adicionais: Degradação microbiológica e química complementar

Além da corrosão causada por ácido sulfúrico biogênico, cuja origem foi discutida anteriormente, os sistemas de esgoto estão sujeitos a uma série de mecanismos adicionais de degradação. Esses mecanismos decorrem diretamente da complexa e contínua atividade microbiológica que ocorre nas superfícies internas das tubulações. Nessas superfícies, biofilmes estruturados atuam como plataformas de transformação de compostos orgânicos e inorgânicos (HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013). Tais transformações influenciam diretamente a estabilidade e a integridade de materiais que constituem a tubulação do sistema de esgoto (MALEK MOHAMMADI *et al.*, 2020).

No interior dessas formações microbianas organizadas, que aderem firmemente às paredes das tubulações, ocorrem processos fermentativos e metanogênicos. Esses processos se desenvolvem sob diferentes condições de oxigenação, especialmente em ambientes anaeróbios. São comuns em redes com baixa taxa de renovação hidráulica ou ventilação deficiente. Essas condições favorecem a presença de microrganismos anaeróbicos estritos. Esses microrganismos degradam matéria orgânica dissolvida e particulada, liberando subprodutos como ácidos graxos voláteis, dióxido de carbono e metano (CH₄) (ZHANG; KELLER; YUAN, 2009; JIANG *et al.*, 2011; HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013). Segundo Li *et al.* (2019), a produção de metano pode atingir proporções significativas. Pode haver conversão de até 70% da carga orgânica dissolvida em CH₄. Isso contribui para riscos operacionais, como inflamabilidade e acúmulo gasoso. Além disso, altera as condições físico-químicas, afetando a estabilidade dos materiais expostos a esse ambiente altamente redutor.

A presença de compostos nitrogenados também é significativamente transformada pelos biofilmes. Esses processos são realizados por diferentes grupos microbianos, adaptados a variações locais de oxigênio, pH e disponibilidade de substrato, os quais produzem moléculas que incluem amônia livre (NH₃) (HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013; STANASZEK-TOMAL; FIERTAK, 2016). Outro aspecto importante, também enfatizado por Li *et al.* (2019), é a presença crescente de contaminantes emergentes. Entre esses contaminantes estão marcadores de resistência a antibióticos, moléculas orgânicas utilizadas como biomarcadores de exposição a fármacos e substâncias psicoativas.

2.2.3 Intensificação da degradação: Transporte de água em massa

O transporte de água e massa em sistemas de esgoto é um fator decisivo na intensificação de processos de desgaste físico das tubulações, principalmente em condições

de escoamento turbulento. Nesses ambientes, partículas sólidas em suspensão, como grãos de areia ou outros sedimentos, são continuamente mobilizadas pela água em movimento e impactam as superfícies internas das tubulações (LOWE; MARSHALL, 1989; ABRAHAM; GILLANI, 1999).

Três mecanismos principais controlam esse transporte: advecção, difusão molecular e dispersão turbulenta. A advecção representa o transporte das partículas junto ao fluxo médio, promovendo um movimento coeso e direcionado, o que pode resultar em colisões repetidas e localizadas com as paredes das tubulações. Como esse processo ocorre em uma escala macroscópica e tende a superar a difusão molecular em ordens de magnitude, é plausível considerar que a dispersão desempenha um papel relevante na ampliação da área sujeita ao desgaste abrasivo. Já a dispersão turbulenta resulta das flutuações caóticas do fluxo em regimes turbulentos. Essa variabilidade promove uma distribuição mais ampla e irregular das partículas ao longo da seção da tubulação, aumentando as chances de impacto em múltiplas direções e intensidades (YABUKI *et al.*, 2000; HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013).

Outro aspecto relevante é o comportamento cíclico de sedimentação e ressuspensão. Durante períodos de baixa vazão, partículas sólidas tendem a se depositar no fundo das tubulações. Contudo, em eventos de aumento de fluxo, esses sedimentos são novamente suspensos e reintegrados ao transporte, promovendo atrito contínuo com as paredes inferiores. Essa repetição contribui para o desgaste mecânico localizado, especialmente em regiões onde o fluxo favorece a movimentação de partículas mais densas (HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013).

2.3 Materiais utilizados em redes de esgoto

O material de concreto utilizado na construção de sistemas de esgoto é tipicamente baseado no uso de cimento Portland. Existem diferentes tipos de cimento Portland, sem apresentar diferenças significativas na taxa potencial de corrosão do concreto. No entanto, um aumento na quantidade relativa de cimento eleva a alcalinidade e, assim, o material ativo disponível para reação com o sulfeto de hidrogênio. A taxa de corrosão, em unidades de mm por ano, é, portanto, reduzida de acordo com o aumento da alcalinidade por unidade de volume do material de concreto. O uso de materiais altamente alcalinos como agregados no concreto (por exemplo, calcário e dolomita) também reduzirá a taxa de corrosão. Tipos de concreto resistentes à corrosão existem, mas geralmente possuem custo elevado. Esses tipos são geralmente baseados em cimento supersulfatado, cimento aluminoso ou cimento com

alto teor de enxofre. Além disso, a superfície do concreto também pode ser protegida por revestimentos ou pinturas (por exemplo, resina epóxi e alcatrão de hulha). A impermeabilidade desses revestimentos é crucial para resistir ao ataque por sulfeto (HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013; WU; HU; LIU, 2018).

Em resumo, o problema de corrosão do concreto é causado pelo H₂S que, ao passar para a fase gasosa, é absorvido pela película líquida presente nas superfícies úmidas de concreto dentro do sistema de esgoto. As superfícies de concreto mais comumente corroídas estão próximas à fase aquosa anaeróbia e em áreas diretamente expostas à liberação de H₂S de superfícies turbulentas da água, como em quedas hidráulicas. Nessas superfícies úmidas, normalmente há oxigênio disponível na atmosfera do esgoto, permitindo que o H₂S presente na superfície do concreto seja oxidado a ácido sulfúrico por reações microbianas (ROGHANIAN; BANTHIA, 2019).

O ácido sulfúrico gerado nas superfícies úmidas das tubulações pode reagir com o cimento alcalino presente no concreto. Uma estequiometria simplificada dessa reação é dada pela Equação 2.1:



Onde, o CaCO₃ é um componente do cimento e o CaSO₄ (gesso) é um produto da reação (HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013).

Se a taxa de formação do ácido sulfúrico for baixa, grande parte dele reagirá com o cimento, formando um material composto por componentes inertes fracamente ligados, como areia e brita. Por outro lado, se a formação do ácido sulfúrico for relativamente alta, parte do ácido pode ser lavada antes de reagir, indo parar no esgoto e reagindo ali com componentes alcalinos, o que resulta na formação de íons sulfato. Os íons sulfato produzidos na película líquida sobre as paredes da tubulação podem, como efeito associado, causar um ataque químico por sulfato ao concreto. Além do H₂S ser uma substância odorífera e corrosiva, ele também causa impactos específicos em termos de corrosão de metais. O H₂S é um ácido fraco que reage com a maioria dos metais pesados, produzindo um sulfeto metálico com baixa solubilidade em água (HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013). Para um metal divalente, a reação (Equação 2.2) total é a seguinte:



O produto MeS precipita devido à sua baixa solubilidade. Por exemplo, pode ocorrer a permeação do gás sulfídrico, pela massa do concreto, e ao atingir a armadura forma sulfeto de ferro (FeS), destruindo a passividade dessa armadura (GENTIL, 2011).

Além disso, o ácido sulfúrico formado pelos processos biogênicos promove uma reação com o ferro fundido ou aço carbono. Por exemplo, em tubulações de concreto armado, após o ataque à pasta de cimento, pode ocorrer o ataque da armadura, notando-se a formação de coloração castanho-alaranjada característica dos sais de ferro. A reação responsável pode ser escrita conforme a Equação 2.3 (GENTIL, 2011):



A corrosão de metais em sistemas de esgotamento sanitário é um fenômeno recorrente, com impactos significativos na durabilidade de tubulações, conexões, equipamentos e estruturas metálicas. Para minimizar os processos de degradação associados à presença de gás sulfídrico e à corrosão em sistemas de esgoto sanitário, as seguintes medidas preventivas e corretivas podem ser adotadas (GENTIL, 2011):

- Injeção de ar comprimido (ventilação forçada), com o objetivo de remover H_2S ;
- Cloração, ou seja, substâncias tóxicas para eliminar a atividade bacteriana;
- Utilização de cimentos resistentes a sulfatos;
- Revestimento das superfícies internas superiores (zona de contato com o ar) com alcatrão de hulha-epóxi;
- Emprego de tubulações confeccionadas com polímeros, como polietileno de alta densidade (PEAD) ou plástico reforçado com fibra de vidro (PRFV), que apresentam elevada resistência química e à corrosão;
- Uso de fôrmas internas de PVC, polietileno ou PRFV.

Embora a utilização de materiais poliméricos seja vista como uma boa opção para a mitigação da degradação de matérias tradicionais de tubulações de esgoto, é importante mencionar que aqueles materiais também sofrem processos de degradação (VAHIDI *et al.*, 2016; SHI *et al.*, 2024)

De acordo com Callister e Rethwisch (2018), a degradação dos polímeros se distingue essencialmente da corrosão em metais, por se tratar de um processo de natureza físico-química. Essa deterioração pode ocorrer por meio de fenômenos como inchamento (swelling), dissolução ou quebra de ligações covalentes, induzidos por agentes como calor, radiação ou

reações químicas. Ainda assim, os mecanismos que governam esses processos não são completamente elucidados, em função da complexidade estrutural dos materiais poliméricos.

Quando expostos a líquidos, os polímeros podem sofrer degradação principalmente por meio do inchamento e da dissolução. No processo de inchamento, o líquido ou soluto penetra e é absorvido pela estrutura do polímero; as moléculas pequenas do soluto se inserem entre as macromoléculas, ocupando os espaços disponíveis. Isso provoca um afastamento entre as cadeias poliméricas, fazendo com que o material se expanda. Esse afastamento reduz as forças de ligação secundárias entre as cadeias, o que resulta em uma diminuição da resistência mecânica e aumento da ductilidade. Além disso, o soluto líquido pode diminuir a temperatura de transição vítrea do polímero, e caso essa temperatura fique abaixo da temperatura ambiente, o material, antes rígido, tende a perder resistência e adotar um comportamento mais borrachoso. O inchamento pode ser entendido como uma forma de dissolução parcial, em que o polímero apresenta apenas uma solubilidade limitada no solvente. Já a dissolução completa ocorre quando o polímero é totalmente solúvel no meio, sendo essa uma progressão do processo de inchamento. De modo geral, quanto maior for a similaridade entre as estruturas químicas do polímero e do solvente, maior será a tendência de ocorrer inchamento ou mesmo dissolução. Um exemplo disso é que borrachas compostas por hidrocarbonetos tendem a absorver rapidamente líquidos também à base de hidrocarbonetos, como a gasolina, mas virtualmente não absorvem água. Os processos de inchamento e dissolução também sofrem influência da temperatura e da estrutura molecular do polímero. De forma geral, quanto maior o peso molecular, o grau de ligações cruzadas e a cristalinidade, e quanto menor a temperatura, menor será a intensidade desses mecanismos de degradação (CALLISTER; RETHWISCH, 2018).

Além disso, os polímeros tendem a apresentar maior resistência à ação de soluções ácidas e básicas quando comparados aos metais. Um exemplo é o ácido fluorídrico (HF), que pode corroer diversos metais e até atacar e dissolver o vidro, mas pode ser armazenado com segurança em recipientes plásticos.

Sistemas de esgotamento sanitário estão sujeitos a condições extremamente agressivas, não apenas do ponto de vista químico, mas também físico. Entre os mecanismos de degradação observados, o desgaste causado pela ação de partículas sólidas presentes no esgoto, especialmente em sistemas com alta carga de lodo e operação sob pressão, pode ser extremamente prejudicial para a durabilidade das tubulações (Abraham e Gillani, 1999).

Estudos experimentais, como o conduzido por Yabuki *et al.* (2000), demonstram que o impacto de partículas sólidas, como grãos de areia, pode gerar perda progressiva de material nas paredes internas dos tubos, em especial nos pontos onde as partículas colidem com maior energia ou frequência. A severidade da erosão depende fortemente do ângulo de impacto das

partículas, da sua velocidade e da natureza do material da tubulação. Em ângulos altos de impacto (próximos da perpendicular), predominam mecanismos de deformação plástica repetida, enquanto em ângulos baixos a remoção de material se dá por ação de corte.

Nesse contexto, os materiais metálicos tradicionais, como o aço carbono e o ferro fundido, têm demonstrado menor resistência ao desgaste abrasivo, com taxas significativas de perda de massa e profundidade de dano sob condições simuladas de esgoto. Em contraste, materiais poliméricos como os polietilenos, especialmente o polietileno de ultra-alto peso molecular (UHMW-PE), apresentaram excelente resistência à erosão em uma ampla faixa de ângulos e velocidades de impacto. Isso se deve à sua alta capacidade de deformação elástica e à elevada energia de fratura, o que dificulta a penetração e remoção de material pelas partículas impactantes. Testes realizados com diferentes tipos de polietileno revelaram que a resistência ao desgaste abrasivo está relacionada a uma combinação entre módulo de elasticidade e energia de fratura. Materiais com menor módulo tendem a distribuir melhor as tensões de impacto, enquanto aqueles com alta energia de fratura resistem mais à propagação de danos internos. Um modelo matemático proposto por Yabuki *et al.* (2000) mostrou boa correlação entre o comportamento erosivo e esses parâmetros mecânicos, o que pode auxiliar na seleção racional de materiais para aplicação em sistemas de esgoto.

Portanto, o uso de materiais com alta resistência ao desgaste abrasivo representa uma estratégia eficaz para mitigar falhas prematuras em redes de esgoto, contribuindo para a sustentabilidade e a redução de custos com manutenção e substituição de componentes (LOWE; MARSHALL, 1989; ABRAHAM; GILLANI, 1999; YABUKI *et al.*, 2000; HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013). A seguir serão descritas as principais características de materiais comumente utilizados em tubulações de redes de esgoto sanitário.

2.3.1 Aço baixo carbono ASTM A36

O aço ASTM A36 é um material de baixo teor de carbono amplamente utilizado em estruturas metálicas e componentes industriais devido à sua boa conformabilidade, soldabilidade e custo relativamente baixo. Entretanto, em ambientes agressivos como os sistemas de esgoto, esse material apresenta suscetibilidade significativa à corrosão, especialmente em condições que combinam ataques químicos e abrasivos. O esgoto contém compostos sulfídricos, cloretos e partículas sólidas em suspensão, os quais promovem a formação de microcélulas galvânicas e aceleram a degradação da superfície metálica.

Nos trabalhos analisados, o aço ASTM A36 ocupa papel central como material estrutural e eletroquimicamente ativo, cuja durabilidade e desempenho dependem diretamente das

interações com o ambiente e com sistemas de proteção ou reforço. No contexto de corrosão eletroquímica, Iswanto (2025) avaliou o aço A36 como substrato exposto a meio ácido (1 M HCl), demonstrando sua elevada suscetibilidade à corrosão quando não protegido, com densidade de corrente de corrosão da ordem de 10^{-3} A/cm², e evidenciando que a aplicação de um nanocompósito de PLA/HEC-ZnO pode reduzir significativamente essa atividade, alcançando eficiência de inibição de aproximadamente 94% e aumento da resistência à transferência de carga para valores superiores a 300 Ω .cm², indicando maior resistência à transferência de carga na interface eletrodo/solução. De forma complementar, Rahman *et al.* (2020) estudaram o aço ASTM A36 em ambiente marinho real, e mostraram que a aplicação de um revestimento co-depositado Zn-ZnO reduziu a taxa de corrosão de 5,03 mm/ano para cerca de 3,21 mm/ano, além de promover uma superfície mais homogênea e menos suscetível à corrosão localizada.

Em um contexto distinto, mas igualmente relevante para a durabilidade do aço, Silva *et al.* (2025) analisaram chapas de aço A36 submetidas a detonações em campo próximo, nas quais o aço atuou como principal elemento resistente, e verificaram que a associação com elastômeros de poliuretano reduz os deslocamentos máximos estruturais em aproximadamente 8% a 20%, dependendo da configuração e da distância da carga explosiva, evidenciando o papel do aço como substrato estrutural cujo desempenho pode ser significativamente aprimorado por camadas poliméricas externas. Por sua vez, Lee e Kim (2024) investigaram vigas de aço estrutural compatíveis com a classe ASTM A36 sob carregamento cíclico, tratando o aço como elemento suscetível à fadiga, e demonstraram que o reforço com patches de CFRP aumenta de forma significativa a vida à fadiga ao retardar a propagação de trincas.

Em conjunto, esses estudos evidenciam que o aço ASTM A36, embora amplamente utilizado por suas propriedades mecânicas e custo acessível, apresenta vulnerabilidades tanto à corrosão quanto a danos mecânicos, e que sua performance e vida útil podem ser substancialmente ampliadas por estratégias de proteção anticorrosiva, revestimentos funcionais e técnicas de reforço estrutural, conforme o contexto ambiental e operacional de aplicação.

Além disso, diversos estudos têm investigado o comportamento eletroquímico do aço A36 em diferentes meios corrosivos, com resultados que evidenciam sua vulnerabilidade. Wiradinata *et al.* (2025) analisaram o efeito do ácido sulfúrico em soluções de diferentes temperaturas e tempos de imersão, observando diminuição significativa da taxa de corrosão do aço A36 com o aumento da temperatura. A taxa de corrosão decaiu de 140,678 mm/ano em 600°C para 87,97 mm/ano em 1100 °C, demonstrando um bom comportamento do aço ASTM A36 ao longo de 72 horas de imersão em solução de ácido sulfúrico. De acordo com

os autores, isso ocorre pela estabilidade da camada passiva formada na superfície do aço. Esse tipo de comportamento é diretamente comparável ao ambiente de esgoto, no qual o ácido sulfúrico biogênico desempenha papel central na degradação das superfícies metálicas, mas também em sua passivação. Por sua vez, Pratama *et al.* (2022) estudaram o aço ASTM A36 imerso em água do mar e verificaram que os tempos de exposição de 48, 96 e 144 horas tem efeito significativo na formação de produtos de corrosão e na diminuição da resistência mecânica do material, com uma taxa de corrosão de 27,97 mm/ano obtida após 144 horas de imersão e aparecimento de pontos de corrosão e fases de óxido de ferro. Apesar de o ambiente marinho não ser idêntico ao esgoto, ambos compartilham alta condutividade elétrica, presença de íons agressivos e variações de pH, fatores determinantes na corrosividade do sistema. Arifin *et al.* (2021) demonstraram que deformações mecânicas, como curvaturas e tensões residuais em chapas de aço A36, avaliadas em diferentes meios aquosos, sendo estes água da chuva e água do mar, fazem com que a taxa de corrosão varie ao longo do tempo de exposição, o que é particularmente relevante para tubulações, onde há constante solicitação mecânica e variações de pressão interna. Em água da chuva, após 72 horas de imersão, os autores obtiveram valores de 1,497 mm/ano, e 1,176 mm/ano em amostras submetidas a tensões em ângulos de 60° e 90°, respectivamente. Em complemento, Hastuty *et al.* (2022) avaliaram o efeito de ânions como cloreto, sulfato e nitrato na corrosão por pites em A36, concluindo que o sulfato — predominante em esgotos — favorece a formação de pites profundos e acelera o processo corrosivo.

Estudos recentes (METALS, 2024) também mostraram que o aço A36 apresenta rápida dissolução anódica em soluções contendo sulfatos e nitratos, corroborando o papel desses íons na intensificação da corrosão. Por fim, Iswanto (2019) destacou a importância de tratamentos superficiais e revestimentos poliméricos para o aumento da durabilidade do aço A36, obtendo resultados promissores com tintas aquosas modificadas com óxido de grafeno, que reduziram a corrente de corrosão em até 60%. Esses achados evidenciam que o uso de revestimentos — como os analisados nesta tese — é essencial para prolongar a vida útil de tubulações metálicas em esgoto.

Em síntese, a literatura aponta que o aço ASTM A36, embora mecanicamente adequado e economicamente viável, não é resistente à corrosão em ambientes de esgoto sem proteção, sofrendo rápida deterioração devido à combinação de ácidos, sais e abrasão. Assim, o emprego de revestimentos poliméricos protetores é uma alternativa necessária e tecnicamente justificada para garantir a durabilidade das tubulações em sistemas de saneamento.

2.3.2 Polímeros e Aplicações Tribológicas

Os polímeros constituem uma classe de materiais de elevada relevância tecnológica, amplamente utilizados em aplicações estruturais e funcionais devido à sua versatilidade e capacidade de adaptação a diferentes condições de serviço. Esses materiais são formados por macromoléculas compostas por unidades repetitivas, denominadas monômeros, cuja organização estrutural e composição química determinam suas propriedades físicas, mecânicas e químicas (CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

Do ponto de vista estrutural, os polímeros podem ser classificados como amorfos ou semicristalinos. Nos polímeros amorfos, as cadeias moleculares encontram-se dispostas de maneira desordenada, o que resulta em maior mobilidade molecular e comportamento mais dúctil. Em contrapartida, os polímeros semicristalinos apresentam regiões ordenadas (cristalinas) intercaladas com regiões amorfas, formando uma microestrutura heterogênea que influencia diretamente suas propriedades mecânicas e tribológicas (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; CANEVAROLO JR., 2006).

As regiões cristalinas, organizadas frequentemente em estruturas lamelares e esferulíticas, conferem maior rigidez, resistência mecânica e estabilidade dimensional ao material. Já as regiões amorfas contribuem para a flexibilidade e capacidade de deformação. Essa dualidade estrutural é fundamental para o comportamento tribológico dos polímeros, uma vez que afeta a distribuição de tensões e a dissipação de energia durante o contato (WARD; SWEENEY, 2013).

As interações intermoleculares também desempenham papel essencial no desempenho dos polímeros. Forças secundárias, como interações de Van der Waals e ligações de hidrogênio, contribuem para a coesão entre cadeias, enquanto a presença de ligações cruzadas (crosslinking) reduz a mobilidade molecular e aumenta a rigidez e a resistência ao escoamento (CALLISTER; RETHWISCH, 2016). Esse aspecto é particularmente relevante em aplicações tribológicas, nas quais a resistência ao desgaste e à deformação superficial é determinante.

Os polímeros são tradicionalmente classificados em três grupos principais: termoplásticos, termorrígidos e elastômeros. Os termoplásticos apresentam cadeias lineares ou ramificadas e podem ser reprocessados mediante aquecimento. Os termorrígidos, por sua vez, formam estruturas tridimensionais altamente reticuladas após a cura, apresentando elevada rigidez e resistência térmica. Já os elastômeros possuem baixa densidade de ligações cruzadas, o que lhes confere elevada elasticidade e capacidade de deformação reversível (CANEVAROLO JR., 2006; CALLISTER; RETHWISCH, 2016).

No contexto tribológico, essas características estruturais influenciam diretamente o comportamento de atrito e desgaste. Materiais termoplásticos, por exemplo, podem apresentar maior susceptibilidade ao desgaste sob condições severas devido à maior mobilidade de suas cadeias. Em contrapartida, polímeros termorrígidos e elastoméricos podem apresentar melhor desempenho dependendo da aplicação, seja pela rigidez estrutural ou pela capacidade de absorção de energia e redistribuição de tensões (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

As propriedades térmicas dos polímeros também são fundamentais para seu desempenho em serviço. A temperatura de transição vítrea (T_g) representa o limite entre o comportamento rígido e o comportamento viscoelástico do material, enquanto a temperatura de fusão (T_m) está associada à perda de ordem das regiões cristalinas. Em condições tribológicas, o calor gerado pelo atrito pode elevar a temperatura local, aproximando o material de sua T_g e alterando significativamente sua resistência ao desgaste e sua resposta mecânica (CALLISTER; RETHWISCH, 2016; BLAU, 2008).

O comportamento tribológico dos polímeros envolve diferentes mecanismos de desgaste, tais como desgaste adesivo, abrasivo e por fadiga. Além disso, um fenômeno característico desses materiais é a formação de filmes de transferência, nos quais material polimérico é transferido para a superfície oposta durante o deslizamento. Esse filme pode atuar como uma camada intermediária que reduz o atrito e o desgaste, dependendo de sua estabilidade e aderência (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

A capacidade dos polímeros de formar filmes de transferência está relacionada à sua estrutura molecular, à energia de superfície e às condições de operação, como carga, velocidade e temperatura. Em alguns casos, esse fenômeno contribui significativamente para a melhoria do desempenho tribológico, enquanto em outros pode levar à instabilidade do sistema de contato.

Do ponto de vista de processamento, os polímeros apresentam elevada versatilidade, podendo ser conformados por técnicas como moldagem por injeção, extrusão, compressão e cura química. Essa adaptabilidade é particularmente relevante para aplicações em revestimentos, nas quais é necessário garantir boa adesão ao substrato e formação de uma camada contínua e uniforme (CANEVAROLO JR., 2006).

Nesse contexto, os polímeros têm sido amplamente utilizados como revestimentos protetivos em sistemas sujeitos a desgaste e corrosão. Esses revestimentos atuam como barreiras físicas e químicas, protegendo o substrato contra agentes agressivos e modificando as condições de contato tribológico (BLAU, 2008).

Entre os revestimentos tradicionais, destacam-se aqueles à base de alcatrão de hulha, conhecidos por sua elevada resistência química e excelente capacidade de barreira contra

corrosão. Esses materiais são amplamente empregados em ambientes industriais severos, especialmente em estruturas metálicas expostas a umidade e agentes químicos agressivos.

Por outro lado, revestimentos poliméricos modernos, como aqueles baseados em poliuretano, apresentam um conjunto de propriedades que os tornam altamente atrativos para aplicações tribológicas. Os poliuretanos combinam resistência mecânica, flexibilidade e comportamento viscoelástico, permitindo melhor dissipação de energia durante o contato e maior resistência ao desgaste (ODA et al., 2012).

Sistemas comerciais como o Zebron, baseados em poliuretano, destacam-se por sua capacidade de absorver impactos, resistir à abrasão e manter integridade estrutural sob condições severas de operação. Essas características tornam esses materiais particularmente adequados para aplicações em que há contato deslizante contínuo e presença de partículas abrasivas.

Dessa forma, a compreensão dos fundamentos estruturais, térmicos e tribológicos dos polímeros é essencial para a análise comparativa entre diferentes sistemas de revestimento. A partir dessa base teórica, torna-se possível avaliar o desempenho de revestimentos à base de alcatrão de hulha e poliuretano, considerando suas vantagens e limitações em aplicações específicas.

2.3.3 Alcatrão de Hulha-resina epóxi

O revestimento de alcatrão de hulha-epóxi representa uma solução tecnológica consolidada para a proteção de superfícies metálicas em ambientes severamente agressivos, como os encontrados em tanques de tratamento de esgoto, tubulações de transporte de efluentes e outras aplicações sanitárias (ZANTHONG, 2025).

Esse revestimento é obtido pela combinação de resina epóxi com alcatrão de hulha, um subproduto da destilação destrutiva do carvão mineral. O alcatrão de hulha é uma mistura heterogênea complexa que contém diversos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), como xileno, naftaleno, seus derivados alquilados, óleo de antraceno e outras substâncias (TAMBE *et al.*, 2016; ZANTHONG, 2025). Esse revestimento bicomponente que combina resina epóxi com alcatrão de hulha, resulta em um material com alta resistência química, excelente impermeabilidade, boa aderência em aço e concreto, e elevada durabilidade em ambientes agressivos (longa vida útil em ambientes severamente corrosivos, classificação ISO 12944 C4 e C5) (ZHANTONG, 2025).

Embora diversos componentes do alcatrão de hulha sejam reconhecidamente tóxicos e carcinogênicos, a formulação resultante do revestimento epóxi-alcatrão apresenta propriedades antibacterianas comprovadas, o que contribui para a redução da atividade

microbiológica sobre a superfície revestida. Essa característica é particularmente relevante em contextos em que a ação de microrganismos, como as bactérias redutoras de sulfato (BRSs), desempenha papel central nos processos de corrosão.

Graças a essa combinação de proteção física e ação antimicrobiana, o revestimento de alcatrão de hulha-epóxi tem sido adotado como revestimento padrão em diversas situações em que se busca alta durabilidade, eficiência de barreira e resistência à degradação biológica, apesar das crescentes preocupações ambientais associadas ao uso de PAHs, uma vez que, de acordo com Zhantong (2025), a vida útil de revestimentos de alcatrão de hulha podem ultrapassar os 20 anos (HVITVED-JACOBSEN; VOLLERTSEN; NIELSEN, 2013; TAMBE *et al.*, 2016; ZHANTONG, 2025).

2.3.4 Zebron® 486/9000

Embora seja um produto utilizado em sistemas de proteção anticorrosiva, o Zebron® 486/9000 trata-se de um revestimento comercial, cuja formulação detalhada e mecanismos de desempenho não são integralmente divulgados pelo fabricante. As informações disponíveis baseiam-se em boletins técnicos fornecidos pela própria empresa, os quais descrevem propriedades gerais, recomendações de aplicação e resultados de testes padronizados.

O Zebron® 486/9000 é um revestimento industrial formulado a partir de poliuretano elastomérico aromático, caracterizado por uma estrutura isenta de solventes (100% de sólidos). Aplicado por spray com tecnologia de mistura em linha, esse sistema bicomponente promove elevada resistência mecânica e química, aliada à flexibilidade. Suas propriedades incluem resistência ao impacto, à abrasão, ao rasgo e a compostos químicos agressivos, tornando-o especialmente indicado para ambientes corrosivos e úmidos, como sistemas de esgoto sanitário e industrial. O produto apresenta cura rápida e ausência de compostos orgânicos voláteis, sendo ecologicamente mais seguro. A espessura de aplicação pode variar de 500 µm a mais de 5000 µm, conforme as exigências do projeto, garantindo proteção contínua, sem emendas, mesmo em geometrias complexas. O revestimento Zebron® 486/9000 apresenta um conjunto de propriedades que o tornam particularmente adequado para aplicação em sistemas de esgoto. Além de manter flexibilidade permanente, o material é capaz de acompanhar fissuras estruturais sem apresentar delaminação. Possui excelente resistência à infiltração de água subterrânea e não é afetado por umidade elevada ou contato constante com água. É altamente resistente a gases agressivos como o H₂S, bem como a outros ácidos, sais e álcalis, comuns em ambientes de esgoto. O revestimento Zebron® também é imune à ação de microrganismos como fungos e bactérias, contribuindo para a

durabilidade do sistema revestido. Em caso de danos localizados, o material pode ser rapidamente reparado com remoção da área afetada e aplicação localizada, garantindo praticidade e continuidade da proteção (ZEBRON®, 2025).

Em um estudo conduzido por Pratikno, Pradyptia e Ikhwani (2021), os autores avaliaram a capacidade protetiva do filme de poliuretano em meio de NaCl 3,5% (m/v). O artigo revisa o poliuretano como um revestimento orgânico amplamente utilizado em estruturas navais devido à sua capacidade de atuar como barreira física contra agentes corrosivos, especialmente em ambientes marinhos. Os resultados obtidos demonstram uma taxa de corrosão de $4,39 \times 10^{-6}$ mm/ano quando se utiliza a técnica de spray para aplicação do poliuretano sobre o substrato em espessura de 250 μm . Entretanto, embora o trabalho cite outros métodos de aplicação como brush e roll, os autores empregaram exclusivamente a aplicação por spray, não avaliando experimentalmente a influência do método de aplicação sobre o desempenho anticorrosivo.

2.3.5 Comparação entre alcatrão de hulha e revestimentos de poliuretano

Revestimentos à base de resinas epóxi e poliuretano apresentam características distintas que condicionam sua aplicação em sistemas de proteção superficial. Os revestimentos epóxi destacam-se pela elevada adesão ao substrato, alta rigidez e excelente resistência química, sendo amplamente empregados em ambientes industriais e em superfícies submetidas a cargas mecânicas elevadas. Entretanto, sua limitada resistência à radiação ultravioleta pode resultar em degradação superficial e alterações de cor quando expostos a ambientes adversos, exigindo, em muitos casos, a aplicação de um topcoat protetor. Em contraste, os revestimentos de poliuretano apresentam maior flexibilidade e superior resistência aos efeitos do intemperismo e da radiação UV, mantendo melhor estabilidade estética e desempenho em ambientes externos. Embora, em geral, apresentem resistência química ligeiramente inferior à dos epóxios, os poliuretanos exibem elevada resistência à abrasão e maior tolerância a deformações e variações térmicas. Dessa forma, a literatura indica que a escolha entre epóxi e poliuretano deve considerar as condições ambientais e funcionais do serviço, sendo comum a utilização de sistemas combinados, nos quais o epóxi atua como camada de base anticorrosiva e o poliuretano como camada de acabamento e proteção ambiental (REALITY PATHING, 2025). A Tabela 2.1 apresenta um comparativo das propriedades descritas anteriormente entre ambos os tipos de revestimento (epóxi vs. poliuretanos).

Tabela 2.1 – Comparação entre os revestimentos de epóxi vs. poliuretanos. Adaptado de REALITY PATHING, 2024.

Critério	Epóxi	Poliuretano
Natureza do material	Termorrígido, alta reticulação	Pode variar de rígido a flexível
Adesão ao substrato	Muito alta	Alta
Rigidez do filme	Alta (filme duro)	Média a alta (dependente da formulação)
Flexibilidade	Baixa	Alta
Resistência química	Muito alta (ácidos, solventes, óleos)	Boa, geralmente inferior ao epóxi para solventes agressivos
Resistência à abrasão	Alta, porém mais frágil a impacto	Muito alta, melhor absorção de impacto
Resistência à radiação UV	Baixa sem topcoat (tende a amarelar)	Alta (boa estabilidade de cor)
Resistência ao intemperismo	Moderada	Alta
Durabilidade típica (valor indicativo)	≈ 5–10 anos	> 10 anos (dependendo do ambiente)
Estabilidade estética	Pode degradar ao sol	Mantém aparência por mais tempo
VOC na aplicação	Geralmente baixo a moderado	Geralmente mais alto
Facilidade de aplicação	Exige preparo rigoroso e controle de Mistura	Aplicação mais tolerante, maior tempo em aberto
Custo inicial	Menor	Maior
Custo ao longo do ciclo de vida	Pode aumentar devido à manutenção	Pode ser menor devido à maior durabilidade
Aplicações típicas	Pisos industriais, ambientes químicos, substratos metálicos	Ambientes externos, superfícies sujeitas a vibração e UV
Uso em sistemas multicamadas	Frequentemente como primer/base	Frequentemente como topcoat

2.3.6 Corrosão do aço ASTM A36 em esgoto doméstico

A corrosão de aços-carbono utilizados em sistemas de esgoto doméstico é um fenômeno multifatorial, resultante da interação entre processos eletroquímicos, químicos e biológicos, que conduz à degradação acelerada do material e à redução da vida útil das estruturas (MAKARENKO *et al.*, 2024; KHAMIS *et al.*, 2025; LIU *et al.*, 2018; YUE *et al.*, 2025).

Entretanto, a investigação da corrosão de aço-carbono empregados em sistemas de esgoto doméstico é motivada não apenas por questões de integridade estrutural, mas também por relevantes implicações ambientais associadas à sustentabilidade da infraestrutura de saneamento (KHAMIS *et al.*, 2025). A degradação progressiva de tubulações de aço em ambientes de esgoto pode comprometer a estanqueidade dos sistemas e aumentar o risco de liberação de efluentes no solo e em aquíferos, configurando um potencial vetor de contaminação ambiental (MAKARENKO *et al.*, 2024).

A partir da análise de tubulações de aço carbono com até 40 anos de operação em sistemas de esgoto subterrâneo, Makarenko *et al.* (2024) demonstraram que a degradação do aço está associada ao acúmulo progressivo de hidrogênio, oxigênio e enxofre, geralmente na forma de H₂S, particularmente em regiões com corrosão localizada do tipo pite, promovendo redistribuição de carbono, aumento das tensões internas da rede cristalina e elevação significativa da microdureza do aço. Esses resultados corroboram as conclusões obtidas por Khamis *et al.* (2025) em seu trabalho de revisão, que identifica ambientes de esgoto doméstico como altamente agressivos devido à produção biogênica de H₂S e formação de ácido sulfúrico, ao mesmo tempo em que há no meio a presença de íons como cloreto e sulfato, o que favorece tanto a corrosão generalizada quanto a corrosão localizada. Devido a isso, Khamis *et al.* (2025) também destacam que a corrosão em sistemas de águas residuárias representa um desafio ambiental significativo, uma vez que falhas estruturais elevam a probabilidade de poluição, demandam intervenções frequentes e aumentam o consumo de materiais, energia e recursos naturais ao longo do ciclo de vida das infraestruturas.

Outros trabalhos da literatura, como o desenvolvido por Liu *et al.* (2018) evidenciaram que a presença combinada de íons cloreto e sulfato intensifica a corrosão do aço carbono em soluções simuladas, produzindo maiores densidades de corrente de corrosão do que aquelas observadas quando esses íons atuam isoladamente, mecanismo relevante para ambientes de esgoto que concentram múltiplos agentes agressivos. E, por fim, Yue *et al.* (2025) demonstraram que atmosferas aquosas contendo CO₂ e H₂S resultam em taxas de corrosão superiores às observadas em meios contendo apenas um desses componentes, evidenciando o efeito sinérgico entre espécies corrosivas frequentemente presentes em sistemas de esgoto doméstico. De acordo com os autores, quando somente na presença de CO₂, a taxa de corrosão observada foi de 0,177 mm/ano, enquanto na presença somente de H₂S a taxa de corrosão foi de 0,0142 mm/ano. Entretanto, ao associar CO₂ e H₂S, a taxa de corrosão aumentou para 0,179 mm/ano.

Em conjunto, os estudos avaliados ressaltam que a corrosão de substratos metálicos, especialmente do aço ASTM A36, em ambientes de esgoto é dominada por processos localizados, acelerados pela ação conjunta de sulfetos, gases dissolvidos e íons agressivos,

reforçando a necessidade de estratégias integradas de monitoramento, seleção de materiais e proteção anticorrosiva, contexto em que técnicas de monitoramento da corrosão, como as discutidas por Abdulmutaali *et al.* (2024) assumem relevância ambiental indireta ao permitir a detecção precoce de degradação e a mitigação de falhas que poderiam resultar em impactos ambientais mais severos.

Dessa forma, os estudos analisados convergem ao indicar que o controle da corrosão do aço carbono em ambientes de esgoto doméstico é uma questão ambiental estratégica, intrinsecamente ligada à proteção dos recursos hídricos, à saúde pública e à sustentabilidade dos sistemas urbanos de saneamento.

2.4 Reprodução e técnicas laboratoriais

2.4.1 Reprodução de esgoto em laboratório

As águas residuais domésticas são determinadas por características físicas, químicas e biológicas, que permitem estabelecer a aceitação para um determinado uso (NOVOTNY, 2002). Martinez *et al.* (2019) apresentaram uma breve descrição dos parâmetros físico-químicos e biológicos utilizados para determinar a qualidade da água residual doméstica conforme mostrado na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

O processo de elaboração decorre em duas fases sucessivas, baseadas no protocolo elaborado por Martinez e Pascichana (2019): uma primeira fase de definição do protocolo de elaboração, e uma segunda fase de mistura e validação do substrato sintético. Conforme descrito na literatura por Henze; Ledín (2001), Henze *et al.* (2008), e Martínez Deusa; Pascichaná Hernandez (2019), as características principais a serem consideradas na água residual são: DBO, DQO, nitrogênio, fósforo e pH.

O esgoto normal também apresenta, em sua composição, componentes de lipídios, proteínas e carboidratos e partes inertes como sólidos sedimentáveis principalmente areias (SOPJONSIRI; MORGENROTH, 2004). Os principais constituintes químicos da água residual se baseiam na sua composição orgânica e inorgânica. Em relação à composição orgânica, pesquisas têm mostrado que os principais componentes orgânicos são proteínas, gorduras e carboidratos (Yao, 2014), enquanto a composição inorgânica é representada por sólidos formados principalmente por nitrogênio (N), fósforo (P), cloretos, sulfatos, carbonatos e bicarbonatos; sendo N, P e cloretos os principais nutrientes encontrados na água residual (MARTÍNEZ, 2014).

Tabela 2.2 – Parâmetros de qualidade das águas residuais domésticas (ARD) (HENZE; LEDIN, 2001; GARCÍA; LÓPEZ, 2005; MARTÍNEZ DEUSA; PASCICHANÁ HERNÁNDEZ, 2019).

Características	Parâmetros	
Físicas	<p><i>Temperatura:</i> Costuma ser superior à da água potável, devido à contribuição da água quente proveniente da limpeza e dos afazeres domésticos.</p> <p><i>Turbidez:</i> É devido à quantidade de matéria em suspensão nas águas residuais (lodo, matéria orgânica e microrganismos).</p> <p><i>Cor:</i> Geralmente é cinza ou marrom, mas devido a processos biológicos anóxicos a cor pode se tornar preta.</p> <p><i>Sólidos:</i> O teor de sólidos da água é um dos parâmetros mais significativos. O teor de sólidos de uma água afeta diretamente a quantidade de lodo que é produzida no sistema de tratamento ou disposição.</p> <p><i>Cheiro:</i> À medida que o tempo passa e o oxigênio se esgota, microrganismos anaeróbicos entram em ação, que reduzem sulfatos e sulfitos a sulfetos. Estes se houver presença de ferro, reagem dando sulfeto de ferro, que confere um odor desagradável, característico da água séptica.</p>	
	<p><i>Orgânico:</i> Carboidratos, gorduras animais, gorduras e óleos, pesticidas, fenóis, proteínas, surfactantes, outros. <i>DQO (Demanda Química de Oxigênio)</i> é o parâmetro utilizado para medir indiretamente o material orgânico que está presente no ARD e que é suscetível a ser oxidado quimicamente.</p> <p><i>DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio)</i> define a quantidade de oxigênio necessária pelos microrganismos do sistema para oxidar biologicamente a matéria orgânica contida no ARD. É também uma medida mais direta de material orgânico.</p> <p><i>Inorgânico:</i> Alcalinidade, cloretos, nitrogênio, pH, fósforo, enxofre, metais pesados</p>	
	Química	
	Biológica	<p><i>Bactérias:</i> Podem ser de origem fecal ou bactérias envolvidas em processos de biodegradação.</p> <p><i>Vírus:</i> Eles vêm da excreção.</p> <p><i>Algas:</i> Seu crescimento é favorecido pela presença no AR de nutrientes como fósforo e nitrogênio.</p> <p><i>Protozoários:</i> Os mais frequentes nas águas residuais são as amebas, flagelados e ciliados livres e fixos.</p>

De acordo com Tanner (2001), o ortofosfato ou fósforo solúvel representa mais de 60% do fósforo total na água residual e é a forma inorgânica mais facilmente assimilada pelos microrganismos; enquanto cerca de 40% do nitrogênio na água residual está na forma orgânica e 60% na forma de amônio (MARTÍNEZ, 2014).

Martinez e Pascichana (2019) fizeram uma compilação de diversos autores que programaram o uso de vários compostos de fácil obtenção e preparo, para representar quimicamente águas residuais de esgoto, esse resumo é apresentado na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Tabela 2.3 – Composição de substratos sintéticos utilizados por diversos autores.

Autor	Compostos orgânicos	Compostos inorgânicos
Rodríguez (1993), Torres <i>et al.</i> (1996)	<i>Proteína:</i> Extrato de carne <i>Carboidratos:</i> Sacarose, amido, celulose <i>Lipídios:</i> Óleo de soja	Solução de sais minerais proposta por Vazoller (1988) Solução de micronutrientes propostas por Touzel e Albanac (1983)
Universidade de Valencia (2000)	<i>Proteína:</i> Gelatina <i>Carboidratos:</i> Amido <i>Lipídios:</i> Sabonete, leite em pó	Sulfato de magnésio $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ Fosfato monopotássico KH_2PO_4 Sulfato de Amônio $(NH_4)_2SO_4$ Bicarbonato de Sódio $NaHCO_3$
Norma Alemã DIN 38412 (2000)	<i>Proteína:</i> peptona extrato de carne	Ureia $(CO(NH_2)_2)$ Sulfato de magnésio $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ Fosfato monopotássico KH_2PO_4 Cloreto de Cálcio $CaCl_2 \cdot H_2O$ Cloreto de sódio $NaCl$
Martinez e Pascichana (2019)	<i>Proteína:</i> extrato de carne em pó <i>Carboidratos:</i> amido de milho, açúcar mascavo, papel higiênico <i>Lipídios:</i> óleo de soja	<i>Fonte de Nitrogênio</i> Cloreto de Amônio (NH_4Cl) <i>Fonte de Fósforo</i> Ácido ortofosfórico (H_3PO_4) <i>Fonte de sais e micronutrientes</i> <i>sais:</i> K_2HPO_4 ; KH_2PO_4 ; $NaCl$; $MgCl_2 \cdot 6H_2O$; $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ <i>micronutrientes:</i> $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ – $MnCl_2 \cdot 4H_2O$; $CoCl_2 \cdot 6H_2O$; $CaCl_2 \cdot 2H_2O$; Anidro $ZnCl$ – $CuCl_2 \cdot H_2O$; H_3BO_3 – $NaCl$

2.4.2 *Análise de Potencial de Circuito Aberto (OCP)*

A análise de potencial de circuito aberto, também conhecida pela sigla OCP (*Open Circuit Potential*), é uma técnica eletroquímica fundamental utilizada para avaliar o comportamento termodinâmico de um sistema eletroquímico em equilíbrio, ou seja, na ausência de corrente elétrica imposta. Nessa condição, nenhum potencial externo é aplicado ao eletrodo, permitindo que o sistema atinja espontaneamente um estado de equilíbrio eletroquímico entre as reações de oxidação e redução que ocorrem na interface eletrodo/eletrólito. Do ponto de vista termodinâmico, o OCP corresponde ao estado de equilíbrio entre os processos de oxidação e redução que ocorrem na interface eletrodo/eletrólito, refletindo a diferença de energia livre entre as espécies envolvidas. Matematicamente, o OCP pode ser descrito como o potencial em que a densidade de corrente anódica (oxidação) se iguala à densidade de corrente catódica (redução), resultando em corrente líquida nula. Esse equilíbrio é governado pela equação de Nernst, que relaciona o potencial eletroquímico às atividades iônicas das espécies redox presentes no sistema. Em sistemas metálicos, por exemplo, o OCP pode indicar a propensão do metal à corrosão, sendo uma ferramenta útil em estudos de estabilidade de materiais e de desempenho de revestimentos protetores (ABREU, 2019). Valores de OCP mais negativos sugerem maior propensão à oxidação espontânea, enquanto valores mais positivos podem indicar passivação ou maior estabilidade do aço frente ao meio investigado.

Durante a medição do OCP, monitora-se o potencial do eletrodo de trabalho em relação a um eletrodo de referência, sem a passagem de corrente significativa. O tempo de estabilização do potencial é uma etapa crucial, pois garante que o valor medido represente de fato um estado de equilíbrio. Em muitas aplicações, é comum acompanhar a evolução do OCP ao longo do tempo, o que permite observar possíveis variações associadas a mudanças na superfície do eletrodo, como a formação de camadas passivadoras, adsorção de espécies ou alterações na composição do meio (MORADIGHADI; NESIC; TRIBOLLET, 2021).

2.4.3 *Curva de polarização potenciodinâmica*

As curvas de polarização eletroquímica constituem ferramentas fundamentais na análise da cinética de processos de corrosão e de reações redox em sistemas eletroquímicos. Elas são obtidas pela aplicação controlada de um potencial externo ao eletrodo de trabalho, em relação a um eletrodo de referência, e pelo registro da resposta em corrente elétrica. O resultado é uma representação gráfica da densidade de corrente (i) em função do potencial aplicado (E), permitindo a avaliação simultânea de parâmetros termodinâmicos e cinéticos.

