

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS

ESTUDO AVALIATIVO SOBRE A CORROSIVIDADE DE SOLOS
AMAZÔNICOS POR MEIO DE ANÁLISES GEOTÉCNICAS,
QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS

ARIADNE PIMENTEL MACHADO

MANAUS - AM

Agosto/2019

ARIADNE PIMENTEL MACHADO

ESTUDO AVALIATIVO SOBRE A CORROSIVIDADE DE SOLOS
AMAZÔNICOS POR MEIO DE ANÁLISES GEOTÉCNICAS,
QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS

Dissertação apresentada como requisito parcial
para obtenção do título de Mestre do Programa
de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de
Materiais na Universidade Federal do
Amazonas, área de concentração de Materiais.

Prof. Dr. PAULO ROGÉRIO DA COSTA COUCEIRO

Orientador

MANAUS - AM

Agosto/2019

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

M149e	<p>Machado, Ariadne Pimentel</p> <p>Estudo avaliativo sobre a corrosividade de solos amazônicos por meio de análises geotécnicas, químicas e microbiológicas / Ariadne Pimentel Machado. 2019</p> <p>82 f.: il. color; 31 cm.</p> <p>Orientador: Paulo Rogério da Costa Couceiro</p> <p>Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais) - Universidade Federal do Amazonas.</p> <p>1. Solo argiloso. 2. Aço AISI 1020. 3. Corrosão microbiológica. 4. Acidithiobacillus thiooxidans . 5. Acidithiobacillus ferrooxidans. I. Couceiro, Paulo Rogério da Costa II. Universidade Federal do Amazonas III. Título</p>
-------	---

ARIADNE PIMENTEL MACHADO

**ESTUDO AVALIATIVO SOBRE A CORROSIVIDADE DE SOLOS
AMAZÔNICOS POR MEIO DE ANÁLISES GEOTÉCNICAS,
QUÍMICAS E MICROBIOLÓGICAS**

Aprovada em 16 de agosto de 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Rogério da Costa Couceiro (Orientador)
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Takeshi Matsuura (Membro)
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. Emerson da Costa Rios (**Membro**)
Universidade Federal do Amazonas

AGRADECIMENTOS

A Deus Pai Todo Poderoso, por ouvir as minhas orações e pelas bênçãos derramadas.

Aos meus pais e avós, pelo apoio e sempre acreditando nos meus sonhos.

Ao meu esposo, pela paciência e parceria.

Ao professor Paulo Rogério da Costa Couceiro, pela confiança depositada, compromisso, oportunidade e orientação.

Ao professor Takeshi Matsuura, pelos seus ensinamentos, orientações, simplicidade, companheirismo, disponibilidade de recursos e pessoal.

As amigas Marleide Menezes e Jaqueline Santos, pelas orações, amizade e fidelidade. Essas são minhas amigas-irmãs. A Andréa Souza dos Santos, que sempre esteve à postos para qualquer situação.

Aos amigos, Ayná Vieira e Ygor Leite, por compartilhar, mais particularmente, de todos os momentos de dor e alegria no mestrado.

Aos companheiros de laboratório e/ou de estudos: Dayane Izabelita, Rosane Bindá, Aguinaldo Branco, Frank Martins, Thamirys Ribeiro, Alexandra Rosas; e, aos outros, que a listagem não caberia nesta página.

Aos pesquisadores e técnicos, Marcos Denilson (LAMESP/ Central Analítica), Mateus Elias (LABIV/ Central Analítica), Juliana Pereira (Laboratório de Metalurgia/ FT), Jakieline Veras (LTMOE/ Inpa), Miécio Melquiades (LabMat/ Estatística), Diogo (LaMac/ FT) pelas análises, respectivamente, de: absorção atômica, infravermelho, metalografia, MEV, DRX, FRX.

Aqueles que torceram por mim e participaram, ainda que indiretamente, de todo o processo do mestrado, além de entenderem as eventuais ausências.

A FAPEAM, pelo amparo financeiro.

RESUMO

Conforme estudos realizados em 2015 pela *International Zinc Association* (IZA) e Universidade de São Paulo, estima-se que o Brasil gasta em torno de 236 bilhões de reais na reposição de equipamentos causados pela corrosão. Diversos métodos têm sido propostos para estudar e monitorar esse processo. No entanto, tratar o solo como agente participante ainda é pouco considerado. Quando um duto ou estrutura é exposto a uma variedade de ambientes, pode ser colonizado por bactérias, fungos ou algas e isto representa um dos grandes problemas industriais da atualidade de repercussão econômica, ambiental ou de saúde. Neste trabalho estudou-se a suscetibilidade do aço AISI 1020 à corrosão em contato com o solo representativo da região amazônica, coletado em pontos de saída de dutos do solo. As amostras de solo foram caracterizadas pelas técnicas químicas (DRX, FRX, IV, MEV, pH e acidez total), geotécnicas (limites de liquidez – LL e plasticidade – LP, granulometria e massa específica dos grãos) e microbiológicas (semeadura, isolamento e caracterização pelos testes de pH, temperatura, coloração de Gram, teste químico, motilidade, redução de nitrato, oxidase e catalase). A amostra de aço foi caracterizada por FRX, MEV e taxa de corrosão. As amostras de solo são tipicamente de fração argilosa, com predominância do argilomineral caulinita, com pH ácido. O LL teve como resultado 83 %; LP com 41 %, mostrando um IP = 42 %. Esses resultados indicam que solo apresenta elevada retenção de umidade. Esse fator pode favorecer a presença de micro-organismos, como fungos e bactérias. Entre as bactérias presentes, as *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Acidithiobacillus ferrooxidans* foram identificadas conforme Holt (1994). A caracterização química e metalográfica do aço confirmaram ser de aço AISI 1020. A análise de MEV mostrou a presença corrosão microbiológica na superfície analisada do aço. A taxa de corrosão para esse tipo de solo foi alta; e o grau de agressividade do solo foi classificado como severo, de acordo com os parâmetros da NACE. Os resultados indicaram que se faz necessário uma análise completa deste meio para melhor compreensão de sua ação corrosiva e, posteriormente, escolher a melhor forma de proteção do material enterrado.