Do ponto de vista científico, as curvas de polarização refletem o comportamento da interface eletrodo/eletrólito sob condições não estacionárias, em que o potencial é deslocado em relação ao potencial de circuito aberto (OCP). Esse deslocamento promove a intensificação de processos anódicos (oxidação) ou catódicos (redução), cujas taxas de reação são descritas pela equação de Butler–Volmer (Equação 2.4).

$$i = i_0 [\exp^{(1-\beta)\eta F/RT} - \exp^{-\beta \eta F/RT}] \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Em que i é a densidade de corrente líquida do sistema, i_0 é a densidade de corrente de troca, β é o coeficiente de atividade da reação, F é a constante de Faraday, η é o sobrepotencial, R a constante universal dos gases e T a temperatura em K.

O ensaio de polarização potenciodinâmica pode começar a partir do potencial de corrosão, também conhecido como potencial de circuito aberto, estabelecido naturalmente após a imersão do material na solução ou de potenciais mais negativos, onde predominam reações catódicas. O potencial é então elevado a uma taxa de varredura constante. Diversos fatores, como a velocidade de varredura, a composição do eletrólito, o tempo de estabilização antes da varredura e a temperatura do ensaio, podem afetar o formato das curvas obtidas. Nessas curvas, a corrente é apresentada em valores absolutos e normalizada pela área exposta do material, resultando na densidade de corrente (GENTIL, 2011; ABREU, 2019).

Uma curva de polarização, como a descrita na Figura 2.4, permite a obtenção de parâmetros fundamentais para avaliar o comportamento de um material em meio corrosivo. Um desses parâmetros é a densidade de corrente crítica de corrosão (I_c), que corresponde à corrente necessária para o início da passivação do aço; quanto maior esse valor, maior a dificuldade de promover a passivação. Outro dado importante é a densidade de corrente de passivação (I_p), que representa o menor valor de corrente na curva e está relacionada à estabilidade da passividade — valores mais baixos indicam maior proteção do material. O potencial de corrosão (E_c) também pode ser determinado e corresponde ao ponto em que há a transição entre as regiões catódica e anódica. Além disso, o potencial de passivação (E_p) indica o início do processo de passivação; valores mais elevados desse potencial sugerem menor facilidade em formar a camada passiva e, portanto, menor resistência à corrosão. Por fim, o potencial de pite, transpassivação ou ruptura (E_t) marca o limite da passividade, iniciando-se a transpassivação; quanto maior esse valor, maior é a resistência do material à corrosão localizada (ABREU, 2019).

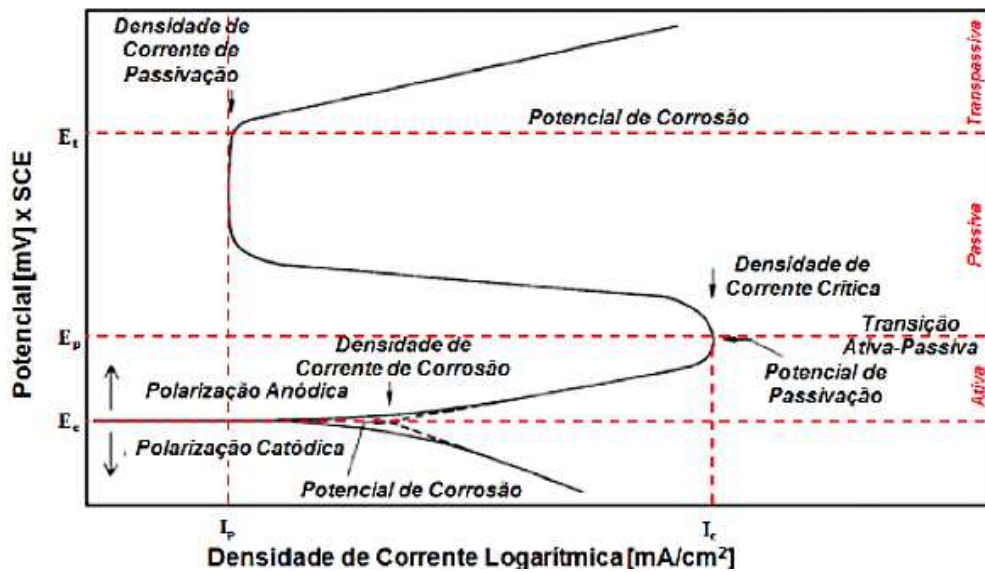


Figura 2.4. Curva de polarização típica de um ensaio potenciodinâmico em aço inoxidável (SANTANDRÉA, 1999).

2.4.4 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS) é uma técnica analítica baseada na aplicação de um pequeno sinal de tensão alternada a um sistema eletroquímico, com o objetivo de medir a resposta em corrente e, a partir disso, determinar sua impedância em função da frequência. Diferentemente de técnicas que operam em corrente contínua, a EIS trabalha com sinais de baixa amplitude e em uma ampla faixa de frequências, o que permite investigar, de forma não destrutiva, os diferentes processos que ocorrem na interface eletrodo/eletrólito. A impedância (Z) é uma grandeza complexa que combina tanto a resistência elétrica (componente real) quanto efeitos capacitivos e indutivos (componente imaginária), refletindo a oposição do sistema ao fluxo de corrente alternada. Ao variar a frequência da perturbação aplicada, diferentes fenômenos físico-químicos se tornam dominantes, como a transferência de carga nas interfaces, a formação da dupla camada elétrica, processos de adsorção e reações eletroquímicas, além do transporte de massa por difusão (GENTIL, 2011; PAJKOSSY; JURCZAKOWSKI, 2017).

A impedância (Z), em ohms, pode ser calculada de acordo com a Equação 2.5 (NUNES, 2023):

$$Z = \frac{E_0 \cdot \cos(\omega t)}{I_0 \cdot \cos(\omega t + \varphi)} \quad (\text{Eq. 2.5})$$

Em que t é o tempo, I_0 e E_0 são índices utilizados para denotar valores iniciais para a corrente e para potencial, ω é a frequência angular em radianos e pode ser expressa por $2\pi f$, f é a frequência de oscilação do sinal em Hertz.

A corrente alternada e o potencial alternado estarão em fase se for um resistor e não estarão em fase se for um capacitor (o potencial alternado aplicado está atrasado em 90° em relação à corrente alternada) ou um indutor (o potencial alternado aplicado está adiantado em 90° em relação à corrente alternada). A diferença de fase apresentada pelos capacitores e indutores é φ (NUNES, 2023).

A impedância pode ser representada no plano complexo como uma parte real e uma imaginária, conforme Equação 2.6. Em que Z' é o componente real e corresponde à contribuição da resistência do sistema. O componente imaginário é representado por Z'' é o componente imaginário e está associado às contribuições capacitiva e indutiva de impedância. O símbolo j é igual $\sqrt{-1}$ e se refere à unidade imaginária. As Equações 2.7 e 2.8 representam as expressões para um capacitor e para um indutor, respectivamente. C é o valor da capacitância medida em farad (F) e L é a indutância medida em henry (H) (GENTIL, 2011; NUNES, 2023).

$$Z(\omega) = Z' + jZ'' \quad (\text{Eq. 2.6})$$

$$Z_{\text{capacitor}} = \frac{1}{j\omega C} \quad (\text{Eq. 2.7})$$

$$Z_{\text{indutor}} = j\omega L \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Já nos circuitos puramente resistivos, a corrente e a tensão aplicadas estão em fase. A tensão varia de forma senoidal com o tempo, conforme a Equação 2.9 e não possui alteração de fase; v é a tensão, V_m é o valor máximo da tensão e ω é a frequência (NUNES, 2023).

$$v = V_m \text{sen}(\omega t) \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Essa abordagem permite extrair parâmetros quantitativos que descrevem as propriedades do sistema, como resistência à transferência de carga, capacitância da camada dupla elétrica e impedância difusiva. Os dados obtidos por EIS são normalmente interpretados por meio de modelos de circuito elétrico equivalente, que utilizam combinações de resistores, capacitores, elementos de Warburg e outros componentes ideais ou semi-ideais para representar os processos eletroquímicos de maneira simplificada (GENTIL, 2011).

Os resultados podem ser apresentados em diagramas de Nyquist, nos quais se plota a parte imaginária da impedância contra a parte real, ou em diagramas de Bode, que mostram a magnitude da impedância total e o ângulo de fase em função da frequência. Esses gráficos

forneem informações importantes sobre a dinâmica dos processos envolvidos e ajudam a identificar limitações cinéticas ou difusivas no sistema (FERREIRA *et al.*, 2023).

A Figura 2.5 apresenta um diagrama de Nyquist. Nesses gráficos, o eixo das abscissas equivale à parte real e corresponde às contribuições das resistências. A intersecção do arco com o eixo das abscissas corresponde ao valor da resistência da solução (R_s) em região de altas frequências. A parte imaginária está no eixo das ordenadas e está relacionada às contribuições capacitivas e indutivas. A intersecção com o eixo das ordenadas, em região de baixas frequências, equivale à resistência da solução somada com a resistência à polarização ($R_s + R_p$) e está associada à resistência ao processo de transferência de carga faradaica (LUKÁCS; KRISTÓF, 2020; FERREIRA *et al.*, 2023).

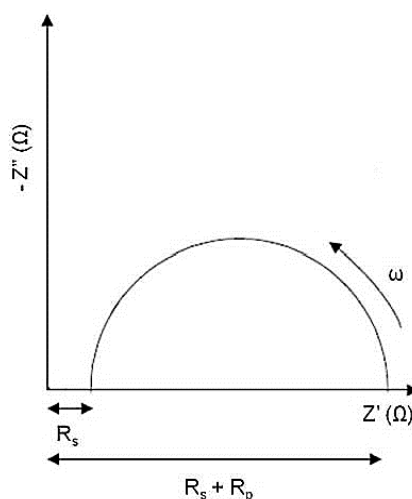


Figura 2.5. Representação do Diagrama de Nyquist (SOUZA, 2013).

Os sistemas eletroquímicos investigados podem ser representados por modelos de circuitos elétricos. Por exemplo, considere o circuito elétrico equivalente de uma interface metal pintado/solução (Figura 2.6). O revestimento atua como um separador de cargas entre o metal e a solução, ou seja, a interface revestida tem uma analogia com o desempenho de capacitores. Por isso, é representado por uma capacitância, C , e uma resistência, R , em geral elevadíssima. De modo geral, valores mais altos de resistência (R) e mais baixos de capacitância (C) indicam melhores propriedades de barreira do revestimento de tinta. Com o tempo, a penetração do meio corrosivo na matriz do revestimento tende a elevar sua constante dielétrica, o que leva ao aumento da capacitância. Esse processo de permeação também favorece o surgimento de defeitos na película, o que provoca uma redução progressiva de sua resistência. Assim, ao acompanhar ao longo do tempo as variações nos valores de resistência e capacitância obtidos por meio dos diagramas de impedância, torna-se possível avaliar a cinética de degradação dos revestimentos orgânicos (GENTIL, 2011).

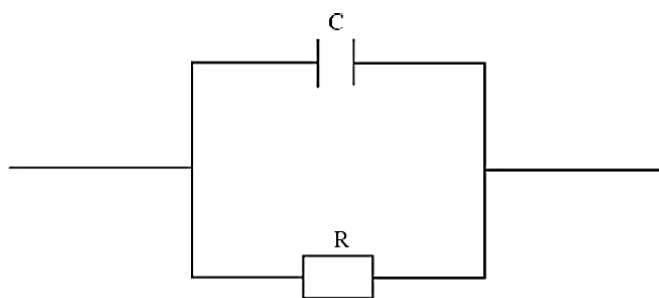


Figura 2.6. Circuito elétrico equivalente da interface metal pintado/solução (GENTIL, 2011).

A Figura 2.7 ilustra um exemplo didático de diagramas de Bode aplicados à espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS). Na Figura 2.7 (a), observa-se a representação da magnitude do ângulo de fase em função da frequência, que é uma das formas clássicas de se construir um diagrama de Bode. Já na Figura 2.7 (b) apresenta os circuitos elétricos equivalentes utilizados para representar essas curvas, compostos por diferentes números de pares resistência-capacitância (RC). Cada curva no gráfico corresponde a um circuito com um, dois ou três elementos RC (1RC, 2RC e 3RC, respectivamente). Fica evidente que o número de momentos de relaxação no diagrama de Bode está relacionado a constantes de tempo associadas a resistências e capacitâncias (RC). Cada RC introduz uma nova contribuição na resposta de fase do sistema em uma faixa específica de frequência. Isso demonstra como o diagrama de Bode pode ser utilizado para identificar processos eletroquímicos distintos em sistemas multicamadas ou com diferentes interfaces de resposta (HUANG *et al.*, 2016). Um exemplo típico de sistema multicamadas, amplamente estudado por EIS, é o sistema de proteção por revestimento polimérico como o caso da tubulação de esgoto protegida, onde existe: eletrólito (ex.: esgoto sintético / solução de H_2SO_4), o revestimento polimérico (ex.: epóxi, poliuretano, Zebron®), a interface revestimento–metal e o substrato metálico (aço); Cada uma dessas regiões apresenta constantes de tempo eletroquímicas distintas, que podem ser claramente identificadas no diagrama de Bode (módulo de impedância $|Z|$ e ângulo de fase).

A espectroscopia de impedância eletroquímica tem aplicações em diversas áreas, incluindo o estudo de corrosão, a avaliação de revestimentos protetores, o desenvolvimento de sensores eletroquímicos, a caracterização de dispositivos de armazenamento de energia como baterias e supercapacitores, além de aplicações biomédicas, como a análise de tecidos e membranas. Sua sensibilidade, versatilidade e caráter não invasivo fazem da EIS uma ferramenta poderosa para investigar mecanismos complexos em sistemas eletroquímicos, sendo, portanto, amplamente utilizada tanto em pesquisa fundamental quanto em aplicações tecnológicas e industriais (GENTIL, 2011; FERREIRA *et al.*, 2023).

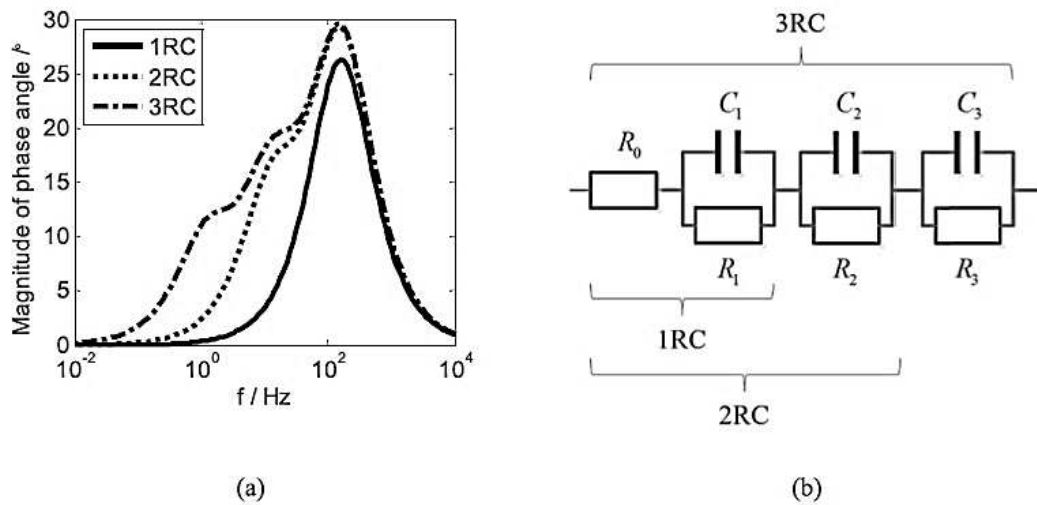


Figura 2.7. (a) Diagrama de Bode do ângulo de fase de circuitos $n(\text{RC})$ ($n = 1, 2, 3$); (b) esquema dos circuitos equivalentes em (a) (HUANG *et al.*, 2016).

2.4.5 Ensaio de desgaste abrasivo tipo roda de borracha

2.4.5.1 Método normalizado

A norma ASTM G65 descreve um método de ensaio laboratorial a seco para avaliar a resistência de materiais à abrasão utilizando o aparato de roda de borracha. No ensaio, um abrasivo de granulação controlada é introduzido entre um corpo de prova e uma roda de borracha rotativa, contra a qual o corpo é pressionado por um braço de alavanca com força determinada (Figura 2.8).

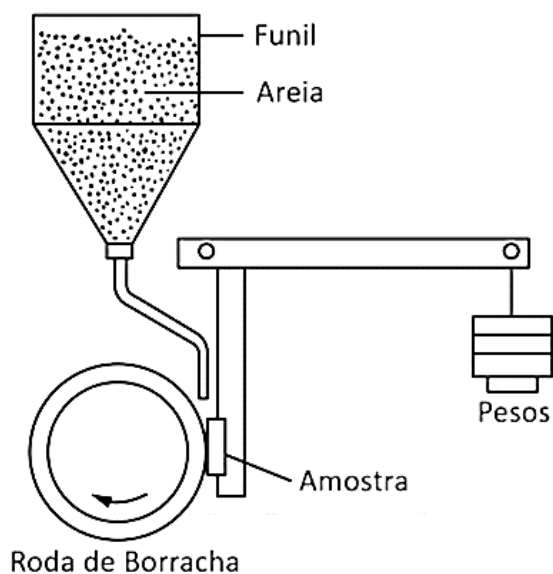


Figura 2.8. Aparato experimental para o ensaio abrasivo tipo roda de borracha (ASTM G65, 2015).

A abrasão ocorre com o movimento da roda na direção do fluxo de areia. A perda de massa do corpo de prova é medida antes e depois do teste, sendo posteriormente convertida em perda de volume (mm^3). Este método de ensaio foi desenvolvido com o objetivo de viabilizar a avaliação da abrasão em diferentes formas de materiais, abrangendo desde metais forjados, fundidos e conformados até revestimentos aplicados por soldagem, eletrodeposição, cerâmicas e outros (ASTM G65, 2015).

A norma prevê cinco procedimentos (A ao E), com variações de força e duração, e os resultados são usados para classificar os materiais quanto à sua resistência à abrasão sob condições padronizadas (ASTM G65, 2015).

Este método inclui cinco procedimentos normatizados recomendados, adequados para diferentes níveis de resistência ao desgaste, a saber:

- **Procedimento A:** ensaio de maior severidade, adequado para classificar materiais metálicos em ampla faixa de perda de volume, desde baixa até alta resistência à abrasão. É especialmente indicado para materiais com resistência média a elevada.
- **Procedimento B:** versão de menor duração do Procedimento A. Pode ser aplicado a materiais altamente resistentes, mas é mais apropriado para aqueles com resistência média a baixa. Deve-se optar por este procedimento quando a perda volumétrica no Procedimento A ultrapassar 100 mm^3 .
- **Procedimento C:** variante de curta duração do Procedimento A, indicada para revestimentos finos.
- **Procedimento D:** variante com carga reduzida do Procedimento A, indicada para materiais de baixa resistência à abrasão.
- **Procedimento E:** versão de curta duração do Procedimento B, indicada para materiais com resistência média ou baixa à abrasão.

Os parâmetros desses procedimentos são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Os parâmetros dos procedimentos recomendados na norma ASTM G65, 2015.

Procedimento	Força Normal [N]	Revoluções por minuto da roda [RPM]	Distância [m]
A	130	6000	4309
B	130	2000	1403
C	130	100	71,8
D	45	6000	4309
E	130	1000	718

A norma ASTM G105 especifica um método de ensaio laboratorial com abrasivo úmido, destinado à avaliação da resistência de materiais metálicos à abrasão por riscamento, utilizando o ensaio de roda de borracha com areia úmida. Durante o ensaio, uma suspensão abrasiva (mistura de areia de quartzo e água deionizada) é introduzida entre um corpo de prova e uma roda de borracha rotativa. O corpo de prova é pressionado contra a roda por meio de um braço alavanca sob carga constante de 222 N, enquanto a roda gira a aproximadamente 245 rpm, promovendo o desgaste abrasivo na superfície da amostra. Para comparação entre materiais com diferentes densidades, os resultados devem ser reportados em perda de volume (mm^3). Este método é aplicável a diversas formas de materiais metálicos, como metais forjados, fundidos, revestimentos por soldagem ou aspersão térmica e ligas sinterizadas. O uso do método em revestimentos requer atenção, pois revestimentos muito finos ou mal aderidos podem falhar durante o teste. Nestes casos, procedimentos modificados são necessários (ASTM G105, 2020).

2.4.5.2 Adaptação dos métodos laboratoriais às situações de campo

De acordo com Zum Gahr (1987), tribologia, que é uma palavra derivada do grego em que “tribos” significa esfregar ou roçar, abrange o estudo científico sobre atrito, lubrificação e desgaste, assim como as aplicações em situações práticas. Atrito e desgaste não são propriedades de um único material, mas de um sistema tribológico. Atrito é a resistência ao movimento e surge da interação de superfícies sólidas na área real de contato. Desgaste ocorre quando há danos em superfícies que se movimentam umas sobre as outras, normalmente envolvendo perda progressiva de material em uma ou em ambas as superfícies (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Um sistema tribológico (Figura 2.9) é constituído por um corpo, por um contra corpo (que pode ser sólido, líquido, gasoso, ou ainda, uma mistura desses). Normalmente ocorre a presença do elemento interfacial, que pode ser um óleo lubrificante, poeira, camadas adsorvidas etc. Além disso, há o ambiente que tem um papel fundamental no desempenho do sistema (ZUM GAHR, 1987).

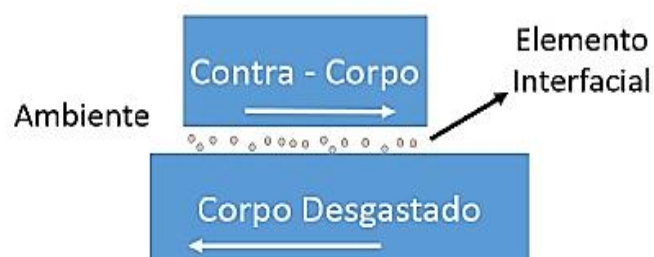


Figura 2.9. Sistema tribológico abrasivo (Adaptado de Zum Gahr, 1987).

Quando se trata de desempenho tribológico é importante que sejam realizados testes tribológicos. Zum Gahr (1987), baseado em trabalhos disponíveis na literatura, explica seis categorias em que os testes tribológicos podem ser divididos, como está sintetizado na Figura 2.10 que toma como exemplo um automóvel.

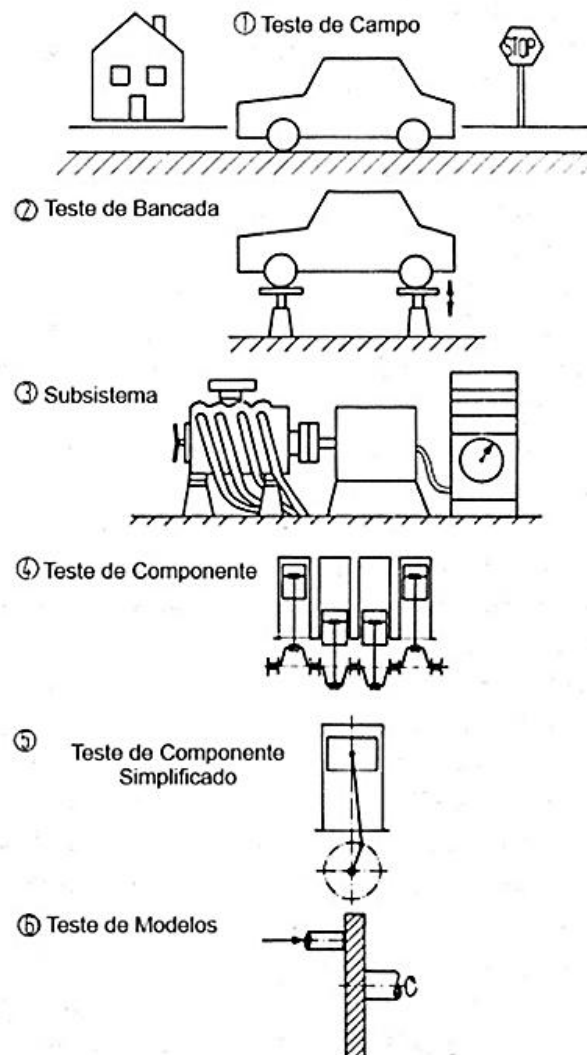


Figura 2.10. Aparato experimental para o ensaio abrasivo tipo roda de borracha (ASTM G65, 2015).

De acordo com a Figura 2.10, os (1) *testes de campo*, são realizados em períodos relativamente grandes e em condições bastante parecidas com aquelas que ocorrem na aplicação prática do componente; os (2) *testes de bancada*, são realizados em laboratório sendo que ocorrem algumas simplificações em condições operacionais aceleradas ou sobrecarregadas; uma outra categoria consiste no (3) *teste do subsistema*, em que ocorrem simplificações entre as interações de diversas partes do sistema e alterações consideráveis

são realizadas nas condições reais de operação ou em condições alto desempenho; mais simplificações podem ocorrer, dessa forma, no caso do motor de combustão interna do automóvel, pode-se ter o (4) *teste de um componente*, representado, na Figura 2.10 pela análise do desempenho tribológico de vários sistemas cilindro-pistão. No caso do (5) *teste de um componente simplificado*, pode-se analisar apenas um cilindro-pistão; finalmente, tem-se os (6) **testes de modelos** que podem ser realizados em tribômetros cujo tipo vai depender do componente que se deseja avaliar. O autor ressalta a importância de se certificar de que o modelo testado, neste caso pino-sobre-disco, represente satisfatoriamente as interações do sistema estudado. Nota-se, portanto, que para se definir uma metodologia para estudar o desempenho tribológico de um componente em laboratório é importante saber em quais condições esse componente opera e selecionar a categoria de teste para realizar a análise. Quanto mais simples for a categoria provavelmente menores serão os custos. Os testes de modelo, realizados em tribômetros, podem ser realizados em curtos períodos, pois podem ser executados em condições extremas de operação. De forma geral, pode se concluir parcialmente que as redes de esgoto urbano representam sistemas complexos sujeitos a múltiplos processos de degradação, tanto químicos quanto físicos. A corrosão biogênica, impulsionada pela ação de microrganismos que transformam compostos sulfurados em ácido sulfúrico, é um dos principais desafios, especialmente em ambientes anaeróbios ou mal ventilados. Além disso, o desgaste abrasivo causado por partículas sólidas em suspensão e as reações eletroquímicas nas interfaces metal-solução comprometem a durabilidade dos materiais tradicionais, como concreto e ferro fundido. Esses fenômenos destacam a necessidade de estratégias de proteção, como revestimentos poliméricos, inibidores de corrosão e materiais mais resistentes, para garantir a longevidade das infraestruturas. A escolha de materiais e técnicas de proteção deve considerar não apenas a resistência química, mas também a capacidade de suportar condições operacionais adversas, como variações de vazão, turbulência e cargas mecânicas. Estudos laboratoriais, como ensaios de polarização e espectroscopia de impedância, são essenciais para avaliar o desempenho desses materiais em condições controladas. A combinação de soluções inovadoras, como polímeros de alta resistência e revestimentos inteligentes, com monitoramento contínuo pode mitigar os efeitos da corrosão e do desgaste, reduzindo custos de manutenção e aumentando a eficiência dos sistemas de esgoto. Assim, a integração entre pesquisa científica e aplicação prática é fundamental para o desenvolvimento de infraestruturas mais sustentáveis e resilientes.

CAPÍTULO III

3. ANÁLISE DA DEGRADAÇÃO DA TUBULAÇÃO E AMBIENTE DO SISTEMA DE ESGOTO DE UBERLÂNDIA

3.1 Introdução

O crescimento urbano acelerado e o conseqüente aumento da demanda por infraestrutura sanitária têm intensificado os desafios relacionados à manutenção e eficiência dos sistemas de esgoto nas cidades brasileiras. Em Uberlândia, uma das principais cidades do estado de Minas Gerais, o sistema de esgotamento sanitário desempenha papel essencial na preservação ambiental e na promoção da saúde pública. No entanto, a operação contínua e a exposição a agentes físicos, químicos e biológicos tornam as tubulações e o próprio efluente sanitário sujeitos a processos de degradação que podem comprometer a funcionalidade do sistema.

Neste contexto, a análise técnica e científica das amostras de tubulação e da água de esgoto torna-se uma ferramenta fundamental para diagnosticar o estado atual da infraestrutura, identificar padrões de desgaste e degradação, além de avaliar os riscos associados à qualidade do efluente. Tais estudos permitem não apenas mapear áreas críticas do sistema, como também embasam decisões estratégicas voltadas à manutenção preventiva, reabilitação de trechos comprometidos e melhorias no tratamento do esgoto.

3.2 Caracterização do processo de degradação e desgaste da tubulação de redes de esgoto de Uberlândia

Com a finalidade de realizar a caracterização dos processos de degradação foi necessário analisar amostras em campo. A Figura 3.1 apresenta uma imagem da tubulação usada no esgoto indicando uma maior degradação na parte inferior do tubo. Essa degradação formada na parte inferior do tubo, que possivelmente combina o arraste das partículas sólidas da lama de esgoto e a degradação por corrosão leva a uma perda de espessura crítica da tubulação, onde após vários anos de serviço observam-se perdas de espessura maiores aos

50% de sua espessura original e na prática são os pontos onde esse tipo de tubulação geralmente falha.

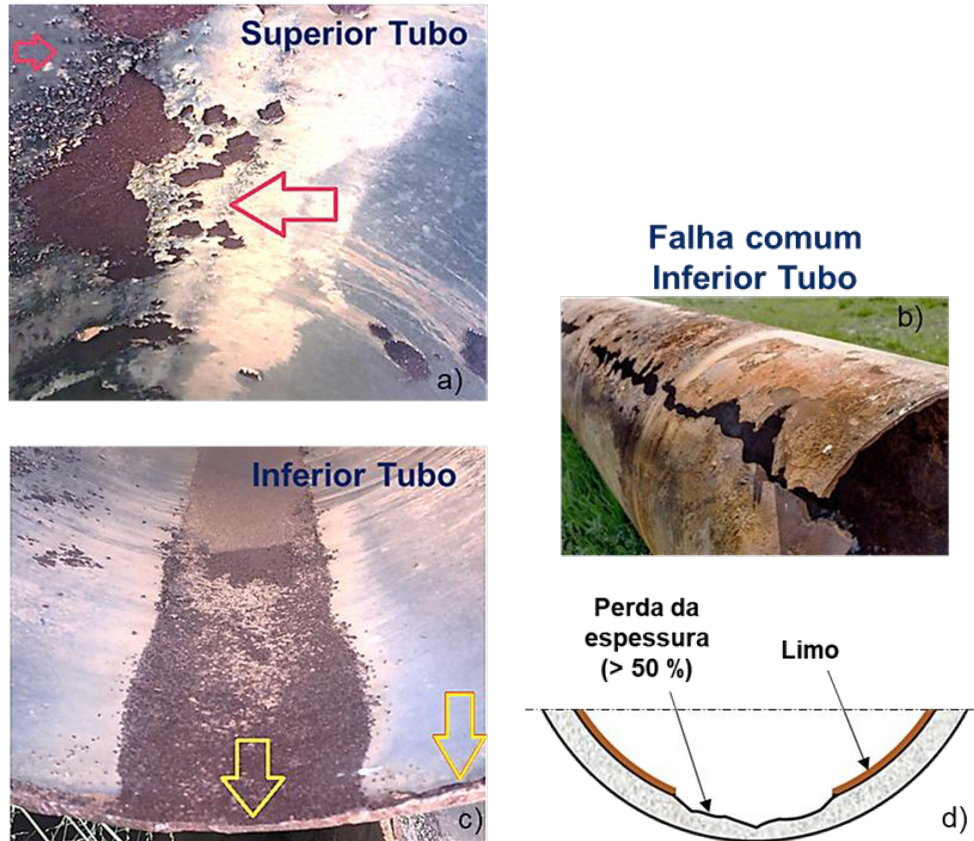


Figura 3.1. a) degradação da parte superior de tubos de esgoto. b) falha típica de tubos aplicados descartados da rede de transporte por gravidade. c) degradação e perdas de espessura na parte inferior do tubo. d) indicação da perda de espessura na parte inferior da tubulação de esgoto. Fonte próprio autor.

Cabe esclarecer que em projetos de sistemas de coleta e transporte de esgoto, busca-se prioritariamente o escoamento deste fluido por gravidade, sem a necessidade de bombeamento. Contudo, quando as condições topográficas do terreno não favorecem este tipo de escoamento, deve-se recorrer a bombeamento para o transporte destes efluentes. O sistema de esgotamento sanitário é composto majoritariamente de redes com escoamento natural, portanto busca-se analisar neste trabalho os mecanismos de degradação em redes de esgoto que escoam por gravidade. De acordo com a ABNT NBR 9649 (1986) estas redes apresentam velocidades baixas de fluxo da lama, não podendo exceder à 5 m/s.

A Figura 3.2 apresenta a falha do revestimento na tubulação. Na parte inferior da tubulação, Figura 3.2 - c, é observada a remoção uniforme associada ao arraste de particulado sólido sedimentável presente na lama de esgoto. Outra característica é a presença da falha do

revestimento no formato inicial de bolhas que aparentam ser geradas na interface do substrato (aço) e revestimento. O tipo de falha caracterizado pela formação de bolhas é mais presente na parte superior da tubulação, Figura 3.2 - a.

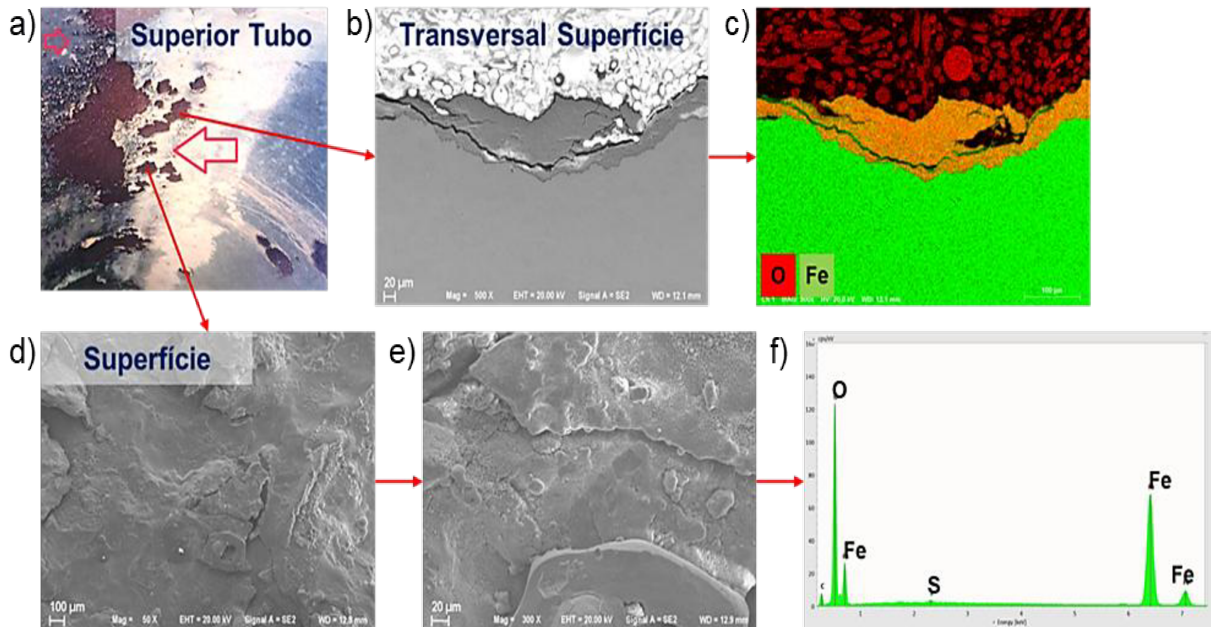


Figura 3.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície das partes de aço expostas da parte superior da tubulação de esgoto. A figura mostra em a) indicação da região do tubo; em b) e c) mapeamento da região via EDS da superfície; em d) e e) superfície do material; f) os principais elementos encontrados via EDS na superfície do aço ASTM A36 quando perdeu o revestimento. Fonte próprio autor.

Para identificar os mecanismos de degradação na tubulação de esgoto, foram coletadas amostras da tubos já substituídos do sistema de esgoto de Uberlândia. As amostras foram coletadas de trechos onde ocorria escoamento por gravidade, na condição de fim de vida útil e fora de operação. O material foi cedido pelo prestador de serviços de saneamento da cidade, o Departamento Municipal de Água e Esgoto – DMAE, de Uberlândia. É importante notar que a tubulação analisada esteve no subsolo em atividade por um tempo aproximado de 18 anos e encontrava-se no depósito de inservíveis. As amostras foram retiradas da parte superior (Figura 3.2) e inferior (Figura 3.3) dos tubos. Estas amostras foram inicialmente esterilizadas para evitar o risco de contaminação biológica e depois limpas em acetona por 10 minutos em ultrassom. Primeiramente foram analisadas, via microscopia óptica (microscópio Olympus BX51N) microscopia eletrônica de varredura (MEV, ZEISS Evo MA10[®]), as características da degradação da parte expostas de aço na superior e inferior do tubo.

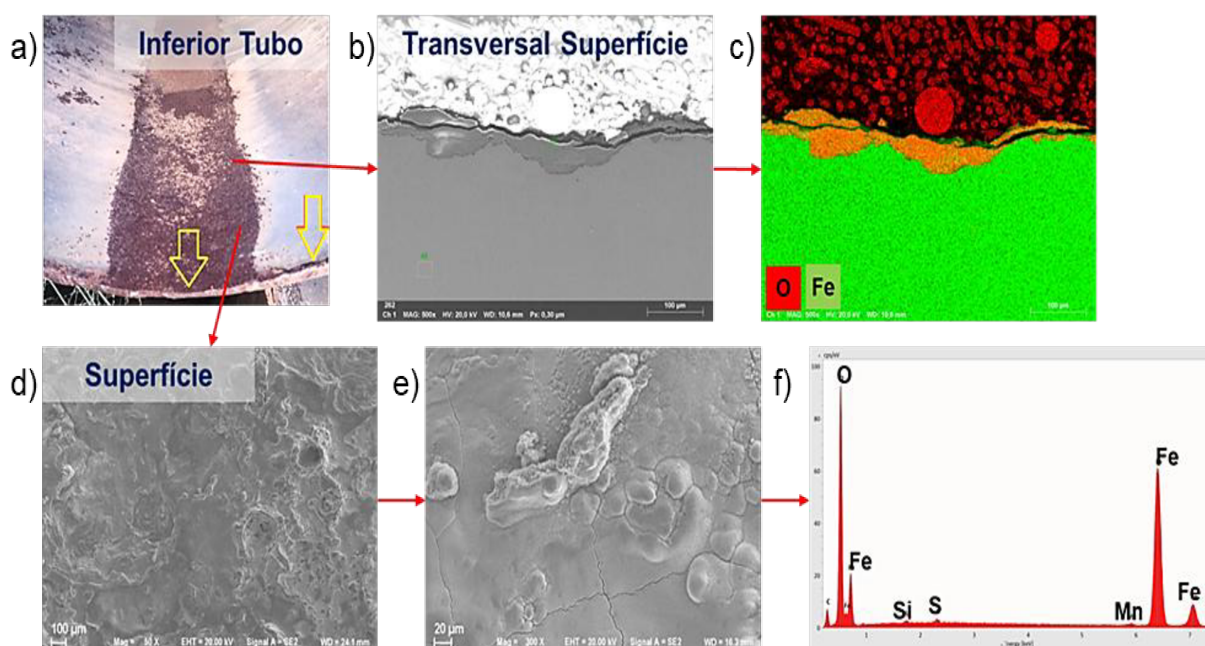


Figura 3.3. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície das partes de aço expostas da parte superior da tubulação de esgoto. A figura mostra em a) indicação da região do tubo; em b) e c) mapeamento da região via EDS da superfície; em d) e e) superfície do material; f) os principais elementos encontrados via EDS na superfície do aço ASTM A36 quando perdeu o revestimento. Fonte próprio autor.

Nas imagens de MEV do aço mostradas nas Figura 3.3 d) e e) observa-se uma superfície áspera e irregular, resultado da dissolução homogênea da matriz metálica e a presença de produtos de corrosão (óxidos e hidróxidos) recobrendo a superfície, com aspecto granular.

Conforme o observado na Figura 3.2 - d – e, e Figura 3.3 - d - e a superfície da tubulação apresentou características de camadas de elevada oxidação e corrosão generalizada, onde observou-se exposição do substrato (Aço ASTM A36). Isso é comprovado pela presença na superfície de oxigênio (O) e enxofre (S), além do ferro (Fe) do aço, Figura 3.2 - f e Figura 3.3. Observa-se também que a perda de revestimento se apresenta de maneira mais uniforme na parte inferior da tubulação. É evidente que o referido aço é susceptível à corrosão em meios onde há a presença de H_2S e, por conseguinte, H_2SO_4 , conforme evidenciado nos estudos anteriores (ARDILA, 2013; LABIAPARI *et al.*, 2013, ARDILA, LABIAPARI; MELLO, 2017; LABIAPARI *et al.*, 2017). Assim, a análise apresentada na Figura 3.2 e na Figura 3.3 mostra que a principal causa da degradação da tubulação e, conseqüente falha, ocorre por corrosão generalizada devido à reação do ambiente do esgoto com o aço estrutural da tubulação.

Apesar de apresentadas evidências de que a falha da tubulação é dada pela corrosão generalizada do aço que a compõe, faz-se necessário o entendimento sobre mecanismo de

corrosão visto que o sistema é composto também por um revestimento protetor inerte. Dessa forma, a análise foi concentrada nas observações realizadas nas superfícies do revestimento com a finalidade de obter indícios das origens da falha primeiramente do revestimento que permite o acesso do eletrólito ao aço estrutural da tubulação.

A Figura 3.4 apresenta a superfície do revestimento, e duas degradações características observadas que se evidenciam com trincas e com sulcos/riscos no revestimento, analisadas no MEV marca Tescan, modelo VEGA 3 LMU.

Os riscos/sulcos apresentados no revestimento evidenciam a ocorrência de desgaste abrasivo no revestimento. A teoria mostra que os micromecanismos de microsulcamento e microcorte estão associados à dinâmica de deslizamento de partículas duras na interface de abrasão (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Nesse caso, o escoamento dos sólidos sedimentáveis, decantados na parte inferior do tubo, em conjunto com a carga hidrostática podem gerar os riscos/sulcos observado na Figura 3.4 d) e e). Esse processo de desgaste reduz a espessura do filme polimérico que reveste o tubo permitindo a exposição do substrato.

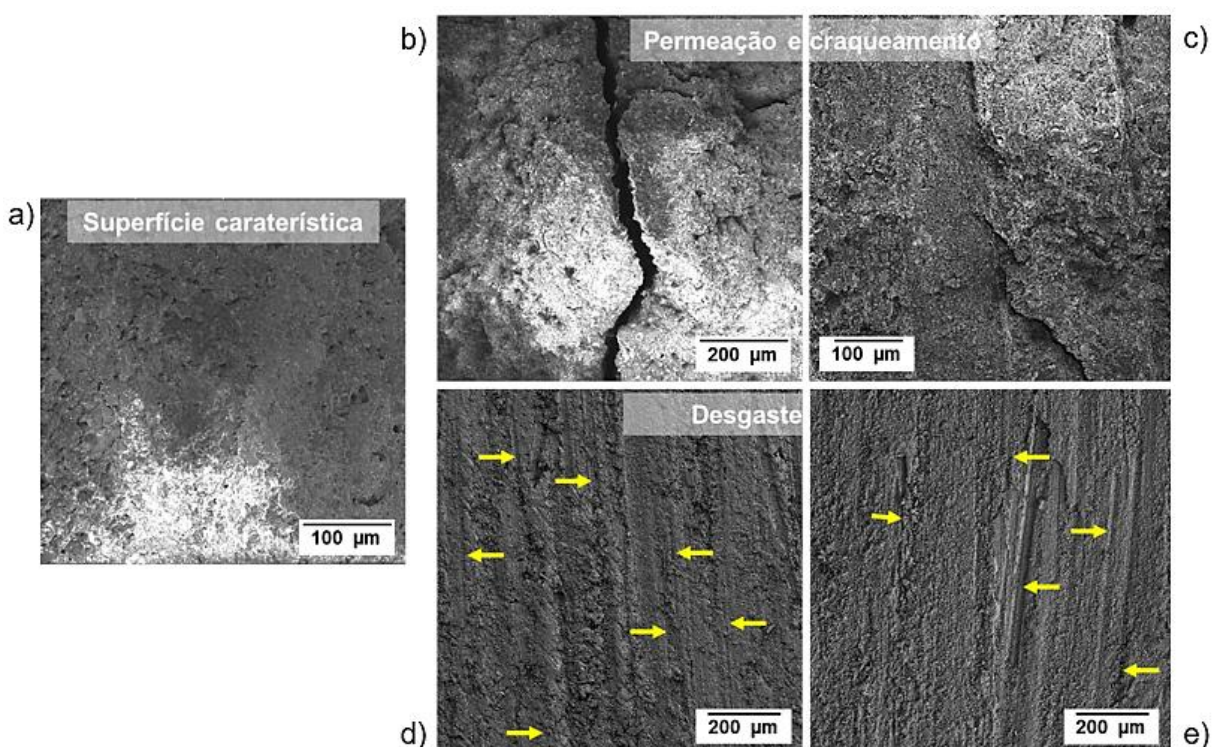


Figura 3.4. Microscopia eletrônica de varredura (MEV) da superfície do revestimento. a) superfície característica do polímero; b) c) aberturas na superfície do polímero e pontos de permeação; d) e) desgaste abrasivo no polímero. Fonte próprio autor.

Por outro lado, conforme o observado nas tubulações analisadas, alguns pontos da tubulação de aço aparentam corrosão inicial sem a remoção total do revestimento polimérico

como indicado nas setas de cor vermelha na Figura 3.1 - a. Adicionalmente, as Figura 3.4 - b e c apresentam o processo de trincamentos do revestimento polimérico, que levam a entender que existe um processo de permeação de H_2S e H_2SO_4 no revestimento polimérico. Essa permeação permite o acesso do eletrólito ao substrato e conseqüente corrosão do aço da tubulação antes mesmo de acontecer a remoção mecânica do revestimento. Em tese, o processo de corrosão do substrato pode levar à perda de aderência do revestimento polimérico e os subprodutos da corrosão gerar bolhas que levam ao desprendimento do revestimento. Conforme exposto na literatura por Scully (1989), Callister (2018) e Trentin *et al.* (2022), a permeação ocorre com mais facilidade em polímeros quando comparado com metais ou cerâmicos, devido a sua baixa densidade e estrutura molecular. A literatura ressalta que o processo de penetração pode levar à degradação do polímero, uma vez que podem ocorrer reações químicas e/ou inchamento do material (CALLISTER, 2002; TRENTIN *et al.*, 2022), levando a geração de trincas, como as observadas na Figura 3.1 – b e - c.

A permeação de um eletrólito em um filme polimérico tem sido objeto de muitos estudos e alguns modelos têm sido propostos como (i) caminhos de percolação, (ii) inclusões de Maxwell ou presença de vazios, e (iii) a combinação de ambos (HINDERLITER *et al.*, 2006). Embora não haja consenso sobre o processo de captação ou retenção de eletrólitos, vários pesquisadores concordam na existência de uma captação não homogênea composta por uma camada externa de permeação na interface revestimento/solução e uma camada interna imaculada na interface revestimento/substrato (HINDERLITER *et al.*, 2006; AMAND *et al.*, 2013; NGUYEN *et al.*, 2015; TRENTIN *et al.*, 2022). Segundo este modelo, a constante dielétrica na região permeada aumenta consideravelmente, passando da constante dielétrica do revestimento seco para a da água. Utilizando diferentes modelos, a Figura 3.5 apresenta a formação das duas zonas de permeação com uma vista 2D de uma seção transversal do revestimento. A resistividade elétrica e as constantes dielétricas relativas para a zona afetada pela difusão no revestimento são modeladas de três maneiras: primeiro, como caminhos de percolação que atuam como canais para fornecer água à interface e avançar a zona afetada pela difusão; o segundo modelo assume um sistema bifásico do tipo Maxwell, onde a água preenche os vazios no revestimento e nas inclusões do revestimento; e o terceiro modelo combina inclusões, retendo a maior parte da água, com alguns canais que conectam as inclusões de água.

A literatura mostra que tensões superficiais no revestimento facilitam a permeação de fluidos (CALLISTER, 2018; TRENTIN *et al.*, 2022), dessa forma, o tubo tende degradar com maior velocidade na sua parte inferior devido à maior carga hidrostática gerada pela presença da lama de esgoto, combinada com a perda de espessura devido a abrasão. É interessante notar que espessuras menores de um mesmo revestimento permite que o fenômeno de

permeação aconteça mais rápido e leva a menor resistividade dielétrica (TRENTIN *et al.*, 2022).

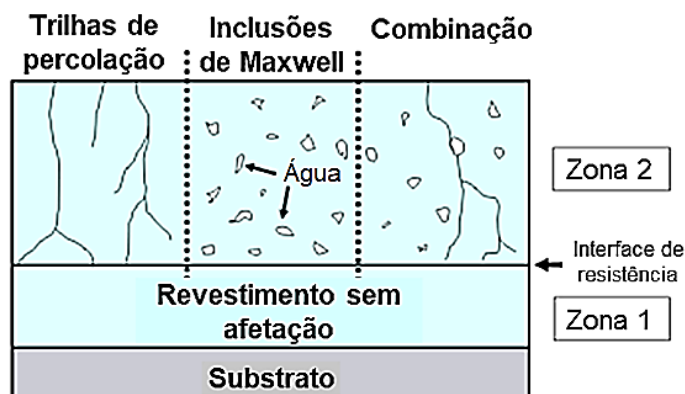


Figura 3.5. Modelo da formação das duas zonas de permeação com uma vista 2D de uma seção transversal do revestimento. Adaptado de Hinderliter *et al.* (2006).

Em resumo, o processo de degradação do tubo de esgoto observado em campo foi regido pela corrosão generalizada no tubo de aço proveniente do H_2SO_4 gerado nas paredes da tubulação. Porém, como condição de ocorrência desta degradação do aço, foram identificados dois fenômenos que afetam o revestimento polimérico e desprotegem a tubulação, sendo eles, a permeação de elementos corrosivos no revestimento e os fenômenos abrasivos observados na parte inferior do tubo.

Assim, considerando que este estudo deve representar os mecanismos de degradação, aponta-se que os seguintes fenômenos representam a degradação em tubos de esgoto e, portanto, estes constituem a abordagem metodológica que será foco deste trabalho:

- Permeação do eletrólito e a diminuição da resistividade eletroquímica do revestimento;
- Abrasão por deslizamento de partículas duras no revestimento do tubo.
- Corrosão generalizada do aço ASTM A36 em meios com concentração de ácido sulfúrico;

Porém, para que as condições de teste sejam semelhantes às condições de utilização do material, deve ser reproduzido o meio em que ocorre o processo de degradação no esgoto. Desta forma, desenvolveu-se uma metodologia para caracterização do esgoto e sua reprodução de forma laboratorial.

3.3 Desenvolvimento laboratorial de esgoto característico de Uberlândia

O processo de elaboração decorreu em duas fases sucessivas, baseadas no protocolo elaborado por Martinez e Pascichana (2019): uma primeira fase de definição do protocolo de elaboração, e uma segunda fase de mistura e validação do substrato laboratorial. Foi agregada uma terceira fase de nivelção dos sólidos sedimentais não solúveis e da acidez por sulfetos, simulando a situação real de esgoto na que existe a decomposição e desoxigenação da água, como foi explicado na problemática. A Figura 3.6 detalha as atividades desenvolvidas em cada fase.

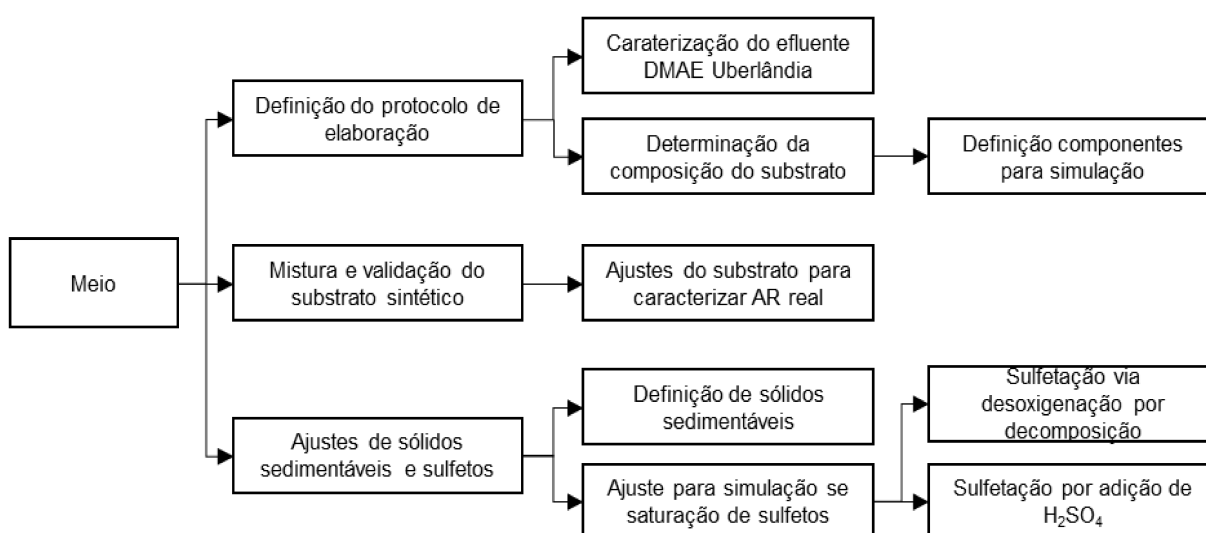


Figura 3.6. Atividades do processo de desenvolvimento de substrato laboratorial que simula a água residual de Uberlândia. Fonte próprio autor.

Como base de estudo foram coletadas águas residuais do esgoto da região de Uberlândia pelo período de um ano. As amostras foram coletadas de acordo com o mapa georreferenciado em DATUM SIRGAS 2000 apresentado na Figura 3.7.

As amostras, coletadas mensalmente durante o período de um ano, foram submetidas a análises laboratoriais previamente realizados pelo DMAE foram obtidas as composições características da água residual de Uberlândia, compreendido de janeiro de 2021 até fevereiro de 2022, assim considerando as variações climatológicas da cidade de Uberlândia.

As análises foram realizadas pela empresa Bioética Ambiental contratada pelo DMAE Uberlândia. A Tabela 3.1 apresenta o resumo dos principais componentes dessas análises, onde foram obtidas a média do ano, o desvio padrão (68,27 de nível de confiança) e o máximo esperado durante o ano. Um exemplo da análise feita Laboratório Bioética está no Anexo 1.

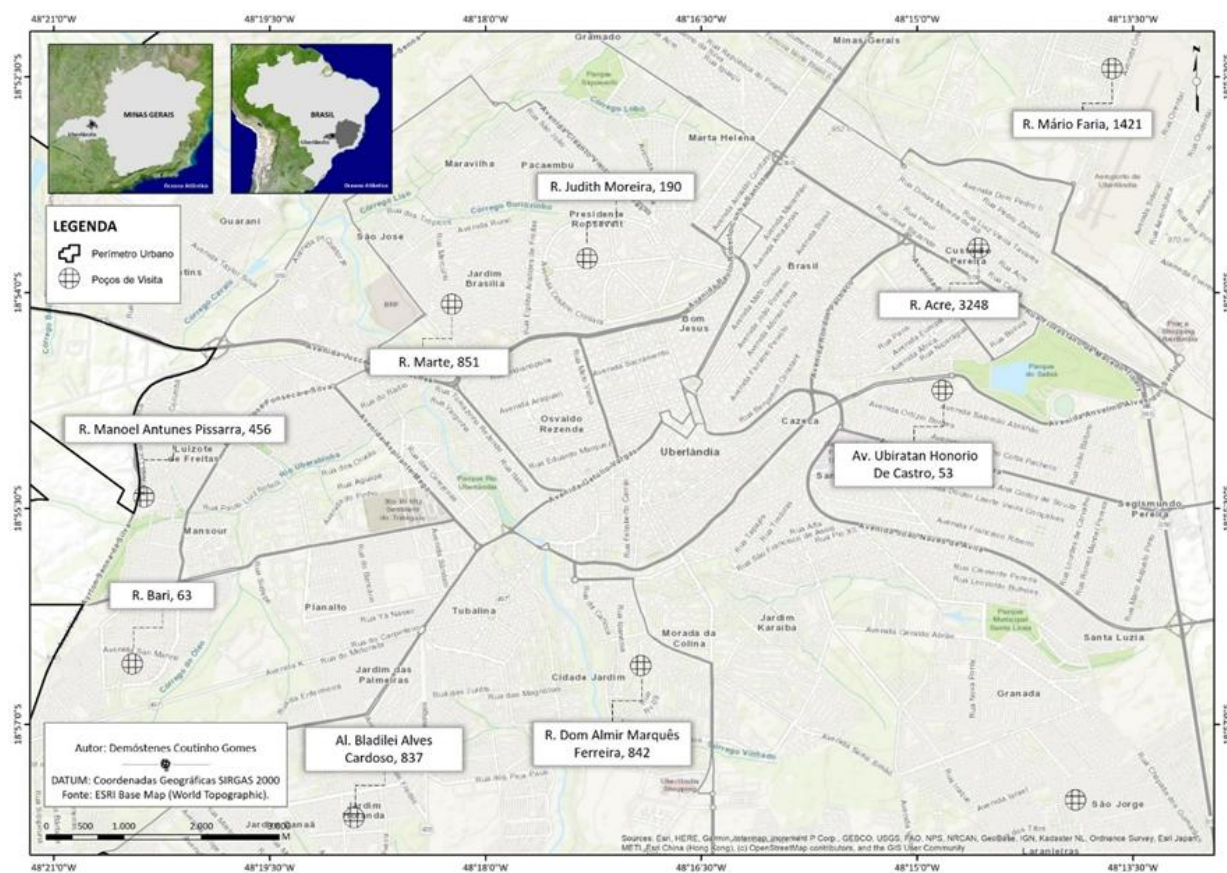


Figura 3.7. Pontos de coleta de amostras de águas residuais da rede de esgoto de Uberlândia pelo período de um ano.

Tabela 3.1 – Componentes característicos da água residual do efluente DMAE Uberlândia, conforme os dados coletados mensalmente no período de um ano.

Análise	Unidade	Média	DP	Máximo
DQO	mg/L	855,22	269,56	1124,77
DBO	mg/L	283,85	112,88	396,72
Óleos e gorduras	mg/L	24,83	16,49	41,32
Nitrogênio	mg/L	55,59	12,13	67,72
Fosforo	mg/L	7,99	6,31	14,30
Cloreto	mg/L	153,92	80,41	234,33
pH	Unidade	7,31	0,38	7,69
Sólidos sedimentáveis	mL/L	3,29	1,99	5,28
Metais	mg/L	0,786	0,751	1,537

Conforme descrito na literatura por Henze e Ledin (2001), Henze *et al.* (2008) e Martínez Deusa e Pascichaná Hernández (2019), foram consideradas as características principais da água residual: DBO, DQO, Nitrogênio, Fósforo e pH. O esgoto normal também apresenta, em

sua composição, componentes de lipídios, proteínas e carboidratos (SOPHONSIRI; MORGENROTH, 2004). Em relação à hipótese de abrasão por partículas duras considerou-se o volume de sólidos sedimentais e a quantidade de metais não solúveis. A respeito dos agentes reativos, foram considerados os cloretos e a geração de ácido sulfúrico por decomposição. Para a realização da simulação do esgoto residual, seguiu-se a sequência de atividades apresentada na Figura 3.8.

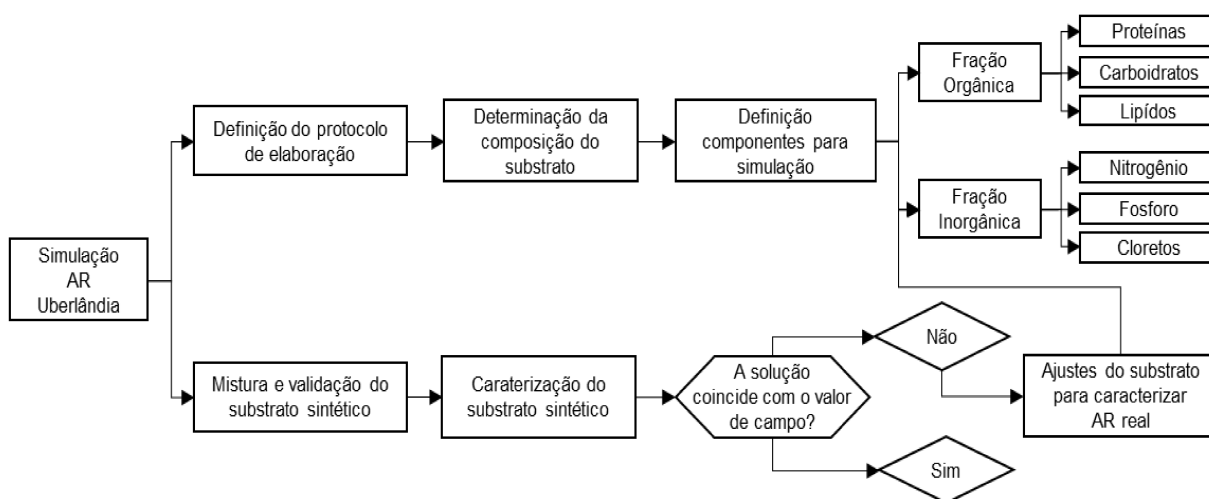


Figura 3.8. Atividades da criação do substrato laboratorial que reproduz a água residual de Uberlândia. Fonte próprio autor.

Foi definida a utilização de compostos representativos de cada um dos principais constituintes químicos da água residual conforme apresentado na Revisão Bibliográfica (Capítulo II), com base em sua composição orgânica e inorgânica. Assim, a partir das informações listadas em revisões bibliográficas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**) foram definidos os componentes para simular as águas residuais de Uberlândia. Os componentes estão apresentados na Tabela 3.2. Com base nos componentes da Tabela 3.2 foram testadas duas soluções: **A e B**, conforme mostrado na Tabela 3.3.

Para a validação das soluções foram avaliados a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), quantidade de N, P e cloretos para que estejam entre o valor médio e o máximo dos valores apresentados pelas águas residuais de Uberlândia. As análises foram realizadas com o apoio do laboratório LAQUA – Laboratório de Qualidade Ambiental do Instituto de Ciências Agrárias da UFU. As análises DBO e DQO possuíram uma metodologia específica para a avaliação.

Tabela 3.2 – Compostos orgânicos e inorgânicos para o desenvolvimento do substrato laboratorial. Fonte próprio autor.

Compostos orgânicos	Compostos inorgânicos
	<i>Fonte de Nitrogênio</i>
	Ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$)
<i>Proteína</i>	Cloreto de Amônio (NH_4Cl)
extrato de carne em pó	
	<i>Fonte de Fósforo</i>
	Fosfato monopotássico (KH_2PO_4)
<i>Carboidratos</i>	
sacarose	
	<i>Fonte de sais e micronutrientes</i>
	<i>Sais</i>
<i>Lipídios</i>	Fosfato monopotássico (KH_2PO_4)
sabonete	Cloreto de sódio NaCl
soro de leite	
	<i>Micronutrientes</i>
	Acetato de sódio $\text{C}_2\text{H}_3\text{NaO}_2$
	Cloreto de Cálcio $\text{CaCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$

Tabela 3.3 – Composição dos substratos laboratoriais elaborados, em g/L. Fonte próprio autor.

	Solução A	Solução B
<i>Extrato de carne</i>	1.22	0.995
<i>Sacarose</i>	0.1	0.08
<i>Detergente líquido</i>	0.28	0.17
<i>Ureia</i>	0.059	0.05
<i>Fosfato monopotássico</i>	0.015	0.007
<i>Cloreto de Sódio</i>	0.21	0.17
<i>Acetato de Sódio</i>	0.015	0.012
<i>Biftalato de potássio</i>	1.6	1.06

Para análise do DQO o procedimento realizado foi:

- Homogeneização das amostras (soluções) transferindo 2,5 mL para um tubo de análise.
- Adição 1,5 mL da solução digestora ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) e adicionar 3,5 de reagente ácido sulfúrico / sulfato de prata.

- Com o tubo tampado, agitou-se as amostras várias vezes até ser obtida a homogeneização.
- Inserção do tubo num termo reator (fabricante HACH modelo DRB200) mantido a 150 ± 2 °C por duas horas.
- Resfriamento do tubo a temperatura ambiente. Esse tubo de ensaio foi invertido algumas vezes para a sedimentação de sólidos. Após o procedimento, realizou-se a leitura em um espectrofotômetro (fabricante HACH modelo DR2800) a 600nm e comparar com a curva de calibração previamente preparada.

Para a análise da DBO foram preparadas as amostras para análise com a adição de 0,5% de NaOH. Foi adicionado sulfito de sódio (Na_2SO_3) para um volume de 1 L de água destilada e deionizada com 100 mL da solução amostral já neutralizada, 10 mL de ácido acético de 50% de pureza e 1 mL de iodeto de potássio. Após preparo da água de diluição, deixou-se descansar por 30 min para oxigenação. Após oxigenação adicionou-se 1 mL de cloreto de cálcio, clorito de ferro, sulfato de magnésio e solução tampão fosfato. Deixou-se descansar 30 min a mais e se realiza leitura de oxigênio dissolvido (OD), sendo uma medição no primeiro dia (OD1), e outra (OD5) após cinco dias, mantendo numa estufa incubadora a 20 ± 1 °C. Foram feitas análises em duplicata.

Os resultados das análises das soluções laboratoriais elaboradas para simular a água de esgoto de Uberlândia são apresentados na Tabela 3.4. Conforme os resultados os valores das soluções laboratoriais A e B estão dentro da faixa dos valores apresentados no Efluente de Uberlândia, da mesma forma os valores da solução A foram mais elevados quando comparados com os da solução B, mas mantendo-se dentro da faixa de valores apresentados pelo efluente real. Assim a preparação da solução A foi a escolhida como a solução de esgoto laboratorial característica da lama de esgoto de Uberlândia (Tabela 3.1).

Tabela 3.4 – Resultados das análises dos substratos laboratoriais de água de esgoto de Uberlândia. Fonte: próprio autor.

	Unidade	Efluente Uberlândia	Solução A	Solução B
DQO	mg/L	585,66 – 1124,77	1112,32 ± 113,5	848,02 ± 118,72
DBO	mg/L	170,97 – 396,73	321,60 ± 54,67	262,20 ± 15,73
Nitrogênio	mg/L	43,46 – 67,72	59,00 ± 4,13	50,00 ± 4,50
Fosforo	mg/L	1,68 – 14,30	12,50 ± 2,00	6,00 ± 1,02
Cloreto	mg/L	73,51 – 234,33	210,00 ± 37,8	170,00 ± 16,80
pH		6,73 – 7,69	7,31 ± 0,1	7,48 ± 0,1

A decomposição da água residual dentro da tubulação de esgoto leva a criação de ácido sulfúrico (H_2SO_4), dessa forma aumentando o nível de acidez do ambiente de esgoto e a propensão à corrosão da tubulação (Bowker, Smith e Webster, 1985; Tsutiya e Sobrinho, 2000). Para o aumento de acidez por ácido sulfúrico, primeiramente foi testada a desoxigenação por decomposição do substrato laboratorial, que o processo natural da solução diminuir seu pH, na qual está se decompõe e gera ácido sulfúrico no ambiente diminuindo o pH da solução. Assim, foi deixado amostras do substrato laboratorial em recipientes fechados por 3, 4 e 5 meses para decomposição. Após o tempo foi medido o que indicou que para as soluções de 3 e 4 meses de decomposição o pH das soluções esteve entre 7 e 8. E após 5 meses de decomposição o pH esteve entre 6 e 7. Concluiu-se que decomposição não gerou suficiente diminuição de pH (geração de ácido sulfúrico) devido à falta de bactérias (Metcalf e Eddy, 2003) que ajudam no ciclo de decomposição e geração de H_2S na tubulação de esgoto. Desta forma, foi estabelecida que a maneira mais viável para a acidificação do meio era a adição de ácido sulfúrico no substrato laboratorial de forma manual. Assim, foram testadas várias concentrações de ácido sulfúrico, até chegar na concentração de 9,5 g/L de ácido sulfúrico na solução de esgoto laboratorial sendo a que teve com maior semelhança com a degradação em campo, como discutido na próxima seção Figura 3.1.

Com o substrato laboratorial que reproduza as águas residuais de Uberlândia e sua acidificação, serão definidos os componentes para os sólidos sedimentais para que simulem a fração de volume máxima apresentada nas águas residuais de Uberlândia (40,28 mL/L, Tabela 3.1).

Com o objetivo de avaliar o tamanho médio das partículas sólidas do esgoto, coletou-se no desarenador da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE – Uberabinha) amostras dos sólidos sedimentáveis. As amostras provenientes do desarenador foram levadas por um processo de secagem mediante colocação em leito de secagem por 03 (três) dias. Após a secagem, as amostras foram submetidas ao ensaio de granulometria de acordo com as normas ABNT NBR 17054 (2022) e ABNT NBR 16915 (2021). O resultado deste ensaio pode ser observado por meio da Figura 3.9.

Conforme o resultado da curva granulométrica, os tamanhos das partículas para as amostras dos sólidos se apresentam entre 75 e 5600 μm , sendo que 60% das partículas estão compreendidas entre os diâmetros de 212 e 1000 μm . Esses grãos preferencialmente são areias (sílica).

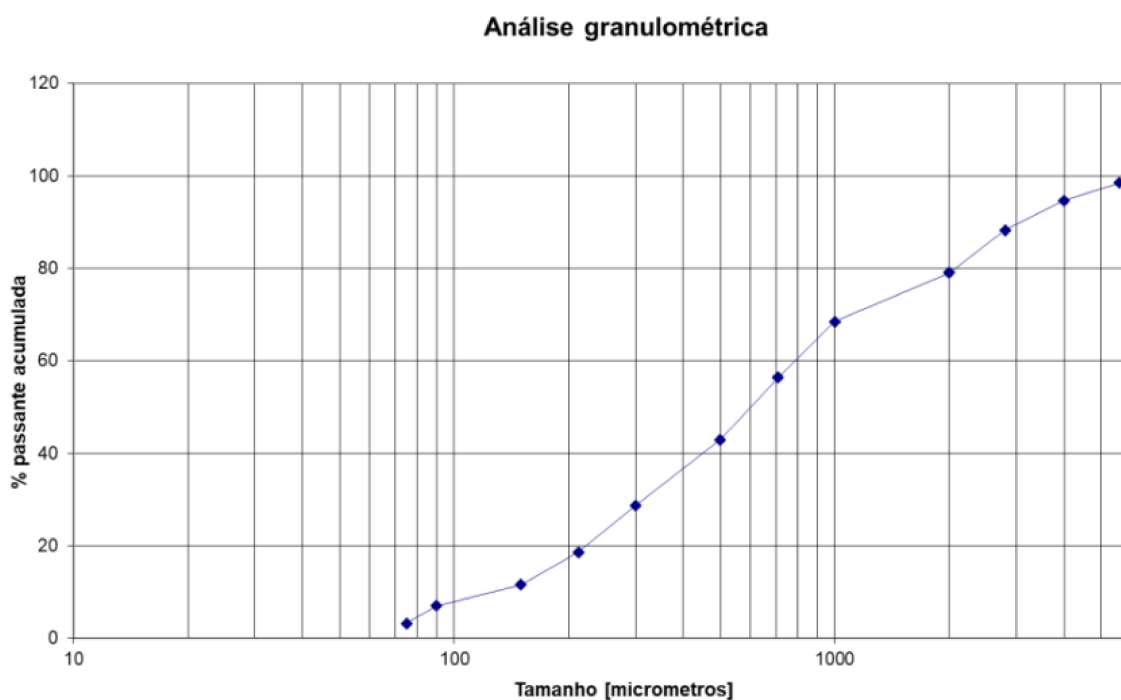


Figura 3.9. Curva granulométrica de partículas abrasivas do esgoto de Uberlândia. Fonte próprio autor.

3.4 Mecanismos de degradação em laboratório

3.4.1 Reprodução em laboratório da corrosão generalizada do aço ASTM A36

Para avaliar se a solução simulada de esgoto com adição de 9,5 g/L de H_2SO_4 descreve a corrosão apresentada na tubulação foi caracterizada a corrosão generalizada observada na tubulação de aço ASTM A36 utilizada na tubulação de esgoto. Para isso que se realizou ensaios de polarização potenciodinâmica anódica no aço ASTM A36 e comparou-se o aspecto da amostra ao final do ensaio com o do aço sem revestimento observado em campo (Figura 3.3). A polarização potenciodinâmica anódica pode chegar em valores de potenciais onde a corrosão se apresenta da saturação (crescimento de oxigênio) (Revie e Uhlig, 2011), como é o caso de campo. Para a polarização foi usado um potenciostato *Biologic*, modelo *SP150*. A amostra teve uma área exposta de 1 cm². Como contra-eletródo foi utilizado uma gaze de platina de 80 mesh com dimensão de 2,5 x 3,5 cm. Como eletródo de referência utilizou-se calomelano saturado (SCE). A taxa de aumento do potencial foi 0,5 mV/s. Antes do início do ensaio foi realizado 02 (duas) horas de OCP (potencial de circuito aberto) para estabilização do OCP. Na Figura 3.10 é apresentada a curva de polarização características do ASTM A36 até chegar na fase de saturação (crescimento de oxigênio).

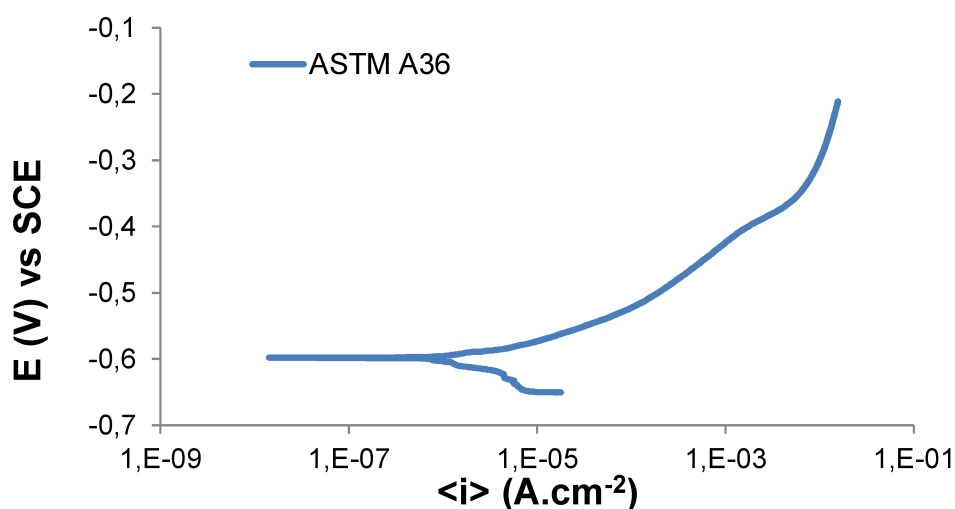


Figura 3.10. Curva de polarização do aço ASTM A36 sem revestimento com meio eletrolítico de esgoto laboratorial com 9,5 g/L de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.

A curva de polarização do aço ASTM A36 apresenta um comportamento de corrosão ativa, ou seja, sempre está em processo corrosivo, caracterizado por um potencial de corrosão em torno de $-0,60$ V vs. SCE e densidades de corrente de corrosão da ordem de 10^{-5} – 10^{-4} $A \cdot cm^{-2}$. A ausência de uma região passiva estável e o aumento contínuo da corrente anódica indicam que o eletrólito agressivo suprime a formação de filmes protetores, resultando em elevadas taxas de corrosão governadas pela dissolução ativa do ferro e pelas reações de evolução de hidrogênio.

Ao comparar o aspecto superficial da amostra sem revestimento após o teste de polarização potenciodinâmica (Figura 3.11 (a)) com a amostra que perdeu seu revestimento coletada *in loco* (Figura 3.11 (b)) observa-se que ambas apresentam aspecto similar, mostrando mesmas características de ataque na superfície.

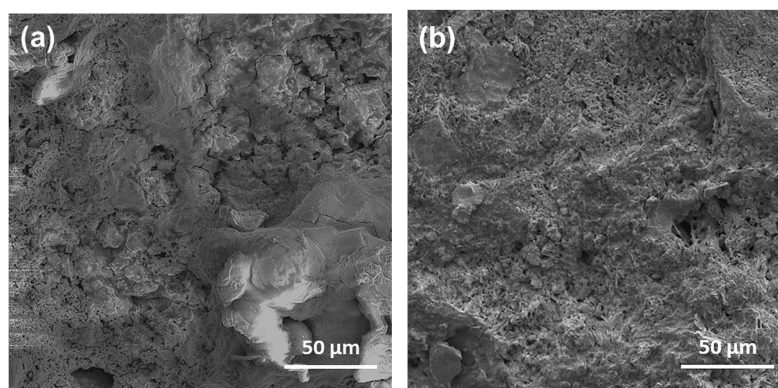


Figura 3.11. (a) Imagem de MEV após ensaio de polarização da amostra de aço ASTM A36 no meio eletrolítico de esgoto laboratorial com adição de 5% de H_2SO_4 . (b) Amostra coletada em campo. Fonte próprio autor.

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), apresentadas na Figura 3.11, evidenciam diferenças e similaridades marcantes entre as superfícies do aço ASTM A36 submetido a ensaio acelerado de corrosão em meio eletrolítico laboratorial (Figura 3.11 - a) e o aço retirado de uma tubulação real da rede de esgoto de Uberlândia (Figura 3.11 - b), ambas analisadas na mesma ordem de grandeza de ampliação (barra de escala de 50 μm).

Na Figura 3.11 - a, correspondente ao aço ASTM A36 exposto ao meio de esgoto sintético contendo adição de 5% de H_2SO_4 , observa-se uma superfície altamente deteriorada, caracterizada por morfologia irregular, com regiões extensas de material fragmentado e de aspecto lamelar. A presença de cavidades profundas, associadas a zonas de destacamento do material, indica um ataque corrosivo severo e predominantemente generalizado, típico de ambientes fortemente ácidos. Nota-se ainda a formação de produtos de corrosão não aderentes, com aparência frágil e parcialmente destacada da superfície metálica, sugerindo dissolução anódica intensa e instabilidade dos filmes formados. Essa morfologia é compatível com mecanismos de corrosão acelerada por ácido sulfúrico, nos quais a rápida dissolução do ferro impede a formação de camadas protetoras contínuas.

Além disso, a heterogeneidade da superfície na Figura 3.11 - a indica que o ataque corrosivo não ocorre de forma perfeitamente uniforme, havendo regiões onde a degradação é mais intensa, possivelmente associadas a microvariações de composição, inclusões ou diferenças locais de potencial eletroquímico. O aspecto rugoso e a presença de relevos pronunciados contribuem para o aumento da área superficial efetiva, o que tende a intensificar ainda mais a cinética corrosiva ao longo do ensaio.

Por sua vez, a Figura 3.11 - b, referente ao aço ASTM A36 retirado de uma tubulação da rede de esgoto de Uberlândia, revela uma superfície também degradada, porém com morfologia distinta e menos agressiva quando comparada ao ensaio laboratorial. Observa-se uma textura mais homogênea, com presença de porosidade fina distribuída de maneira relativamente uniforme e ausência de grandes regiões de destacamento macroscópico do material. Os produtos de corrosão aparentam maior aderência à superfície, formando uma camada mais contínua, ainda que porosa, o que sugere um regime de corrosão mais lento e progressivo, típico de exposições prolongadas em ambiente real. A microestrutura observada na Figura 3.11 - b é compatível com um ambiente de esgoto sanitário onde a corrosão ocorre de forma contínua ao longo do tempo, influenciada por fatores como a atividade microbiológica, a presença intermitente de ácido sulfúrico biogênico, variações de pH e condições hidrodinâmicas do escoamento. A ausência de cavidades profundas e a menor fragmentação superficial indicam que, apesar da agressividade do meio real, o processo

corrosivo ocorre em um regime menos extremo do que aquele imposto pelo ensaio acelerado com adição direta de H_2SO_4 .

A comparação entre as duas superfícies evidencia que o ensaio laboratorial reproduz de forma conservadora e intensificada os mecanismos de degradação observados em campo, sendo particularmente eficiente em simular a perda de material associada à corrosão ácida. Embora a severidade do ataque no ensaio acelerado seja maior, as características morfológicas fundamentais — como formação de produtos de corrosão com morfologia irregular e não compacta — estão presentes em ambas as amostras, reforçando a validade do meio sintético adotado como ferramenta de avaliação comparativa.

Dessa forma, os resultados microestruturais corroboram os dados eletroquímicos apresentados anteriormente, demonstrando que o aço ASTM A36 apresenta elevada susceptibilidade à corrosão em ambientes de esgoto, especialmente aquele em presença de ácido sulfúrico. A similaridade qualitativa entre as superfícies deterioradas em laboratório e em campo confirma que o ensaio proposto constitui uma abordagem representativa e adequada para estudos de degradação acelerada, permitindo extrapolações consistentes para condições reais de operação em sistemas de esgotamento sanitário.

3.4.2 Características de desgaste abrasivo do revestimento polimérico pelo escoamento de partículas abrasivas

O objetivo deste experimento foi simular o mecanismo de abrasão observado nas amostras da tubulação de esgoto (Figura 3.4), com ensaio de abrasão pelo escoamento de partículas duras no revestimento de alcatrão de hulha.

Metcalf & Eddy (2013) demonstram que as vazões de esgoto são variáveis em decorrência do tempo. Esta condição pode ser observada nas estações de tratamento de esgoto do DMAE, visto que em determinados períodos, especialmente durante a madrugada, a medição de vazão de esgoto costuma alcançar valores inferiores à metade da máxima vazão diária. Por outro lado, de acordo com ABNT NBR 9649 (1986) para que a auto limpeza da tubulação ocorra, ou seja, como condição de não haver deposição de material no fundo da rede, a tensão trativa (σ) deve ser superior à 1 Pascal (Pa). Quando o escoamento ocorre na condição de condutos livres, está tensão é função direta do peso específico do líquido, da inclinação da tubulação e do raio hidráulico. Portanto, quando a relação y/D (lâmina líquida em relação ao diâmetro) diminui, por exemplo em períodos noturnos, a tensão trativa fica normalmente menor que 1 Pa, ocasionando decantação de material sólido no fundo da rede. (Figura 3.12).

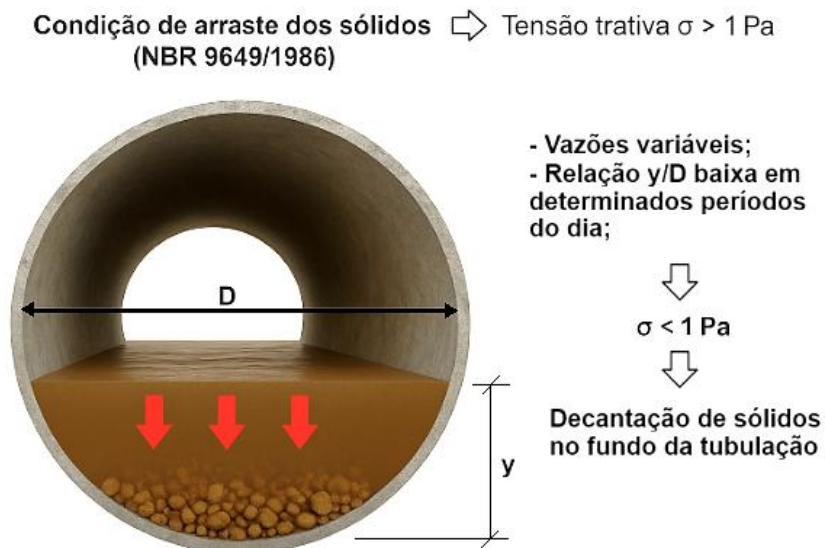


Figura 3.12. Decantação de material sólido no fundo da tubulação em função de baixas vazões. Fonte próprio autor.

Durante os horários de maior vazão, como manhã entre 7h e 11h e noite entre 17h e 21h, o tubo se enche, podendo arrastar sólidos. Nesse momento, a pressão exercida pelas partículas depositadas, devido ao seu peso, causa um determinado movimento relativo. Esse movimento resulta em desgaste por deslizamento na superfície do polímero, conforme ilustrado na Figura 3.13, evidenciando o impacto do fluxo intenso na integridade do material.

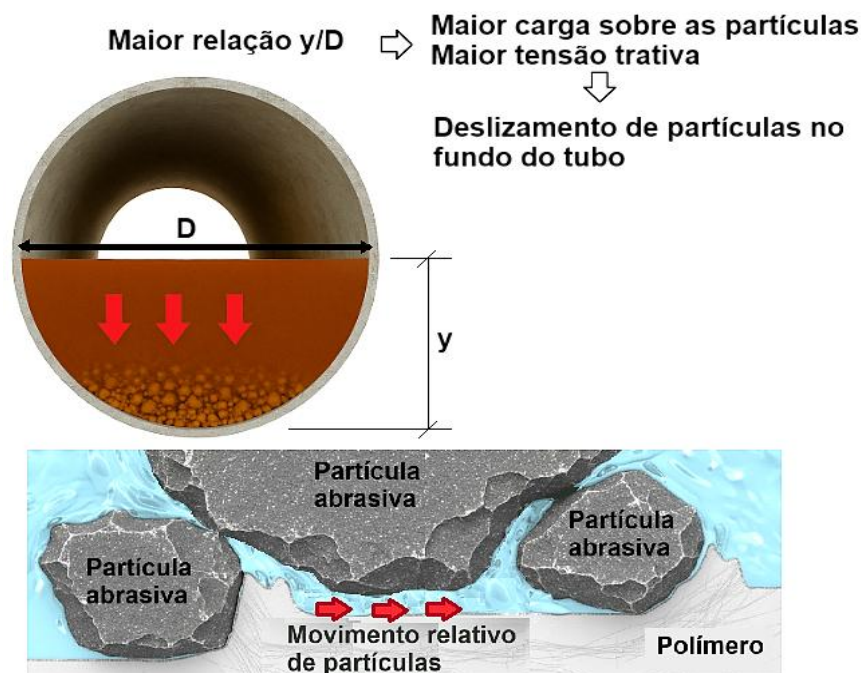


Figura 3.13. Modelo desgaste por deslizamento na parte inferior do tubo pelo escoamento de partículas duras (majoritariamente areias). Fonte próprio autor.

Foi planejado um ensaio abrasivo para simular o fluxo unidirecional de partículas de esgoto, capazes de trabalhar com partículas entre 212 e 1000 μm , em condições de moderada agressividade, considerando que o fluido real é um efluente não tratado. Optou-se pelo ensaio de roda de borracha úmida, onde as partículas abrasivas são direcionadas ao contato pelas aletas da roda. Assim, surgiu a necessidade de adaptar a bancada de roda de borracha, existente no LTM - Laboratório de Tribologia e Materiais (Figura 3.14), para ambientes úmidos, garantindo maior eficiência no respectivo procedimento. Estas adaptações foram:

- A) Isolamento interno para o repositório onde estará o esgoto laboratorial com as partículas sólidas para ser usado no ensaio, isto mediante pintura epóxi bicomponente usada em tubos de transporte de óleo e gás. E a instalação de um registro para controlar o fluxo do esgoto que será direcionado na interface roda de borracha e amostra revestida;
- B) Limpeza e manutenção do sistema de rotação da roda de borracha.
- C) Vedação do sistema de rotação para não ser afetado pelo esgoto laboratorial;
- D) Modificação do bocal de despejo do esgoto laboratorial com partículas abrasivas;
- E) Isolamento interno para o repositório cairá o esgoto laboratorial com as partículas sólidas para após terem passado pela interface roda e amostra revestida, isto mediante pintura epóxi bicomponente usada em tubos de transporte de óleo e gás.
- F) Aperfeiçoamento do sistema de vedação da tampa do repositório para evitar a vazamentos do esgoto sintético.

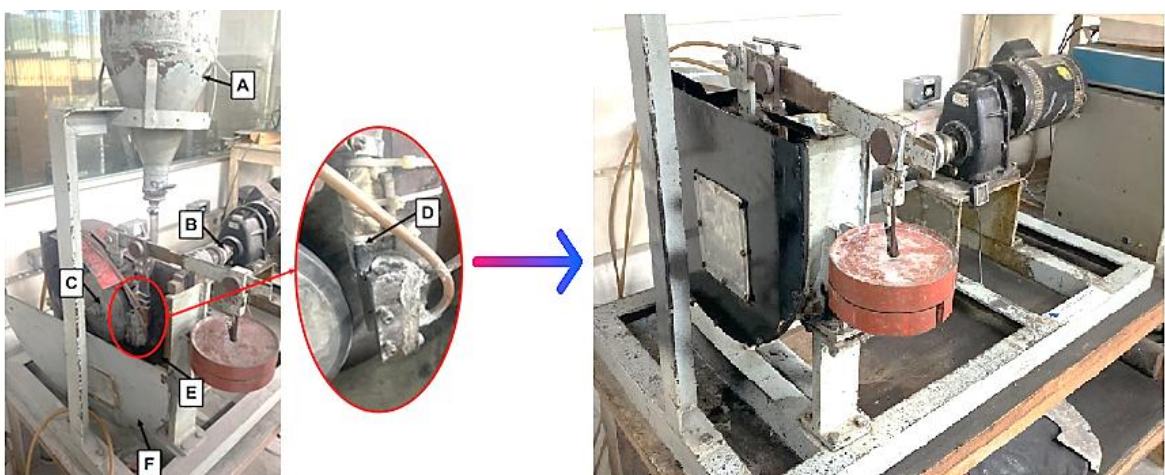


Figura 3.14. Bancada de ensaios abrasivos por roda de borracha indicando os objetos de adaptação listados pelo autor. Fonte próprio autor.

O ensaio foi planejado para representar mecanismo apresentado no revestimento de alcatrão de hulha, para esse fim o efluente sintético reproduzida em laboratório foi usada, com

5% de H_2SO_4 e partículas abrasivas de sílica na quantidade de 5 mL/L conforme mostrado na Tabela 3.1. Primeiramente se seguiram as orientações da norma para ensaios padronizados de roda de borracha úmido ASTM G105, mas seus procedimentos foram muito agressivos para avaliar o revestimento e levavam ao arrancamento total do revestimento como indica a Figura 3.15, mesmo com partículas de sílica (SiO_2) de 200 μm de diâmetro médio e com partículas de 800 μm de diâmetro médio.



Figura 3.15. Desgaste total do revestimento de alcatrão de hulha, de 1 mm de espessura, pela aplicação de ensaios de roda de borracha úmido conforme a ASTM G105, utilizando partículas abrasivas de sílica com mistura tamanho de 200 μm e de 800 μm de diâmetro médio. Fonte próprio autor.

Assim, os parâmetros foram ajustados para refletir condições mais adequadas aos ensaios, com base na situação do problema. Como mencionado anteriormente, a condição limite de escoamento foi definida com uma pressão de 1 Pa (Figura 3.12). Dessa forma, a carga aplicada corresponde à pressão de 1 Pa, considerando a tubulação de aço utilizada na rede de esgoto de Uberlândia, que possui um diâmetro de 470 mm e capacidade máxima de 75% do diâmetro, ou seja, 325 mm. Assim, a carga sobre as partículas seria aproximadamente 0,174 N. Como essa carga é muito pequena para ser aplicada na bancada de testes, ela foi aumentada em 60 vezes. Para garantir que a carga por partícula não fosse afetada pelas condições reais, a quantidade de partículas foi aumentada em 35 vezes. Dessa forma, os parâmetros de carga aplicada foram ajustados para cerca de 6,5 N, e a quantidade de partículas de sílica foi elevada para 175 mL/L. Devido à ampla faixa de tamanhos das partículas, que variam de 100 a 1000 μm , foi utilizada uma mistura composta por 50% de partículas com diâmetro médio de 500 μm e 50% com diâmetro médio de 300 μm . Diante da severidade do desgaste abrasivo, os parâmetros previstos na norma ASTM G105 foram modificados, adotando-se uma velocidade de rotação de 200 rpm e um tempo de teste de 30 minutos. Ao comparar os mecanismos de desgaste da amostra de campo com os produzidos no aço revestido com alcatrão de hulha com esta metodologia, foi evidenciado que a metodologia conseguia representar os mecanismos de desgaste apresentados no campo, como evidenciado na Figura 3.16.

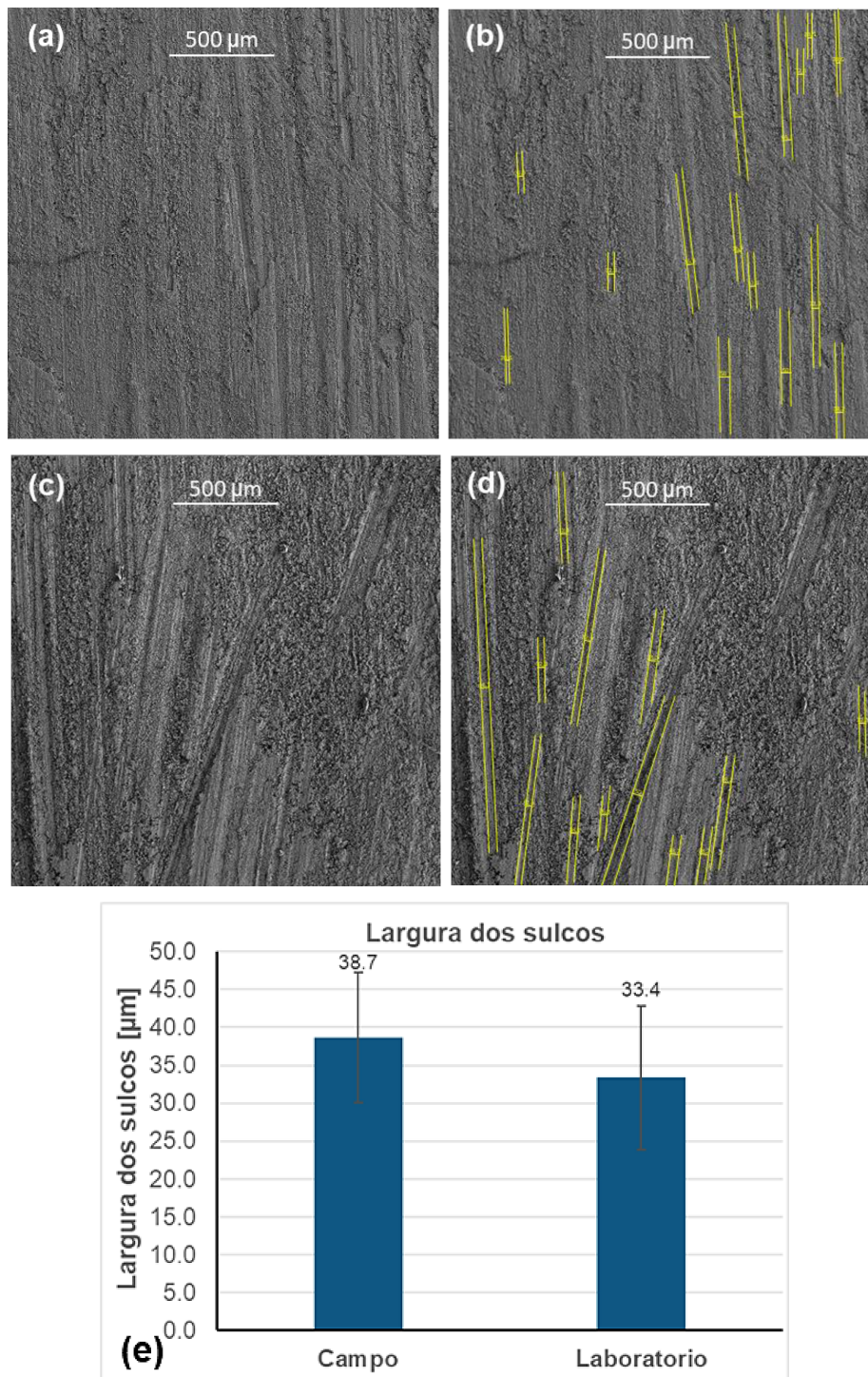


Figura 3.16. Comparação de mecanismos de desgaste no revestimento alcatrão de hulha: a) reprodução do desgaste em ambiente laboratorial por meio do ensaio roda de borracha úmido com parâmetros adaptados via MEV; b) Exemplo de medição da largura dos sulcos em amostra desgastada em ambiente laboratorial via MEV; c) desgaste abrasivo de amostra coletada em campo via MEV; d) Exemplo de medição da largura dos sulcos em amostra de campo via MEV; e) comparação de larguras dos sulcos em amostras de campo e replicada em laboratório. Fonte próprio autor.