Palavras-chave: Solo argiloso; Aço AISI 1020; Corrosão microbiológica; *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

ABSTRACT

According to a study conducted in 2015 by the *International Zinc Association* (IZA) and USP, it is estimated that Brazil spends around R \$ 236 billion on the replacement of equipment caused by corrosion. Several methods have been proposed to study and monitor this process. However, treating soil as a participant agent is still poorly considered. The presence of microorganisms in which a duct or structure is exposed, given the variety of environments that may present colonies of bacteria, fungi or algae may represent one of the major industrial problems of today. In this work the susceptibility of AISI 1020 steel to corrosion in contact with the representative soil of the Amazon region was studied, collected at points of exit from the soil. The techniques used for the soil were: Chemical (DRX, FRX, EAA, IV-TF, MEV, pH and total acidity), Geotechnics (limits of liquidity and plasticity, grain size and specific grain mass) and Microbiological seeding, isolation and characterization through pH, temperature, Gram staining, chemical testing, motility, nitrate reduction, oxidase and catalase tests. For steel, it was used: Chemical (FRX, EAA, MEV) and corrosion rate. The chemical characterization showed a clay soil, with the predominant presence of clayey kaolinite, with acid pH. The LL resulted in 83%; LP, 41%, showing an IP = 42%. With these parameters, it was observed that the studied soil has a high humidity retention. These conditions favor the presence of microorganisms such as fungi and bacteria. Among the bacteria present, *Acidithiobacillus thiooxidans* and *Acidithiobacillus ferrooxidans* were identified according to Holt (1994). The chemical and metallographic characterization of the steel confirmed that the steel used was AISI 1020. The SEM analysis showed microbiological corrosion on the analyzed surface. The corrosion rate for this type of soil was high; and, the degree of soil aggressiveness was classified as severe, according to NACE parameters. The results indicated that a complete analysis of this medium is necessary to better understand its corrosive action and, subsequently, to choose the best way of protecting the buried material.

Keywords: Clayey soil; AISI 1020 steel; Microbiological corrosion; *Acidithiobacillus thiooxidans* and *Acidithiobacillus ferrooxidans*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Amostra de solo <i>in natura</i> da região amazônica.....	22
Figura 2. Vista aérea da Refinaria Gabriel Passos – Regap (CETESB, 2017).....	27
Figura 3. Vista da região contaminada da Baía de Guanabara, Rio de Janeiro/RJ, em jan/2000 (CETESB, 2000).....	28
Figura 4. Vazamento de óleo em São Sebastião/SP, em fev/2004 (CETESB, 2004). ...	29
Figura 5. Relação entre as variáveis das taxas de corrosão no solo, adaptado de Roberge (1999).	31
Figura 6. Processo de oxirredução do ferro, adaptado de Oliveira (2010).....	35
Figura 7. Gráficos de temperaturas diárias e chuvas acumuladas no ano de 2018 (INMET, 2018).....	42
Figura 8. Pontos de coleta das amostras de solo adaptado do MAPS/Amazonas (2019).	43
Figura 9. Amostras de tarugos de aço AISI 1020.....	44
Figura 10. pHmetro de bancada da Quimis.	46
Figura 11. Esquerda – politriz e Direita – corpo de prova polido.	47
Figura 12. Microscópio óptico da Pantec e modelo MMI 2000 acoplado ao notebook..	47
Figura 13. Extrato aquoso das amostras de solo coletadas.....	53
Figura 14. Espectros no IV das amostras de solo.	55
Figura 15. Padrão de difração de raios X das amostras de solo.	57
Figura 16. Padrão de difração de raios X das amostras de solo 1.	56
Figura 17. Micrografias de MEV da amostra de solo. Superior esquerda – A1. Superior meio – A3. Superior direita – A3. Inferior esquerda – A4. Inferior direita – A5 (amostra esterilizada).....	60
Figura 18. Coloração de Gram. Esquerda superior – amostra A1, Direita superior – amostra A2, Esquerda inferior – amostra A3 e Direita inferior – amostra A4.....	62
Figura 19. Teste de Motilidade. Esquerda superior – amostra A1, Direita superior – amostra A2, Esquerda inferior – amostra A3 e Direita inferior – amostra A4.....	63
Figura 20. Teste de redução de nitrato.	64
Figura 21. Teste de catalase.....	65
Figura 22. Teste oxidase, da Esquerda para Direita. Primeiro – amostra A1, Segundo – amostra A2, Terceiro – amostra A3 e Quarta – amostra A4.	65
Figura 23. Amostra de tarugo de aço. Esquerda - antes da exposição ao tratamento 1 e Direita – após 30 dias de exposição ao tratamento 1.....	67

Figura 24. Microimagens de MEV da amostra de aço. Superior esquerda – ampliação 10.000× (2 μm). Superior direita – ampliação 10.000× (1 μm). Inferior esquerda – ampliação 10.000× (20 μm) e Inferior direita – ampliação 10.000× (5 μm). 68

Figura 25. Microimagens da superfície oxidada da amostra de aço AISI 1020. Esquerda superior - ampliação de 40×, Direita superior – ampliação de 100×, Esquerda inferior - ampliação de 200× e Esquerda superior - ampliação de 400×. 70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Diâmetro médio de grãos, em μm (ROBERGE, 1999).	20
Tabela 2. Classificação dos aços <i>versus</i> teor aproximado que identificam as classes, adaptado de Callister (2000).	24
Tabela 3. Resistividade de diferentes solos (OSELLA e FAVETTO, 2000).	30
Tabela 4. Classificação da resistência relativa à corrosão de ligas típicas de ferro e níquel de acordo com a taxa de corrosão em mpy.	41
Tabela 5. Composição química e propriedades mecânicas do Aço AISI 1020 (NBR 87/2000).	44
Tabela 6. Parâmetro de pH do solo adaptado de EMBRAPA (1997).	46
Tabela 7. Resultados das análises geotécnicas.	54
Tabela 8. Resultados da análise de FRX para as amostras de solo.	54
Tabela 9. Resultados das análises de pH e acidez total.	58
Tabela 10. Parâmetros de identificação de micro-organismos adaptado de Holt (1994).	60
Tabela 11. Resultado pH versus temperatura.	61
Tabela 12. Resultado da análise de FRX para o corpo de prova.	66
Tabela 13. Resultado da taxa de corrosão com solo esterilizado.	70
Tabela 14. Classificação da tabela NACE-RP-07-75.	71
Tabela 15. Resultado da taxa de corrosão para solo não esterilizado.	71