O aspecto dos sulcos da amostra de desgaste gerada no laboratório (Figura 3.16 – a) se assemelha aos sulcos de desgaste presentes na amostra de campo (Figura 3.16 – c), além de possuir uma direcionalidade em ambos os casos.

A Figura 3.16 – c e – d apresenta uma exemplificação da medição da largura dos sulcos identificados no revestimento desgastado no laboratório e os identificados na amostra de campo, com o fim de fazer uma comparação estatística dos tamanhos sulcos, seguindo metodologia similar apresentada por Ardila (2017) e Damião (2018). Para a base estatística foram medidos os sulcos das amostras desgastadas no laboratório (3 amostras) e 5 (amostras de campo), a medições de largura feitas via MEV. A média da largura dos sulcos das amostras de campo foi de $38,7 \pm 8,6 \mu\text{m}$, enquanto a largura dos sulcos de amostras desgastadas em laboratório foi de $33,4 \pm 9,5$, a Figura 3.16 – e apresenta visualmente está diferença. Uma análise estatística a NOVA fator único com 95 % de confiança mostrou que as médias são iguais.

3.5 Conclusões parciais e resumo

No capítulo se analisou os mecanismos de degradação em tubulações de esgoto em Uberlândia MG, identificando três processos principais: corrosão generalizada do aço ASTM A36 devido à ação do H_2SO_4 , abrasão por partículas sólidas no fundo dos tubos e permeação de agentes corrosivos através do revestimento polimérico. Esses fenômenos, combinados, levam à perda de espessura da tubulação e à falha prematura do sistema. Para reproduzir essas condições em laboratório, foi desenvolvido um esgoto laboratorial com composição química similar ao efluente real, incluindo partículas abrasivas e acidez controlada, permitindo simular os mecanismos de degradação de forma controlada e reprodutível.

A metodologia laboratorial empregada, com os ensaios de polarização potenciodinâmica e testes de abrasão por roda de borracha úmida, validou a eficácia do esgoto laboratorial na replicação dos danos observados em campo. Esses experimentos não apenas confirmaram os mecanismos de degradação, mas também abriram caminho para estudos sobre o desempenho de materiais e revestimentos.

CAPÍTULO IV

4. METODOLOGIA PARA A AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS PARA A TUBULAÇÃO DE ESGOTO

As análises de mecanismos de degradação em amostras de campo de tubulações de esgoto revestidas indicaram que o revestimento pode ser afetado por fenômenos como permeação, que reduz a resistência do revestimento e compromete a proteção, além de abrasão, que causa tensões residuais e perda de massa, diminuindo a espessura do revestimento. Portanto, é fundamental realizar análises de degradação química, permeação e ensaios de desgaste abrasivo nos revestimentos utilizados em redes de esgoto. Para facilitar a compreensão do procedimento experimental deste estudo, apresenta-se um fluxograma das atividades realizadas (Figura 4.1). Este capítulo detalha os revestimentos analisados e as técnicas de avaliação empregadas.

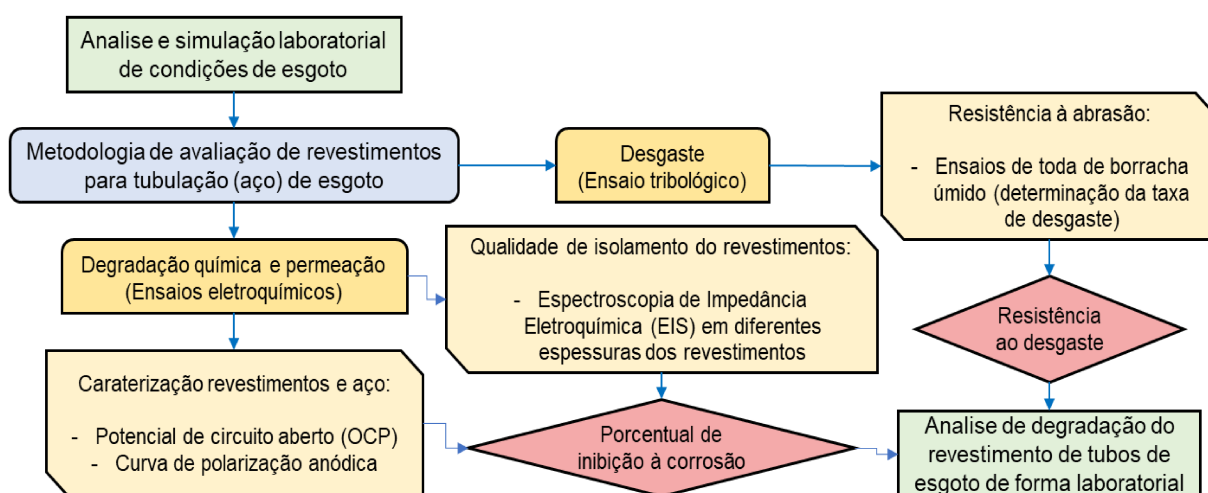


Figura 4.1. Fluxograma das etapas principais para o desenvolvimento da metodologia para avaliação de revestimento protetivos da tubulação de esgoto. Fonte próprio autor.

Conforme a Figura 4.1 a análise do Capítulo 3 a tubulação de esgoto tem dois processos de degradação que devem ser estudados: um principal devido à falta de proteção físico-química pela degradação e permeação química do revestimento; e outra que leva a perda de espessura do revestimento pelo desgaste tribológico de grande forma abrasivo. Assim, o teste de desgaste abrasivo tipo roda de borracha úmido, como descrito na seção 3.4.2, foi adotado

como método de avaliação da resistência ao desgaste desses revestimentos. As caracterizações realizadas nos aços recobertos foram o OCP e a espectroscopia de impedância eletroquímica.

A espectroscopia de impedância eletroquímica (EIE) foi selecionada por possibilitar a caracterização do aço revestido em contato com o esgoto doméstico e assim determinar os valores de resistência e capacitância do *coating* (revestimento) assim como a resistência à transferência de carga do aço e o elemento de fase constante. Dessa forma a EIE vem sendo considerada uma das ferramentas mais eficazes para avaliar o desempenho de revestimentos (FRÉCHETTE; COMPÈRE; GHALI, 1992; BONORA; DEFLORIAN; FEDRIZZI, 1996; LOVEDAY; PETERSON; RODGERS, 2004). No geral, o EIE é uma técnica extremamente útil para medir e monitorar a taxa de deterioração/intumescimento de revestimentos poliméricos expostos a eletrólitos e para estudar reações eletroquímicas catódicas e anódicas quando ocorre a corrosão do aço investigado (TRENTIN *et al.*, 2022). Algumas das principais vantagens do EIE no estudo de revestimentos poliméricos são:

- 1- sua característica não destrutiva;
- 2- possibilidade de avaliar a degradação ou regeneração de filmes; e
- 3- capacidade de fornecer valores quantitativos para os processos eletroquímicos que ocorrem no sistema (GONZALEZ-GARCIA; GARCIA; MOL, 2016; BARSOUKV; MACDONALD, 2005).

4.1 Materiais

Atualmente o DMAE utiliza o aço A36 revestido por alcatrão de hulha (base de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs), revestimento polimérico similar a uma pintura. Para aplicação destes produtos deve-se realizar a preparação da superfície, de acordo com as recomendações da Norma Sueca SIS-05 5900 (1967), de acordo com a Tabela 4.1.

Entretanto, para reproduzir a situação atual de operação da tubulação com estes revestimentos, buscou-se por meio de pesquisa de campo com operadores e visitas *"in loco"* medir a espessura média de aplicação do revestimento alcatrão de hulha. Atualmente esse revestimento é aplicado numa espessura média de 150 μm em sua camada úmida (pouco tempo de cura) e por volta de 125 μm em sua camada seca (100% de cura). Considerando que a aplicação ocorre em duas demãos, a espessura da camada acabada é em torno de 250 μm . Como forma de realizar amostragem para reprodução desta espessura em laboratório, acompanhou-se 30 medições de espessura de vários revestimentos, ao longo de 10 dias. A

espessura média foi levantada utilizando-se um medidor de camada de tinta ultrassônica Minipa MCT 401, obtendo-se espessura média de $265,34 \pm 31,86 \mu\text{m}$ a um nível de confiança de 95,45%. Assim, a espessura de $250 \mu\text{m}$ também foi utilizada como referência para análise experimental da degradação do revestimento de alcatrão de hulha.

Tabela 4.1 - Recomendações para aplicação do alcatrão de hulha conforme as recomendações da Norma Sueca SIS-05 5900 (1967). Fonte próprio autor.

Sistema	Tipo	Tinta	Número de demãos	Espessura por demão (μm)	Espessura Total (μm)
CBCA-34	Fundo	Alcatrão de hulha epóxi preta	1	150	450
	Intermediária	Alcatrão de hulha epóxi marrom	1	150	
	Acabamento	Alcatrão de hulha epóxi preta	1	150	

A aplicação do revestimento foi feita pelo DMAE Uberlândia para manter o padrão com o campo. Cabe ressaltar, que apesar de recomendações normativas, as condições de aplicação de revestimento adotadas por algumas concessionárias são adaptáveis, muitas vezes se baseando em critérios de redução de custos.

Com o objetivo de realizar análise em condições normativas, considerando variabilidades executivas, também foi analisada durante os experimentos, a espessura de $500 \mu\text{m}$.

Além da análise experimental da degradação do revestimento de alcatrão de hulha, esta mesma metodologia foi aplicada em revestimento com potenciais melhoras de desempenho em relação a atual situação. No mercado e na indústria são apresentados revestimentos mais bem desenvolvidos para tubulações com bases epóxi, poliuretanos e componentes cerâmicos. A Figura 4.2 apresenta as camadas que compõem esses tipos de revestimento. Amostras de aço revestidas com o revestimento denominado *Zebron*®, fornecidas pela empresa Steelmast Metalúrgica LTDA, foram usadas neste estudo, sendo este revestimento com base de Poliuretano bicomponente. A proposta desta empresa é que este revestimento seja utilizado em tubulações de saneamento e transportes de fluidos, com diversas espessuras, mas inicialmente recomenda que seu revestimento seja aplicado com espessura de 1 mm.

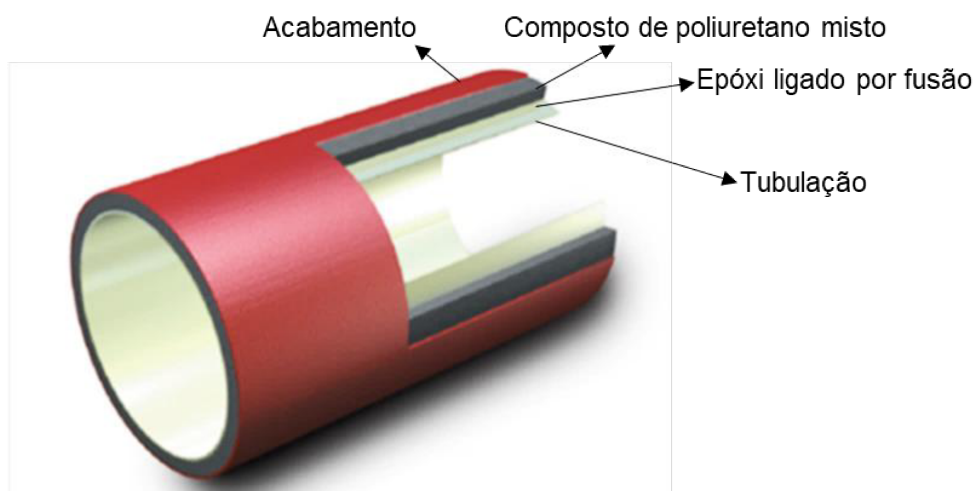


Figura 4.2. Revestimento com base epóxi ou PU para a proteção de tubulação transportadora de fluidos. Fonte próprio autor.

Os revestimentos são aplicados em tubos de aço carbono ASTM A36, com composição química descrita na Tabela 4.2. Para a medição foram utilizados equipamentos distintos devido à maior precisão do resultado em função da técnica e elemento analisado. Para elementos C e S foi utilizada a técnica de absorção de infravermelho, em equipamento do fabricante Leco, modelo CS444. Para o elemento N foi utilizada a técnica de termocondutividade, em equipamento Leco, modelo TC436. Os demais elementos foram analisados por espectroscopia de emissão ótica, em equipamento do fabricante ThermoARL, modelo 4460.

Tabela 4.2 – Composição química do aço A36 (% em peso) que será utilizado com substrato dos revestimentos. Fe elemento de balanço.

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	AL	Cu	Co	W	N
A36	0,138	1,06	0,01	0,0154	0,0075	0,01	0,01	0,003	0,033	0,014	0,0025	0,008	0,0026

4.1.1 Medição de dureza dos revestimentos

Foi realizada a medição de dureza dos revestimentos. Primeiramente foi realizada dureza de escala Shore A, mas os revestimentos saíram da escala da medição. Para medição foi utilizada a escala Rockwell M, o procedimento de medição teve como parâmetros:

- Penetrador: Uma esfera de aço endurecido com diâmetro de 6,35 mm (1/4 de polegada), que cria uma área de contato maior, distribuindo a carga e permitindo uma medição mais precisa em materiais que se deformam facilmente.

- Cargas (Forças) Aplicadas: Carga Menor (Pré-carga): 10 kgf. Esta carga é aplicada primeiro para assentar o penetrador na superfície e estabelecer um ponto zero de referência. É comum a todas as escalas Rockwell.
- Carga Maior (Carga Total): 100 kgf para a escala M. Esta é a carga adicional aplicada sobre a pré-carga (ou seja, 10 kgf + 90 kgf = 100 kgf total).

Foram realizadas 10 medições de dureza para cada revestimento. O processo de medição realizado foi:

- Aplicou-se a carga menor (10 kgf) e zerou-se o medidor de profundidade.
- Aplicou-se a carga maior (100 kgf) por um tempo determinado (o tempo de "dwell").
- Removeu-se a carga maior, mantendo apenas a carga menor.
- A profundidade residual de penetração (h) foi medida automaticamente pela máquina.
- O equipamento calculou e exibiu diretamente o número de dureza Rockwell M.

4.2 Análise de degradação química e permeação

Para as caracterizações, as amostras de ASTM A36, com e sem revestimento, foram usinadas em formato retangular, com dimensões de 4,0 x 1,5 x 0,3 cm. Para o preparo das superfícies, os corpos de prova sem revestimento passaram por lixamento em lixadeira rotativa. Utilizou-se lixas d'água em granulometrias de #120, #240, #320, #600 e #1200. Na sequência, os aços passaram por polimento utilizando panos de #9, #6 e #3 µm, lubrificados com pasta diamantada. Quanto aos aços revestidos, as partes da amostra sem revestimento (para contato elétrico) foram lixadas até #320, em procedimento similar ao aço puro, enquanto o revestimento teve preparo de superfície realizado utilizando lixa de granulometria #1200, até as espessuras desejadas, sendo elas: espessura inicial, 1 mm, 0,5 mm e 0,25 mm, aproximadamente.

As caracterizações eletroquímicas para os aços revestidos sem desgaste foram feitas em tempos de imersão de 1 h, 24 h, 48 h, 120 h e 168 h em meio de esgoto sintético produzido em ambiente laboratorial. Para as amostras desgastadas, os ensaios foram realizados em tempo de imersão de 1 h. Todas as análises foram feitas em triplicata. A composição do esgoto laboratorial utilizado foi determinada na seção anterior apresentado na Tabela 3.3 (Solução A) e como relatado anteriormente com adição de 5% de H₂SO₄:

As caracterizações eletroquímicas foram realizadas em um potenciostato/galvanostato AUTOLAB PGSTAT204N (Metrohm) acoplado a uma célula eletroquímica convencional de três eletrodos. Foram realizadas caracterizações em amostras com e sem desgaste. Para as

caracterizações dos revestimentos sem desgaste, utilizou-se uma célula com capacidade de volume de 30 mL, conforme apresentado na Figura 4.3 - a, enquanto para os revestimentos desgastados o volume foi de 90 mL. Utilizou-se como eletrodo de trabalho o próprio aço ASTM A36, com e sem revestimento, eletrodo de referência de $\text{Ag}_{(s)}/\text{AgCl}_{(s)}/\text{KCl}_{-(\text{sat})}$ e contra eletrodo de grafite. A área do eletrodo de trabalho em contato com a solução eletrolítica foi de $0,8 \text{ cm}^2$ para as amostras sem desgaste e de $2,54 \text{ cm}^2$ para as amostras desgastadas. Essa alteração no tamanho da área se deu pelo tamanho das amostras e das células utilizadas nos diferentes momentos. As células eletroquímicas utilizadas são mostradas na Figura 4.3.

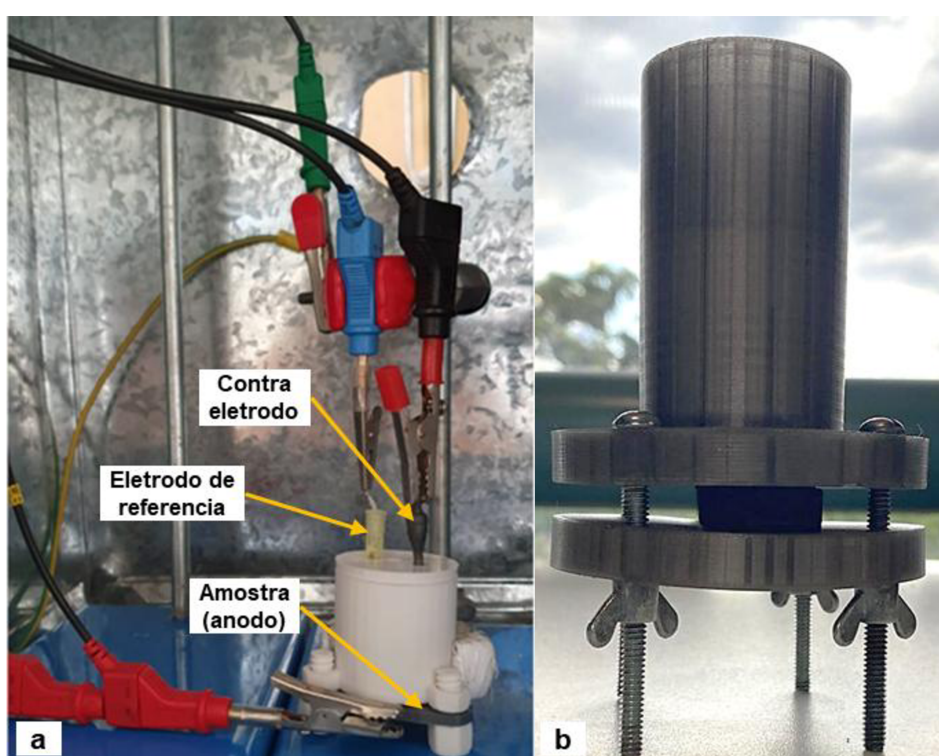


Figura 4.3. (a) Célula eletroquímica convencional impressa em 3d, com disposição de eletrodos; (b) Célula eletroquímica projetada para ensaios eletroquímicos de revestimentos espessos. Fonte próprio autor.

4.2.1 Desenvolvimento de célula eletroquímica para ensaios de amostras desgastadas e com grande espessura de revestimento

Normalmente, amostras usadas em análises de corrosão têm espessura inferior a 3 mm, enquanto amostras de desgaste são mais espessas, cerca de 5 mm, e amostras com revestimentos podem chegar a 1 mm. Assim, foi desenvolvida uma célula eletroquímica adequada para esses tipos de amostras, inspirada em “flat cell”, fabricada por manufatura aditiva, conforme mostrado nas Figura 4.3 – (b) e Figura 4.4.

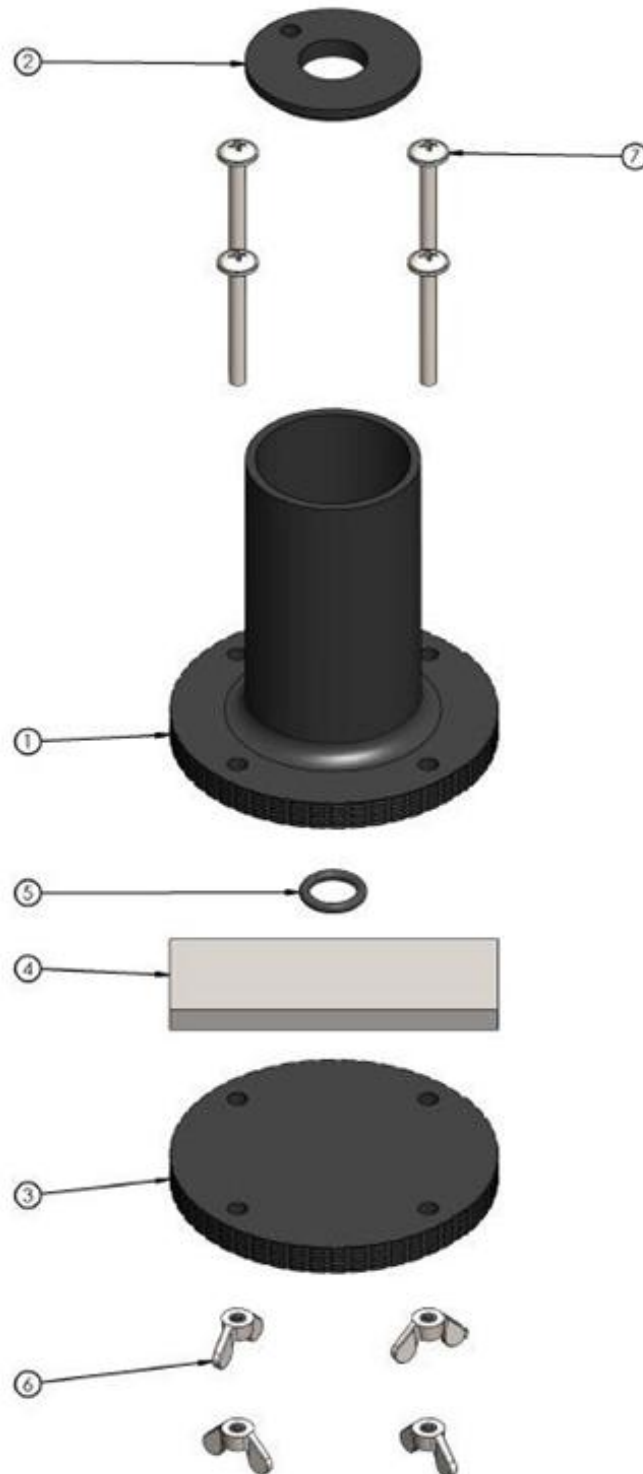


Figura 4.4. Desenho da célula eletroquímica projetada. Fonte próprio autor.

Na Figura 4.4 mostra-se que a célula é baseada numa base flangeada a qual é composta pelo corpo da célula (1) na qual vai se depositar o eletrólito, na parte inferior tem uma guia para encaixar um O-ring (5) o qual vai reter o eletrólito na superfície da amostra (4) que estará pressionada na parte inferior pela flange que é composta pelo corpo da célula (1)

e o disco de inferior (3), a amostra (4) fica entre esta flange na parte inferior da montagem e é pressionada por meio de 4 parafusos (7) com arruela tipo borboleta (6), essa quantidade para ter uma distribuição uniforme de pressão. Na parte superior do corpo da célula (3) é encaixada uma tampa com furos de encaixe para o contra eletrodo e o eletrodo de referência, os quais vão ficar equidistantes em todos os ensaios.

A célula projetada permite assim testar de forma confiável amostras com até 8 mm de espessura e 20 mm de largura.

4.2.2 Potencial de circuito aberto (OCP)

As medidas de potencial de circuito aberto (OCP) dos aços com e sem revestimento foram realizadas em intervalo de tempo de 0,1 s e corrente zero, utilizando o software NOVA 2.1.7. O tempo de medida foi de 3.600 s.

O objetivo desta técnica é avaliar o potencial de estabilização de um material de acordo com um eletrodo de referência. Na Figura 4.5 observa-se que o potencial de circuito aberto do aço revestido com Zebron estabiliza-se em um valor mais positivo do que o inicial após 120 horas de imersão no eletrólito devido ao revestimento atuar como uma barreira física, protegendo o aço e reduzindo a corrosão. Após 168 horas de imersão, a estabilização do OCP é inferior ao inicial, indicando uma possível degradação do revestimento polimérico ou alteração penetração do eletrólito pelo revestimento, atingindo a superfície do aço.

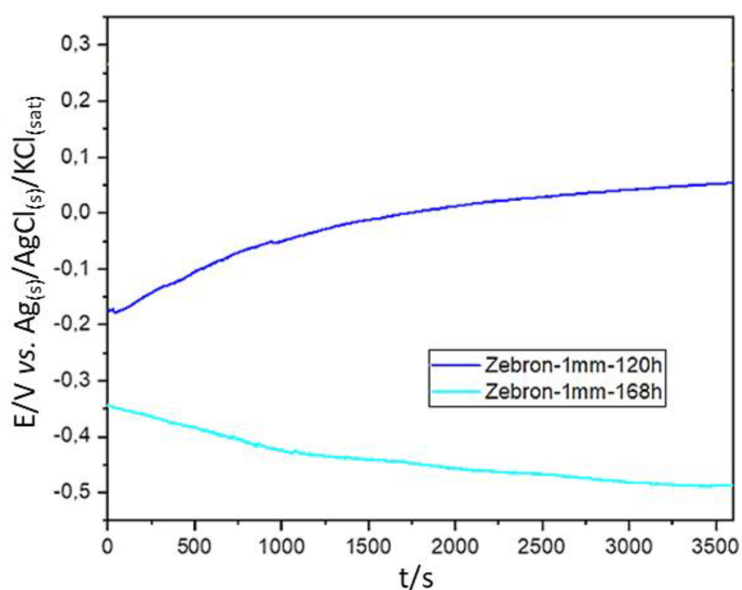


Figura 4.5. Variações do OCP do aço ASTM A36 na presença de revestimento de Zebron de 1 mm de espessura em meio laboratorial de esgoto. Fonte próprio autor.

4.2.3 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIS)

As medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica foram realizadas em potencial de OCP, com amplitude de perturbação de ± 10 mV para o aço puro e ± 20 mV para os aços revestidos. O intervalo de frequência avaliado foi de 100 kHz a 0,01 Hz.

Todas as caracterizações foram realizadas dentro de gaiola de Faraday. As medidas de EIE foram realizadas em meio de esgoto laboratorial, na presença e na ausência de revestimento.

Para o cálculo da eficiência de inibição dos revestimentos, utilizou-se a Equação 4.1:

$$EI\% = \left(\frac{R_{ct,i} - R_{ct,0}}{R_{ct,i}} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 4.1}$$

Em que:

EI%: eficiência de proteção

$R_{ct,i}$: resistência à transferência de carga na presença de revestimento

$R_{ct,0}$: resistência à transferência de carga na ausência de revestimento

A técnica de EIE é amplamente utilizada no estudo dos mecanismos de corrosão e proteção de materiais metálicos, inclusive em longos tempos de imersão, pois é considerada não-destrutiva.

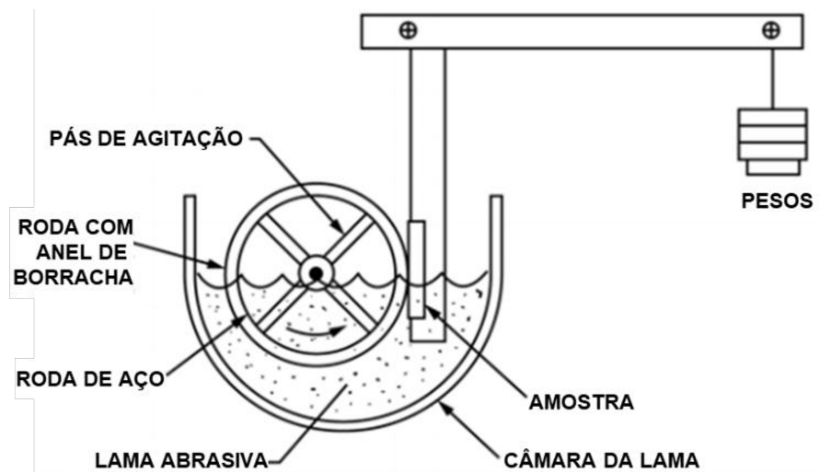
A análise dos resultados obtidos é feita pelo Diagrama de Nyquist e pelo Diagrama de Bode, os quais trazem valores de resistência à transferência de carga e ângulo de fase dos processos eletroquímicos ocorridos no sistema, respectivamente, como importantes informações na interpretação dos dados resultantes. Foi usado o *software* Nova 2.1.7 para o apoio de elaboração e ajustes dos circuitos equivalente e obtenção dos valores das variáveis do circuito. Os diagramas de Bode e Nyquist estão explicados no Capítulo 2, seção 2.4.4.

4.3 Análise de perda de massa por desgaste abrasivo

Conforme a seção 3.4.2 o ensaio de roda de borracha úmido (ASTM G105), com parâmetros adaptados para a situação do campo, mostrou mecanismos de desgaste abrasivo similares aos apresentados em campo. Assim, esse padrão foi usado como forma comparativa de desgaste abrasivo em tubulação de esgoto.

O ensaio de roda de borracha úmido é realizado em um abrasômetro, que consiste em um motor de corrente contínua que aciona uma roda de aço anel de borracha clorobutílica de

dureza 60 ± 2 Shore A. O corpo de prova é inserido dentro de um porta-amostra refrigerado à água fixada por um sistema de alavancas que permite a aplicação da força normal. O sistema está fechado numa câmara onde está a lama de esgoto (ASTM G105). O esquema do sistema de roda de borracha é apresentado na Figura 4.6 – (a). Como foi falado na seção 3.4.2 o sistema de roda de borracha úmido foi adaptado de uma bancada de roda de borracha seco, a bancada é apresentada na Figura 4.6 – (b).



(a)



(b)

Figura 4.6. (a) Esquema do abrasômetro roda de borracha úmido a ser utilizado nos ensaios (ASTM G105); (b) Bancada de roda de borracha úmido do Laboratório de Tribologia e Materiais - LTM. Fonte próprio autor.

A roda de borracha consiste em uma roda de aço de diâmetro de 152,4 mm com um anel de borracha clorobutílica de dureza 60 ± 2 Shore A e seção 12,5 mm x 12,5 mm. Essa

borracha é fixada externamente à roda que gira a uma velocidade constante de 200 rpm. A roda tem 4 pás de agitação em cada face (Figura 4.7).



Figura 4.7. Roda de borracha com pás de agitação usadas nos ensaios de roda de borracha úmido. Fonte próprio autor.

Os ensaios foram conduzidos à temperatura ambiente (23 °C). Como relatado e justificado na seção 3.4.2 os ensaios tiveram parâmetros distintos aos da norma ASTM G105 para se adequar às condições e aos mecanismos de desgaste apresentados na tubulação de esgoto de Uberlândia analisadas. Os parâmetros do ensaio estão contidos na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Parâmetros de ensaio do teste roda de borracha. Fonte próprio autor.

Parâmetros	
<i>Tempo</i>	10, 20, 30,40 e 50 [minutos]
<i>Rotação</i>	200 [RPM]
<i>Carga normal</i>	6,5 [N]
<i>Abrasivo</i>	SiO ₂
<i>Distância Linear</i>	4306 [m]

O abrasivo usado foi sílica que é a maior parte da composição dos sólidos sedimentáveis da rede de esgoto de Uberlândia, a mistura foi de 50% a 50% de foi uma mistura de partículas abrasivas com diâmetro médio de 300 µm e diâmetro médio de 300 µm, numa concentração de 175 mL/L na solução laboratorial de esgoto. A força normal do ensaio e quantidade e granulometria das partículas foram definidos e justificados na seção **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Os ensaios foram feitos em amostras de aço A36 revestido por alcatrão de hulha e Zebron® com espessura de 1 mm. O formato das amostras em chapas com as dimensões 100 x 25 x 30 mm.

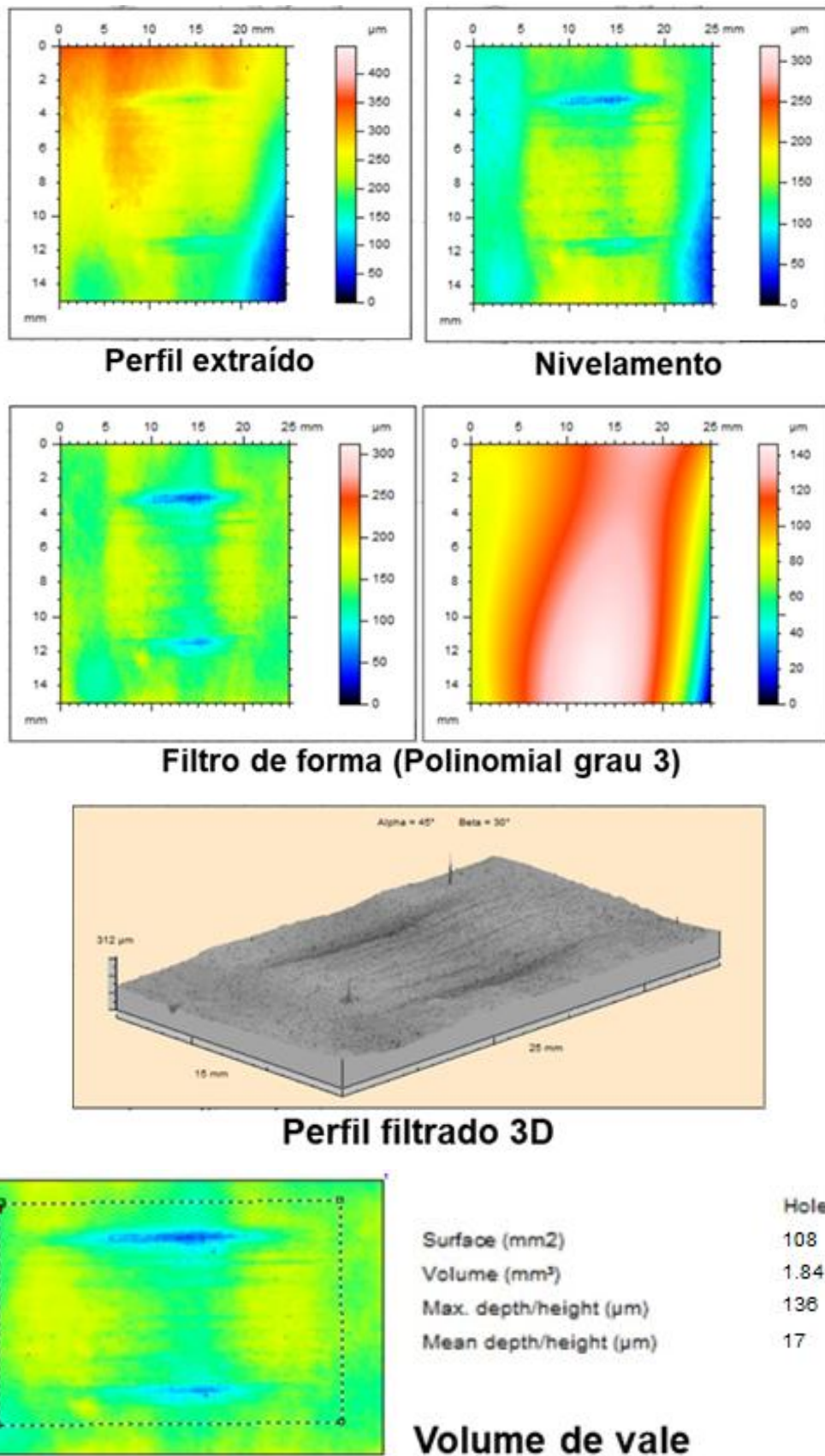


Figura 4.8. Procedimento de análise das interferometrias para obtenção do volume desgastado em amostras após ensaios de roda de borracha úmido. Fonte próprio autor.

Os ensaios foram com tempos de 10 min, 20 min, 30 min, 40 min e 50 min, todos os tempos em triplicatas. Após o ensaio a amostra era lavada, e deixada para secar pelo mínimo 48 horas, para depois fazer interferometria na marca de desgaste com o fim de obter o volume desgastado. O interferômetro da Marca OPM - Hyperion System (sensor confocal KF3), com densidade de 500 pontos/mm, área analisada de 5 mm x 5 mm. Para a análise dos dados gerados utilizou-se o programa Mountains Map Universal®, versão 3.0.11.

A taxa de desgaste foi medida utilizando o volume desgastado da amostra ensaiada via interferometria laser. O procedimento de análise das interferometrias para estimação do volume desgastado foi feito no *software MountainsMap®*, o procedimento incluiu filtro de nivelamento e depois filtro de forma polinomial grau 3, como é exemplificado na Figura 4.8.

A taxa de desgaste é definida pela equação 4.2, considerando as informações de volume (V), a força normal (FN) e o comprimento deslizado (Ld), é determinado o coeficiente de desgaste (k):

$$k = \frac{V}{Ld * F_N} \quad \text{Eq. 4.2}$$

Onde,

V – Volume desgastado [m³]; Ld – Comprimento deslizado [m]; FN – Força normal [N].

Os valores de coeficiente de desgaste foram plotados e estimado o regime permanente de desgaste. Os valores de coeficiente de desgaste após o regime permanente de desgaste foram considerados como o coeficiente de desgaste do material.

4.4 Análises e avaliação de resultados

Após os testes, para avaliar as superfícies foram utilizadas as técnicas de microscopia eletrônica de varredura (MEV, ZEISS Evo MA10®) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS, TESCAN Vega3).

CAPÍTULO V

5. AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS PARA REDE DE ESGOTO

5.1 Caracterizações eletroquímicas

5.1.1 Material da tubulação sem revestimento - Aço A36

A análise do comportamento eletroquímico do aço ASTM A36 foi realizada com base em medidas de Potencial de Circuito Aberto (OCP), curva de Polarização Potenciodinâmica (CPP) e Espectroscopia de Impedância Eletroquímica (EIE), utilizando como parâmetros: faixa de frequência de 10 kHz à 0,01 Hz e V_{rms} de ± 10 mV, em diferentes tempos de imersão (1 h, 24 h, 48 h, 120 h e 168 h). O gráfico de OCP, assim como a curva de polarização, o diagrama de Nyquist e os diagramas de Bode para o aço são apresentadas na Figura 5.1. A Tabela 5.1 apresenta os parâmetros eletroquímicos obtidos para o aço ASTM A36 em meio de esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 apresentados na Figura 5.1.

A partir da análise do gráfico mostrado na Figura 5.1 - a), foi possível observar que, ao longo de 1 h, o valor de OCP do aço ASTM A36 se deslocou para valores mais positivos, se estabilizando em -0,424 V. Esse aumento, representado pela curva crescente, pode ser atribuído à formação de um filme de produtos de corrosão na superfície do aço que agem como protetores da mesma corrosão, visível após as caracterizações.

Os valores de OCP estabilizado e de resistência à transferência de carga ($36,49 \Omega \cdot cm^2$) indicam que o aço ASTM A36 apresenta baixa resistência à corrosão, com um único arco capacitivo em Nyquist Figura 5.1 - c), relacionado à interface metal/eletrólito.

Essas observações são corroboradas pelo valor de I_{corr} em torno de $7,65 \times 10^{-5} A \cdot cm^{-2}$ (Tabela 5.1), cujo valor está dentro da faixa de I_{corr} encontrada na literatura para este mesmo aço em meio ácido ($8,8 \times 10^{-6} A \cdot cm^{-2}$ em meio de H_2SO_4 2 mol L^{-1} , Pradityana *et al.* (2024); $6,3 \times 10^{-5}$ em meio de HCl 1 mol L^{-1} , Gapsari *et al.* (2022)). Os valores de taxa de corrosão obtidos por Gapsari *et al.* (2022), também corroboram com os dados experimentais deste trabalho, com um valor de 7,4 mm/ano.

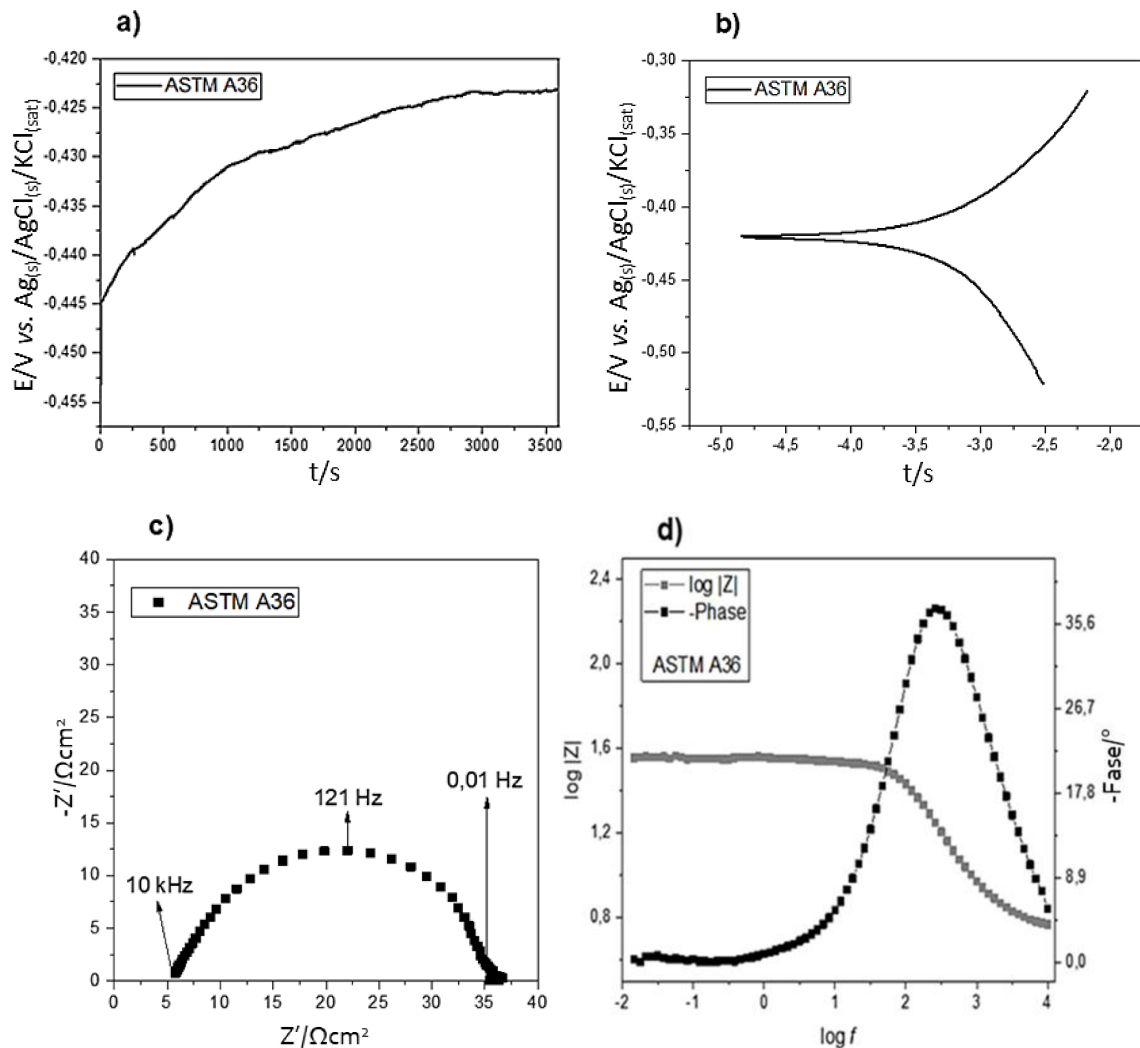


Figura 5.1. Caracterizações eletroquímicas do aço ASTM A36 sem revestimento em meio esgoto laboratorial contendo 5% de H₂SO₄. Sendo: a) Gráfico de OCP; b) CPP; c) diagrama de Nyquist; e d) Diagrama de Bode. Fonte próprio autor.

Tabela 5.1 – Parâmetros eletroquímicos obtidos para o aço ASTM A36 em meio de esgoto laboratorial contendo 5% de H₂SO₄, comparado com alguns valores encontrados na literatura.

Amostra	R _{ct} [Ω.cm ²]	OCP [V]	E _{corr} calculado [V]	I _{corr} [A cm ⁻²]	Taxa de corrosão [mm/ano]
ASTM A36 - 5% H ₂ SO ₄	36,49	-0,424	-0,421	7,65 x 10 ⁻⁵	8,89
ASTM A36 - 0,5 M H ₂ SO ₄ (≈5%) (FERREIRA <i>et al.</i> , 2013)	~19,34	—	-0,495	~8.11×10 ⁻⁴	~9.41
ASTM A36 - corrosão geral, H ₂ SO ₄ concentrado (~93.5%) (SILVA BARBOSA <i>et al.</i> , 2016)	—	—	—	—	~0,342 x 10 ⁻³
ASTM A36 - em solução ácida similar com 5% H ₂ SO ₄ (BONFIL; VELEVA; ESCALANTE-GARCIA, 2025)	—	-0,363	—	—	—

A taxa de corrosão obtida para o aço ASTM A36 no meio contendo 5% de H_2SO_4 foi de 8,89 mm/ano, evidenciando elevada agressividade do meio e rápida degradação do substrato metálico. Esse valor apresenta boa concordância com os resultados reportados por Ferreira et al. (2013), que obtiveram taxa de corrosão de $\approx 9,41$ mm/ano para o mesmo material em solução de 0,5 M H_2SO_4 , indicando comportamento corrosivo semelhante em meios ácidos comparáveis. Em contrapartida, Silva Barbosa et al. (2016) reportaram taxas significativamente inferiores, da ordem de $\approx 0,342$ $\mu\text{m}/\text{ano}$, demonstrando que a taxa de corrosão pode variar substancialmente em função das condições experimentais adotadas, tais como concentração do eletrólito, temperatura, regime hidrodinâmico, composição química do meio e formação de produtos de corrosão na superfície. No presente trabalho, a elevada taxa de corrosão observada está associada aos baixos valores de resistência de polarização ($R_t = 36,49 \Omega \cdot \text{cm}^2$) e à elevada densidade de corrente de corrosão ($7,65 \times 10^{-5} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$), indicando baixa resistência à transferência de carga e ausência de formação de camada protetora estável. Esses resultados confirmam a severidade do meio simulado e reforçam a necessidade do emprego de revestimentos protetores em aplicações envolvendo sistemas de esgoto e ambientes contendo espécies ácidas agressivas. De modo geral, a proximidade entre os resultados obtidos neste trabalho e aqueles reportados na literatura valida a metodologia experimental empregada, demonstrando sua capacidade de reproduzir condições corrosivas representativas para avaliação de materiais e revestimentos em ambientes severos. De maneira geral, o aço ASTM A36 apresenta baixa resistência à corrosão em meio ácido, como é o caso do esgoto. Esse é um comportamento característico de aços baixo carbono expostos diretamente a eletrólitos agressivos sem revestimentos ou inibidores.