LISTA DE ABREVIATURAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AISI - American Iron and Steel Institute
- ANTT - Agência Nacional de Transportes Terrestres
- AT - Acidez Total
- BGN - Bacilos Gram Negativos
- BRS - Bactérias Redutoras de Sulfatos
- CIF - Crystallographic Information File
- CMI - Corrosão Microbiológica Induzida
- CTC - Capacidade de Troca Catiônica
- dee - Diâmetro Esférico Equivalente
- DC - Corrente Direta
- ddp - Diferença de Potencial
- DRX - Difração de Raios X
- EAA - Espectrometria de Absorção Atômica
- FRX - Fluorescência de Raios X
- IC - Índice de Corrosividade
- ICSD - Inorganic Crystal Structure Database
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia
- IP - Índice de Plasticidade
- IVTF - Espectroscopia na Absorção de Infravermelho por Transformada de Fourier
- IZA - International Zinc Association
- LL - Limites de Liquidez
- LP - Limites de Plasticidade
- LT - Linha de Transmissão
- mpy - Milésimo de Polegada por Ano
- NACE - National Association of Corrosion Engineers
- NBR - Norma Técnica Brasileira
- NMP - Número Mais Provável
- PCA - Plate Count Agar
- pH - Potencial Hidrogeniônico

SAE - Society of Automotive Engineers - EUA
TA-Coari - Terminal Aquaviário de Coari
UFAM - Universidade Federal do Amazonas
UHE - Usina Hidrelétrica
USP - Universidade de São Paulo

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	v
RESUMO	vii
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xii
SUMÁRIO.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	15
2. JUSTIFICATIVA.....	17
3. OBJETIVOS.....	18
3.1. Geral.....	18
3.2. Específicos	18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
4.1. Solo	19
4.2. Classificação do Solo.....	20
4.3. Argila	21
4.4. Propriedades Gerais da Argila	22
4.5. Aço.....	24
4.6. Aço Carbono	25
4.7. Corrosão.....	26
4.8. Corrosão Ocasionalada pelo Solo	29
4.9. Corrosão em Dutos Enterrados	32
4.10. Causas da Corrosão em Dutos Enterrados	32
4.11. Corrosão Microbiológica.....	34
4.12. Principais Grupos de Bactérias Relacionados à Corrosão	35
4.13. Avaliação da Corrosividade pela Taxa de Perda de Massa.....	40
5. METODOLOGIA	42
5.1. Amostras de Solo	42
5.2. Corpo de Prova (Aço AISI 1020)	43
5.3. Análises Geotécnicas	44
5.4. Caracterização Mineralógica, Química e Óptica	45
5.5. Caracterização Microbiológica	48
5.6. Taxa de Perda de Massa.....	51
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	52

6.1. Solo	52
6.1.1. Análises Geotécnicas	52
6.1.2. Análises Químicas, Mineralógicas e Ópticas	54
6.1.2.1. Fluorescência de Raios X (FRX)	54
6.1.2.2. Espectroscopia no Infravermelho -ATR	55
6.1.2.3. Difração de Raios X (DRX, método pó)	56
6.1.2.4. Acidez total e pH.....	57
6.1.2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	60
6.1.3. Análises Microbiológicas	60
6.1.3.1. Temperatura e pH.....	60
6.1.3.2. Coloração de Gram.....	62
6.1.3.3. Motilidade	62
6.1.3.4. Redução de nitrato.....	63
6.1.3.5. Catalase	64
6.1.3.6. Oxidase.....	65
6.2. Aço.....	66
6.2.1. Análises Químicas	66
6.2.1.1. Fluorescência de Raios X (FRX)	66
6.2.1.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	66
6.2.1.3. Metalografia	68
6.2.1.4. Taxa de Corrosão	70
7. CONCLUSÃO	71
8. PERSPECTIVAS	72
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

1. INTRODUÇÃO

Em muitos casos, a corrosão pode ser definida como a deterioração ou mesmo a destruição de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 2007).

A deterioração, causada por interações físico-químicas entre o material e o meio ao qual este se encontra exposto, pode levar a alterações prejudiciais ao seu desempenho, tornando-o inadequado para o uso, o que pode resultar em danos ao meio ambiente, por exemplo, em episódios de contaminação ocasionada pelo vazamento de substâncias de reservatórios que em sua manutenção preventiva não levou em conta as características corrosivas do solo.

Dessa forma, em função do elevado número de tubulações e reservatórios enterrados, o estudo do solo como agente corrosivo é de grande importância, visto que sua capacidade de deterioração pode representar um problema econômico e ambiental, com o passar dos anos.

O processo investigativo sobre a taxa de corrosividade do solo é altamente relevante para várias atividades associadas diretamente à vida útil de materiais, equipamentos e estruturas, especialmente estruturas vitais como torres de transmissão de energia elétrica, que devem, obrigatoriamente, manter sua integridade física (LABEGALINI *et al.*, 1992).

A região Amazônica tem um papel importante na matriz energética brasileira, pelo fato de suas bacias hidrográficas apresentarem elevado potencial hidrelétrico. Assim, projetos de construção de novas usinas hidrelétricas (UHEs) e linhas de transmissão (LTs) estão sendo realizados e, apesar da relevância do assunto, são poucos os estudos científicos sobre a corrosividade do solo na região Norte do Brasil (BRASIL, 2009).

O grau de corrosividade de um solo pode ser avaliado com o auxílio de índices de corrosividade (IC), onde parâmetros do solo, como resistividade elétrica, teor de umidade, potencial hidrogeniônico (*pH*), entre outros, são avaliados e índices parciais lhes são atribuídos, os quais variam conforme o valor encontrado (ROBERGE, 1999).

Diversos métodos têm sido propostos para estudar e monitorar os processos de corrosão, como ensaios de perda de massa (taxa de perda de massa), análise do extrato aquoso (análise microbiológica), detecção de corrente galvânica, medição de resistência elétrica e medidas eletroquímicas, entre outras (MACDONALD, 1998; FERREIRA, 2005; RODRIGUES, 2006; DA SILVA, 2007).

Acompanhar o processo de corrosão por meio de medidas de perda de massa ou de profundidade do pite, nas condições reais de aplicação do material é, sem dúvida, a forma mais precisa e confiável de se avaliar a agressividade de um solo. No entanto, os estudos devem ser conduzidos durante longos períodos, muitas vezes incompatíveis com os projetos de engenharia. Por outro lado, a necessidade em avaliar a agressividade do solo em curtos períodos tem levado vários pesquisadores a estudar métodos de medidas indiretas, que se baseiam na correlação das propriedades do solo com sua corrosividade absoluta (TRABANELLI *et al.*, 1972; SILVA, 2010; BRASIL, 2010).

Desta forma, esta pesquisa tem grande importância tecnológica para a Região Norte, devido principalmente ao gasoduto Urucu-Coari-Manaus, quanto a avaliação e determinação do grau de corrosividade em amostras de aço AISI 1020 no subsolo característico da região amazônica.

2. JUSTIFICATIVA

Devido à possibilidade de repercussões ambientais negativas, estudar o solo torna-se de vital importância para uma melhor compreensão da sua atuação como veículo para os agentes corrosivos e conseqüentemente a definição dos tipos mais adequados de proteção das estruturas enterradas, evitando que ocorram vazamentos e, posteriormente, contaminação do solo.

O estudo do solo como meio corrosivo é considerado como sendo de grande importância, em função do elevado número de tubulações e reservatórios instalados sob o solo, sendo que sua deterioração possa representar um problema real para a economia e para o meio ambiente com o passar dos anos. Como vários parâmetros podem afetar a corrosividade de um solo os métodos mais utilizados para medir essa corrosividade são apenas “representativos”, não levando a valores absolutos.

Devido à escassez de estudos nesta temática que envolve a corrosividade de metais em solos amazônicos, esta pesquisa visa contribuir com um estudo avaliativo sobre o processo de corrosividade dos solos amazônicos mediante as técnicas de perda de massa e análise microbiológica, usando o aço AISI 1020 que apresenta uma composição química similar aos aços da maioria dos oleodutos e gasodutos.

Assim, este trabalho mostra-se de grande relevância para fins preventivos quanto ao uso desses materiais sob o solo da região norte, em decorrência da presença do gasoduto Urucu-Coari-Manaus, bem como no uso de gás encanado em áreas residenciais e comerciais.

3. OBJETIVOS

3.1. Geral

Estudar o processo de corrosividade de um solo amazônico representativo frente amostras de aço similar de oleoduto e gasoduto mediante as análises geotécnicas, químicas e microbiológicas.

3.2. Específicos

- Coletar e preparar as amostras de solo amazônico representativo e adquirir amostras de aço AISI 1020 (cortes de lingote de 3 cm de comprimento);
- Realizar análises geotécnicas das amostras de solos, como massa específica dos grãos (NBR 6458/2016); granulometria (NBR 7181/2016); limites de liquidez e de plasticidade (NBR 6459/2016 e NBR 7180/2016, respectivamente);
- Caracterizar mineralógica e quimicamente as amostras de solo mediante as técnicas analíticas de difração de raios X (DRX), espectroscopia de absorção na região do infravermelho (IVTF) e fluorescência de raios X (FRX);
- Caracterizar a composição química da amostra de aço AISI 1020 por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX);
- Realizar análise microbiológica do extrato aquoso de solo;
- Identificar as bactérias atuantes no processo de corrosividade desse tipo de solo;
- Avaliar o processo de corrosividade das amostras de aço em contato com as amostras de solo mediante a técnica de perda de massa/taxa de corrosão.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo denota Gentil (2007) na obra intitulada “*Corrosão*” é de fundamental relevância se estudar o solo como meio corrosivo, levando em consideração os grandes tanques e tubos enterrados, como oleodutos, gasodutos, minerodutos e os reservatórios de combustíveis.

O processo de desgaste de equipamentos enterrados é decorrente das características físico-químicas e microbiológicas e alguns fatores superficiais, que acabam gerando custos altos para uma variedade de setores, como por exemplo, o setor industrial (GOMES, 2001).

4.1. Solo

Existem inúmeras obras que definem o termo solo, esses conceitos foram elaborados de acordo com o setor de atuação do profissional, então, é perceptível a caracterização do solo em vários panoramas (LEPSCH, 2002).

Meurere (2000), explica no livro “*Fundamentos de Química do Solo*”, que a origem do solo se dá pelo desgaste das rochas devido às intempéries da natureza. As partes, então, podem ser transportadas por agentes naturais e serem depositadas em distantes locais, gerando solos distintos ao passar dos anos. Já para Luchese e colaboradores (2002) conceitua o solo como sendo uma mistura de compostos minerais e compostos orgânicos, forma solos horizontais, devido a ação química, física e microbiológica.

A camada que está na superfície da terra é denominada de solo que ao longo dos tempos pode sofrer alterações e mudanças devido aos fatores referentes ao clima, a biota e principalmente pelas ações do homem. Dessa forma, a união de todos os proponentes da fase sólida gera a produção de micro-habitat ou micro sítio, que apresentam características singulares, onde o solo se comporta como um dreno para contaminantes e também como tampão natural, controlando o transporte de elementos químicos e outras substâncias para a atmosfera, hidrosfera e biotas (OTENIO *et al.*, 2005).