5.1.2 Zebtron®

A análise do comportamento eletroquímico do revestimento Zebtron® foi realizada com base em medidas de OCP) e EIE, utilizando como parâmetros: faixa de frequência de 100 kHz à 0,1 Hz e frequência de perturbação de ± 20 mV, em diferentes tempos de imersão (1h, 24h, 48h, 120h e 168h). A escolha do valor de ± 20 mV se deu pela alta resistividade dos materiais analisados, os quais não demonstravam tendências ao serem submetidos à baixas frequências de perturbação.

5.1.2.1 Zebtron® - Espessura 1,00 mm

O gráfico de OCP, assim como os Diagramas de Nyquist e os Diagramas de Bode para as amostras recobertas por Zebtron®, com espessura aproximada de 1,00 mm, são mostrados na Figura 5.2, Figura 5.3, Figura 5.4 e Figura 5.5.

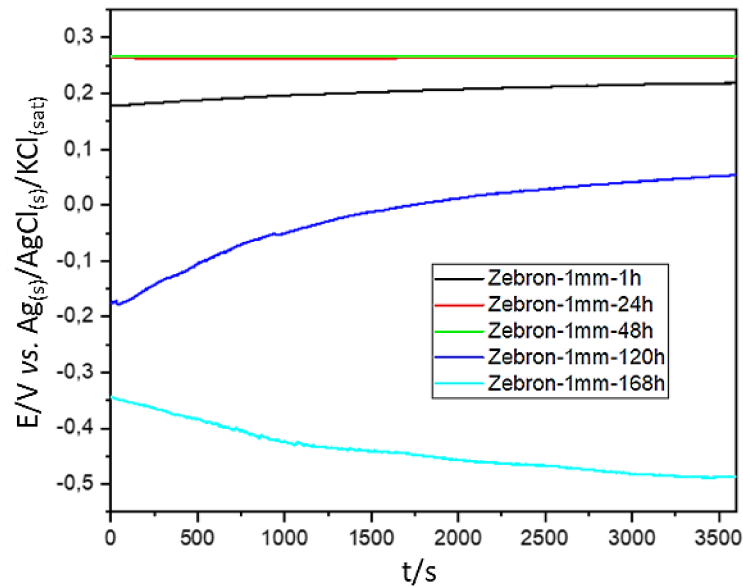


Figura 5.2. Variações do OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron, em espessura de $\approx 1,00$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.

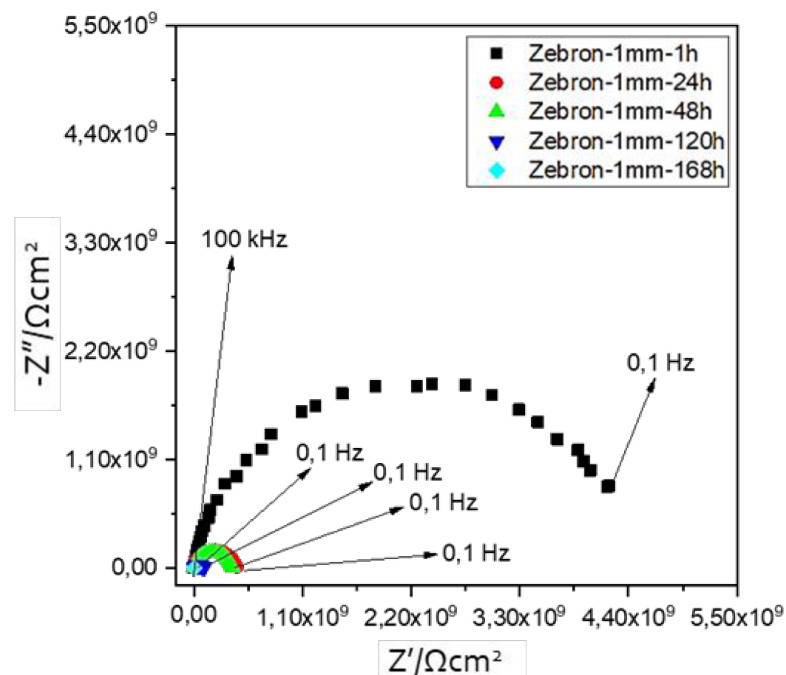


Figura 5.3. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de $\approx 1,00$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de freqüência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

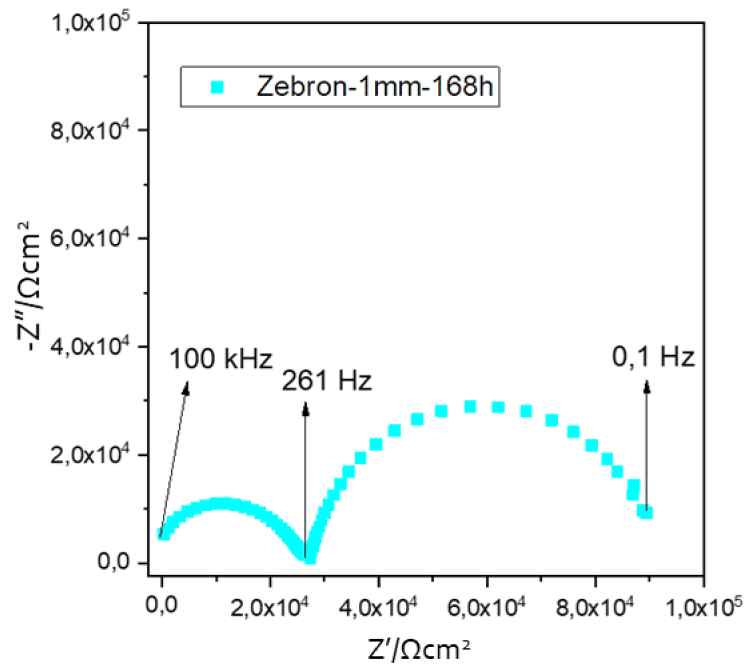


Figura 5.4. Diagrama de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por Zebbron® em espessura de $\approx 1,00$ mm após 168 h de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

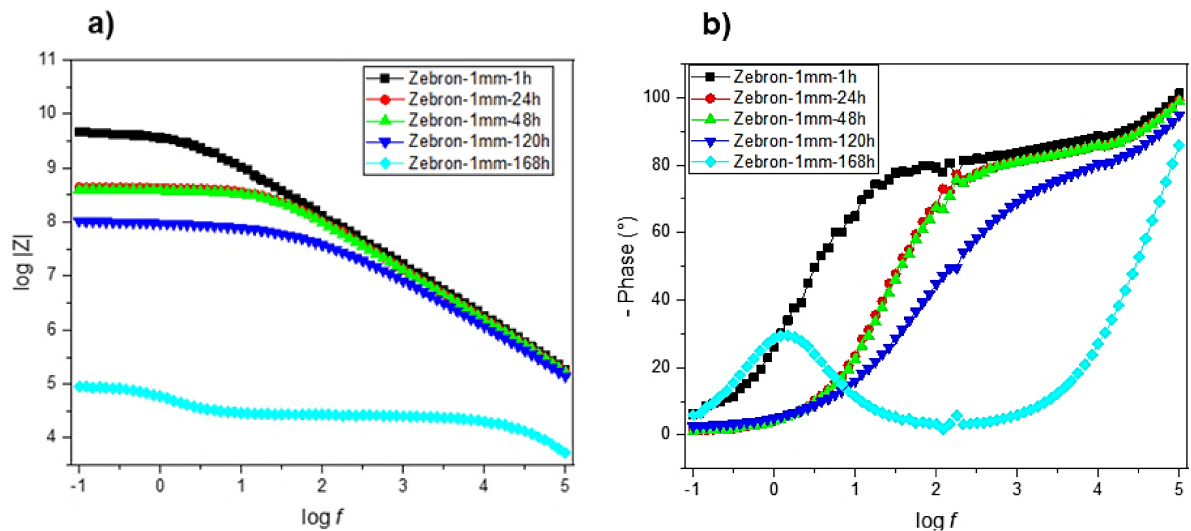


Figura 5.5. Diagramas de Bode a) $\log f \times \log |Z|$ e b) $\log f \times$ ângulo de fase para o aço ASTM A36 revestido por Zebbron® em espessura de ≈ 1 mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

As curvas de OCP (Figura 5.2) do aço revestido com Zebron 1mm cujo tempo de imersão no esgoto variou de 1 h a 120 h observa-se uma estabilização do OCP em um valor mais positivo do que o inicial, indicando uma redução da atividade anódica do aço, ou seja uma menor tendência à dissolução metálica (Tabela 5.2), Em sistemas de aços revestidos, isso pode significar que o eletrólito ainda não permeou o revestimento e portanto o revestimento polimérico está atuando como uma boa barreira física para o eletrólito. Já em 168 h de imersão, observa-se uma tendência de queda do potencial para -0,488 V, indicando, possivelmente, o “intumescimento” do revestimento, sugerindo uma modificação inicial da camada protetora e aumento da atividade anódica da superfície do aço.

Tabela 5.2 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de $\approx 1,00$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.

Tempo de imersão [h]	OCP [V]
1	0,219
24	0,266
48	0,266
120	0,054
168	-0,488

O comportamento observado nas curvas de OCP é condizente com o observado nos diagramas de Nyquist, os quais apresentam um único semicírculo entre 1 h e 120 h, conforme a Figura 5.3, indicando apenas um processo eletroquímico, com uma única constante de tempo, evidenciando que o eletrólito ainda não permeou o revestimento e que nestes tempos não houve ocorrência de reação entre o meio e o substrato (WANG *et al.*, 2022), enquanto em 168 h de imersão, conforme visualizado na Figura 5.4, há o surgimento de um segundo semicírculo, representando dois diferentes processos com duas constantes de tempo diferentes, sugerindo o aparecimento de falhas no revestimento e a interação do eletrólito com a superfície do aço (LAZANAS; PRODROMIDIS, 2023).

Ainda, de acordo com os valores expostos na Figura 5.5, pode-se afirmar que o maior valor de resistência do *coating* para a amostra de aço revestida com Zebron®-1mm foi obtida em 1 h de imersão, sendo $4,59 \times 10^9 \Omega.cm^2$. Após 24 e 48 h de imersão, a resistência do revestimento obtido foi de $4,35 \times 10^8 \Omega.cm^2$ e $3,87 \times 10^8 \Omega.cm^2$, respectivamente, e em 120 h houve um decréscimo do valor para $9,16 \times 10^7 \Omega.cm^2$. Em 168 h houve uma queda acentuada para $2,93 \times 10^4 \Omega.cm^2$. A resistência do revestimento é um parâmetro diretamente associado à sua capacidade de atuar como barreira física e dielétrica contra a penetração de eletrólitos.

No início da imersão (1 h), o valor extremamente elevado de resistência ($4,59 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$) indica que o revestimento Zebron® está íntegro, com baixa permeabilidade e alta coesão molecular, impedindo a passagem de íons corrosivos até o substrato metálico. Esse comportamento é típico de revestimentos poliméricos densos e bem aderidos, como os poliuretanos elastoméricos, que apresentam estrutura reticulada e baixa absorção inicial de água.

Com o aumento do tempo de imersão, observa-se uma redução gradual e, posteriormente, acentuada da resistência do revestimento, atingindo $2,93 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ em 168 h. Essa queda pode ser explicada por fenômenos de intumescimento (swelling) e permeação do eletrólito no interior da matriz polimérica. A presença de H_2SO_4 a 5% acelera esse processo, pois o ácido sulfúrico é altamente higroscópico e capaz de interagir com grupos polares do polímero, aumentando sua constante dielétrica e reduzindo a resistividade. Além disso, a difusão de espécies agressivas pelo revestimento pode gerar microcanais ou inclusões de água, conforme descrito nos modelos de percolação e Maxwell (STAUFFER & AHARONY). Outro fator relevante é a sinergia entre degradação química e tensões internas. A absorção de eletrólito provoca variações dimensionais no filme, que podem gerar microtrincas ou perda localizada de aderência, facilitando o avanço da solução até a interface aço/revestimento. Esse processo é evidenciado pela mudança no perfil eletroquímico observado nos diagramas de Nyquist, enquanto nos primeiros tempos há um único semicírculo (indicando barreira íntegra), em 168 h surgem dois semicírculos, caracterizando a ocorrência simultânea de processos no revestimento e no substrato metálico.

Apesar da queda expressiva da resistência, a eficiência de inibição à corrosão permanece alta (99,91%), o que indica que, mesmo degradado, o revestimento ainda oferece proteção significativa em relação ao aço exposto diretamente ao meio. Contudo, a tendência observada sugere que, em exposições prolongadas, a integridade do Zebron® pode ser comprometida, especialmente em regiões sujeitas a abrasão ou variações térmicas, acelerando a perda da função barreira.

Os diagramas de Bode confirmam a tendência observada nos diagramas de Nyquist. Todos os sistemas, entre 1 h e 120 h apresentam características de um resistor associado a um capacitor, conforme descrito por Lazanas; Prodomidis (2023) e Panigrahi et. Al (2024). A partir da análise da Figura 6.a), é possível verificar que nos tempos de imersão de 1 h, 24 h e 48 h o valor da magnitude da impedância total ($|Z|$) em baixas frequências é alto, indicando boa resistência à corrosão das amostras. Em 120 h o valor de $|Z|$ começa a decair, e em 168h é significativamente mais baixo, reforçando a hipótese de degradação da proteção superficial.

A Figura 5.6 - b) apresenta a análise do comportamento capacitivo do sistema através do ângulo de fase. Inicialmente, próximo de 80° , indica um sistema altamente capacitivo,

dominado por um único processo. Após 120 horas, o ângulo de fase diminui, sugerindo a presença de múltiplos processos ou uma perda de homogeneidade na camada superficial, possivelmente devido a alterações na estrutura superficial do material (LAZANAS; PRODROMIDIS, 2023). Após 168 horas, observa-se a ocorrência de dois processos eletroquímicos distintos, indicando uma degradação parcial da camada protetora e a exposição do substrato subjacente (XU *et al.*, 2024; WANG *et al.*, 2022). Essas mudanças refletem a evolução do sistema ao longo do tempo, evidenciando diferentes mecanismos de degradação e alterações na integridade do revestimento ao longo do tempo de imersão no eletrólito.

5.1.2.2 Zebron® - Espessura 0,50 mm

O gráfico de OCP, assim como os Diagramas de Nyquist e os Diagramas de Bode para as amostras recobertas por Zebron®, com espessura aproximada de 0,50 mm, são mostrados nas Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8.

Os resultados de OCP mostram um comportamento inicial menos estável para as amostras recobertas com Zebron®-0,5mm do que o observado para o material Zebron®-1mm, apesar da pequena variação. Os valores de OCP, disponibilizados na Tabela 5.3, mostram que, em tempo de imersão de 1 h o valor de OCP observado foi de -0,318 V, variando para -0,383 V em 24 h e -0,346 V em 48 h. A variação observada entre 1 h e 24 h sugere um processo de intumescimento do revestimento, seguido por um deslocamento do OCP para valores mais positivos em 48 h, o que pode indicar a formação produto de produtos que melhoram o comportamento à corrosão no substrato. No entanto, em 120h e 168h, há uma queda e estabilização em valores mais negativos (-0,363 V e -0,378 V, respectivamente), sugerindo perda parcial desses produtos na superfície devido provavelmente à instabilidade desses produtos formados anteriormente.

É importante ressaltar ainda a diferença entre os perfis encontrados em Nyquist para as amostras revestidas com Zebron®-1mm e Zebron®-0,5mm. No primeiro caso, o surgimento de dois semicírculos ocorreu somente no tempo de 168 h de imersão, indicando o contato do eletrólito com o substrato de aço, em um segundo processo eletroquímico observado nos diagramas de Bode. Já para a amostra recoberta com Zebron®-0,5mm, todos os perfis obtidos mostram a presença de dois semicírculos, confirmados pelos diagramas de Bode apresentados na Figura 5.8. É possível observar na Figura 5.8 - a) que os valores da magnitude de impedância total ($|Z|$) em baixa frequência são baixos quando comparados ao revestimento Zebron®-1mm, indicando menor proteção do revestimento na espessura de 0,5mm em todos os tempos de imersão. Entretanto, para esta espessura, quando o aço revestido estava em contato com eletrólito após 120 h, houve um aumento no valor de $|Z|$,

refletindo maior impedância à passagem de corrente e, portanto, melhora da resistência à corrosão. O perfil em 168h é semelhante ao de 120 h, sugerindo que o material alcança um patamar de estabilidade nesse intervalo.

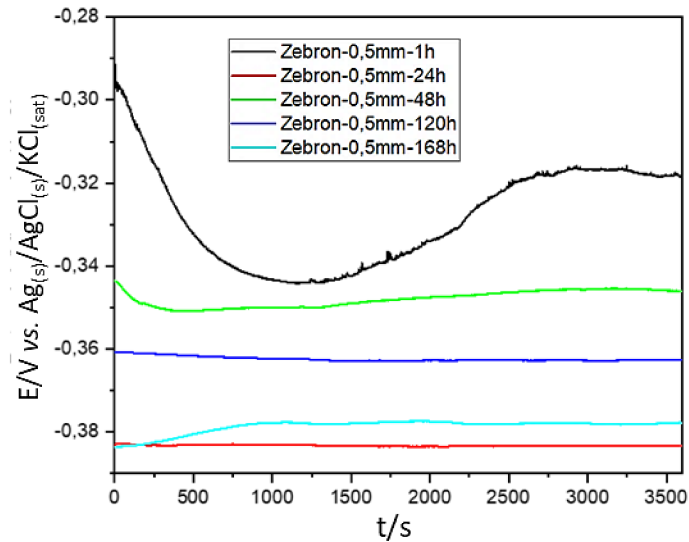


Figura 5.6. Variações do OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebtron®, em espessura de $\approx 0,50$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.

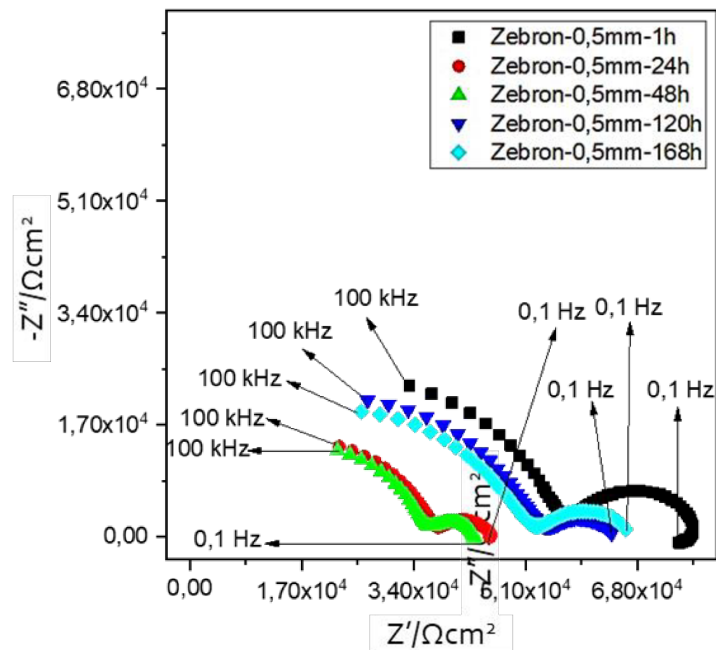


Figura 5.7. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por Zebtron® em espessura de $\approx 0,50$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

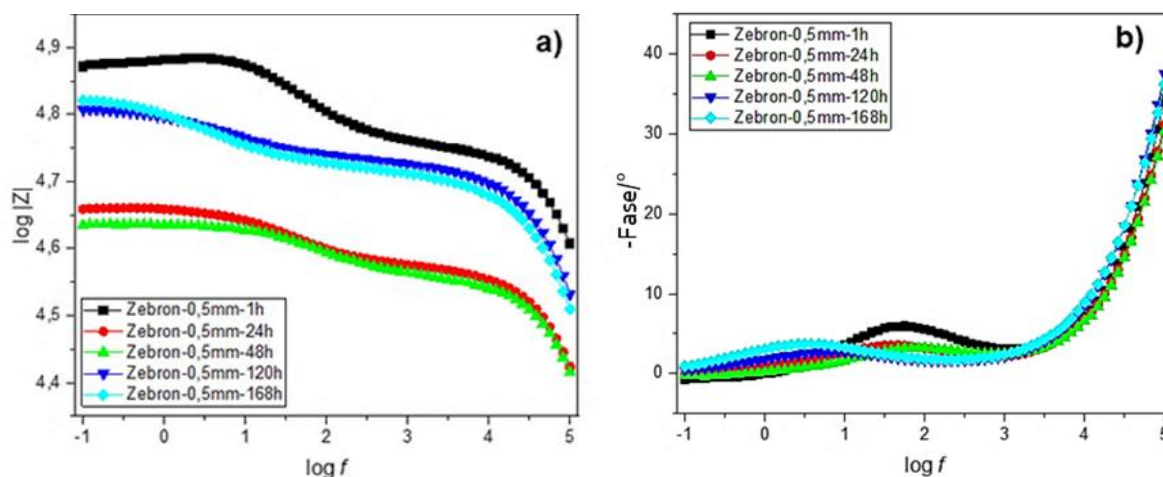


Figura 5.8. Diagramas de Bode a) $\log f \times \log |Z|$ e b) $\log f \times \text{ângulo de fase}$ para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de $\approx 0,50$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

Tabela 5.3 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de $\approx 0,50$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.

Tempo de imersão [h]	OCP [V]
1	-0,318
24	-0,383
48	-0,346
120	-0,363
168	-0,378

O comportamento do ângulo de fase (Figura 5.8 - b) reforça as observações anteriores. Nos primeiros tempos, os processos são pouco definidos e de baixa amplitude, refletindo comportamento mais resistivo. A partir de 120 h, ocorre o surgimento de um processo capacitivo, compatível com a presença de produtos de corrosão (os óxidos e hidróxidos de ferro). Ao final de 168 h, o perfil do ângulo de fase mantém-se similar ao observado em 120 h, porém com um pico mais alargado na região de 10^3 a 10^1 Hz, com largura a meia altura superior à esperada para um único processo de relaxação RC. Este alargamento indica a sobreposição de duas constantes de tempo, atribuídas à resposta dielétrica do revestimento τ_c e ao processo de transferência de carga na interface metal/eletrólito τ_{dl} . A deconvolução por ajuste com circuito equivalente confirmou a presença de dois elementos CPE-R em paralelo

sem, contudo, comprometer completamente a proteção oferecida até esse período de exposição.

De maneira geral, a análise comparativa dos dados de OCP, Nyquist e Bode sugere que a espessura do material influencia diretamente na resistência do revestimento, no tempo necessário para o intumescimento do polímero e no início da degradação do substrato metálico.

5.1.2.3 Zebron® - Espessura 0,25 mm

O gráfico de OCP, assim como os Diagramas de Nyquist e os Diagramas de Bode para as amostras recobertas por Zebron®, com espessura aproximada de 0,25 mm, são mostrados nas Figura 5.9, Figura 5.10 e Figura 5.11.

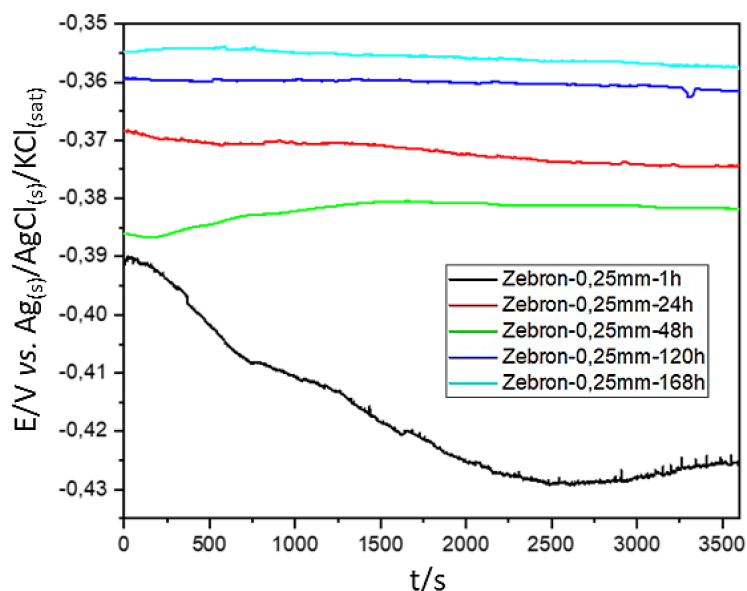


Figura 5.9. Variações do OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de $\approx 0,25$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.

As curvas de OCP mostram valores mais negativos para 1 h de imersão, com -0,452 V. Esse comportamento sugere baixa resistência inicial à corrosão, e mesmo com o tempo de imersão, a melhora é sutil, alcançando potenciais de -0,374 V em 24 h de imersão e sofrendo pouca variação nos demais tempos, conforme Tabela 5.4. Em 48 h de imersão o valor de OCP observado foi de -0,382 V, com um pequeno acréscimo para -0,362 V e -0,358 V em 120 h e 168 h de imersão, respectivamente.

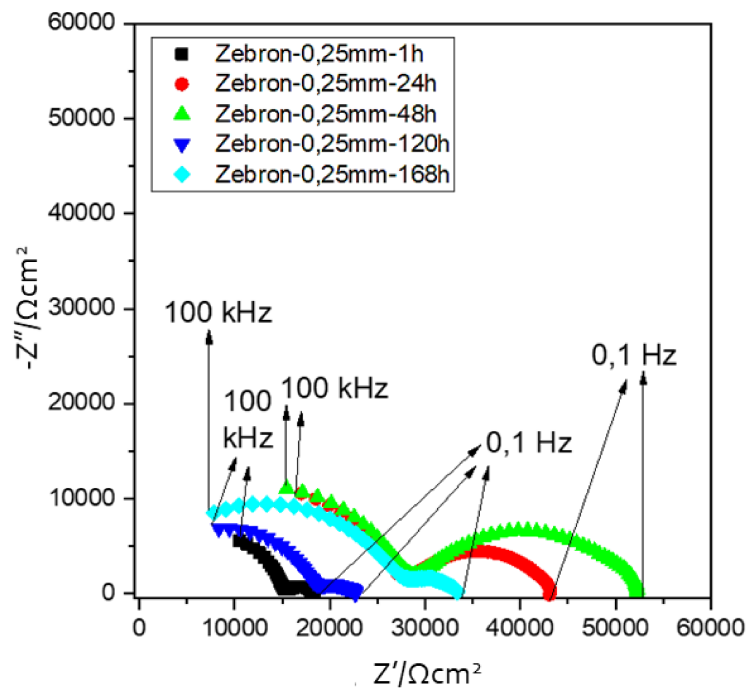


Figura 5.10. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por Zebbron® em espessura de $\approx 0,25$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

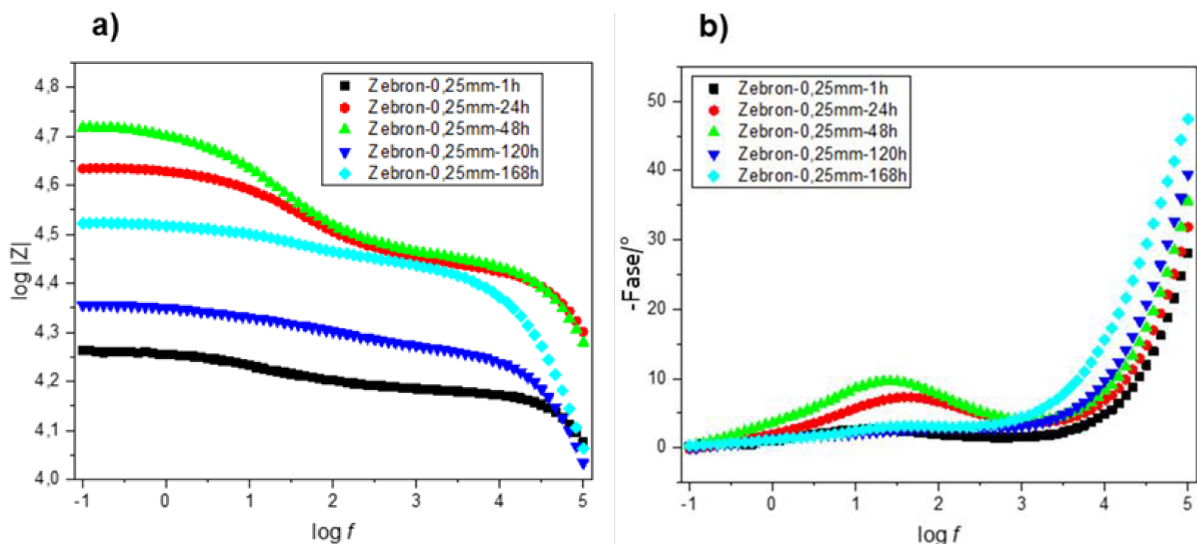


Figura 5.11. Diagramas de Bode a) $\log f \times \log |Z|$ e b) $\log f \times$ ângulo de fase, para o aço ASTM A36 revestido por Zebbron® em espessura de $\approx 0,25$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

Tabela 5.4 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de $\approx 0,25$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 .

Fonte próprio autor.

Tempo de imersão [h]	OCP [V]
1	-0,452
24	-0,374
48	-0,382
120	-0,362
168	-0,358

Nos diagramas de Nyquist, apresentados na Figura 5.10, percebe-se que há um aumento nos valores de R_{ct} para todas as idades, exceto para 120 h, em relação ao tempo de 1 h de imersão. O maior valor de R_{ct} obtido para a espessura de 0,25 mm foi em 48 h de imersão, com $2,89 \times 10^4 \Omega \cdot cm^2$. De maneira geral, o aumento do raio é discreto ao longo do tempo, com tendência de estabilização sem ganhos expressivos de resistência à transferência de carga. Isso demonstra que a espessura reduzida compromete a formação de uma barreira eficiente à corrosão, o que se verifica também pela formação de um segundo semicírculo em todos os tempos de imersão, devido à interação do eletrólito com o substrato (Wang *et al.*, 2022; Lazanas e Prodromidis, 2023). Para esta espessura são observadas pequenas variações na eficiência de inibição à corrosão, conforme Tabela 5.5, compatíveis com os valores de R_{ct} na ordem de $10^4 \Omega \cdot cm^2$.

Tabela 5.5 – Valores de R_{ct} e de Eficiência de Inibição à Corrosão para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de $\approx 0,25$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.

Tempo de imersão [h]	R_{ct} [$\Omega \cdot cm^2$]	EI [%]
1	$1,48 \times 10^4$	99,83
24	$2,78 \times 10^4$	99,91
48	$2,89 \times 10^4$	99,91
120	$1,88 \times 10^4$	99,86
168	$2,80 \times 10^4$	99,91

Os diagramas de Bode, apresentados na Figura 5.11, mostram valores de $|Z|$ baixos em toda a faixa de frequência, com valores inferiores aos observados para Zebron®-0,5mm e 1mm. Ainda que se note um aumento sutil de $|Z|$ em 168h, os dados indicam um sistema

predominantemente resistivo com baixa barreira capacitiva, confirmando a fragilidade da camada formada, o que pode ser atribuído a um aumento da taxa de corrosão e a presença de defeitos, causados pelo contato prolongado com o eletrólito (Wang *et al.*, 2022; Zeng *et al.*, 2023).

Os ângulos de fase reforçam a interpretação anterior. Tal comportamento é compatível com superfícies com baixa proteção à corrosão e elevada atividade eletroquímica, de maneira que a análise eletroquímica do Zebron®-0,25mm revelou um comportamento distinto em comparação às espessuras maiores, com indicações de maior susceptibilidade à corrosão e menor eficiência de formação de camada de produtos de corrosão protetores. Tanto as medições de OCP quanto as caracterizações por EIE mostram tendências de degradação precoce para esta espessura em meio de esgoto laboratorial.

Os resultados obtidos para as três espessuras de Zebron® demonstram uma clara correlação entre a espessura do material e seu desempenho eletroquímico. Amostras mais espessas (1,00 mm) formam camadas de produtos de corrosão mais protetoras à corrosão, exibindo maiores resistências à corrosão, enquanto espessuras reduzidas (0,50 e 0,25 mm) comprometem a eficiência barreira. A evolução temporal das curvas também confirma que a geração de produtos de corrosão protetores é mais eficaz quando há maior volume de material, o que é decisivo para aplicações anticorrosivas.

5.1.3 Alcatrão de hulha (AH)

A análise do comportamento eletroquímico do alcatrão de hulha foi realizada com base em medidas de OCP e EIE, utilizando como parâmetros: faixa de frequência de 100 kHz à 0,1 Hz e V_{rms} de ± 20 mV, em diferentes tempos de imersão (1h, 24h, 48h, 120h e 168h).

5.1.3.1 Alcatrão de hulha - Espessura 1,00 mm

O gráfico de OCP, assim como os Diagramas de Nyquist e os Diagramas de Bode para as amostras recobertas por alcatrão de hulha, com espessura aproximada de 1,00 mm, são mostrados nas Figura 5.12, Figura 5.13, Figura 5.14, Figura 5.15 e Figura 5.16.

Conforme observado na Tabela 5.6, nos primeiros três tempos de imersão em esgoto laboratorial os valores de OCP apresentam pouca variação, com -0,240 V em 1 h, -0,227 V em 24 h e -0,248 V em 48 h. Essa estabilidade inicial indica a presença uma camada estável e protetora sobre a superfície do material, sendo neste caso o revestimento de alcatrão de hulha. A partir de 120h, observa-se uma queda abrupta no OCP para -0,479 V, indicando um processo de desestabilização da interface eletrodo/eletrólito. Esse deslocamento para potenciais mais negativos é indicativo de uma perda da proteção superficial. Em 168h, há um

deslocamento para $-0,367$ V, um potencial mais positivo, o que pode estar associado a uma geração de produtos de corrosão como a formação de uma camada de óxido no aço.

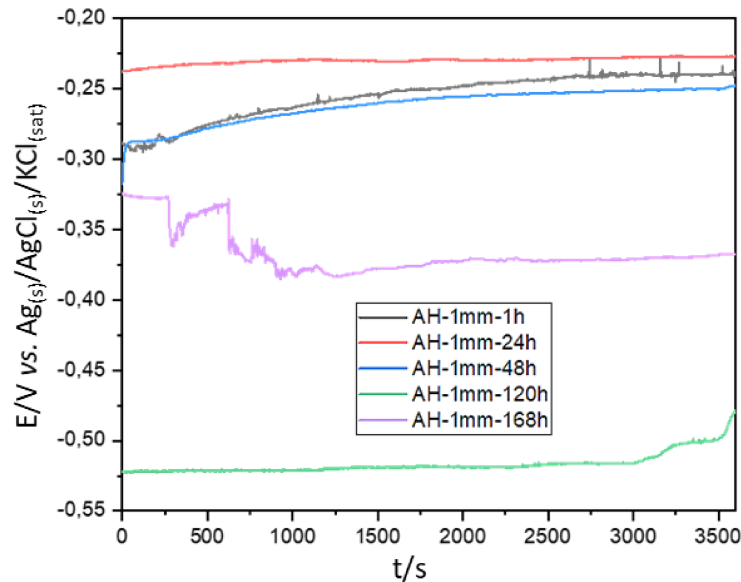


Figura 5.12. Variações do OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 1,00$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.

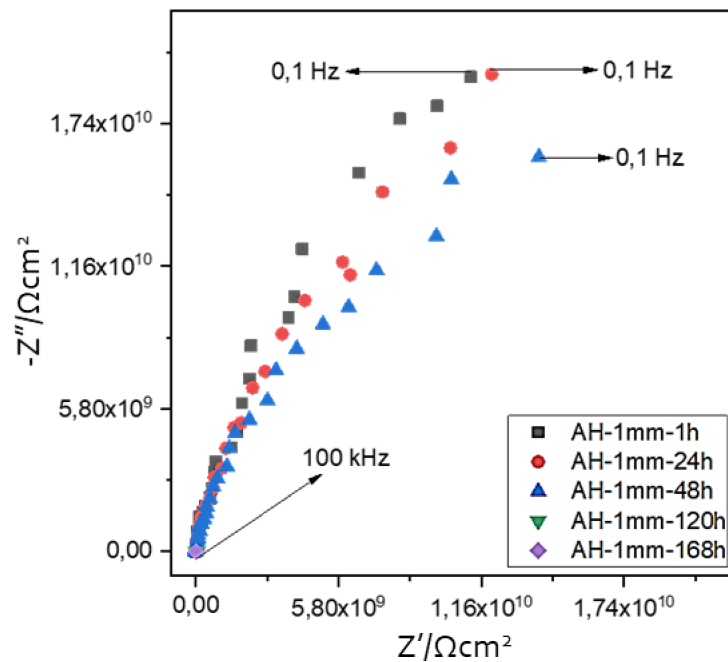


Figura 5.13. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de $\approx 1,00$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

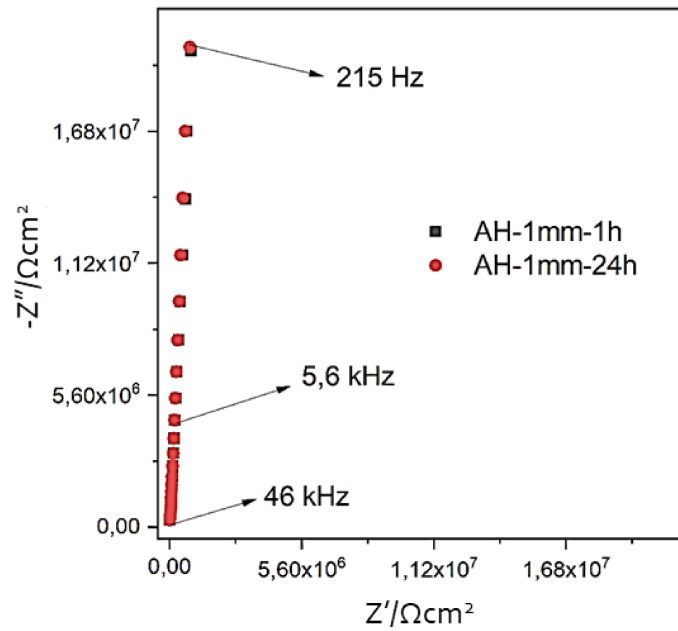


Figura 5.14. Diagramas de Nyquist isolados para o aço recoberto com alcatrão de hulha em espessura de 1 mm após 1 h e 24 h de imersão em esgoto laboratorial. Fonte próprio autor.

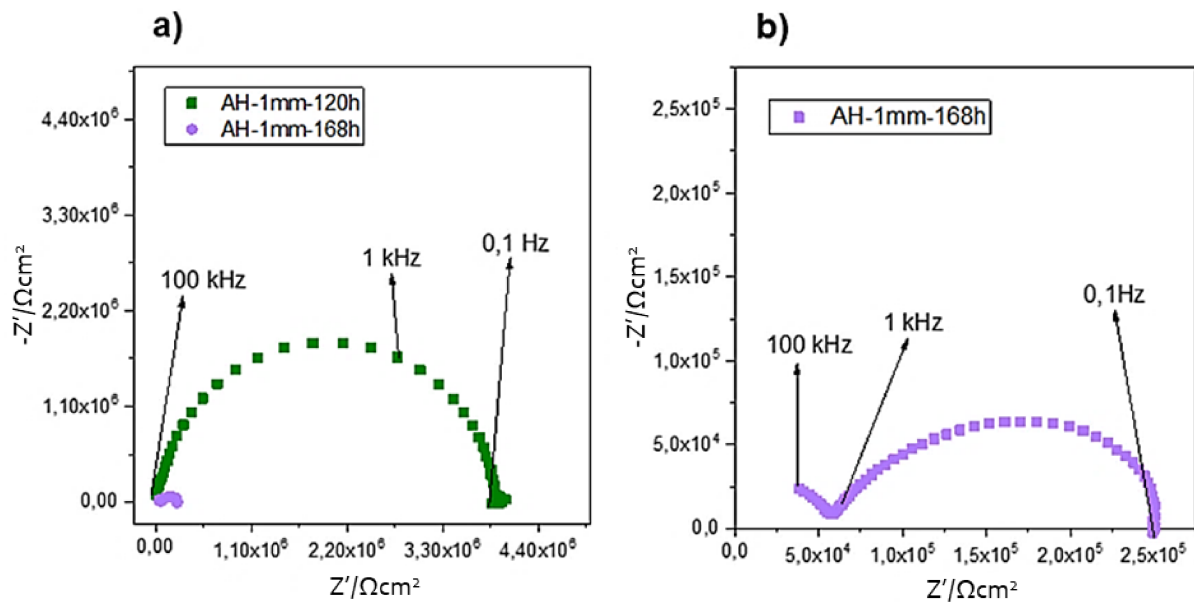


Figura 5.15. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de $\approx 1,00$ mm, a) após 120 h e b) após 168 h de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

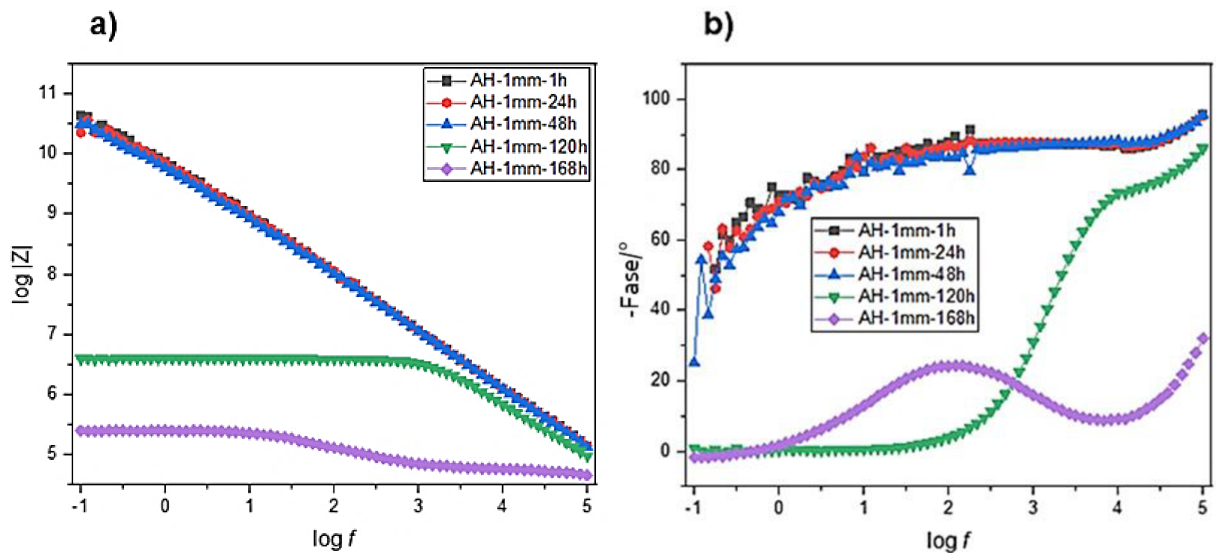


Figura 5.16. Diagramas de Bode a) $\log f \times \log |Z|$ e b) $\log f \times$ ângulo de fase para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de $\approx 1,00$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H₂SO₄. Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

Tabela 5.6 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 1,00$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H₂SO₄. Fonte próprio autor.

Tempo de imersão [h]	OCP [V]
1	-0,240
24	-0,227
48	-0,248
120	-0,479
168	-0,367

Pela análise dos diagramas de Nyquist do aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha com espessura de $\approx 1,00$ mm (Figura 5.13, Figura 5.14 e Figura 5.15), percebe-se um comportamento predominantemente capacitivo nos tempos de imersão iniciais (1 h até 48 h), sem tendência à formação de semicírculos, o que indica que o revestimento está cumprindo seu papel de barreira física, impedindo a difusão de íons e gases para o aço e portanto evitando a ocorrência de reações redox entre o aço e o eletrólito (LAZANAS; PRODROMIDIS 2023; PANIGRAHI; MAL; BHATTACHARYYA, 2024). Esse comportamento capacitivo apresentado pelo diagrama de Nyquist do aço revestido com o alcatrão de hulha com 1 mm nos tempos de imersão de 1 e 24 h (Figura 5.14), indicando que até o tempo de 24 h o

revestimento está intacto e bloqueando a penetração de íons (LAZANAS; PRODRONIDIS 2023; PANIGRAHI; MAL; BHATTACHARYYA, 2024; WANG *et al.*, 2022; XU *et al.*, 2024). No entanto, a partir de 120 h de imersão, observa-se a formação de um semicírculo e a partir de 168 h há dois semicírculos, indicando uma degradação do revestimento e o início do processo corrosivo do aço ASTM A 36. Esse mesmo comportamento foi observado nos diagramas de Nyquist do aço revestido com 0,5 e 0,25 mm de espessura de alcatrão de hulha (Figura 5.7 e Figura 5.10). De maneira geral, pode-se dizer que a barreira física formada pelo revestimento é comprometida (degradada) quando o aço ASTM A36 revestido é submetido a longos tempos de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 .

5.1.3.2 Alcatrão de hulha - Espessura 0,50 mm

O gráfico de OCP, assim como os Diagramas de Nyquist e os Diagramas de Bode para as amostras recobertas por alcatrão de hulha, com espessura aproximada de 0,5 mm, são mostrados nas Figura 5.17, Figura 5.18, Figura 5.19 e Figura 5.20.

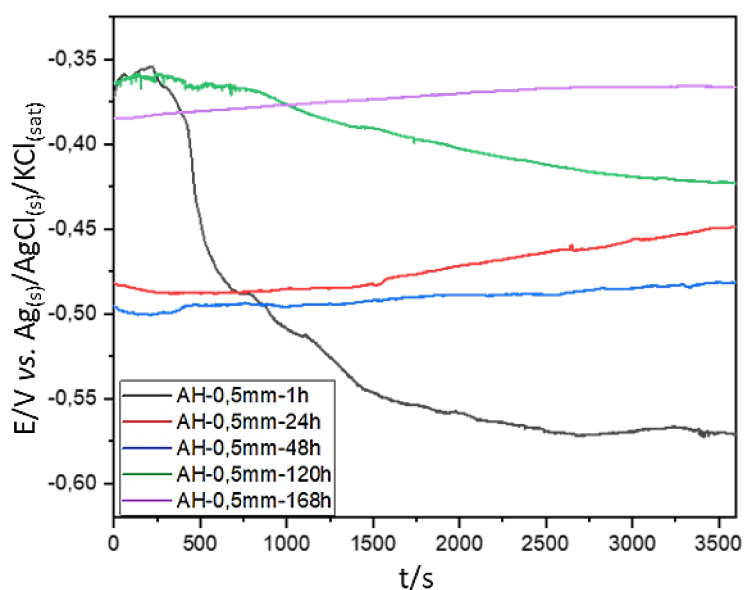


Figura 5.17. Variações do OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 0,50$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.