Uma das definições mais completas sobre o solo é a da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1997), que diz que o solo se apresenta como sendo

uma coleção de estruturas do meio natural, proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica. Geralmente, o solo aparece com características marcantes para a terra, fortalecendo fatores fundamentais, tais como: o meio ambiente, meio social e o setor econômico, essenciais a vida, normalmente sendo observado como a região interfásica entre a crosta terrestre, a atmosfera e a água.

Existem várias propriedades que podem influenciar a velocidade reacional da corrosão, sendo a mais atuante a granulometria do solo. Por essa razão, é preciso destacar os principais fatores proponentes da ação corrosiva do solo, tais como: a aeração, o teor de umidade, *pH*, a reação redox, a resistividade elétrica, as condições climáticas, a heterogeneidade do solo e a presença de sais solúveis, gases e micro-organismos (GENTIL, 2007).

4.2. Classificação do Solo

A dimensão das partes que compõem o solo define o seu desempenho, ou seja, por meio do tipo granulométrico, a classificação do solo está de acordo com o seu tamanho decrescente, podendo ser: grãos, pedregulhos ou cascalho, areias (grossas, médias ou finas), siltes e argilas (ESPÍNOLA, 1977).

Por esse motivo, o critério principal para se classificar o solo é o tamanho dos grãos no qual ele é constituído. Roberge (1999) designa o diâmetro dos grãos (em μm) para cada tipo básico de solo, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Diâmetro médio de grãos, em μm (ROBERGE, 1999).

Tipo de Solo		Diâmetro dos grãos (μm)
	Argila	<2
	Silte	2-50
	Muitofina	50-100
	Fina	100-250
Areia	Média	250-500
	Grossa	500-1000
	Muitogrossa	1000-2000

De acordo com Espínola (1977), quase nunca um solo é considerado totalmente limpo ou puro, ou seja, não pode ser constituído na sua maioria por somente um tipo granulométrico. Desse modo, comumente o solo se apresenta com frações de argila, areia e silte.

Como pode ser observado na Tabela 1, o solo argiloso é constituído por partículas pequenas em seu extremo. Já, as areias apresentam-se com partículas de fácil observação e individualizável.

A granulometria está inteiramente relacionada com algumas características do solo, entre elas o formato das partículas, a densidade e a área superficial específica. Por esse motivo, pode ser conceituada como sendo a razão entre a partícula e o seu peso ou volume.

Fetugato (2005) explica que a somatória das superfícies externas e internas do solo é a superfície total das partículas, sendo que a superfície específica cresce com a minimização da dimensão dos grãos. Isso quer dizer que, dentre as massas de solo argiloso, arenoso e silteoso a de maior superfície é a argilosa.

Em se tratando da Amazônia, os perfis lateríticos, principalmente, da região Central da Bacia Amazônica, sob o domínio da Formação Alter do Chão, têm horizontes com características, bem variadas, de cor, textura, espessura e composição mineral, que geralmente são classificados como Latossolos Amarelos e Vermelhos. Essa composição, em princípio, mostra a abundância da argila, sob forma de caulinita, em quase todos os horizontes (COUCEIRO, 2004).

4.3. Argila

O termo argila possibilita várias definições, pois se trata de um conceito que atua de acordo com a formação profissional e científica de quem se interessa por essa temática, bem como os geólogos, pedólogos, engenheiros civis, químicos e outros.

Em uma visão geral e completa da argila é considerada como sendo um produto natural, terroso, constituído por componentes de granulometria fina, entre os quais se evidenciam, por serem essenciais, os minerais argilosos. A Figura 1 mostra um solo

representativo da região amazônica. Este material natural desenvolve, quase sempre, plasticidade em meio aquoso e enrijece depois de seco e mais, ainda depois da cozedura (GOMES, 1988). As argilas apresentam em sua estrutura fragmentos cristalinos extremamente pequenos, os quais formam os argilominerais. Também são formadas de outros materiais e minerais, tais como: matéria orgânica, sais solúveis e partículas de quartzo, feldspatos, pirita, mica, calcita, dolomita, além de minerais não cristalinos (amorfos) (FROTA *et al.*, 2007).



Figura 1. Amostra de solo *in natura* da região amazônica.

Conforme De Belie (2004) é preciso conhecer e estudar algumas propriedades da argila para poder utilizá-la no setor tecnológico. Dentre essas características podem ser citadas: composição química, mineralogia, capacidade de troca catiônica (CTC), granulometria, área superficial específica, porosidade, propriedades físico-mecânicas.

4.4. Propriedades Gerais da Argila

As argilas apresentam algumas propriedades que, segundo Gomes (2001) e De Belie (2004), colaboram para sua vasta utilização nos processos tecnológicos, tais como:

- Granulometria - fundamental característica dos minerais argilosos e fator que condiciona muitas das suas propriedades, principalmente pelo fato de que as argilas são materiais geológicos finamente divididos constituídos por cristais que apresentam pequeníssimas dimensões, em regra com diâmetro esférico equivalente (d_{ee}) $< 2 \mu\text{m}$. Na indústria cerâmica, por exemplo, à base de argila está sujeita a dimensão do grão o qual afere propriedades como: plasticidade das

pastas e textura, permeabilidade, retenção de água, resistência em verde e em seco dos corpos cerâmicos.

- Superfície Específica - as argilas possuem elevada superfície específica, fator essencial em diversas indústrias no qual o contato sólido-fluido depende diretamente da superfície específica do sólido como: catálise, cerâmica, branqueamento de óleos etc. Outra relevância nessa propriedade está também na elevada superfície específica da fração argilosa ou coloidal dos solos utilizados na agricultura por apresentar alta capacidade de troca catiônica e pela fixação reversível dos nutrientes minerais e dos fertilizantes.
- Capacidade de Troca Catiônica (CTC) - os minerais argilosos apresentam propriedades de troca catiônica fixadas na superfície externa dos seus cristais, situados nos espaços das intercamadas estruturais ou localizados em outros espaços interiores, mas acessíveis, das estruturas, por outros íons existentes em soluções aquosas envolventes. Essa capacidade de troca catiônica é a capacidade que um mineral argiloso ou argila pode adsorver e trocar, uma propriedade importante dos minerais argilosos e argilas que resulta do desequilíbrio das suas cargas elétricas, devido particularmente a substituições isomórficas e que pode influenciar fortemente determinadas propriedades físico-químicas e tecnológicas.
- Viscosidade - é a resistência que ele oferece à fluência. No sistema argila-água, também conhecido por suspensão, as partículas de argila dispersas em água têm hábitos lamelares. A viscosidade do fluido não é mais do que a medida da fricção interna das suas moléculas e a fluidez é o recíproco da viscosidade.
- Plasticidade - é a propriedade que se manifesta na mudança de forma sem ruptura de uma massa feita com argila e água por aplicação de uma força exterior e pela retenção da forma quando a força é removida ou reduzida abaixo de certo valor. O grau de deformação de uma pasta de argila, até ela entrar em ruptura, aumenta progressivamente até determinado valor conforme do conteúdo de água. São os minerais argilosos a principal causa da plasticidade das argilas. Em argilas do mesmo tipo, quanto maior for o teor em minerais argilosos, maior será a plasticidade. Os aspectos indispensáveis que afetam a plasticidade são a mineralogia, granulometria, forma dos cristais, carga elétrica dos cristais e o estado de desfloculação da argila.

4.5. Aço

De longe, o aço é o material mais amplamente utilizado para a construção de infraestruturas e indústrias do mundo, é usado para fabricar desde agulhas de costura até plataformas de petróleo (HONEYCOMBE, 1981).

De acordo com Gentil (2007), de uma forma geral, os aços são classificados em aço carbono ou aço liga, devido à presença ou não de elementos de liga, embora ainda existam os aços especiais, dentre os quais se destacam os aços inoxidáveis, que contêm elementos adicionados em maiores teores como, por exemplo, o cromo.

Nos aços comuns, conhecidos como aço-carbono, o ferro é o elemento em maior proporção. Esses, por sua vez, possuem diferentes quantidades de carbono e de elementos de liga que determinarão as propriedades que deseja obter, tais como: ductibilidade, dureza, tenacidade, resistência à corrosão, conforme sua funcionalidade. Já os aços-liga possuem em sua composição, além do carbono que conferem parte das propriedades mecânicas da liga, porcentagens elevadas de outros elementos químicos, como o cromo, níquel, molibdênio, tungstênio, manganês, silício, cobre, pequenas quantidades de vanádio, nióbio, boro e titânio.

Estes elementos são incorporados para aumentar e distribuir melhor as propriedades mecânicas, combinando dureza, ductilidade e tenacidade, ou inclusive para melhorar a resistência da liga à corrosão e à brasão. Por isso, esses metais são mais caros que os aços carbono, e necessitam de cuidados durante os tratamentos térmicos (SOUZA, 2001).

No Brasil, a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, por intermédio da NBR 87/2000, classifica os aços carbono e os de baixo teor em liga segundo os critérios adotados pela AISI-SAE. A tabela 2 apresenta a classificação dos aços, de uma forma geral, em função da composição química que identificam as classes.

Tabela 2. Classificação dos aços *versus* teor aproximado que identificam as classes, adaptado de Callister (2000).

Tipo	Classe	Designação	Teor aproximado dos elementos que identificam a classe
Aço-carbono	10XX	Carbono	Mn – máximo 1,00 %
	11XX	Ressulfurado	-
	12XX	Ressulfurado e refosfatado	-
	14XX	Com adição de nióbio	Nb 0,10 %
	15XX	Carbono	Mn entre 1,00 e 1,65 %
Aço-liga	13XX	Manganês	Mn – 1,75 %
	23XX	Níquel	Ni – 3,5 %
	31XX	Níquel-Cromo	Ni – 1,25 % e Cr – 0,65 %
	41XX	Cromo-Molibdênio	Cr – 0,50 %; 0,80 % e 0,95 %
	43XX	Cromo-Níquel-Molibdênio	Ni – 1,8 %; Cr – 0,50 a 0,80 % e Mo - 0,25 %
	50XX	Cromo	Cr – 0,27 %; 0,40 %; 0,50 % e 0,65 %
	61XX	Cromo-Vanádio	Cr – 0,60 %; 0,80 %; 0,950 % e 1,05 %; V - 0,10 % ou 0,15 % mínimo
	86XX	Cromo-Níquel-Molibdênio	Cr – 0,50; Ni – 0,55 % e Mo - 0,20 %
	92XX	Com adição de chumbo	Si – 2,00 % e Mn – 0,85 %
Aço com adições	XXBXX	Com adição de boro	-
	XXLXX	Com adição de chumbo	-

Pode-se dizer que o grupo mais importante e utilizado na engenharia e na indústria é o aço carbono. De fato, as propriedades mecânicas desses aços, sem qualquer elemento de liga, e na maioria dos casos também sem qualquer tratamento térmico, são suficientes para atender à maioria das aplicações práticas. É evidente que os aços carbono apresentam certas limitações, sobretudo quando se desejam propriedades especiais de resistência à corrosão, resistência ao calor, resistência ao desgaste, características elétricas ou magnéticas entre outras (NOGUEIRA, 2002).

4.6. Aço Carbono

Para Colpaert (1989) e Panossian (1993), os aços carbono são ligas de ferro-carbono que, normalmente, apresentam taxa de 0,008 a 2 % de carbono, e alguns elementos residuais (manganês, silício, fósforo e enxofre) que podem ficar retidos durante o processo de fabricação. O teor de impureza (elementos além de ferro e de carbono) corresponde a no máximo 2 % de sua composição. Essa porcentagem está relacionada ao mineral de procedência e ao processo de fabricação do aço, embora alguns elementos sejam intencionalmente adicionados para aumentar a resistência, ductibilidade, dureza do aço ou apenas para facilitar o processo de fabrico (usinabilidade).

Para Souza (2001) os aços podem ser classificados conforme sua porcentagem de carbono e dureza, ou somente pelo seu teor de carbono, tendo um custo relativamente baixo, além de possuir excelentes propriedades mecânicas, não requisitando de tratamentos elaborados para sua produção.