Para a amostra AH-0,5mm é possível observar uma tendência de deslocamento do valor de OCP para potenciais mais positivos ao longo do tempo de imersão, conforme apresentado na Tabela 5.7. Em 1 h o valor de OCP obtido foi de -0,571 V, apresentando um deslocamento para -0,449 V em 24 h, -0,481 V em 48 h, -0,423 V em 120 h e -0,366 V em 168 h de imersão em esgoto laboratorial.

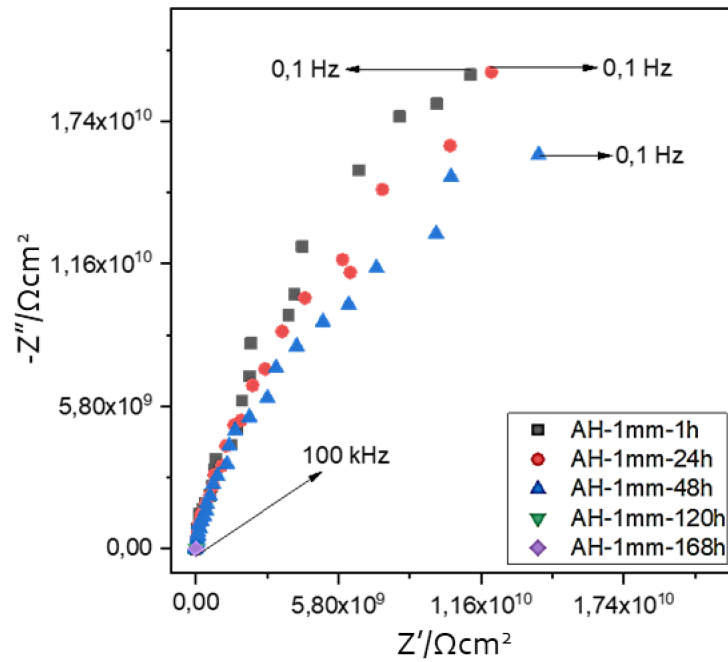


Figura 5.18. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de $\approx 0,50$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

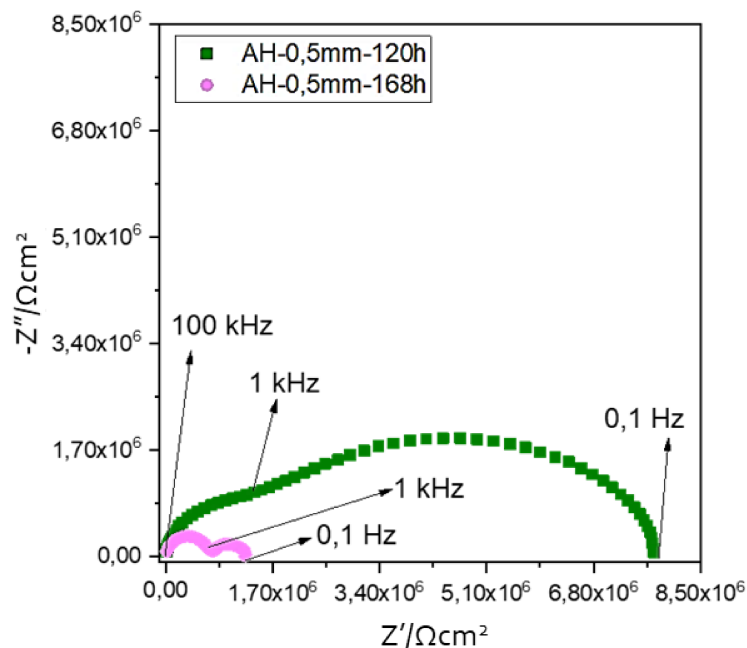


Figura 5.19. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de $\approx 0,50$ mm, após 120 h e 168 h de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Amplitude de perturbação de $\pm 0,2$ mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

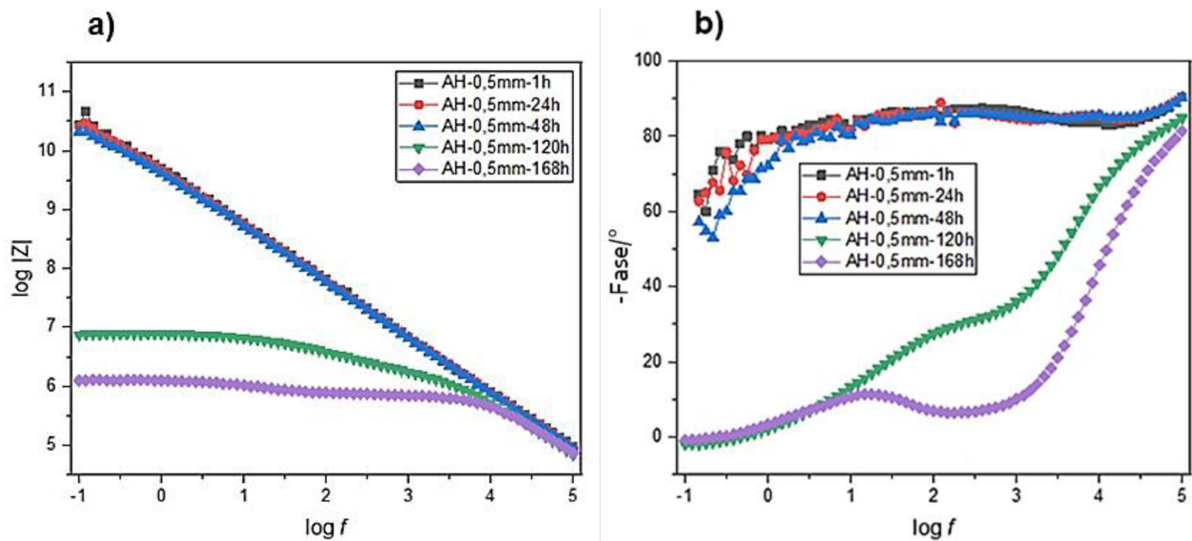


Figura 5.20. Diagramas de Bode a) $\log f \times \log |Z|$ e b) $\log f \times$ ângulo de fase para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de $\approx 0,50$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H₂SO₄. Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

Tabela 5.7 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 0,50$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H₂SO₄. Fonte próprio autor.

Tempo de imersão [h]	OCP [V]
1	-0,571
24	-0,449
48	-0,481
120	-0,423
168	-0,366

Observa-se na Figura 5.17 uma tendência geral de deslocamento dos valores de potencial no sentido nobre (mais positivo) ao longo das primeiras 48 horas de exposição, seguida por uma relativa estabilização ou por uma leve oscilação nos tempos mais prolongados (120 e 168 horas). Essa dinâmica sugere um processo gradual de geração e consolidação de filme de produtos de corrosão protetivos em eventuais discontinuidades ou poros do revestimento, onde o eletrólito tenha acesso ao substrato metálico. A proteção conferida por esse filme se mostra mais pronunciada e estável até as 48 horas, indicando um período de efetividade máxima do mecanismo de barreira. Ainda que os resultados para 120 e 168 horas revelem uma ligeira alteração no perfil da curva — possivelmente associada à saturação, micro-ruptura ou alteração na morfologia da camada —, os valores de potencial

mantêm-se em patamares que indicam uma proteção residual significativa, evidenciando a durabilidade do sistema revestido mesmo em exposições mais longas.

A análise dos diagramas de Bode (Figura 5.20) é condizente com o observado em Nyquist, com valores de $|Z|$ elevados até 48 h de imersão e decréscimo significativo em 120 h e 168 h, avaliando-se em baixas frequências. Da mesma forma, o ângulo de fase das amostras varia de próximo a 80° para 1 h, 24 h e 48 h, decaindo significativamente para 120 h e 168 h, com a presença de dois processos de relaxação nesta faixa de frequência investigada.

5.1.3.3 Alcatrão de hulha - Espessura 0,25 mm

O gráfico de OCP, assim como os Diagramas de Nyquist e os Diagramas de Bode para as amostras recobertas por alcatrão de hulha, com espessura aproximada de 0,25 mm, são mostrados nas Figura 5.21, Figura 5.22, Figura 5.23 e Figura 5.24.

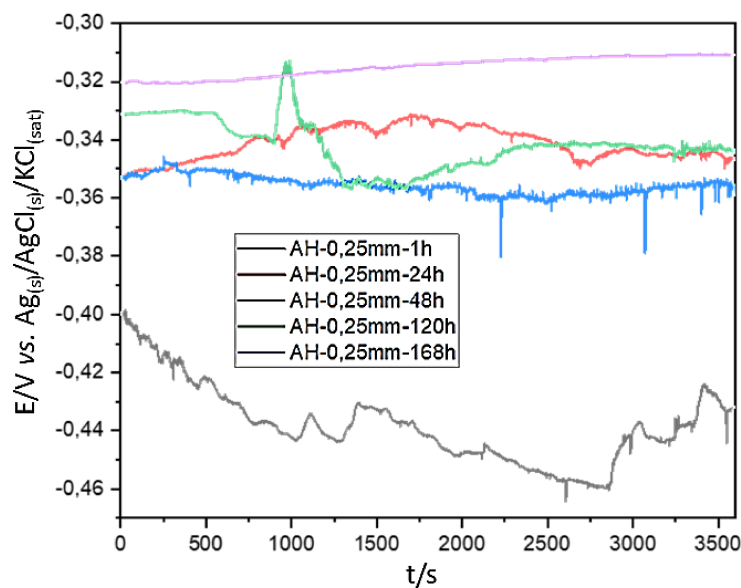


Figura 5.21. Variações do OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 0,25$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H₂SO₄. Fonte próprio autor.

O perfil observado para as curvas demonstra a ocorrência de diversos ruídos, possivelmente ocasionados pela ocorrência contínua de reações na superfície do eletrodo durante a medição do OCP. Conforme apresentado na Tabela 5.8, os valores de OCP observados para a amostra AH-0,25mm foram de -0,470 V em 1 h, -0,347 V em 24 h, -0,357 V em 48 h, -0,345 V em 120 h e -0,311 V em 168 h.

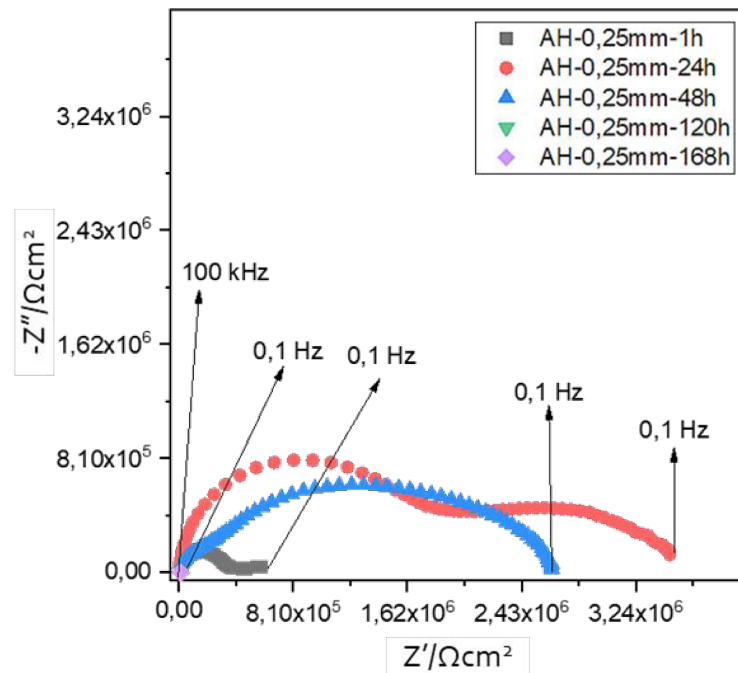


Figura 5.22. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de $\approx 0,25$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

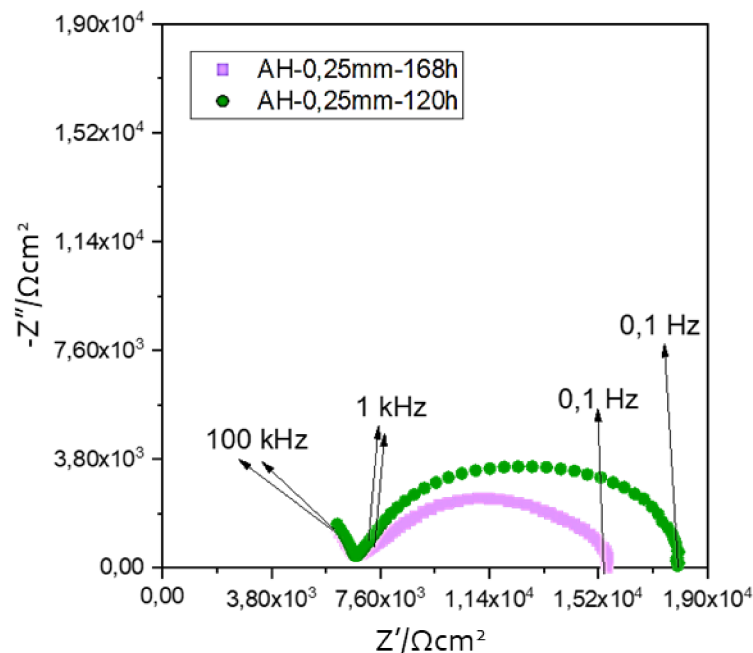


Figura 5.23. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de $\approx 0,25$ mm, após 120 h e 168 h de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

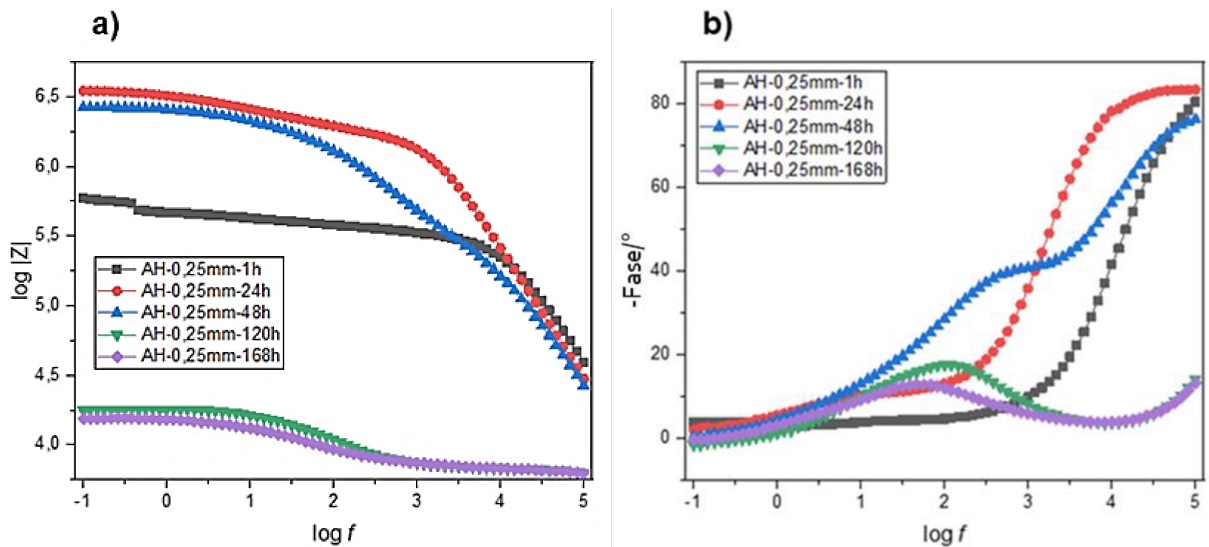


Figura 5.24. Diagramas de Bode a) $\log f \times \log |Z|$ e b) $\log f \times$ ângulo de fase para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de $\approx 0,25$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

Tabela 5.8 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 0,25$ mm ao longo do tempo de imersão em esgoto laboratorial contendo 5% de H_2SO_4 . Fonte próprio autor.

Tempo de imersão [h]	OCP [V]
1	-0,470
24	-0,347
48	-0,357
120	-0,345
168	-0,311

Ao associar a avaliação dos gráficos de OCP e diagramas de Nyquist aos diagramas de Bode, observa-se que AH-0,25mm apresenta estabilidade somente até 24 h de imersão. Os valores de $|Z|$ em baixas frequências para todos os tempos são significativamente menores que para as demais espessuras avaliadas, assim como o ângulo de fase se encontra abaixo de 15° para todas as amostras em tempos superiores à 24 h de imersão.

É possível concluir, de maneira geral, que a espessura do revestimento afeta significativamente a capacidade protetiva oferecida, tornando mais rápida a degradação do material e o contato do meio com o substrato metálico.

A partir da extrapolação do semicírculo da região de altas frequências em direção à baixas frequências no eixo da impedância real dos diagramas de Nyquist do aço ASTM A 36

revestido com Zebron ou com Alcatrão de hulha (em diferentes espessuras) obtém-se os valores de resistência do *coating* e CPE do *coating*, caracterizando a interface revestimento/eletrólito para os tempos de imersão iniciais (1 e 24 h). Para os tempos de imersão mais longos (120 e 168 h) observa-se dois semicírculos: um na região de altas frequências, caracterizando a interface revestimento/eletrólito e o outro na região de baixas frequências, caracterizando a interface aço/eletrólito. Nas Tabela 5.9 e Tabela 5.10 estão mostrados os dados obtidos (resistência do *coating*, CPE do *coating*, resistência à transferência de carga do aço e CPE do aço) por EIE dos aços ASTM A 36 revestimentos com Zebron ou Alcatrão de hulha e com diferentes espessuras.

Tabela 5.9 – Parâmetros eletroquímicos obtidos para o aço revestido com Zebron® em diferentes espessuras (1,00, 0,50, 0,25 mm) e tempos de imersão em esgoto laboratorial.

Fonte próprio autor.

Zebron 1 mm	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{coating} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_{coating}	n	R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE ($\text{S} \cdot \text{s}^n$)	n	X²
1h	0	$5,63 \times 10^9$	$1,37 \times 10^{-11}$	0,915	-	-	-	$6,9 \times 10^{-5}$
24h	0	$5,44 \times 10^8$	$2,45 \times 10^{-11}$	0,894	-	-	-	$1,9 \times 10^{-5}$
48h	0	$4,79 \times 10^8$	$2,29 \times 10^{-11}$	0,905	-	-	-	$9,9 \times 10^{-5}$
120h	0	$1,17 \times 10^8$	$1,79 \times 10^{-10}$	0,740	-	-	-	$9,2 \times 10^{-5}$
168 h	0	$3,12 \times 10^4$	$6,74 \times 10^{-10}$	0,920	$8,22 \times 10^4$	$2,68 \times 10^{-6}$	0,933	$6,1 \times 10^{-5}$

Zebron 0,5 mm	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{coating} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_{coating}	n	R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE 2 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	n	X²
1h	0	$7,43 \times 10^4$	$1,25 \times 10^{-10}$	0,854	$2,83 \times 10^4$	$3,63 \times 10^{-7}$	0,787	$1,3 \times 10^{-5}$
24h	0	$4,64 \times 10^4$	$3,20 \times 10^{-10}$	0,813	$1,09 \times 10^4$	$2,63 \times 10^{-6}$	0,655	$1,0 \times 10^{-4}$
48h	0	$4,49 \times 10^4$	$3,04 \times 10^{-10}$	0,816	$9,19 \times 10^3$	$1,56 \times 10^{-6}$	0,681	$9,0 \times 10^{-5}$
120h	0	$6,58 \times 10^4$	$2,76 \times 10^{-10}$	0,817	$1,53 \times 10^4$	$8,46 \times 10^{-6}$	0,520	$4,3 \times 10^{-4}$
168 h	0	$6,40 \times 10^4$	$4,54 \times 10^{-10}$	0,782	$2,16 \times 10^4$	$9,99 \times 10^{-6}$	0,511	$4,5 \times 10^{-4}$

Zebron 0,25mm	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{coating} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_{coating}	n	R_{ct} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE 2 ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	n	X²
1h	0	$1,85 \times 10^4$	$2,89 \times 10^{-10}$	0,877	$2,39 \times 10^3$	$3,24 \times 10^{-6}$	0,526	$6,7 \times 10^{-5}$
24h	0	$3,39 \times 10^4$	$2,89 \times 10^{-10}$	0,842	$2,05 \times 10^4$	$1,89 \times 10^{-6}$	0,616	$2,0 \times 10^{-4}$
48h	0	$3,50 \times 10^4$	$3,99 \times 10^{-10}$	0,829	$3,13 \times 10^4$	$1,97 \times 10^{-6}$	0,611	$2,4 \times 10^{-4}$
120h	0	$2,24 \times 10^4$	$8,28 \times 10^{-10}$	0,825	$6,28 \times 10^3$	$11,6 \times 10^{-5}$	0,453	$4,7 \times 10^{-5}$
168 h	0	$3,32 \times 10^4$	$1,69 \times 10^{-9}$	0,779	$8,93 \times 10^3$	$7,24 \times 10^{-6}$	0,486	$2,1 \times 10^{-4}$

Tabela 5.10 – Parâmetros eletroquímicos obtidos para o alcatrão de hulha em diferentes espessuras e tempos de imersão em esgoto laboratorial.

AH	Rs	R _{coating}	CPE _{coating}	n	R _{ct}	CPE 2	n	X ²
1 mm	(Ω.cm ²)	(Ω.cm ²)	(S.s ⁿ)		(Ω.cm ²)			
1h	0	-	1,64 x 10 ⁻¹⁰	0,968	-	-	-	1,0 x 10 ⁻⁵
24h	0	-	1,57 x 10 ⁻¹⁰	0,961	-	-	-	9,9 x 10 ⁻⁵
48h	0	3,58 x 10 ¹⁰	2,19 x 10 ⁻¹⁰	0,928	-	-	-	5,3 x 10 ⁻⁵
120h	0	4,93 x 10 ⁶	3,66 x 10 ⁻¹⁰	0,932	-	-	-	8,3 x 10 ⁻⁶
168 h	0	2,61 x 10 ⁵	8,77x10 ⁻¹⁰	0,681	6,95 x 10 ⁴	5,48 x 10 ⁻¹¹	0,905	1,8 x 10 ⁻³

AH	Rs	R _{coating}	CPE _{coating}	n	R _{ct}	CPE 2	n	X ²
0,5 mm	(Ω.cm ²)	(Ω.cm ²)	(S.s ⁿ)		(Ω.cm ²)			
1h	0	8,27 x 10 ¹⁰	2,83 x 10 ⁻¹⁰	0,949	-	-	-	3,1 x 10 ⁻⁵
24h	0	4,05 x 10 ¹⁰	1,82 x 10 ⁻¹⁰	0,944	-	-	-	7,8 x 10 ⁻³
48h	0	3,58 x 10 ¹⁰	2,19 x 10 ⁻¹⁰	0,928	-	-	-	2,2 x 10 ⁻³
120h	0	1,64 x 10 ⁶	5,33 x 10 ⁻¹¹	0,949	7,87 x 10 ⁶	1,93 x 10 ⁻⁹	0,733	4,29 x 10 ⁻⁵
168 h	0	8,85 x 10 ⁴	4,43 x 10 ⁻¹¹	0,931	6,83 x 10 ⁵	4,55 x 10 ⁻⁸	0,790	4,3 x 10 ⁻³

AH	Rs	R _{coating}	CPE _{coating}	n	R _{ct}	CPE 2	n	X ²
0,25 mm	(Ω.cm ²)	(Ω.cm ²)			(Ω.cm ²)			
1h	0	9,22 x 10 ⁵	6,67 x 10 ⁻¹¹	0,947	3,60 x 10 ⁵	1,44 x 10 ⁻⁷	0,605	4,7 x 10 ⁻³
24h	0	2,02 x 10 ⁶	7,27 x 10 ⁻¹¹	0,972	2,32 x 10 ⁶	3,01 x 10 ⁻⁸	0,640	4,6 x 10 ⁻³
48h	0	2,79 x 10 ⁶	6,98 x 10 ⁻¹¹	0,656	1,82 x 10 ⁵	1,04 x 10 ⁻¹⁰	1,02	2,7 x 10 ⁻⁵
120h	0	8,34 x 10 ⁴	7,76 x 10 ⁻¹⁰	0,904	1,44 x 10 ⁴	1,16 x 10 ⁻⁶	0,72	1,6 x 10 ⁻³
168 h	0	8,38 x 10 ⁴	7,79 x 10 ⁻¹⁰	0,792	1,12 x 10 ⁴	3,68 x 10 ⁻⁶	0,618	7,2 x 10 ⁻⁴

Os circuitos elétricos propostos para as amostras de Zebron®, representados na Figura 5.25, descrevem em a) um circuito do tipo [R(RQ)], representando a resistência da solução, a resistência do *coating* e um elemento de fase constante referente ao revestimento. O CPE representa a resposta capacitiva da camada de revestimento, considerando a rugosidade da superfície, porosidade ou outras heterogeneidades. Esse circuito se ajustou para as amostras de Zebron®, na espessura de 1 mm, nos tempos de 1h, 24h, 48h e 120h de imersão em esgoto laboratorial. Em b) um circuito do tipo [R(RQ)(RQ)], com dois processos eletroquímicos em série. Este circuito descreve a resistência da solução e dois semicírculos, sendo o primeiro representativo da resistência do *coating* e de seu elemento de fase constante, e o segundo referente à resistência à transferência de carga e elemento de fase constante do aço ASTM

A36. Este circuito se ajustou para as amostras de Zebron®, na espessura de 1 mm, no tempo de 168 h de imersão em esgoto sintético, e para as espessuras de 0,5 mm e 0,25 mm em todos os tempos de imersão em esgoto laboratorial.

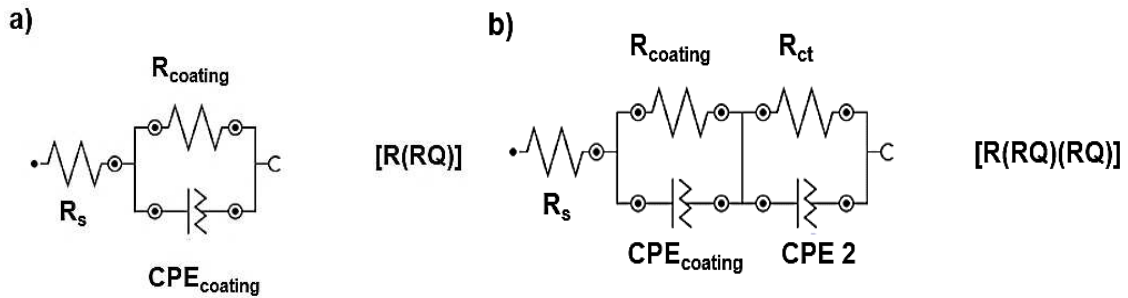


Figura 5.25. Circuitos eletroquímicos obtidos a partir dos ajustes das amostras recobertas por Zebron®. Fonte próprio autor.

Ao analisar a Tabela 5.9, as mudanças nos parâmetros de resistência do *coating* e suas implicações, observa-se para o aço revestido com 1 mm de zebron uma redução significativa no valor da resistência do *coating* (revestimento), que diminui de $5,63 \times 10^9$ ohms.cm² para $3,12 \times 10^4$ ohms.cm² após 168 horas de imersão em esgoto doméstico. Essa diminuição indica uma degradação do *coating*, possivelmente devido à ação corrosiva dos componentes presentes no esgoto, como ácidos, sais e microrganismos, que podem comprometer a integridade do revestimento ao longo do tempo.

Por outro lado, o aumento do parâmetro CPE (Elemento de fase constante) de $1,37 \times 10^{-11}$ a $6,74 \times 10^{-10}$ sugere que o revestimento está se tornando mais poroso ou que há um aumento na área superficial efetiva, permitindo maior interação com o eletrólito (intumescimento do revestimento pelo eletrólito). O CPE representa a resposta capacitiva da camada de revestimento, considerando a rugosidade da superfície, porosidade ou outras heterogeneidades. Este comportamento é comum em processos de deterioração, onde a formação de produtos de corrosão ou a alteração na estrutura do revestimento contribuem para essa mudança na capacitância aparente. Além disso, a variação do índice n , que passa de 0,915 para 0,920, indica uma mudança na dispersão dos processos de carga, sugerindo uma alteração na heterogeneidade da superfície ou na distribuição dos defeitos no *coating*. Essa pequena variação pode estar relacionada à formação de poros ou fissuras, facilitando a penetração de agentes corrosivos e acelerando a degradação do revestimento. Já para o aço revestido com o mesmo revestimento comercial, porém em uma espessura menor de (0,5 mm) não apresentou uma variação tão significativa ao longo do tempo de imersão, mantendo a resistência do *coating*, em $6,40 \times 10^4$ ohms.cm² e o valor de CPE do *coating* em $4,54 \times 10^{-10}$ e o n próximo de 0,8, indicando uma pequena variação na estrutura do revestimento após 168

h imerso em esgoto doméstico. Já o revestimento Zebron de 0,25 mm aplicado sobre o aço ASTM A36 em meio de esgoto doméstico apresentou uma resistência do revestimento, registrada como $3,32 \times 10^4$ ohms.cm², indicando uma resistência inicial relativamente elevada, sugerindo uma camada de proteção eficaz contra a corrosão. No entanto, após 168 horas de imersão, observa-se um aumento no valor do CPE para $1,69 \times 10^{-9}$ e um valor de n próximo de 0,8. Este aumento no CPE sugere que o revestimento está se tornando mais poroso ou apresentando trincas, permitindo a penetração do eletrólito, que é comum em ambientes de esgoto devido à presença de compostos corrosivos e agentes oxidantes. A presença de trincas ou porosidade facilita a passagem de íons e eletrólitos, acelerando o processo de corrosão do aço subjacente. A resistência à transferência de carga do aço, avaliada em $8,9 \times 10^3$ ohms.cm², demonstra que o aço começa a oxidar devido à penetração do eletrólito através do revestimento comprometido.

Além disso, observa-se para o aço revestido com 0,5 e 0,25 mm de Zebron, independente do tempo de imersão em esgoto doméstico, um segundo CPE atribuído à interface aço/eletrólito, em torno de 10^{-6} , e o valor de n de 0,5 sugerindo uma deterioração progressiva do revestimento que protege o aço ASTM A36, refletindo uma maior facilidade de transferência de carga do aço e uma maior difusão de íons, moléculas ou gases através do revestimento. Esses dados evidenciam que, apesar da resistência inicial do revestimento, a exposição prolongada ao meio de esgoto compromete sua integridade, levando à formação de trincas e porosidade que facilitam a corrosão do aço. Portanto, a análise de espectroscopia de impedância eletroquímica revela a necessidade de melhorias no revestimento a base de Zebron ou de estratégias adicionais de proteção para garantir a durabilidade do aço ASTM A36 em ambientes agressivos como o esgoto doméstico.

A Figura 5.26 apresenta os circuitos elétricos utilizados para descrever o comportamento das amostras recobertas por alcatrão de hulha. Dessa forma, é representado em a) um circuito do tipo [R(QW)], representando a resistência da solução, um elemento de fase constante referente ao *coating* e um warburg, que corrobora o comportamento observado nos diagramas de Nyquist e diagramas de Bode para o aço recoberto por alcatrão, em espessura de 1 mm, nos tempos de imersão de 1h e 24h em esgoto laboratorial. O elemento de Warburg refere-se à existência de uma barreira do *coating*, ou seja, a presença de Warburg indica que a reação é controlada pela transferência de massa em regiões de médias para baixas frequências. Em b) um circuito do tipo [R(RQ)], representando a resistência da solução, a resistência do *coating* e um elemento de fase constante referente ao revestimento. Esse circuito se ajustou para as amostras de AH, na espessura de 1 mm, nos tempos de 48 h e 120 h de imersão em esgoto laboratorial, e para a espessura de 0,5 mm em 1 h ,24 h e 48 h de imersão em esgoto laboratorial. Têm-se, ainda, em c) um circuito do tipo [R(RQ)(RQ)], com

dois processos eletroquímicos em série. Este circuito descreve a resistência da solução e dois semicírculos, sendo o primeiro representativo da resistência do *coating* e de seu elemento de fase constante, e o segundo referente à resistência à transferência de carga e elemento de fase constante do aço ASTM A36. Este circuito se ajustou para as amostras de AH, na espessura de 1 mm, no tempo de 168 h de imersão em esgoto sintético, para a espessura de 0,5 mm em 120 h e 168 h de imersão, e para espessura de 0,25 mm em todos os tempos de imersão em esgoto laboratorial.

Na Tabela 5.10 observa-se para o aço ASTM A36 revestido com 0,25 mm de alcatrão de hulha uma diminuição significativa dos valores de resistência do revestimento de $9,22 \times 10^5$ ohms.cm² para $8,38 \times 10^4$ ohms.cm² após 168 h de imersão. A constante de capacidade de dispersão (CPE) apresentou uma redução de $6,67 \times 10^{-11}$ para $7,79 \times 10^{-10}$, refletindo alterações na interface entre o revestimento e o substrato, possivelmente devido à formação de poros ou fissuras. A mudança no parâmetro n , de 0,947 para 0,792, indica uma transição de um comportamento mais ideal para um comportamento mais dispersivo, reforçando a hipótese de degradação do revestimento ao longo do tempo. Os gráficos de dispersão comparativos mostrando as tendências nos valores de R_{coating} e CPE dos revestimentos nas diferentes espessuras estão apresentados no Anexo 2.

Por último, esses resultados evidenciam que o revestimento de alcatrão de hulha, embora inicialmente eficaz, sofre deterioração significativa após exposição prolongada, comprometendo sua capacidade de proteção.

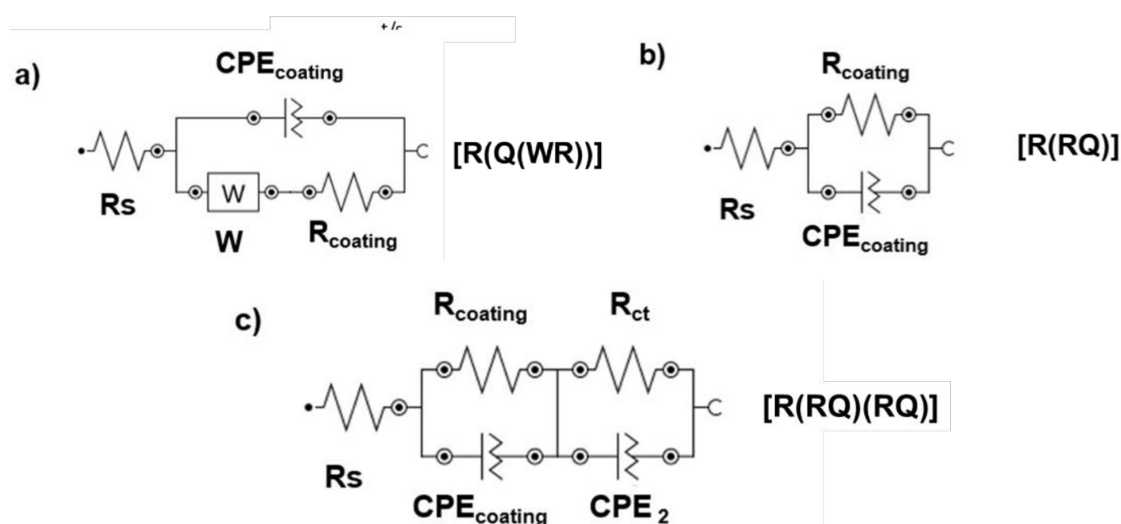


Figura 5.26. Circuitos eletroquímicos obtidos a partir dos ajustes das amostras recobertas por Alcatrão de hulha. Fonte próprio autor.

5.1.4 Conclusões parciais e resumo

O revestimento Zebron® com espessura de aproximadamente 1,00 mm demonstrou excelente desempenho eletroquímico ao longo de 168 h de imersão. Até 120 h, manteve alta estabilidade de OCP, comportamento capacitivo dominante e elevada resistência do revestimento, com eficiências de inibição à corrosão acima de 99,99%. Em 168 h, os sinais de degradação se tornaram evidentes, com o decréscimo dos valores de resistência do revestimento e o aparecimento de duas constantes de tempo (RQ) no diagrama de Nyquist e o deslocamento do OCP para valores mais negativos. Ainda assim, o sistema manteve eficácia protetiva elevada, mostrando-se um bom revestimento frente ao meio de esgoto laboratorial contendo 5% de H₂SO₄. Com metade da espessura (0,50 mm), o recobrimento Zebron® apresentou comportamento similar nos primeiros tempos, mas menos estável. A formação precoce de dois semicírculos em Nyquist e a menor magnitude de |Z| nos diagramas de Bode indicam maior suscetibilidade à interação com o eletrólito. Ainda assim, os valores de resistência do revestimento e EI mantêm-se elevados (99,93–99,96%), e há indícios de resistência à corrosão a partir de 120 h. A barreira é menos eficiente que na espessura de 1 mm, mas ainda funcional. A espessura mais fina (0,25 mm) apresentou o pior desempenho entre as amostras revestidas por Zebron®. O OCP do aço revestido permaneceu em valores negativos ao longo de todo o tempo de imersão no eletrólito. A presença contínua de dois semicírculos em Nyquist, baixos valores de |Z| e ângulos de fase inferiores confirmam a perda precoce da função barreira no meio avaliado. Embora a EI permaneça numericamente elevada, isso se deve à baixa R_{ct} do aço ASTM A36, não refletindo proteção real. O revestimento não oferece resistência duradoura à corrosão nessa espessura.

A presença constante de dois semicírculos no diagrama de Nyquist, associados juntamente com baixos valores de |Z| e ângulos de fase reduzidos, indicaram que o revestimento a base de Zebron não oferece uma proteção efetiva ao aço analisado.

O revestimento alcatrão de hulha de 1,00 mm apresentou um comportamento capacitivo até 48 h, com OCPs estáveis e impedância elevada. A partir de 120 h, a queda acentuada dos valores de OCP e a presença de duas constantes de tempo no diagrama de Nyquist indicaram perda de integridade do revestimento comercial e o início do processo corrosivo do aço. Ainda assim, a resistência do revestimento em 120 h foi elevada ($3,91 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}^2$) e a EI permaneceu acima de 99,95% até 168 h. É um sistema eficaz, mas com degradação evidente após longas exposições. Na espessura de 0,50 mm o alcatrão de hulha demonstrou comportamento comparável ao AH-1mm até 48 h de imersão. O OCP do aço revestido com mostrou alcatrão de hulha apresentou um deslocamento para valores positivos ao longo do tempo de imersão e o comportamento capacitivo prevaleceu até o tempo de imersão de 48 h.

Em 120 h e 168 h surgem duas constantes de tempo, visíveis tanto nos diagramas de Nyquist quanto em Bode, mas com resistência do revestimento ainda elevada, na ordem de 10^6 e 10^4 , respectivamente. Esse revestimento se mostrou mais estável que o com a espessura de 1,00 mm sob as mesmas condições, sugerindo melhor desempenho relativo, possivelmente associado a melhor adesão ou menor rigidez. O desempenho do alcatrão de hulha com 0,25 mm é inferior aos demais. Após 24 h, observou-se queda significativa do valor de resistência do *coating*, atingindo o valor de $6,80 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ em 120 h e 168 h. O revestimento nesta espessura é inadequado para exposição prolongada em ambientes agressivos.

Para ambos os revestimentos, a espessura influencia significativamente a eficácia da proteção. Espessuras de 1,00 mm resultaram em maior capacidade protetiva do substrato e maior estabilidade de OCP. À medida que a espessura é reduzida para 0,50 mm e, principalmente, 0,25 mm, há maior suscetibilidade à degradação precoce, perda de coesão da barreira e surgimento de dois semicírculos, indicando os processos referentes ao revestimento e a ocorrência do contato do eletrólito com o aço, formando um filme de óxido de ferro que age como protetor.

Para o revestimento Zebron®, a perda significativa de desempenho só é notável em 168 h na espessura de 1,00 mm, enquanto o alcatrão de hulha com a mesma espessura apresenta perda mais evidente a partir de 120 h.

5.2 Avaliação dos revestimentos submetidos ao desgaste abrasivo

5.2.1 Desgaste abrasivo via roda de borracha úmido

A avaliação da resistência dos revestimentos poliméricos Zebron® e alcatrão de hulha ao desgaste abrasivo foi realizada com base na técnica de roda borra úmido (ASTM G105). Os parâmetros representam a situação de campo, conforme discutido na seção 3.4.2. Foi usada a solução de esgoto reproduzida laboratorialmente conforme a solução da Tabela 3.3, foi adicionado 5% de H_2SO_4 e foi uma mistura de 50% a 50% de partículas abrasivas de sílica de diâmetro médio igual a 500 μm e de diâmetro médio igual a 300 μm . Os parâmetros usados no teste foram apresentados na Tabela 4.3. Amostras de cada revestimento (1,00 mm de espessura) foram testadas para tempos de ensaio de 10, 20, 30, 40 e 50 min, com 3 réplicas cada. A medição de volume foi feita mediante interferometria laser, conforme seção 3.4.2, a Figura 5.27 mostra os exemplos de cálculo do volume desgastado em marcas de desgaste para todos os tempos no alcatrão de hulha.

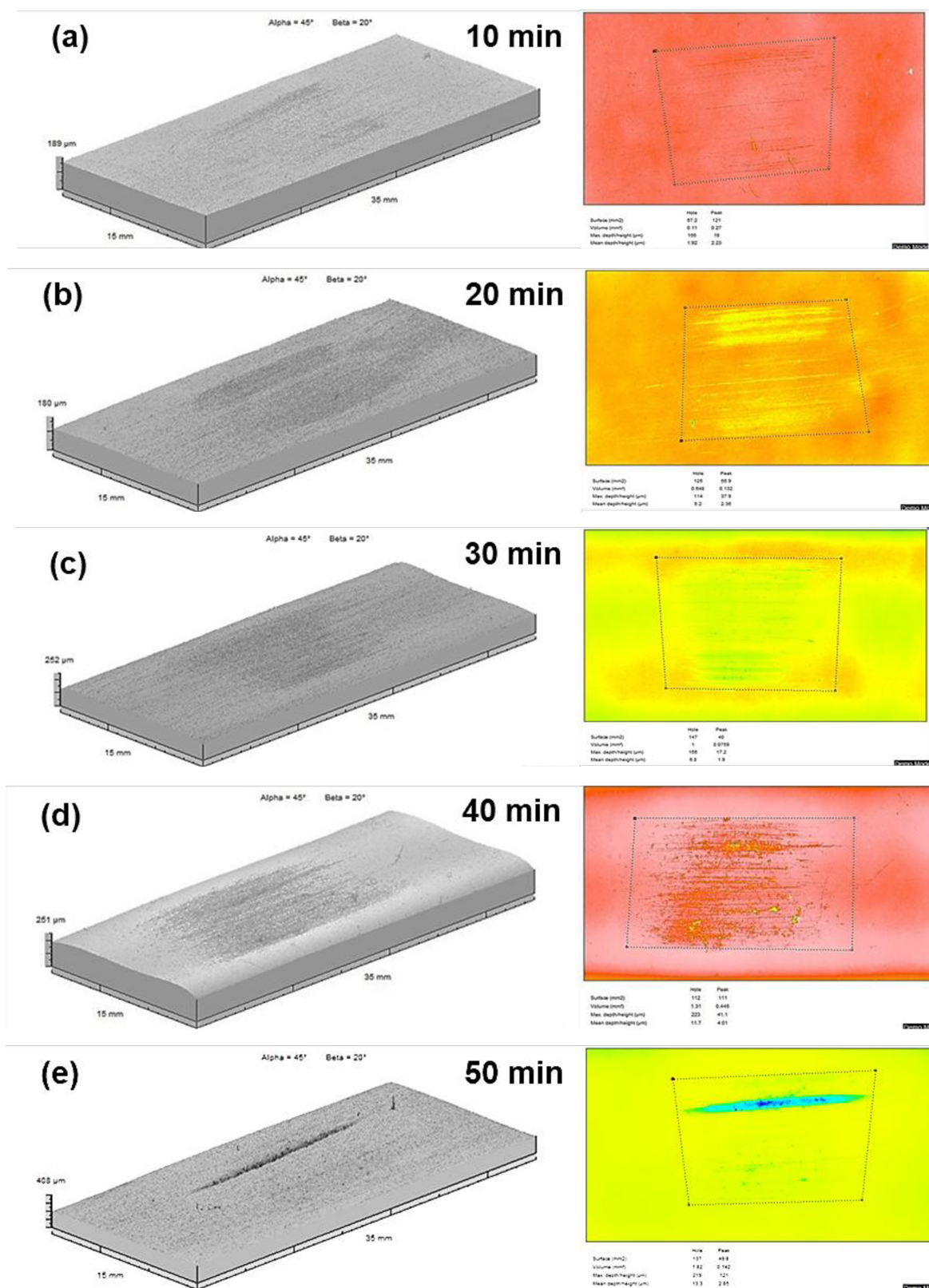


Figura 5.27. Medição do volume desgastado via interferometria laser em amostras de revestimento de Zebtron® submetidas em roda de borracha úmido. Interferometria da amostra com: (a) 10 min de teste; (b) 20 min de teste; (c) 30 min de teste; (d) 40 min de teste; e (e) 50 min de teste. Fonte próprio autor.

Os resultados do ensaio de desgaste abrasivo tipo roda de borracha estão apresentados na Figura 5.29, na forma do coeficiente de desgaste k (Eq. 4.2) ao longo do tempo. Na Figura 5.29 – (a) observou-se que a estabilidade do coeficiente aconteceu após os 30 minutos de ensaio, essa estabilidade é chamada de regime permanente de desgaste (Rutherford e Hutchings, 1997; Trezona, Allsopp e Hutchings, 1999) as mudanças do coeficiente de desgaste serão pouco significativas. As médias do coeficiente de desgaste após o regime permanente de desgaste estão apresentadas na Figura 5.29 – (b).

De acordo com a Figura 5.27, o desgaste do revestimento Zebron® é significativamente menor do que o do alcatrão de hulha, apresentando uma perda de espessura aproximadamente dez vezes mais lenta ao longo do tempo devido ao desgaste abrasivo. A seção 5.1 destacou que a proteção e a qualidade do revestimento diminuem à medida que sua espessura reduz, tornando o alcatrão de hulha mais vulnerável a uma perda de eficácia mais rápida em condições operacionais. Assim, o Zebron® oferece maior durabilidade e resistência ao desgaste, mantendo sua proteção por mais tempo em comparação ao alcatrão de hulha.

Ao observar o aspecto das marcas de desgaste via MEV nos revestimentos (Figura 5.28) observa-se que o desgaste abrasivo aparenta ser mais severo (Hutchings e Shipway, 2017; Zum Gahr, 1987) no alcatrão de hulha, apresentando sulcos aparentemente mais largos e fundos, enquanto no recoberto por Zebron® esses sulcos aparentam ser mais superficiais. Isso evidencia que as partículas abrasivas têm a capacidade de sulcar com maior facilidade o revestimento de alcatrão de hulha quando comparado com o revestido por Zebron®, o que é refletido na resistência ao desgaste abrasivo (Figura 5.29).