A liga metálica de aço carbono é ainda hoje o material comumente utilizado na construção de oleodutos, gasodutos e minerodutos, em virtude do seu baixo custo e da alta resistência a impactos, ductibilidade, tenacidade e facilidade de soldagem. É por isso que os tubos de aço carbono correspondem ainda hoje a cerca de 90 % das tubulações industriais, sendo na maioria feita a aplicação de revestimentos metálicos (zincagem) ou não metálico inorgânicos ou orgânicos, a fim de minimizar o ataque por processos corrosivos.

4.7. Corrosão

Segundo Silva (2010), o processo de corrosão assume um papel importante na economia, que é dependente da utilização dos metais e suas ligas. O emprego extensivo de aço carbono se deve ao fato de que são relativamente baratos e apresentam uma ampla gama de propriedades. Formada em sua essência por ferro e carbono, sua composição apresenta, em geral, baixa resistência à corrosão na maioria dos meios onde equipamentos ou estruturas são utilizados. Por esse motivo, é fundamental a aplicação de algum tipo de proteção a fim de reduzir o ataque por agentes de corrosividade (GENTIL, 2007; RAMASWAMY e ROY, 1975).

Nesse contexto, um estudo realizado em 2015 pela *International Zinc Association* (IZA) e pela USP estimou que o Brasil gastou, na reposição de equipamentos causados pela corrosão, cerca de R\$ 236 bilhões, o que correspondeu a 4 % do Produto Interno Bruto – PIB.

Entre os registros de ocorrências mais recentes que ganharam espaço na mídia devido seu agravante danos ecológicos, foram os seguintes:

- Vazamento de diesel na Refinaria Gabriel Passos –Regap, 2017.

Em agosto de 2017, um vazamento de diesel contaminado quase provocou uma tragédia na unidade de hidrotreatamento U-110, na Refinaria Gabriel Passos - Regap (Figura 2). Foi necessário isolar a área. No entanto, não houve explosão nem registro de vítimas. Segundo relato de operadores, um furo de aproximadamente 12 cm provocou o rompimento da linha de diesel da saída do reator, depois do trocador E-03. Ao que tudo indica, esse furo ocorreu por corrosão severa na linha, provavelmente, devido à falta de manutenção (CUT, 2017).



Figura 2. Vista aérea da Refinaria Gabriel Passos – Regap (CETESB, 2017).

- Rompimento do oleoduto procedente da Refinaria Duque de Caxias, em 2000.

Em janeiro de 2000, o oleoduto procedente da Refinaria Duque de Caxias, sentido Terminal da Ilha d'Água, rompeu devido à corrosão, no interior do manguezal, liberando 1.300 m³ do produto. As manchas de óleo formadas, espalharam-se pela Baía de Guanabara (Figura 3), no sentido horário, por ação da maré enchente. Como resultado, foram impactadas extensas áreas de praias, costões rochosos, manguezais, ilhas, obra do patrimônio histórico (porto de Visconde de Mauá), pontos turísticos (como a Ilha de Paquetá), materiais de pesca (redes, cercos, embarcações, remos) e morreram dezenas de aves aquáticas. (CETESB, 2000).

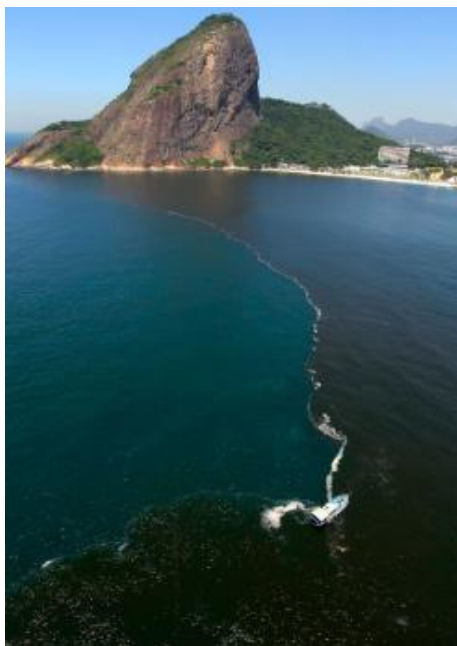


Figura 3. Vista da região contaminada da Baía de Guanabara, Rio de Janeiro/RJ, em jan/2000 (CETESB, 2000).

- Rompimento de duto enterrado em São Sebastião, no ano de 2004.

Na manhã do dia 18 de fevereiro de 2004 foi constatado afloramento de petróleo e contaminação do rio Guaecá, na região da Praia de Guaecá, em São Sebastião.

A PETROBRAS/TRANSPETRO identificou a causa do vazamento como sendo uma fenda longitudinal, causada por corrosão, no oleoduto OSBAT 24'', km 3 + 143 m, quota 219 m. O vazamento ocorreu dentro de Unidade de Conservação (área do Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo São Sebastião), atingindo o rio Guaecá, corpo d'água classe 1, afetando severamente a biota aquática e associada ao mesmo.

Foram atingidos também a praia de Guaecá e outros ambientes como a Mata Atlântica / mata ciliar (área de preservação permanente), indiretamente afetados pelas ações de emergência e remediação implantadas. A operação de emergência envolveu mais de 600 pessoas e intensa logística. O evento teve intensa repercussão na mídia, estimulada ainda pela proximidade do carnaval. Houve impacto socioeconômico no turismo local e nas atividades de subsistência (comércio informal) da praia de Guaecá (Figura 4).



Figura 4. Vazamento de óleo em São Sebastião/SP, em fev/2004 (CETESB, 2004).

4.8. Corrosão Ocasionalada pelo Solo

A corrosividade do solo pode ser definida como a habilidade do ambiente para desenvolver o processo de corrosão. As propriedades do solo exercem uma influência particular na corrosão eletroquímica modificando as condições dos processos anódicos e catódicos. Nesse caso, os elétrons, cedidos pelo metal são doados ao oxidante no próprio lugar onde são produzidos (SEDRIKS, 2004).