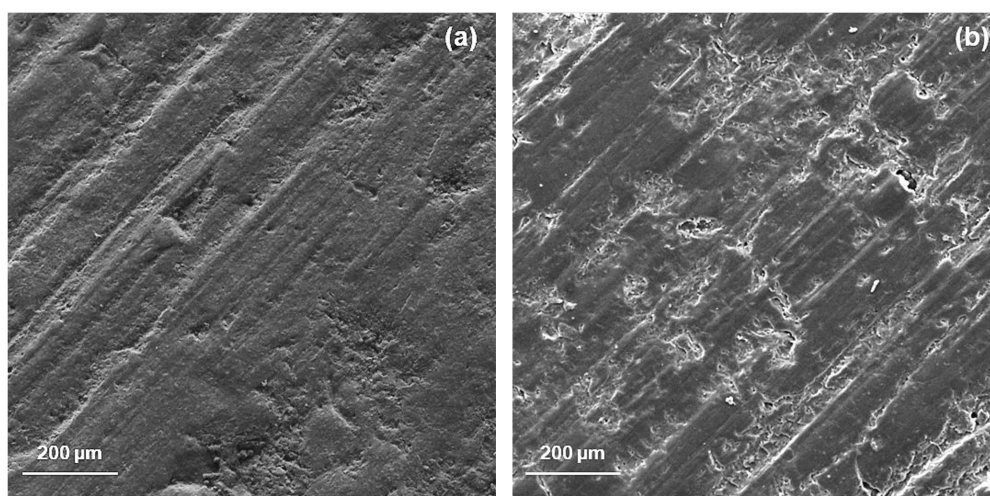


Figura 5.28. MEV das superfícies desgastadas via roda de borracha úmido para; (a) alcatrão de hulha; (b) Zebron®. Fonte próprio autor.

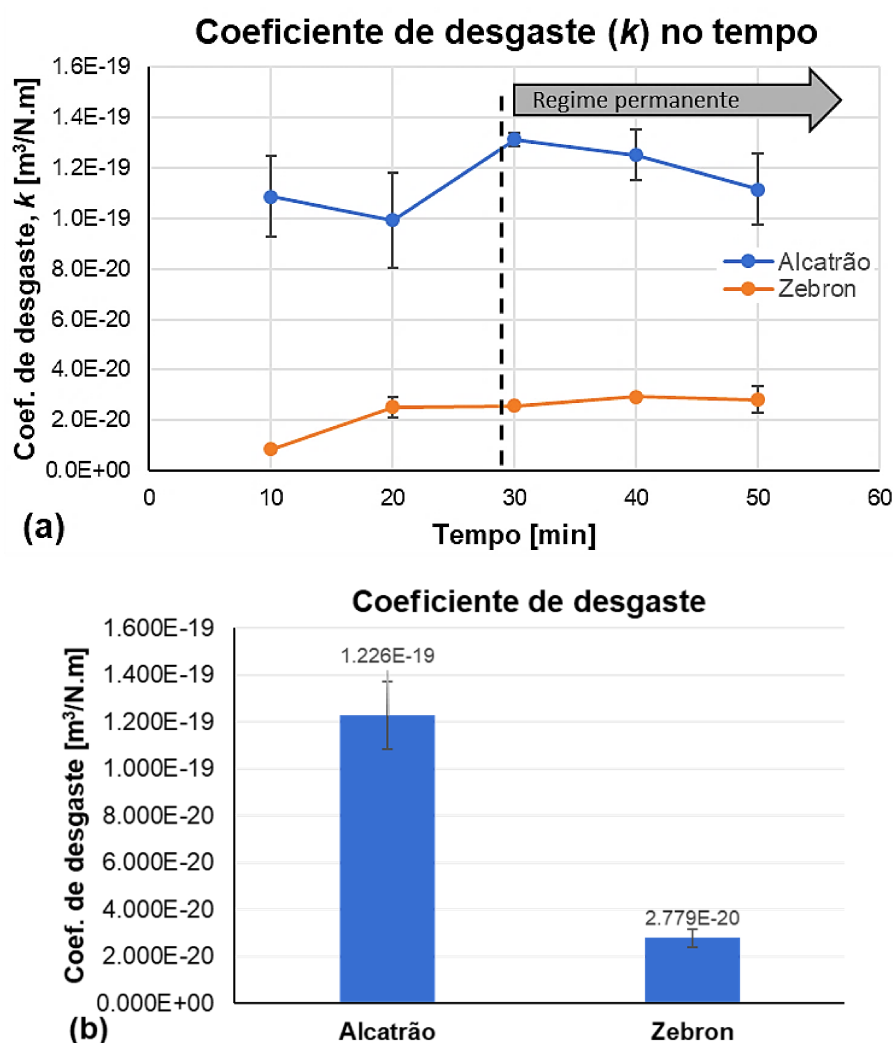


Figura 5.29. (a) Coeficiente de desgaste (k) dos revestimentos para tubulação ao longo do tempo em ensaios de roda de borracha úmido; (b) Coeficiente de desgaste (k) médio dos revestimentos. Fonte próprio autor.

Foi medida a dureza dos revestimentos pelo método de Rockwell M como explicado na seção 4.1.1, os valores de dureza estão representados na Figura 5.30 - a. Os valores de dureza mostram que a dureza do revestimento Zebron® ($55,7 \pm 1,0$ HRM) são aproximadamente 26 % maiores que os de alcatrão de hulha ($44,2 \pm 0,9$ HRM). Estes valores podem ser um indício da resistência ao desgaste de cada revestimento, para isso foi comparado o coeficiente de desgaste como os valores de dureza como é apresentado na Figura 5.30 - b.

Observa-se na Figura 5.30 - b que a maior dureza do revestimento reduz o coeficiente de desgaste devido à resistência aprimorada ao atrito., como é apresentado na literatura clássica (HUTCHINGS e SHIPWAY, 2017; ZUM GHAR, 1987). Essa comparação pode ser um indício ao resultado de resistência ao desgaste dos revestimentos, mas não deve ser o

único fator já que a diferença no coeficiente de desgaste de uma ordem de grandeza não é refletida numa grande variação de dureza, a qual foi só de 26 % de diferença.

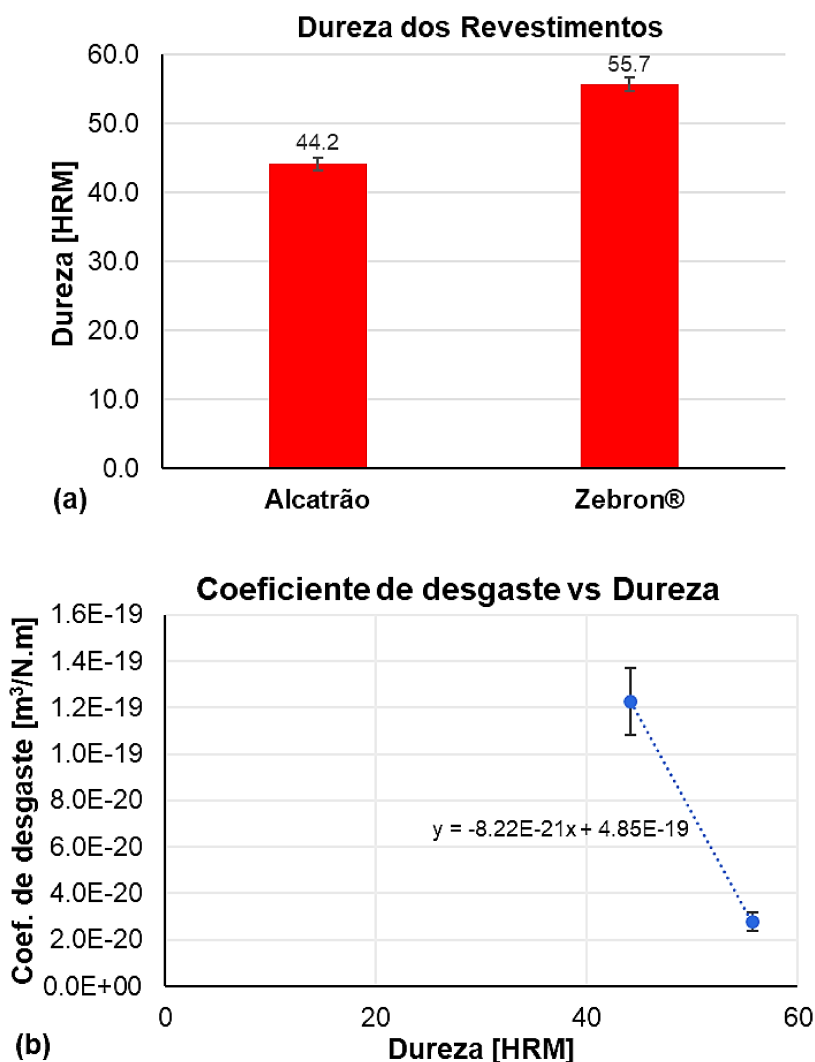


Figura 5.30. (a) Dureza dos revestimentos; (b) Comparação do coeficiente de desgaste versus dureza do revestimento. Fonte próprio autor.

Embora a dureza seja frequentemente utilizada como um parâmetro indicativo da resistência ao desgaste, especialmente em regimes dominados por abrasão, diversos estudos demonstram que, no caso de materiais poliméricos, essa correlação não é necessariamente direta ou proporcional. Isso ocorre porque o desgaste em polímeros depende não apenas da resistência à penetração, mas também de propriedades como tenacidade, módulo elástico e comportamento viscoelástico. Assim, materiais com dureza semelhante podem apresentar desempenhos tribológicos significativamente distintos, dependendo de sua capacidade de dissipar energia e resistir à deformação durante o contato abrasivo (HUTCHINGS; SHIPWAY,

2017; BLAU, 2008). Dessa forma, a diferença observada de aproximadamente uma ordem de grandeza no coeficiente de desgaste entre os revestimentos analisados não pode ser explicada exclusivamente pela variação de 26% na dureza, evidenciando a influência de mecanismos adicionais.

Nesse contexto, o comportamento viscoelástico do revestimento à base de poliuretano (Zebron®) pode desempenhar papel fundamental na sua maior resistência ao desgaste abrasivo. Polímeros com maior capacidade de deformação elástica e recuperação tendem a absorver parte da energia imposta pelas partículas abrasivas, reduzindo a profundidade de penetração e, conseqüentemente, a severidade dos sulcos formados na superfície. Esse efeito resulta em menor remoção de material e maior estabilidade do sistema tribológico (ZUM GAHR, 1987; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Tal comportamento está de acordo com as observações microestruturais obtidas por microscopia eletrônica de varredura, nas quais o revestimento Zebron® apresentou sulcos menos profundos, indicando predominância de mecanismos menos agressivos, como deformação elástica reversível e microcorte reduzido.

Adicionalmente, a resistência ao desgaste em polímeros está fortemente relacionada à sua estrutura molecular e ao grau de reticulação. Materiais com maior densidade de ligações cruzadas, como poliuretanos, tendem a apresentar maior resistência à deformação plástica permanente e à propagação de danos superficiais. Em contrapartida, revestimentos com menor coesão estrutural, como aqueles à base de alcatrão de hulha, podem apresentar maior suscetibilidade à remoção de material por mecanismos de microfatura e destacamento. Além disso, a presença do meio úmido durante o ensaio pode influenciar significativamente os mecanismos de desgaste, atuando tanto como meio de transporte de partículas abrasivas quanto modificando as interações na interface de contato, o que pode intensificar a degradação de materiais com menor resistência estrutural ou química (BLAU, 2008; ZUM GAHR, 1987).

5.2.2 Avaliação da influência das características do desgaste abrasivo na resistividade dos revestimentos

Para a análise da influência das características do desgaste abrasivo no perfil eletroquímico dos revestimentos objeto deste estudo, foram utilizadas amostras com espessura de $\approx 1,00$ mm, caracterizadas por EIE em tempo de imersão de 1 h em esgoto sintético após períodos de 10, 20, 30, 40 e 50 minutos de desgaste abrasivo via roda de borracha úmido da seção anterior. A faixa de frequência avaliada foi de 100 kHz a 1 Hz, devido à grande quantidade de dispersão e à distorção do perfil em Nyquist observada em menores frequências.

5.2.2.1 Zebbron®

O gráfico de OCP, assim como os Diagramas de Nyquist e os Diagramas de Bode para as amostras de aço recobertas por Zebbron®, com espessura aproximada de 1,00 mm, após 10, 20, 30, 40 e 50 min de desgaste abrasivo são mostrados nas Figura 5.31, Figura 5.32 e Figura 5.33.

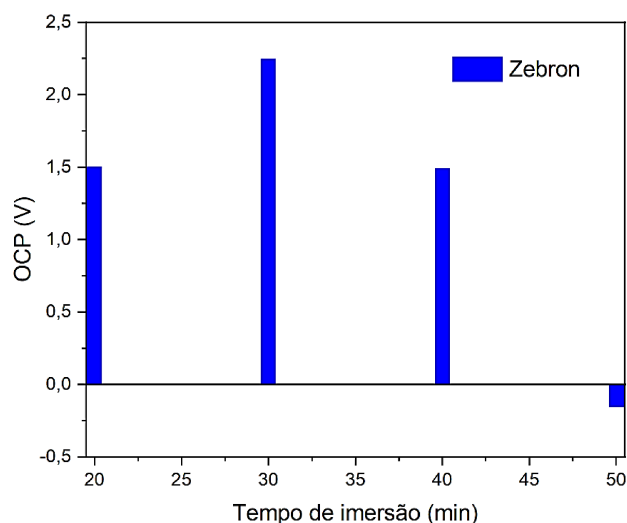


Figura 5.31. Gráfico mostrando os valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebbron®, em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 , considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Fonte próprio autor.

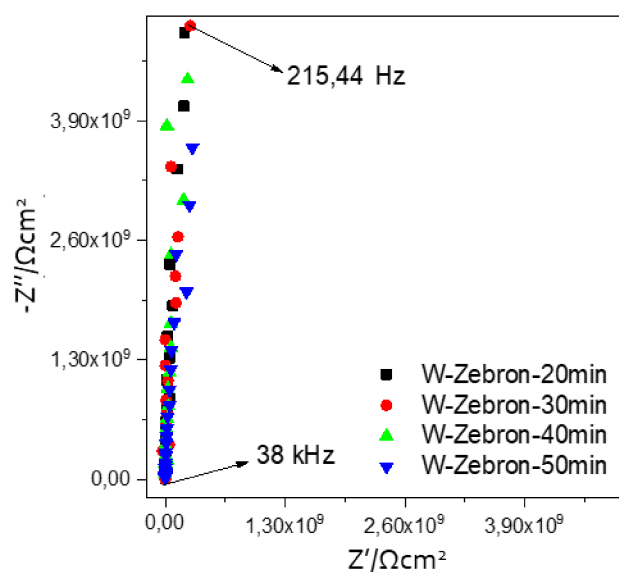


Figura 5.32. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por Zebbron® em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 , considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 1 Hz. Fonte próprio autor.

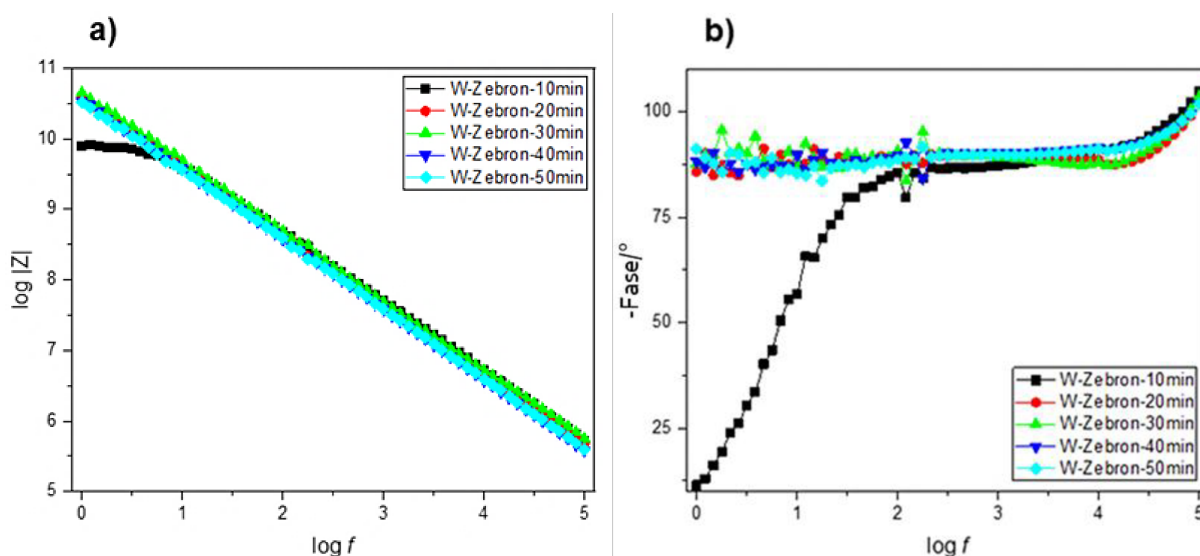


Figura 5.33. Diagramas de Bode a) $\log f \times \log |Z|$ e b) $\log f \times$ ângulo de para o aço ASTM A36 revestido por Zebron® em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H₂SO₄, considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

A análise de OCP das amostras submetidas a diferentes tempos de desgaste abrasivo (Tabela 5.11) revelou informações relevantes sobre a integridade e desempenho protetivo do revestimento de Zebron® aplicado sobre aço ASTM A36.

Tabela 5.11 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por Zebron®, em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H₂SO₄, considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Fonte próprio autor.

Tempo de desgaste [min]	OCP [V]
20	1,501
30	2,247
40	1,493
50	-0,153

Em sistemas de proteção, espera-se que o aumento do desgaste leve a uma tendência de potencial mais negativo, indicando exposição do substrato metálico e início de corrosão. No entanto, nas amostras analisadas, esse comportamento não foi observado, sugerindo que o revestimento a base de Zebron® permaneceu eficaz durante o ensaio realizado.

Os valores de OCP do aço revestido após 20, 30, 40 e 50 minutos de abrasão, se mantiveram em uma faixa praticamente estável de potencial. Isso indica que o processo de

desgaste não foi suficiente para expor significativamente o substrato metálico ou não houve tempo suficiente para ocorrer o intumescimento do eletrólito no aço revestido quando imerso por 1 h em esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 .

A manutenção de potenciais elevados e positivos sugere que o poliuretano, principal componente do Zebron®, mesmo parcialmente desgastado, continua atuando como um isolante elétrico eficaz, impedindo a ocorrência de reações eletroquímicas na interface aço/solução.

Essa resposta é coerente com os diagramas de Nyquist, apresentados na Figura 5.32, os quais mostram que, mesmo após abrasão superficial, o revestimento mantém espessura suficiente para impedir o transporte de íons até o substrato, quando avaliado em tempo de 1 h de imersão em esgoto sintético. Além disso, o formato observado para os diagramas e para os diagramas de Bode (Figura 5.33) em 20, 30, 40 e 50 minutos reforça que o sistema permanece dominado por um comportamento puramente capacitivo, típico de revestimentos íntegros e condizente com os valores de OCP medidos. Essa afirmação é corroborada pela não obtenção de valores de R_{ct} , devido ao perfil das amostras em Nyquist, indicando 100% de eficiência de inibição à corrosão para todos os tempos de desgaste abrasivo, nas condições de teste empregadas.

Esses resultados demonstram a eficiência do revestimento Zebron® como barreira anticorrosiva em curtos tempos de exposição, destacando o poliuretano como um revestimento promissor para aplicações que exigem simultaneamente proteção contra agentes eletroquímicos agressivos e resistência ao desgaste mecânico, quando em espessuras elevadas.

5.2.2.2 Alcatrão de hulha

O gráfico de OCP, assim como os Diagramas de Nyquist e os Diagramas de Bode para as amostras recobertas por alcatrão de hulha, com espessura aproximada de 1 mm, após 10, 20, 30, 40 e 50 minutos de desgaste abrasivo são mostrados nas Figura 5.34, Figura 5.35 e Figura 5.36.

A análise do valor de OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha demonstrou variações moderadas nos valores ao longo dos diferentes tempos de desgaste por abrasão. Conforme os dados apresentados na Figura 5.34 e na Tabela 5.12, após 10 min de desgaste o valor de OCP medido foi de -0,252 V, seguido por um deslocamento para valores mais negativos após 20 minutos de desgaste (-0,466 V), e por oscilações nos valores subsequentes, sendo -0,160 V em 30 min, -0,333 V em 40 min e -0,329 V em 50 min.

A ausência de uma tendência contínua de deslocamento do OCP para potenciais mais negativos, mesmo com o aumento do tempo de desgaste, sugere que o revestimento manteve

sua integridade ao longo dos ensaios, nas condições de teste empregadas. Ainda, a variação observada nos valores pode ser atribuída a pequenas alterações superficiais, mas não reflete perda significativa da eficácia do revestimento, que continua a atuar como sistema protetor eficiente ao longo dos diferentes tempos de ensaio.

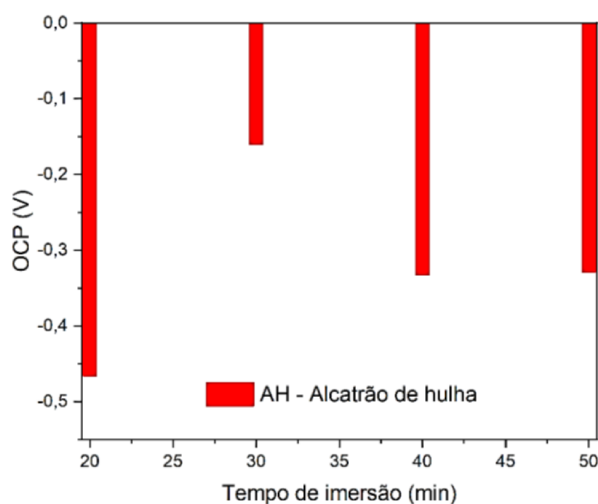


Figura 5.34. Gráfico mostrando os valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 , considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Fonte próprio autor.

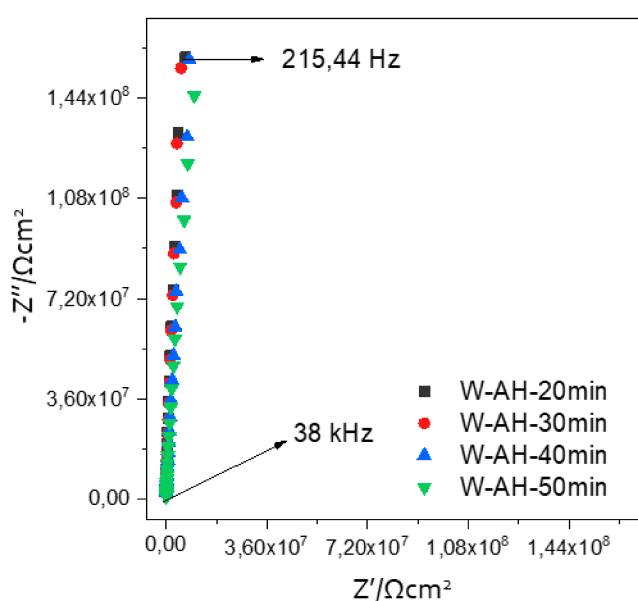


Figura 5.35. Diagramas de Nyquist para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H_2SO_4 , considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Amplitude de perturbação de ± 20 mV e faixa de frequência de 100 kHz a 1 Hz. Fonte próprio autor.

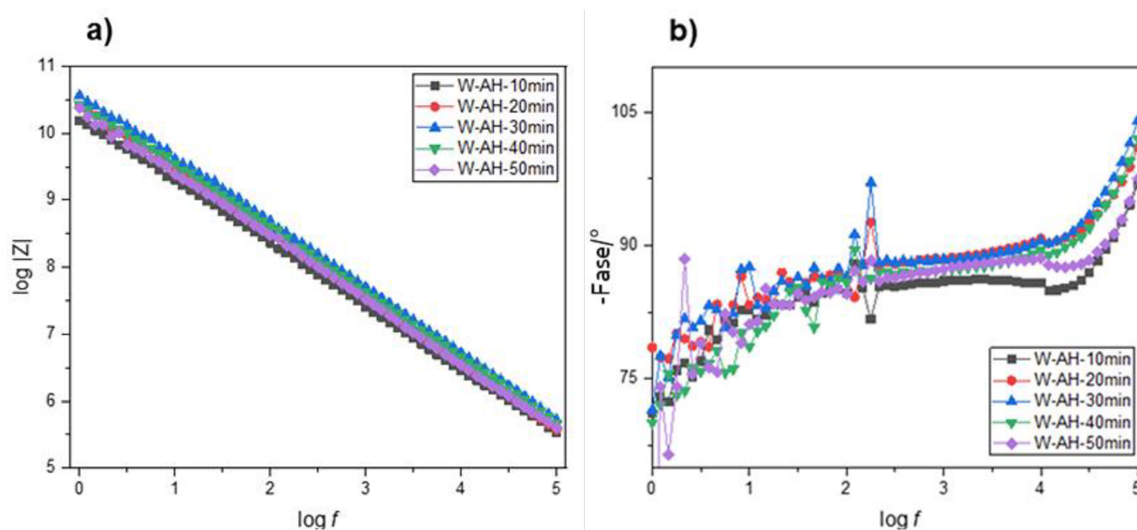


Figura 5.36. Diagramas de Bode a) $\log f \times \log |Z|$ e b) $\log f \times \text{ângulo}$ de para o aço ASTM A36 revestido por Zebtron® em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H₂SO₄, considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Faixa de frequência de 100 kHz a 0,1 Hz. Fonte próprio autor.

Além disso, os diagramas de Nyquist, visualizados na Figura 5.35, apresentaram perfis similares entre si, com arcos capacitivos bem definidos e sem evidência clara de mecanismos adicionais associados à corrosão localizada ou falhas do revestimento. Nos diagramas de Bode (Figura 5.36), tanto a magnitude da impedância quanto os ângulos de fase permaneceram elevados, especialmente em baixas frequências, mesmo após os maiores tempos de desgaste, caracterizando um comportamento predominantemente capacitivo típico de materiais com boa resistência à transferência de carga. Dessa forma, é considerado que o revestimento apresentou 100% de eficiência de inibição à corrosão nas condições avaliadas, assim como foi para o recoberto por Zebtron®.

Tabela 5.12 – Valores de OCP para o aço ASTM A36 revestido por alcatrão de hulha, em espessura de $\approx 1,00$ mm em meio de esgoto sintético contendo 5% de H₂SO₄, considerando diferentes tempos de desgaste via roda de borracha úmido. Fonte próprio autor.

Tempo de desgaste [min]	OCP [V]
20	-0,466
30	-0,160
40	-0,333
50	-0,329

Nas Tabela 5.13 e Tabela 5.14 estão mostrados os dados de EIE dos aços ASTM A36 revestidos com Zebron ou com Alcatrão de hulha após diferentes tempos de ensaios de desgaste. Como informação adicional os valores de OCP obtidos para os dois revestimentos estão no Anexo 3.

Tabela 5.13 – Parâmetros eletroquímicos obtidos para o revestimento Alcatrão de hulha em diferentes tempos de desgaste. Fonte próprio autor.

AH desgaste	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{coating} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_{coating} ($\text{S} \cdot \text{s}^n \cdot \text{n}^{-1}$)	n	X²
20 min	0	-	$1,74 \times 10^{-11}$	0,950	$4,3 \times 10^{-4}$
30 min	0	-	$7,78 \times 10^{-12}$	1	$1,9 \times 10^{-4}$
40 min	0	-	$8,87 \times 10^{-12}$	1	$1,1 \times 10^{-3}$
50 min	0	-	$1,17 \times 10^{-11}$	1	$2,1 \times 10^{-3}$

Tabela 5.14 – Parâmetros eletroquímicos obtidos para o revestimento Zebron® em diferentes tempos de desgaste. Fonte próprio autor.

Zebron desgaste	Rs ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	R_{coating} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)	CPE_{coating} ($\text{S} \cdot \text{s}^n \cdot \text{n}^{-1}$)	n	X²
20 min	0	-	$1,10 \times 10^{-11}$	0,984	$3,7 \times 10^{-3}$
30 min	0	-	$8,11 \times 10^{-12}$	1	$5,8 \times 10^{-5}$
40 min	0	-	$1,12 \times 10^{-11}$	0,992	$2,8 \times 10^{-3}$
50 min	0	-	$1,01 \times 10^{-11}$	1	$2,9 \times 10^{-3}$

Na Tabela 5.13, observa-se que o aço ASTM A36 revestido com alcatrão hulha submetido ao ensaio de desgaste em diferentes tempos de 20 min até 40 min apresentou uma diminuição do CPE do *coating* de $1,74 \times 10^{-11}$ para $8,87 \times 10^{-12}$ e um aumento de n de 0,950 para 1. A diminuição na CPE geralmente indica uma maior permeabilidade do revestimento, facilitando a passagem de íons corrosivos, o que pode estar associado à degradação do material ao longo do tempo de ensaio de desgaste. Por outro lado, o aumento do parâmetro n, que indica a homogeneidade do processo de impedância, sugere uma mudança na natureza do revestimento, possivelmente refletindo uma maior uniformidade na distribuição do alcatrão hulha ou uma redução na formação de porosidade. Essa mudança pode estar relacionada à compactação ou ao preenchimento de fissuras durante o desgaste, o que melhora a resistência ao ataque corrosivo. Assim, a análise conjunta dos dados de desgaste e de espectroscopia de impedância permite uma compreensão mais aprofundada do comportamento do revestimento sob condições de uso prolongado. A combinação dessas

técnicas evidencia que, embora o revestimento possa sofrer degradação superficial, há também processos de adaptação ou compactação que podem melhorar sua resistência ao longo do tempo. Essa abordagem integrada é essencial para otimizar a formulação de revestimentos e prever sua durabilidade.

O circuito elétrico descrito na Figura 5.37 representa os ajustes obtidos para as amostras desgastadas. Este circuito se ajustou para todas as amostras.

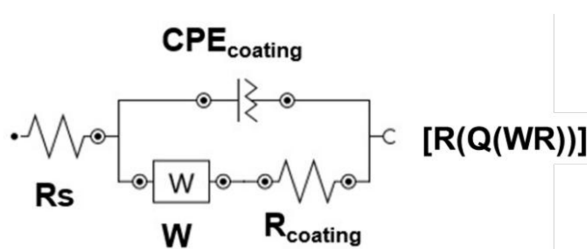


Figura 5.37. Circuito elétrico proposto para as amostras desgastadas. Fonte próprio autor.

Na Tabela 5.14 observa-se que o aço ASTM A36 revestido com Zebron submetido ao ensaio de desgaste em diferentes tempos de 20 min até 40 min apresentou um valor de CPE do *coating* de $1,12 \times 10^{-11}$ praticamente constante e um aumento de n igual a 1. Os dados de CPE indicam uma estabilidade na resposta eletroquímica do revestimento, sugerindo que o Zebron mantém suas propriedades de barreira contra a corrosão durante o desgaste. A constância do valor de n também sugere que a interface entre o *coating* e o substrato permanece relativamente inalterada, indicando uma estabilidade química do revestimento mesmo após os ensaios de desgaste durante 50 min. Portanto, a resistência do *coating* elevada e estável, associada a um valor de CPE constante, reforça a hipótese de que o revestimento oferece uma proteção eficaz contra a corrosão, mesmo sob condições de desgaste mecânico. Portanto, a combinação dos dados de desgaste com os resultados de espectroscopia de impedância fornece uma visão abrangente da performance do revestimento Zebron. Essa abordagem integrada é essencial para otimizar processos de proteção de materiais metálicos, garantindo maior durabilidade e resistência em ambientes agressivos.

5.2.3 Conclusões parciais e resumo

O revestimento Zebron® demonstrou melhor comportamento frente à abrasão, mantendo OCP elevado e comportamento puramente capacitivo mesmo após 50 min de desgaste, com integridade preservada. O alcatrão de hulha, por sua vez, apresentou maior variação no OCP após abrasão e tendência à formação de processos resistivos e capacitivo-

resistivos em menor tempo, embora também mantenha elevada eficiência nos testes de curto prazo.

O revestimento Zebron® demonstrou maior resistência mecânica e eletroquímica em ensaios de abrasão, com desempenho estável após 50 minutos. O alcatrão de hulha manteve bom desempenho, mas com maior variabilidade e menor previsibilidade de resposta eletroquímica. O revestimento Zebron® se apresentou muito resistente ao desgaste, visto que a perda de volume é aproximadamente 10 vezes mais lenta quando comparada ao alcatrão de hulha.

5.3 Avaliação dos revestimentos para aplicação em tubulação de esgoto urbano de Uberlândia

A análise conjunta dos resultados está apresentada nas Figura 5.38, Figura 5.39 e Figura 5.40. Essas figuras evidenciam de forma clara e sistemática o comportamento distinto dos revestimentos de alcatrão de hulha-epóxi e Zebron® quando avaliados em condições de desgaste abrasivo e em condições de proteção de corrosão em meio sintético representativo do esgoto urbano de Uberlândia. Os dados demonstram que a integridade física e o desempenho eletroquímico dos revestimentos evoluem de modo interdependente ao longo do tempo, refletindo a natureza sinérgica dos mecanismos de abrasão e corrosão que caracterizam a tribocorrosão.

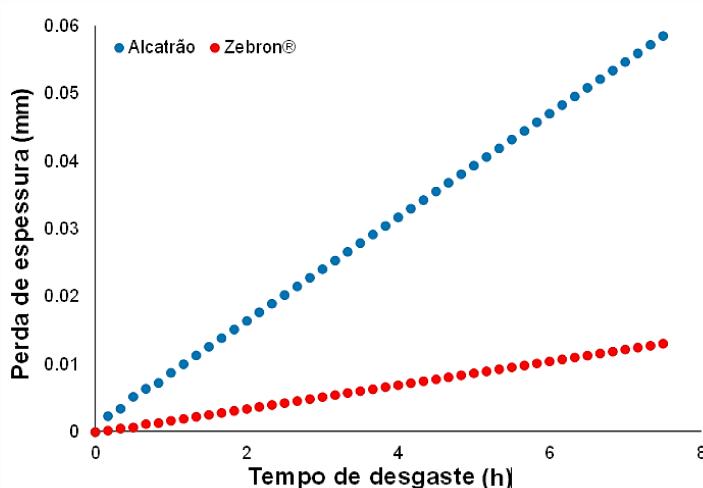


Figura 5.38. Perda de espessura no tempo em revestimentos de Alcatrão de hulha (azul) e Zebron® (vermelho) submetidos ao desgaste abrasivo tipo roda de borracha úmido em ambiente de esgoto urbano representado laboratorialmente e baseado na condição de Uberlândia. Fonte próprio autor.

A Figura 5.38, que relaciona tempo de exposição com a perda de espessura, revela o comportamento fundamentalmente distinto dos dois sistemas no ensaio de desgaste tipo roda de borracha úmido. O revestimento de alcatrão de hulha apresentou uma taxa de desgaste linear e acentuada, evidenciando baixa resistência à ação abrasiva conforme demonstrado anteriormente através da relação de dureza dos revestimentos poliméricos versus desgaste (Figura 5.30). Essa tendência indica que o revestimento alcatrão de hulha, embora apresente boas propriedades iniciais de barreira, sofre degradação mecânica progressiva e contínua sob fluxo contendo partículas sólidas, resultando na perda gradual de espessura efetiva e consequente redução da capacidade de proteção.

O revestimento Zebron®, por sua vez, apresentou incremento de desgaste muito menor, com o ângulo de inclinação da reta reduzido e comportamento quase estável ao longo do tempo. A estrutura polimérica mais densa e altamente reticulada do revestimento Zebron® resulta em maior coesão molecular, proporcionando resistência superior ao cisalhamento superficial. Essa composição avançada garante maior durabilidade contra abrasões, mantendo a integridade da película protetora mesmo sob condições de uso intenso.

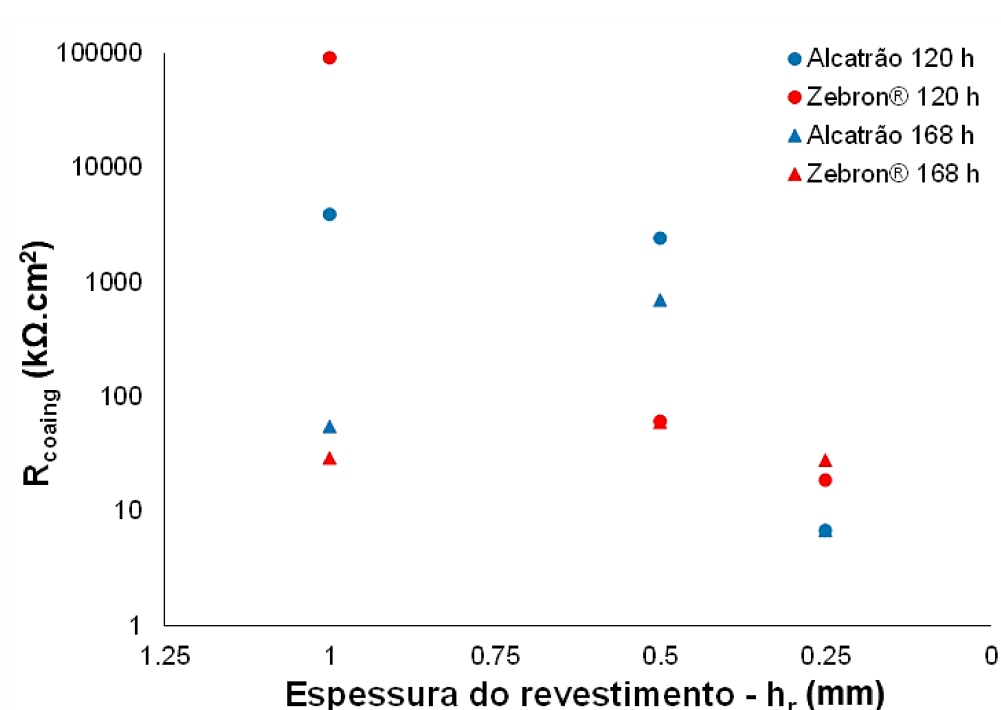


Figura 5.39. Resistência do revestimento ($R_{coating}$ de Alcatrão de hulha (azul) e Zebron® (vermelho) imersos em ambiente de esgoto urbano representado laboratorialmente e baseado na condição de Uberlândia para diferentes espessuras de revestimento, após 120 h e 168 h de imersão em esgoto laboratorial. Fonte próprio autor.

A influência da espessura do revestimento anticorrosivo sobre os valores de resistência do revestimento é observada na Figura 5.39. Nesta figura observa-se que a resistência do revestimento diminui à medida que a espessura do revestimento é reduzida. Para o revestimento alcatrão de hulha, essa correlação é fortemente negativa: pequenas perdas de espessura provocam quedas abruptas de resistência do revestimento refletindo a penetração do eletrólito pelo revestimento anticorrosivo até atingir o substrato metálico. A degradação do revestimento segue um padrão exponencial, típico de revestimentos porosos ou trincados sob desgaste contínuo. O revestimento Zebron®, em contraste, mantém valores de resistência do revestimento elevados mesmo após reduções substanciais de espessura, demonstrando que o material conserva suas propriedades de isolamento elétrico e impermeabilidade mesmo após exposição prolongada ao eletrólito. A persistência desses altos valores de resistência do eletrólito indica que a estrutura do Zebron® possui excelente adesão ao aço ASTM A36, além de baixa permeabilidade a íons corrosivos e gases, características fundamentais para ambientes de esgoto com alta condutividade iônica.

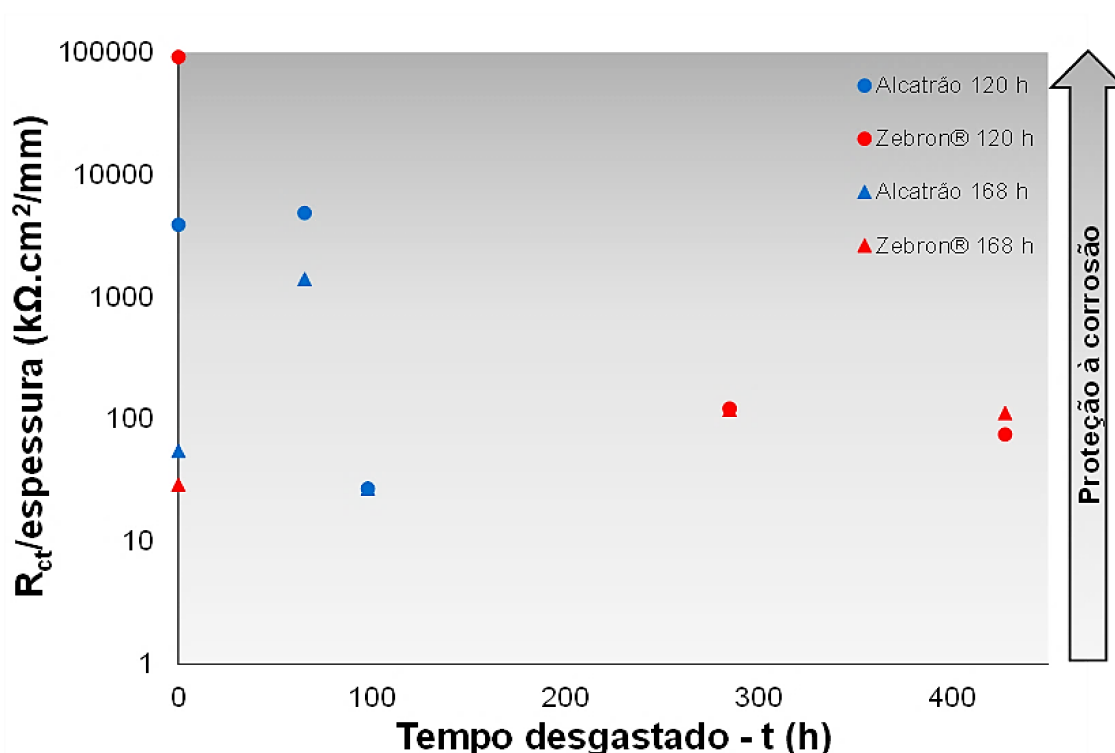


Figura 5.40. Gráfico da resistência do aço revestido com Alcatrão de hulha (azul) e Zebron® (vermelho) em função do tempo de desgaste em ambiente de esgoto urbano representado laboratorialmente e baseado na condição de Uberlândia. Fonte próprio autor.

Na Figura 5.40 relaciona-se o tempo de desgaste com a razão R_{ct} por espessura, assim é possível avaliar a eficiência protetora relativa por unidade de espessura. O comportamento

do revestimento alcatrão de hulha mostra inicialmente um leve aumento — possivelmente associado ao selamento temporário de microfissuras por produtos de corrosão — seguido de um colapso abrupto, evidenciando o ponto crítico a partir do qual o revestimento perde sua funcionalidade protetora. Esse ponto representa a espessura crítica de falha, abaixo da qual o material já não é capaz de oferecer resistência efetiva à transferência de carga. O revestimento Zebron®, em contraste, apresenta uma razão R_{ct} /espessura mais estável e sustentada ao longo do tempo, mesmo após centenas de horas de abrasão, indicando que sua integridade física e barreira eletroquímica permanecem ativas em todo o período de ensaio.

De modo integrado, os resultados confirmam que o desempenho global dos revestimentos é determinado por três fatores inter-relacionados: (i) a taxa de desgaste abrasivo, (ii) a capacidade de manter elevada resistência eletroquímica com a redução de espessura e (iii) a espessura crítica a partir da qual ocorre falha funcional. O revestimento Zebron® supera amplamente o alcatrão em todos esses parâmetros, demonstrando comportamento mais estável e durável em ambiente tribocorrosivo. Tais achados corroboram a hipótese central da tese de que revestimentos poliméricos de alta densidade e boa adesão ao substrato metálico apresentam desempenho superior sob condições combinadas de abrasão e corrosão, típicas de sistemas de esgoto.

O gráfico compilatório apresentado na Figura 5.40 fornece uma análise comparativa entre os revestimentos de alcatrão de hulha (representado na cor azul) e Zebron® (em vermelho) em relação à proteção contra corrosão e resistência ao desgaste em ambientes de esgoto urbano. Essa análise é baseada em testes laboratoriais que simulam as condições reais enfrentadas nesses ambientes, permitindo uma avaliação detalhada do desempenho de cada revestimento. Os resultados indicaram que o revestimento Zebron® apresentou o comportamento eletroquímico mais estável e altamente resistente à abrasão, sendo o revestimento mais indicado para prolongar a vida útil de tubulações metálicas de esgoto. O revestimento alcatrão de hulha-epóxi sofre queda acentuada de desempenho com o aumento do desgaste, demonstrando vulnerabilidade a ambientes de escoamento turbulento.

De maneira geral, a espessura e uniformidade do revestimento são fatores determinantes na durabilidade, reforçando a importância do controle de aplicação e há clara sinergia negativa entre abrasão e corrosão, evidenciada pela redução sistemática de R_{ct} , especialmente no revestimento de menor desempenho.

Em suma, o gráfico evidencia a importância de uma análise detalhada na seleção de revestimentos, destacando que a eficiência de proteção contra corrosão e desgaste é fundamental para garantir a longevidade e o desempenho das infraestruturas de esgoto

urbano. A compreensão dessas diferenças permite uma tomada de decisão mais informada, contribuindo para a sustentabilidade e a redução de custos de manutenção ao longo do tempo.

A análise dos gráficos (Figura 5.38, Figura 5.39 e Figura 5.40) permite consolidar a compreensão dos mecanismos de degradação atuantes nos revestimentos avaliados e reforça a interdependência entre desgaste mecânico, deterioração da barreira protetora e perda progressiva de desempenho eletroquímico.

Com base nos resultados, observa-se que o alcatrão de hulha é rapidamente afetado por processos de microcorte e delaminação, levando à perda precoce de sua espessura e à diminuição abrupta de sua resistência. Em contraste, o revestimento Zebron® apresenta maior resistência, com desgaste controlado e uma manutenção mais prolongada de sua barreira anticorrosiva. Sua eficiência diminui de forma gradual à medida que a espessura diminui, indicando maior estabilidade sob condições de tribocorrosão. Essa análise valida a metodologia proposta na tese, que combina avaliação do desgaste mecânico e do comportamento eletroquímico para entender a durabilidade de revestimentos em condições operacionais de tubulações de esgoto. Assim, a escolha de revestimentos para sistemas de saneamento deve considerar não apenas a resistência anticorrosiva, mas também sua capacidade de resistir a fluxo turbulento, partículas abrasivas e ambientes quimicamente agressivos, garantindo maior longevidade. Assim, os resultados apresentados neste capítulo consolidam a superioridade do revestimento Zebron® frente ao alcatrão de hulha-epóxi em termos de resistência tribocorrosiva, estabilidade ao longo do tempo e potencial de prolongamento da vida útil do aço ASTM A36 em ambientes agressivos. Além disso, oferecem embasamento técnico-científico para a formulação de critérios mais consistentes de seleção de revestimentos, orientando decisões práticas no contexto de manutenção, modernização e prolongamento da vida útil de redes de esgoto. Na Tabela 5.15 estão os valores de R_{coating} obtidos por outros autores para revestimentos de poliuretano e epóxi.

A Tabela 5.15 apresenta os valores de R_{coating} obtidos no atual trabalho em tempos de imersão similares os encontrados na literatura. Quando comparados, os resultados deste estudo mostram-se plenamente compatíveis e, em alguns casos, mais representativos de condições reais de serviço. Chang *et al.* (2021) reportaram valores de R_{coating} da ordem de $10^7 \Omega \cdot \text{cm}^2$ para sistemas G/WPU e compósitos G/PWU com diferentes teores de Al_2O_3 em solução de NaCl 3,5% após 120 h, valores inferiores aos obtidos neste trabalho para Zebron® e alcatrão de hulha nas primeiras 24 h, mesmo em meio mais agressivo. Resultados similares são observados em Benea *et al.* (2020), onde sistemas epóxi e epóxi-poliuretano em água do mar apresentaram R_{coating} da ordem de $10^5 \Omega \cdot \text{cm}^2$ após 168 h, valores próximos aos obtidos neste estudo após períodos prolongados de exposição.

Tabela 5.15 – Valores de R_{coating} obtidos na literatura para revestimentos de poliuretano e epóxi, em diferentes meios. Fonte próprio autor.

Referência	Material	Espessura	Meio / eletrólito	Tempo imersão (h)	R_{coating} ($\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Pesquisa atual desenvolvida no trabalho	Zebron	1,0 mm	Solução de esgoto desenvolvido em laboratório com 9 g/L de H_2SO_4	24	$5,44 \times 10^8$
				120	$1,17 \times 10^8$
				168	$3,12 \times 10^4$
		0,5 mm		24	$4,64 \times 10^4$
				120	$6,58 \times 10^4$
				168	$6,40 \times 10^4$
	0,25 mm	24		$3,39 \times 10^4$	
		120		$2,24 \times 10^4$	
		168		$3,32 \times 10^4$	
	Alcatrão de Hulha	1,0 mm		24	-
				120	$4,93 \times 10^6$
				168	$2,61 \times 10^5$
		0,5 mm		24	$4,05 \times 10^{10}$
				120	$1,64 \times 10^6$
				168	$8,85 \times 10^4$
0,25 mm	24	$2,02 \times 10^6$			
	120	$8,34 \times 10^4$			
	168	$8,38 \times 10^4$			
Chang et al. (2021)	G/WPU	Não informada	NaCl 3,5% (m/v)	120	$\approx 1,2 \times 10^7$
	1% Al_2O_3 /G/PWU				$\approx 1,7 \times 10^7$
	3% Al_2O_3 /G/PWU				$\approx 2,0 \times 10^7$
	5% Al_2O_3 /G/PWU				$\approx 2,5 \times 10^7$
Benea, Simionescu e Mardare (2020)	Epóxi primer (EP)	Não informada	Água do mar	168	$\approx 1,04 \times 10^5$
	EP + poliuretano				$\approx 9,17 \times 10^5$
Ma et al. (2024)	Poliuretano	80-100 μm	HCl 0,1 mol L^{-1}	168	$\approx 2,6 \times 10^3$
	CD-s-APhen-2@SC/PU				$\approx 2,4 \times 10^4$
Xu et al. (2024)	mPU	70 +/- 5 μm	NaCl 3,5% (m/v)	24	$\approx 1,76 \times 10^8$
	PHC1				$\approx 4,49 \times 10^8$
	PHC3				$\approx 4,13 \times 10^8$
	PHC5				$\approx 4,52 \times 10^8$
	PHC7				$\approx 4,19 \times 10^8$
Shmait et al. (2020)	Poliuretano-ZnO-NP	0,65 cm	NaCl 0,5 mol L^{-1}	336	$1,5 \times 10^6$
	Epóxi-ZnO-NP				$8,0 \times 10^4$

Revestimentos poliméricos avançados, como poliuretanos modificados e sistemas nanoestruturados, apresentam desempenho variável. Ma *et al.* (2024) relataram valores

relativamente baixos de R_{coating} (10^3 – $10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$) em meio ácido ($\text{HCl } 0,1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$), enquanto Xu *et al.* (2024) obtiveram resistências elevadas, da ordem de $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$, para filmes finos ($\sim 70 \mu\text{m}$) em $\text{NaCl } 3,5\%$ após 24 h. Esses resultados indicam que, embora filmes finos possam apresentar alta resistência inicial, sua aplicabilidade em ambientes de esgoto altamente agressivos é limitada quando comparada a revestimentos espessos, como os avaliados neste trabalho.

De modo geral, os resultados obtidos demonstram que os valores de R_{coating} alcançados para Zebron® e alcatrão de hulha são compatíveis com os melhores desempenhos reportados na literatura, mesmo sob condições eletrolíticas mais severas. Além disso, a clara influência da espessura e do tempo de exposição reforça a importância do controle de aplicação e da seleção criteriosa do revestimento para sistemas de tubulações de esgoto, onde a agressividade química e a durabilidade a longo prazo são fatores críticos.

5.3.1 Análise de viabilidade técnico-econômica e custo do ciclo de vida (LCC) dos revestimentos

Considerando o caráter aplicado deste trabalho, realizou-se uma análise integrada de viabilidade técnico-econômica, incorporando o desempenho tribocorrosivo dos revestimentos e uma estimativa simplificada do custo do ciclo de vida (Life Cycle Cost – LCC), com o objetivo de avaliar a aplicabilidade dos materiais em sistemas reais, como tubulações e bacias de contenção.

Do ponto de vista técnico, os resultados experimentais demonstraram que o revestimento Zebron® apresenta desempenho significativamente superior ao revestimento à base de alcatrão de hulha-epóxi. Em termos de desgaste abrasivo, o Zebron® apresentou perdas inferiores a 0,015 mm após 8 h de ensaio, enquanto o alcatrão atingiu aproximadamente 0,05 mm, correspondendo a um desgaste cerca de 3 vezes maior. Paralelamente, o Zebron® manteve resistência eletroquímica na faixa de 10^3 a $10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ após 168 h, enquanto o alcatrão apresentou degradação progressiva para valores próximos de $10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$, especialmente em menores espessuras. Esses resultados indicam maior durabilidade e maior capacidade de manutenção da função de barreira do Zebron® ao longo do tempo.

Com base nesses dados, procedeu-se à análise econômica considerando um horizonte de operação de 10 anos. Foram adotados custos médios de aplicação de R\$ 100/m² para o alcatrão de hulha-epóxi e R\$ 250/m² para o Zebron®. Adicionalmente, assumiu-se que o alcatrão requer reaplicações periódicas a cada 3 anos, em função de sua maior taxa de

desgaste e perda de desempenho eletroquímico, enquanto o Zebron® apresenta vida útil compatível com o período analisado, sem necessidade de substituição completa.

O custo do ciclo de vida pode ser expresso conforme a equação 5.1:

$$LCC = C_{\text{inicial}} + \sum C_{\text{manutenção}} \quad \text{Eq. 5.1}$$

A partir dessas premissas, obteve-se que o revestimento à base de alcatrão de hulha-epóxi: $LCC \approx R\$ 400/m^2$ (1 aplicação inicial + 3 reaplicações), enquanto que o revestimento Zebron®: $LCC \approx R\$ 250/m^2$ (aplicação única no período).

A evolução do custo acumulado ao longo do tempo é apresentada no gráfico a seguir.

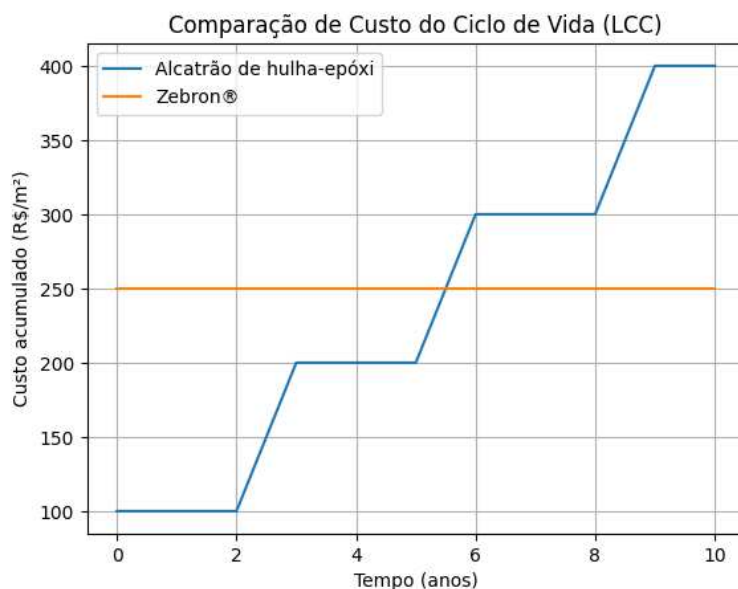


Figura 5.41. Comparação do custo acumulado do ciclo de vida (LCC) dos revestimentos Zebron® e alcatrão de hulha-epóxi ao longo de 10 anos de operação. Fonte próprio autor.

A análise do gráfico evidencia que, embora o alcatrão de hulha apresente menor custo inicial, seu custo acumulado aumenta de forma escalonada devido às sucessivas intervenções de manutenção, ultrapassando o custo do Zebron® a partir do terceiro ano de operação e atingindo valores aproximadamente 60% superiores ao final de 10 anos. Em contraste, o Zebron® apresenta custo constante ao longo do período, refletindo sua maior durabilidade e estabilidade em condições de tribocorrosão.

Além disso, ressalta-se que esta análise não considera custos indiretos, tais como interrupções operacionais, preparação de superfície, mão de obra adicional e riscos

associados à falha do revestimento. A inclusão desses fatores tende a ampliar ainda mais a vantagem econômica do Zebron®, especialmente em aplicações críticas.

- A análise técnico-econômica demonstrou que o melhor desempenho tribocorrosivo do revestimento Zebron® resulta em vantagem ao longo do ciclo de vida. Apesar do maior custo inicial (\approx R\$ 250/m² frente a \approx R\$ 100/m² do alcatrão de hulha-epóxi), o Zebron® apresentou menor desgaste ($< 0,015$ mm vs. 0,05 mm em 8 h) e maior estabilidade eletroquímica (10^3 – 10^4 $\Omega \cdot \text{cm}^2$ após 168 h), indicando maior durabilidade em serviço. Para um horizonte de 10 anos, o alcatrão, devido à necessidade de reaplicações a cada 3 anos, atinge custo acumulado de aproximadamente R\$ 400/m², enquanto o Zebron® mantém custo de cerca de R\$ 250/m², representando um custo total cerca de 60% superior para o alcatrão. Dessa forma, conclui-se que, apesar do maior investimento inicial, o revestimento Zebron® apresenta melhor relação custo-benefício ao longo do ciclo de vida, sendo tecnicamente mais robusto e economicamente mais viável para aplicações em ambientes severos, como sistemas de transporte e contenção de esgoto.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÕES

Com base nos objetivos específicos estabelecidos, as conclusões deste trabalho são apresentadas a seguir:

- Foi possível reproduzir, de forma consistente e reprodutível, um meio sintético representativo do esgoto da cidade de Uberlândia, contendo ácido sulfúrico em concentrações entre 5 e 9 g/L e partículas abrasivas de sílica com granulometria entre 300 e 500 μm . Esse meio foi capaz de simular simultaneamente os mecanismos de corrosão, abrasão e permeação, sendo validado pela semelhança entre os sulcos gerados em laboratório ($33,4 \pm 9,5 \mu\text{m}$) e aqueles observados em campo ($38,7 \pm 8,6 \mu\text{m}$), sem diferença estatística significativa a 95% de confiança.
- O aço ASTM A36 sem revestimento apresentou comportamento altamente instável e inadequado para aplicação em ambientes de esgoto, evidenciado por potenciais de corrosão inferiores a $-0,50 \text{ V}$, densidades de corrente da ordem de $10^{-4} \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}$ e resistências de transferência de carga inferiores a $10^2 \Omega\cdot\text{cm}^2$. Esses resultados confirmam, de forma inequívoca, a elevada agressividade do meio e a inviabilidade do uso do material sem proteção, devido à sua rápida degradação.
- Os resultados demonstram que a espessura do revestimento exerce influência direta no desempenho anticorrosivo. Revestimentos com espessuras entre 0,50 mm e 1,00 mm apresentaram resistência do revestimento da ordem de $10^4 \Omega\cdot\text{cm}^2$, garantindo proteção efetiva. O revestimento Zebron® apresentou valores iniciais de até $5,44 \times 10^8 \Omega\cdot\text{cm}^2$ (24 h), mantendo-se ainda na faixa de 10^3 a $10^4 \Omega\cdot\text{cm}^2$ após 168 h. Por outro lado, o alcatrão de hulha-epóxi apresentou degradação progressiva, com valores reduzidos para aproximadamente 10^6 – $10^4 \Omega\cdot\text{cm}^2$ (120–168 h) em maiores espessuras e queda acentuada para $6,8 \times 10^3 \Omega\cdot\text{cm}^2$ em espessura de 0,25 mm, caracterizando falha prematura. Esses resultados confirmam a superioridade do Zebron® e a existência de uma espessura crítica próxima de 0,50 mm para manutenção da integridade da barreira.
- Os ensaios de desgaste abrasivo evidenciaram diferenças marcantes entre os materiais. O revestimento de alcatrão de hulha apresentou perdas de espessura da

ordem de 0,05 mm após 8 horas, enquanto o Zebron® apresentou perdas inferiores a 0,015 mm nas mesmas condições, demonstrando desempenho significativamente superior. Observou-se ainda que o regime permanente de desgaste é atingido após aproximadamente 30 minutos de ensaio, indicando estabilização dos mecanismos atuantes. Os resultados confirmam que o alcatrão é altamente suscetível a mecanismos de microcorte e delaminação, enquanto o Zebron® apresenta desgaste mais controlado e estável.

- Foi demonstrado que a redução da espessura do revestimento impacta diretamente o desempenho eletroquímico, promovendo a queda dos valores de resistência do revestimento de 10^4 para valores inferiores a $10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$ em condições críticas. Esse comportamento está associado ao aumento da permeação do eletrólito e à exposição do substrato metálico. Verificou-se uma clara sinergia negativa entre abrasão e corrosão, resultando em degradação acelerada, especialmente para espessuras inferiores a 0,50 mm, nas quais ocorre perda significativa da função de barreira.
- A comparação entre os revestimentos permite afirmar, de forma conclusiva, que o Zebron® apresenta desempenho superior em todos os parâmetros avaliados. Em termos eletroquímicos, o Zebron® manteve valores de resistência do revestimento entre 10^3 e $10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ após 168 h, além de valores iniciais da ordem de $10^8 \Omega \cdot \text{cm}^2$, enquanto o alcatrão de hulha-epóxi apresentou degradação progressiva para valores entre 10^4 e $10^3 \Omega \cdot \text{cm}^2$, especialmente em condições severas. No que se refere ao desgaste abrasivo, o Zebron® apresentou perdas inferiores a 0,015 mm, enquanto o alcatrão atingiu aproximadamente 0,05 mm, ou seja, cerca de 3 vezes maior desgaste. Esses resultados evidenciam que o Zebron® mantém sua integridade estrutural e funcional por períodos significativamente mais longos, enquanto o alcatrão perde rapidamente sua capacidade protetora sob condições de tribocorrosão. Dessa forma, o Zebron® configura-se como a alternativa mais adequada para aplicação em tubulações de esgoto sujeitas a condições severas.
- A análise técnico-econômica demonstrou que, apesar do maior custo inicial do Zebron® (\approx R\$ 250/m²) em comparação ao alcatrão de hulha-epóxi (\approx R\$ 100/m²), seu melhor desempenho tribocorrosivo, com menor desgaste ($< 0,015$ mm vs. 0,05 mm em 8 h) e maior estabilidade eletroquímica (10^3 – $10^4 \Omega \cdot \text{cm}^2$ após 168 h), resulta em maior durabilidade. Em 10 anos, o alcatrão atinge custo acumulado de \approx R\$ 400/m² devido às reaplicações, enquanto o Zebron® mantém custo de \approx R\$ 250/m², confirmando melhor relação custo-benefício e maior viabilidade para aplicações severas.
- De forma inequívoca, conclui-se que o desempenho dos revestimentos poliméricos é governado pela interação entre três fatores principais: taxa de desgaste abrasivo,

estabilidade eletroquímica e espessura crítica do revestimento, situada em torno de 0,50 mm. A metodologia experimental proposta foi validada quantitativamente, demonstrando capacidade de reproduzir mecanismos reais de degradação e de discriminar o desempenho dos materiais avaliados. Os resultados obtidos fornecem base técnica robusta para a seleção de revestimentos, com potencial direto de aplicação na ampliação da vida útil de tubulações de esgoto.

CAPÍTULO VII

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se dar continuidade ao estudo dos seguintes pontos:

- Combinação de vantagens do revestimento por Zebron® (resistência mecânica) e do alcatrão de Hulha (barreira química) em um revestimento híbrido, contudo utilizando-se materiais que não sejam ambientalmente inadequados;
- Desenvolvimento de novos revestimentos com a incorporação de nanomateriais, como por exemplo nanopartículas de dióxido de silício (SiO_2) e dióxido de titânio (TiO_2) para melhorar a resistência ao desgaste e a autorregeneração;
- Utilização de modelos preditivos, como por exemplo machine learning para correlacionar espessura, tempo de imersão e percentual de inibição à corrosão.

CAPÍTULO VII

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDULMUTAALI, A. *et al.* Online monitoring of carbon steel corrosion via electrochemical noise and wavelet analysis. **Metals**, v. 14, n. 1, p. 1-18, 2024. DOI: 10.3390/met14010066.

ABIOYE, O. P.; FAYOMI, O. S. I.; LOTO, C. A. Electrochemical Study of Co-Deposited Zn-ZnO on ASTM A36 Mild Steel for Marine Application. **Journal of Bio- and Tribo-Corrosion**, v. 6, p. 71, 2020. DOI: 10.1007/s40735-020-00371-w.

ABRAHAM, D. M.; GILLANI, S. A. Innovations in materials for sewer system rehabilitation. **Tunnelling and Underground Space Technology**, v. 14, p. 43-56, 1999.

ABREU, D. **Tribocorrosão em aços inoxidáveis ferríticos: uma abordagem metodológica**. 2019. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia.

ABREU, D.; ARDILA, M. A. N.; DE MELLO, J. D. B. Influence of chromium content and stabilization on tribocorrosion of ferritic stainless steel. **Journal of Bio-and Tribo-Corrosion**, v. 7, p. 1-14, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9649: Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário: Procedimento**. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16915: Agregados - Amostragem**. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17054: Agregados – Determinação da composição granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2022.

AMAND, S. *et al.* Constant-phase-element behavior caused by inhomogeneous water uptake in anti-corrosion coatings. **Electrochimica Acta**, v. 87, p. 693-700, 2013. ISSN 0013-4686.

ARDILA, M. A. N. **Influência do nióbio na textura e resistência à corrosão de aços inoxidáveis ferríticos em ambientes aerados e desaerados**. 2013. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Uberlândia.

ARIFIN, M. Z.; KUSTONO, D.; WIDIYANTI, W. Characteristics of ASTM A36 Steel Plate Corrosion Rate Due to Bending Treatment with Angle, Corrosion Media, and Corrosion Time Variations. **Journal of Engineering and Applied Technology**, v. 1, n. 1, p. 21-29, 2021. DOI: <https://doi.org/10.21831/jeatech.v1i1.31478>.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G65: Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus**. West Conshohocken, 2015.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM G105-20: Standard Test Method for Conducting Wet Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests**. West Conshohocken, 2020.

BENEA, L.; SIMIONESCU, N.; MARDARE, L. The effect of polymeric protective layers and the immersion time on the corrosion behavior of naval steel in natural seawater. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, p. 13174-13184, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.09.059>.

BLAU, Peter J. **Friction Science and Technology: From Concepts to Applications**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

BONORA, P. L.; DEFLORIAN, F.; FEDRIZZI, L. Electrochemical impedance spectroscopy as a tool for investigating underpaint corrosion. **Electrochimica Acta**, v. 41, n. 7, p. 1073-1082, 1996. ISSN 0013-4686.

BOWKER, R. P. G.; SMITH, J. M.; WEBSTER, N. A. **Odor and Corrosion Control in Sanitary Sewerage Systems and Treatment Plants: Design Manual**. Washington, DC: Center for Environmental Research Information, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, 1985.

BURTON, F. L. *et al.* **Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery**. 5. ed. Nova York: McGraw-Hill Education, 2013.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 10. ed. Hoboken: Wiley, 2018.

CANEVAROLO JR., Sebastião V. **Ciência dos Polímeros: um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2006.

CARRERA, L. *et al.* A review of sulfide emissions in sewer networks: overall approach and systemic modelling. **Water Science and Technology**, v. 73, n. 6, p. 1231-1242, 2016.

CEN, X.; LI, J.; JIANG, G.; ZHENG, M. A critical review of chemical uses in urban sewer systems. **Water Research**, v. 240, p. 120108, 2023.

CHANG, X. *et al.* Alumina nanoparticles-reinforced graphene-containing waterborne polyurethane coating for enhancing corrosion and wear resistance. **Corrosion Communications**, v. 4, p. 1-11, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corcom.2021.11.004>.

CONI, G. D. A. *et al.* Degradação do concreto através da formação de ácido sulfúrico biogênico em uma Estação Elevatória de Esgoto. **Revista ALCONPAT**, v. 12, n. 2, p. 279-295, 2022.

CORTÉS, M.; VERA, E. Durability considerations for mitigating corrosion caused by biogenic sulfuric acid in sewerage systems. In: **Journal of Physics: Conference Series**, 2019. IOP Publishing, p. 012088.

DAMIÃO, Carlos Alberto. **Efeito da textura metalúrgica na resistência a abrasão de aços ao manganês**. 2018. 73 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1120>.

FERREIRA, D. L. *et al.* Espectroscopia de Impedância Eletroquímica: Princípios Básicos e Algumas Aplicações. **Revista Virtual de Química**, v. 15, n. 3, p. 536-552, 2023.

FRÉCHETTE, É.; COMPÈRE, C.; GHALI, E. Evaluation of the corrosion resistance of painted steels by impedance measurements. **Corrosion Science**, v. 33, n. 7, p. 1067-1081, 1992. ISSN 0010-938X.

GAPSIARI, F. *et al.* Analysis of corrosion inhibition of *Kleinhovia hospita* plant extract aided by quantification of hydrogen evolution using a GLCM/SVM method. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 48, n. 41, p. 15392-15405, 12 maio 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.01.067>.

GARCÍA, M. E.; LÓPEZ, P. **Aguas residuales. Composición**. Valladolid: Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico del Agua, 2005.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

GONEN, T.; UYGUNOGLU, T. The effect of various polymer-based coating types on the biological corrosion resistance of mortar. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 27, p. e20220085, 2022.

GONZALEZ-GARCIA, Y.; GARCIA, S.; MOL, J. Electrochemical techniques for the study of self healing coatings. In: _____. **Active Protective Coatings: New-Generation Coatings for Metals**. Dordrecht: Springer, 2016. p. 203-240.

HASTUTY, S. *et al.* The Effect of Chloride, Sulfate, and Nitrate Anions for Pitting Corrosion Behavior on ASTM A36 Steel in Atmospheric Environment. In: **ICONIC-RS 2022 Conference Proceedings**, 2022.

HENZE, M.; LEDIN, A. Types, characteristics and quantities of classic, combined domestic wastewaters. In: _____. **Decentralised Sanitation and Reuse: Concepts, Systems and Implementation**. Londres: IWA Publishing, 2001. p. 59-72.

HENZE, M. *et al.* **Biological Wastewater Treatment: Principles, Modelling and Design**. Londres: IWA Publishing, 2008.

HINDERLITER, B. R. *et al.* Interpretation of EIS data from accelerated exposure of coated metals based on modeling of coating physical properties. **Electrochimica Acta**, v. 51, n. 21, p. 4505-4515, 2006. ISSN 0013-4686.

HUANG, J.; LI, Z.; LIAW, B. Y.; ZHANG, J. Graphical analysis of electrochemical impedance spectroscopy data in Bode and Nyquist representations. **Journal of Power Sources**, v. 309, p. 82-98, 2016.

HUTCHINGS, I.; SHIPWAY, P. **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. 2. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.

HVITVED-JACOBSEN, T.; VOLLERTSEN, J.; NIELSEN, A. **Sewer Processes: Microbial and Chemical Process Engineering of Sewer Networks**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2013.

ISWANTO, A. Biodegradable PLA/HEC-ZnO Nanocomposite for Corrosion Protection of ASTM A36 Steel: A Combined Quantum and Electrochemical Analysis. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 8, p. 101039, 2025. DOI: 10.1016/j.cscee.2024.101039.

ISWANTO, I. Study on the Making of Corrosion Resistant Steel (ASTM A36) Coatings from a Mix of Graphene Oxide + Waterborne Paint. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 673, 2019. p. 012122.

JIANG, G. *et al.* Optimization of intermittent, simultaneous dosage of nitrite and hydrochloric acid to control sulfide and methane productions in sewers. **Water Research**, v. 45, n. 18, p. 6163-6172, 2011.

JIANG, G.; KELLER, J.; BOND, P. L.; YUAN, Z. Predicting concrete corrosion of sewers using artificial neural network. **Water Research**, v. 92, p. 52-60, 2016.

JIANG, G.; SUN, J.; SHARMA, K. R.; YUAN, Z. Corrosion and odor management in sewer systems. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 33, p. 192-197, 2015.

KHAMIS, E.; REYAD, T. E; ABD-EL-KHALEK, D. E. Corrosion assessment and mitigation in wastewater systems: a comprehensive review. **npj Materials Degradation**, 2025. DOI: 10.1038/s41529-025-00645-z.

KOUKETSU, F.; PACHOLOK, D.; COUSSEAU, T.; DA SILVA, C. H. Abrasive wear resistance of idler roll polymeric materials. **Surface Topography: Metrology and Properties**, v. 10, n. 3, p. 034002, 2022.

LABIAPARI, W. S. *et al.* Stainless steel as an antiwear material for the bio-fuel industry. **Wear**, v. 302, n. 1–2, p. 1536-1545, 2013. ISSN 0043-1648.

LABIAPARI, W. S. *et al.* Micro abrasion-corrosion of ferritic stainless steels. **Wear**, v. 376–377, Part B, p. 1298-1306, 2017. ISSN 0043-1648.

LAZANAS, A. C.; PRODROMIDIS, M. I. Electrochemical Impedance Spectroscopy - A Tutorial. **ACS Measurement Science Au**, v. 3, p. 162-193, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsmeasuresciau.2c00070>.

LEE, S.; KIM, H. Fatigue Strength of Steel Girders Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer Patch. **Journal of Structural Engineering**, ASCE, 2024.

LI, W. *et al.* Current status and future prospects of sewer biofilms: Their structure, influencing factors, and substance transformations. **Science of the Total Environment**, v. 695, p. 133815, 2019.

LIU, G. *et al.* Electrochemical analysis of carbon steel corrosion induced by chloride and sulfate ions in simulated concrete pore solution. **International Journal of Electrochemical Science**, v. 13, p. 6248–6258, 2018.

LOVEDAY, D.; PETERSON, P.; RODGERS, B. Evaluation of organic coatings with electrochemical impedance spectroscopy. Part 2: Application of EIS to coatings. **JCT CoatingsTech**, v. 1, n. 10, p. 88-93, 2004. ISSN 1547-0083.

LOWE, D.; MARSHALL, G. P. Abrasion resistance of polymers in slurry pipes. **Construction and Building Materials**, v. 3, n. 2, p. 100-106, 1989.

LUKÁCS, Z.; KRISTÓF, T. A generalized model of the equivalent circuits in the electrochemical impedance spectroscopy. **Electrochimica Acta**, v. 363, p. 137199, 2020.

MA, L. *et al.* Polyurethane coatings with corrosion inhibition and color-fluorescence damage reporting properties based on APhen-grafted carbon dots. **Corrosion Science**, v. 232, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2024.112038>.

MALEK MOHAMMADI, M. *et al.* Factors influencing the condition of sewer pipes: State-of-the-art review. **Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice**, v. 11, n. 4, p. 03120002, 2020.

MAKARENKO, A. *et al.* Corrosion degradation of long-term operated steel sewer pipes. **Materials Science**, v. 59, p. 532–537, 2024. DOI: 10.1007/s11003-024-00808-4.

MARTÍNEZ DEUSA, G. M.; PASCICHANÁ HERNÁNDEZ, C. A. **Desarrollo de un sustrato sintético que simula agua residual domestica para fines de investigación**. 2019. 98 f. Projeto de fim de curso (Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidad del Valle, Santiago de Cali, Colômbia.

MARTÍNEZ, P. A. **Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas**. 2014. 495 f. Tese (Doutorado) - Universidad de Murcia, Murcia, Espanha.

METCALF, W.; EDDY, H. P. **Metcalf and Eddy Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4. ed. Nova York: McGraw Hill, 2003.

MORADIGHADI, N.; NESIC, S.; TRIBOLLET, B. Identifying the dominant electrochemical reaction in electrochemical impedance spectroscopy. **Electrochimica Acta**, v. 400, p. 139460, 2021.

NGUYEN, A. S. *et al.* Impedance analysis of the distributed resistivity of coatings in dry and wet conditions. **Electrochimica Acta**, v. 179, p. 452-459, 2015. ISSN 0013-4686.

NUNES, L. D. C. **Avaliação da eficiência do revestimento anticorrosivo à base de diacetato de celulose para aço API 5L X65**. 2023. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ODA, M. *et al.* Polyurethane coatings for industrial applications: performance and durability. **Progress in Organic Coatings**, v. 73, p. 123–130, 2012.

PAJKOSSY, T.; JURCZAKOWSKI, R. Electrochemical impedance spectroscopy in interfacial studies. **Current Opinion in Electrochemistry**, v. 1, n. 1, p. 53-58, 2017.

PANIGRAHI, K.; MAL, S.; BHATTACHARYYA, S. Deciphering interfacial charge transfer mechanisms in electrochemical energy systems through impedance spectroscopy. **Journal of Materials Chemistry A**, v. 1, p. 14334-14353, 2024.

PRADITYANA, A. *et al.* Curry leaf extract (*Murraya Koenigii* (L.) Spreng) as a corrosion inhibitor of ASTM A36 steel in H₂SO₄. **Results in Engineering**, v. 24, 2024.

PRATAMA, R. G. P.; PRATIWI, D. K.; UTAMI, N. P. E. The Effect of Time Variation on Corrosion Behaviour of ASTM A36 in Seawater from West Bangka of Bangka Belitung Islands, Indonesia. **Journal of Mechanical Science and Engineering**, v. 8, n. 2, 2022.

PRATIKNO, H., PRADYPTIA, I. K.; IKHWANI, H. Effect analysis of coating methods and corrosive media variations toward adhesion strength, corrosion rate and metalography of ASTM A36 steel with polyurethane coating. **International Journal of Offshore and Coastal Engineering**, v. 5, n. 2, p. 70-78, 2021.

REALITY PATHING. **Comparing Epoxy vs. Polyurethane Resin Coatings**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://realitypathing.com/comparing-epoxy-vs-polyurethane-resin-coatings/>. Acesso em: 8 dez. 2025.

REVIE, R. W.; UHLIG, H. H. **Uhlig's Corrosion Handbook**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2011.

ROGHANIAN, N.; BANTHIA, N. Development of a sustainable coating and repair material to prevent bio-corrosion in concrete sewer and waste-water pipes. **Cement and Concrete Composites**, v. 100, p. 99-107, 2019.

SANTANDRÉA, R. **Análise da corrosão em aços inoxidáveis ferríticos estabilizados e com teores variáveis de molibdênio**. 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

SCULLY, J. R. Electrochemical Impedance of Organic-Coated Steel: Correlation of Impedance Parameters with Long-Term Coating Deterioration. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 136, n. 4, p. 979, 1989. ISSN 1945-7111.

SEYMOUR, R. B. **Polymers for Engineering Applications**. Metals Park: American Society for Metals, 1987.

SHI, X. *et al.* The sewer advances: How to select eco-friendly pipe materials for environmental protection. **Science of the Total Environment**, v. 952, p. 175853, 2024.

SHMAIT, A. *et al.* Studies on coatings containing nano-zinc oxide for steel protection. **Materials and Corrosion**, v. 72, p. 859-867, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/maco.202012010>.

SIS - SWEDISH STANDARDS INSTITUTE. **SIS 05 59 00: Surface preparations standards for painting steel surface**. Estocolmo, 1967.

SOPHONSIRI, C.; MORGENROTH, E. Chemical composition associated with different particle size fractions in municipal, industrial, and agricultural wastewaters. **Chemosphere**, v. 55, n. 5, p. 691-703, 2004. ISSN 0045-6535.

SOUZA, D. H. D. **Avaliação em comparação da eficiência dos inibidores (comercial e DMcT) para aço carbono 1007 em meio de água do mar sintética**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

STANASZEK-TOMAL, E.; FIERTAK, M. Biological corrosion in the sewage system and the sewage treatment plant. **Procedia Engineering**, v. 161, p. 116-120, 2016.

STAUFFER, D.; AHARONY, A. **Introduction to percolation theory**. Taylor & Francis, 2. ed. London, 1994.

TAMBE, S. *et al.* Evaluation of microbial corrosion of epoxy coating by using sulphate reducing bacteria. **Progress in Organic Coatings**, v. 94, p. 49-55, 2016.

TARAKANOV, D. Using pipes from various materials for sewage network: theoretical analysis. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, 2020. IOP Publishing, p. 012103.

TRENTIN, A. *et al.* Electrochemical Characterization of Polymeric Coatings for Corrosion Protection: A Review of Advances and Perspectives. **Polymers**, v. 14, n. 12, p. 2306, 2022. ISSN 2073-4360.

TSUTIYA, M. T.; SOBRINHO, P. A. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. São Paulo: Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica da USP, 2000.

VAHIDI, E. *et al.* Environmental life cycle analysis of pipe materials for sewer systems. **Sustainable Cities and Society**, v. 27, p. 167–174, 2016.

VALIX, M.; SHANMUGARAJAH, K. Biogenic acids produced on epoxy linings installed in sewer crown and tidal zones. **Water Research**, v. 80, p. 217-226, 2015.

VINCKE, E.; BOON, N.; VERSTRAETE, W. Analysis of the microbial communities on corroded concrete sewer pipes—a case study. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 57, p. 776-785, 2001.

WANG, H. *et al.* Mechanically robust inorganic/organic hybrid polyurethane films with excellent self-healing and anti-corrosion ability. **Progress in Organic Coatings**, v. 167, p. 106837, jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2022.106837>.

WARD, Ian M.; SWEENEY, John. **An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers**. 2. ed. Chichester: Wiley, 2013.

WELLS, T.; MELCHERS, R. Modelling concrete deterioration in sewers using theory and field observations. **Cement and Concrete Research**, v. 77, p. 82-96, 2015.

WIRADINATA, T. A. *et al.* Analysis of Corrosion Rate in Low-Carbon Steel ASTM A36 and AISI 1020 in Sulfuric Acid Solution Using Heat Treatment Temperature and Immersion Time Variations. **Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur**, v. 10, n. 1, 2025.

WU, L.; HU, C.; LIU, W. V. The sustainability of concrete in sewer tunnel—A narrative review of acid corrosion in the city of Edmonton, Canada. **Sustainability**, v. 10, n. 2, p. 517, 2018.

XU, Y. *et al.* Synergistic effect of 8-HQ@CeO₂ for enhanced corrosion resistance of self-healing polyurethane coating for corrosion protection of mild steel. **Progress in Organic Coatings**, v. 186, p. 108015, jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2023.108015>.

YABUKI, A. *et al.* The anti-slurry erosion properties of polyethylene for sewerage pipe use. **Wear**, v. 240, n. 1, p. 52-58, 2000.

YUE, X. *et al.* Corrosion behavior of mild steel in various environments including CO₂ and H₂S. **Metals**, v. 15, n. 4, p. 1-20, 2025. DOI: 10.3390/met15040440.

ZEBRON. **Chemical Resistance of Zebron® Coatings**. [S. l.], 2025. Disponível em: <https://zebron.com/technical-resources/>. Acesso em: 8 dez. 2025.

ZENG, Y. *et al.* Preparation and characterization of solvent-free anti-corrosion polyurethane-urea coatings. **Surfaces and Interfaces**, v. 36, p. 102504, fev. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2022.102504>.

ZHANG, L.; KELLER, J.; YUAN, Z. Inhibition of sulfate-reducing and methanogenic activities of anaerobic sewer biofilms by ferric iron dosing. **Water Research**, v. 43, n. 17, p. 4123-4132, 2009.

ZHANTONG PIPE. **In-Depth Analysis of Epoxy Coal Tar Anti-Corrosion Steel Pipe Technology**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.zhantongpipe.com/technical/technical97.html>. Acesso em: 8 dez. 2025.

ZUM GAHR, K.-H. **Microstructure and Wear of Materials**. Amsterdã: Elsevier, 1987.

9. ANEXO 1



BIOÉTICA
AMBIENTAL

Relatório de Ensaio 17277/2021.0.A

Proposta Técnica: PC214/2021



Data de Publicação: 22/04/2021 09:13

Identificação Conta	
Cliente: Departamento Municipal de Água e Esgoto	CNPJ/CPF: 25.769.548/0001-21
Contato: Marcelo Costa de Araújo	Telefone: (34) 3233-4708 / (34) 3233-4687
Endereço: Avenida Rondon Pacheco, nº 6400 - Tibery	E-mail: marcelocosta@uberlandia.mg.gov.br
Cidade: Uberlândia	CEP: 38405-142

Nº Amostra: 17277-1/2021.0 - Afluente - ETE Uberabinha	
Tipo de Amostra: Efluente	
Data Coleta: 08/04/2021 13:10	Data Recebimento: 09/04/2021 10:15
Condição do Tempo: Bom	Chuvvas nas últimas 24h: Sim
Tipo de Amostragem: Composta	Temperatura Ambiente (In situ): 27°C
Procedência da Amostra: ETE Uberabinha - 478568 - Afluente - ETE Uberabinha	Natureza da Amostra: Bruta

Resultados Analíticos

Demais Ensaios					
Análise	Resultado	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Arsênio Total	< 0,005 mg/L	0,005	0,002	SMWW 3114 C	19/04/2021
Cádmio Total	0,009 mg/L	0,001	0,01	SMWW 3120 B	14/04/2021
Chumbo Total	< 0,008 mg/L	0,008	0,03	SMWW 3120 B	14/04/2021
Cloreto Total	148,37 mg/L	0,80	-	EPA 300.1: 1997 Rev. 01	20/04/2021
Cobre Dissolvido	0,010 mg/L	0,008	-	SMWW 3120 B	15/04/2021
Condutividade Elétrica	1.214,00 µS/cm	0,3	-	SMWW 2510 B	13/04/2021
Cromo Hexavalente	< 0,05 mg/L	0,05	-	SMWW 3500 CR B	13/04/2021
Cromo Trivalente	< 0,05 mg/L	0,05	-	SMWW 3500 CR B	14/04/2021
DBO	179,75 mg/L	2,00	0,02	SMWW 5210 B	09/04/2021
DOO	589,04 mg/L	20,00	-	SMWW 5220 D	15/04/2021
Escherichia coli	1,73 x 10 ¹⁰ NMP/100mL	1	-	SMWW 9223 B	09/04/2021
Estanho Total	< 0,80 mg/L	0,80	0,02	SMWW 3120 B	14/04/2021
Fenóis Totais	0,027 mg/L	0,003	-	SMWW 5530 C	20/04/2021
Ferro Total	1,53 mg/L	0,10	0,02	SMWW 3120 B	14/04/2021
Ferro Dissolvido	0,40 mg/L	0,10	-	SMWW 3120 B	15/04/2021
Fósforo Total	12,84 mg/L	0,01	0,01	POP AIX 172 Rev.02	15/04/2021
Mercurio Total	< 0,00020 mg/L	0,00020	-	SMWW 3112 B	19/04/2021
Níquel Total	0,080 mg/L	0,008	0,03	SMWW 3120 B	14/04/2021
Nitrito	< 0,03 mg/L	0,03	-	EPA 300.1: 1997 Rev. 01	20/04/2021
Nitrato	0,20 mg/L	0,20	-	EPA 300.1: 1997 Rev. 01	20/04/2021
Nitrogênio Amoniacal	40,04 mg/L	0,20	0,1	SMWW NH3 C	15/04/2021
Nitrogênio Total	51,72 mg/L	0,10	-	SMWW 4500 N	20/04/2021
Óleos Minerais	< 10,00 mg/L	10,00	-	SMWW 5520 D	20/04/2021
Óleos Vegetais e Gorduras Animais	76,60 mg/L	10,00	-	SMWW 5520 D	20/04/2021
Selênio Total	< 0,005 mg/L	0,005	0,03	SMWW 3114 C	19/04/2021

Os resultados deste relatório restringem-se às amostras analisadas. Este relatório somente poderá ser reproduzido em sua totalidade. O prazo de guarda de amostra-convite de entrada é de 07 dias após o término do relatório de análise, exceto para amostras periclitadas.



BIOÉTICA
AMBIENTAL

Relatório de Ensaio 17277/2021.0.A

Proposta Técnica: PC214/2021



Demais Ensaio					
Análise	Resultado	LQ	Incerteza	Referência	Data Análise
Sólidos Sedimentáveis	3,00 mL/L	0,10	-	SMWW 2540 F	15/04/2021
Surfactantes	0,32 mg/L	0,03	-	SMWW 5540 C	12/04/2021
Sulfeto Total	< 0,10 mg/L	0,10	-	SMWW 4500 S2 D	19/04/2021
Zinco Total	0,15 mg/L	0,06	0,01	SMWW 3120 B	14/04/2021
pH - Coleta 01	7,80	1 - 13	-	SMWW 4500 H+B	08/04/2021
pH - Coleta 02	7,79	1 - 13	-	SMWW 4500 H+B	08/04/2021
pH - Coleta 03	7,76	1 - 13	-	SMWW 4500 H+B	08/04/2021
pH - Coleta 04	7,56	1 - 13	-	SMWW 4500 H+B	08/04/2021
pH - Coleta 05	7,56	1 - 13	-	SMWW 4500 H+B	08/04/2021
pH - Coleta 06	7,44	1 - 13	-	SMWW 4500 H+B	08/04/2021
pH - Coleta 07	7,26	1 - 13	-	SMWW 4500 H+B	08/04/2021
pH - Coleta 08	7,28	1 - 13	-	SMWW 4500 H+B	08/04/2021
Temperatura Amostra - Coleta 01	27,00 °C	1 - 120	-	SMWW 2550 B	08/04/2021
Temperatura Amostra - Coleta 02	27,00 °C	1 - 120	-	SMWW 2550 B	08/04/2021
Temperatura Amostra - Coleta 03	28,00 °C	1 - 120	-	SMWW 2550 B	08/04/2021
Temperatura Amostra - Coleta 04	28,00 °C	1 - 120	-	SMWW 2550 B	08/04/2021
Temperatura Amostra - Coleta 05	28,00 °C	1 - 120	-	SMWW 2550 B	08/04/2021
Temperatura Amostra - Coleta 06	27,00 °C	1 - 120	-	SMWW 2550 B	08/04/2021
Temperatura Amostra - Coleta 07	27,00 °C	1 - 120	-	SMWW 2550 B	08/04/2021
Temperatura Amostra - Coleta 08	28,00 °C	1 - 120	-	SMWW 2550 B	08/04/2021

Legenda:

LQ: Limite de Quantificação do laboratório para o parâmetro.

SMWW: Standard Methods for Examination of Water and Wastewater - 23ª Edition 2017.

EPA: Environmental Protection Agency.

POP: Procedimento Operacional Padrão.

µBica: microlitros por centímetro

NRP100mL: Número mais provável

Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0354.

Informações da Coleta:

Amostras coletadas pela Bioética Ambiental de acordo com a norma Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 23ª ed 2017 Methods 1050, 3010, 3010 B, 5000, 9000.

PIG UDIA e ARX 107 - Planejamento de Amostragem Rev. 04.

Laura Magalhães Patrício

Laura Magalhães Patrício
Responsável pela Publicação de Amostras

Aline Martins

Aline Martins
Responsável Técnico de Amostras
CRQ 02404593

Revisado por: Amanda Borges Silva, Jenaina da Silva Reis.

Chave de Validação: 29105491b297a0009fc094931948b2d

Os resultados estão sujeitos ao redimensionamento de amostras analisadas. São válidos somente quando apresentados em seu totalidade.
Caso não queira de outra forma de amostra é de 50 dias após emissão do relatório de amostra, exceto para amostras parciais.

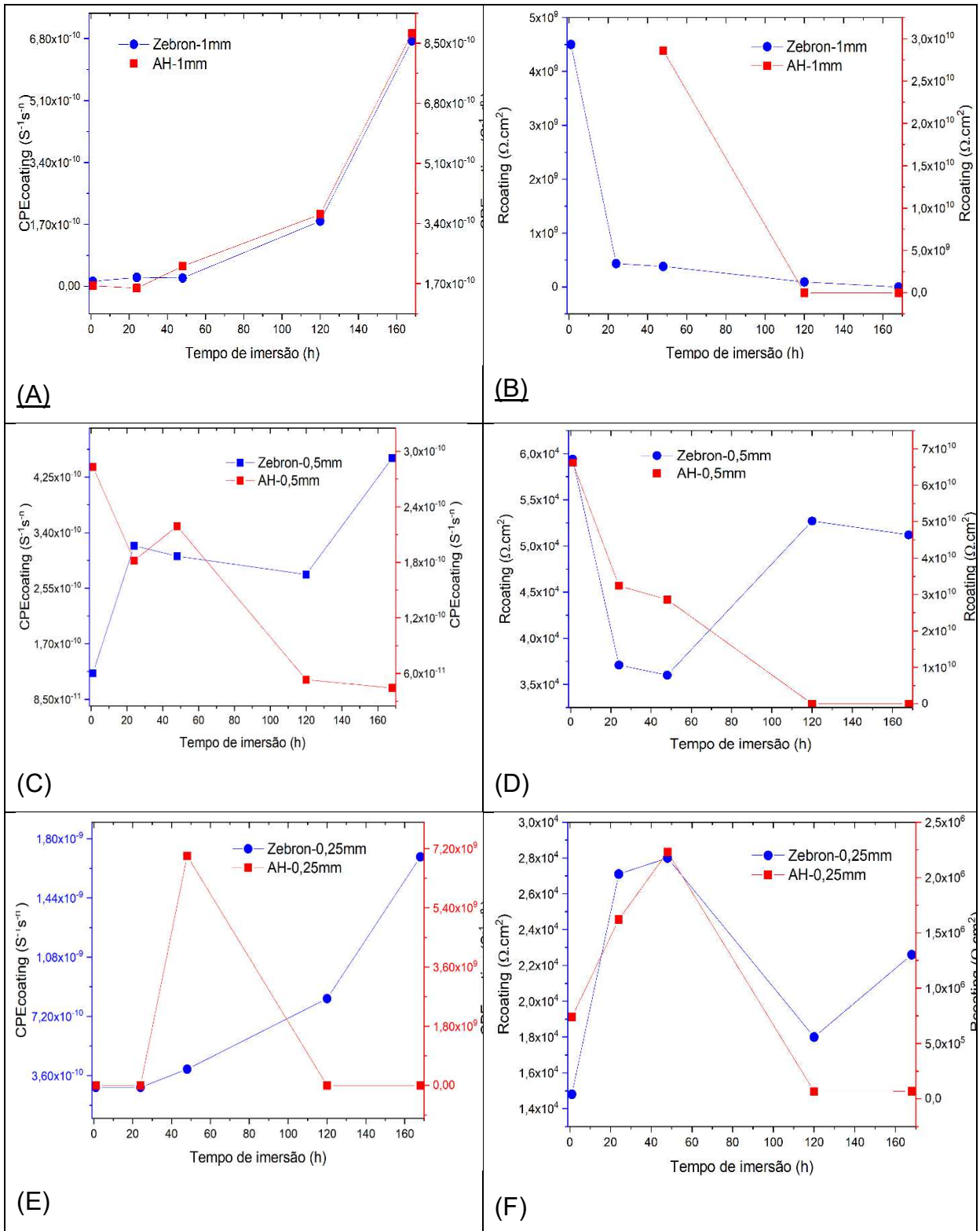
Ampl - 010
Av. Dr. Pedro de Paulo Lemos, nº 25
Santos (SP) - Cep: 13.101-000
Telefone: (045) 3339-0000

www.bioeticaambiental.com.br
SAC: 0800 015 2204 | WhatsApp: (045) 3339-0000

Pág. 38

Lab. 010 - 010
Rua Chryseus, nº 48
Nova Itaboraí - Cep: 29.200-000
Telefone: (045) 3211-0004 | (045) 3211-0004

10. ANEXO 2



Gráficos de dispersão comparativos mostrando as tendências nos valores de Rcoating e CPE dos revestimentos nas diferentes espessuras.

11. ANEXO 3