Para Levlin (2004), a base para a formação de uma célula corrosiva é a diferença de potencial elétrico nessas áreas. Por esse motivo, para que um duto atue como célula de corrosão de grandes dimensões é necessário além de regiões catódicas e anódicas um eletrólito que as conecte externamente. A mistura de solo e água, circundando tubulações, é normalmente suficiente para preencher esta condição.

A corrosão de tubulações metálicas no solo é um processo eletroquímico com uma reação anódica, pela qual o metal é oxidado e com uma reação catódica, comumente ocorre redução do oxigênio, como demonstrado na Equação (1) e Equação (2), respectivamente (GENTIL, 2007).



Uhlig (1948) explica no livro intitulado “*The Corrosion Handbook*” que a resistividade elétrica do solo é um dos fatores mais importantes no processo corrosivo

dos metais enterrados. Dessa maneira, quanto mais baixo seu valor, aumentam a funcionalidade das pilhas de corrosão e um maior fluxo de correntes parasitas é permitido.

Nóbrega e Chang (2003), na obra intitulada “*Avaliação Preliminar da Corrosividade de Solo com o Emprego de Resistividade Elétrica em uma Planta Industrial Utilizada para Armazenamento de Derivados de Petróleo*”, estabeleceram níveis de agressividade do solo em função da sua resistividade elétrica. Osella e Favetto (2000), acrescenta que a resistividade dos solos está inteiramente interligada com a origem geológica do ambiente, o que lhe confere níveis determinados de atividade magnética. A Tabela 3. mostra uma indicação da variação da resistividade dos solos, baseada no tipo de solo (Osella e Favetto, 2000).

Tabela 3. Resistividade de diferentes solos (OSELLA e FAVETTO, 2000).

Tipo de Solo	Resistividade/ Ω cm
Argila (úmida com sais)	< 1.000
Argila (seca)	< 2.000
Pântano, húmus, lama	2.000 -10.000
Silte	> 10.000
Areia	> 20.000

É comum a ocorrência de corrosão por aeração diferencial em tubulações enterradas, visto que podem atravessar solos de diferentes composições, apresentando vários níveis de aeração e permeabilidade. Estudos identificaram que solos argilosos são mais corrosivos do que solos arenosos, independentemente da forma de corrosão (OGUZIE *et al.*, 2004).

Levlin (2004) estudou a corrosão em tubulações enterradas em laboratório e *in situ*. Para testes desenvolvidos durante longos períodos obtêm-se que para solos aerados uma alta taxa de corrosão é atingida inicialmente, com a migração de íons ferro e formação de produtos de corrosão. Com o tempo esta taxa é diminuída, pois os produtos de corrosão precipitados inibem a difusão de novos íons na superfície metálica. Para solos pouco aerados a taxa de corrosão é constante, sem a formação de precipitados.

Em tubulações enterradas em solos contendo sulfato observa-se a ocorrência de corrosão por microrganismos, destacando-se as bactérias redutoras de sulfato, as oxidantes de enxofre, as oxidantes de ferro, as formadoras de limo e alguns tipos de algas e fungos. Estes microrganismos podem influenciar diretamente na velocidade de reações anódicas e catódicas, formar pilhas de aeração diferencial pelo aparecimento de tubérculos e originar meios corrosivos através do seu metabolismo (MAGALHÃES *et al.*, 2002).

Mesmo as tubulações enterradas profundamente (meio desareado) também podem sofrer corrosão acentuada, desde que o solo seja úmido. Assim, é promovido o aparecimento de bactérias que utilizam em seu metabolismo o hidrogênio, seja livre ou combinado a compostos orgânicos, como as bactérias redutoras de nitrato, de dióxido de carbono e de sulfato. A água na forma líquida representa o eletrólito essencial requerido para reações de corrosão.

Roberge (1999) associou os principais parâmetros que afetam a corrosividade dos solos apresentados na Figura 5.

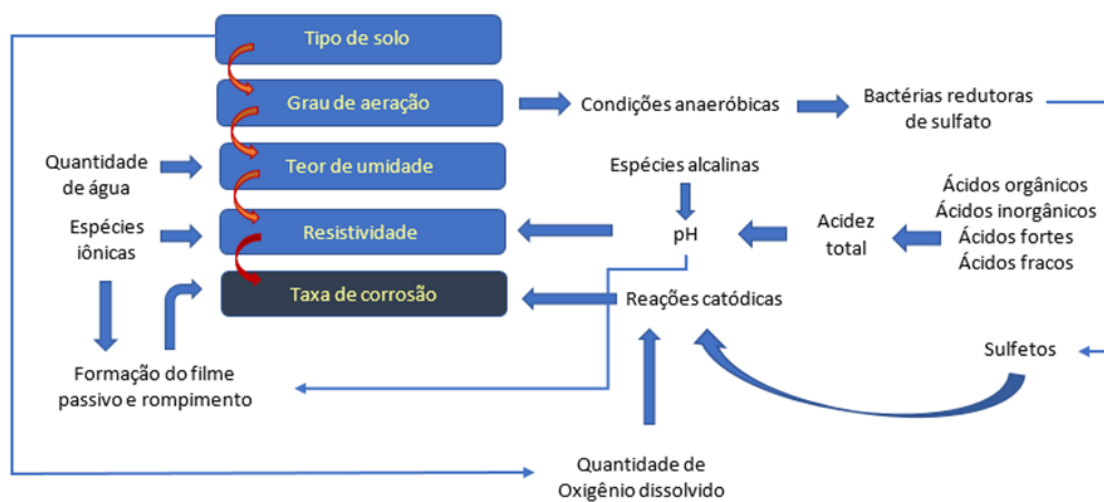


Figura 5. Relação entre as variáveis das taxas de corrosão no solo, adaptado de Roberge (1999).

As tubulações enterradas estão sujeitas a correntes elétricas contínuas de interferência que deixam seu percurso normal, fluem através do solo, atingem a tubulação e a abandonam (neste ponto ocasionando a corrosão eletrolítica). As correntes de fuga que produzem maiores danos são as de corrente contínua ou as de corrente alternada de

baixa frequência. As principais fontes são sistemas de tração elétrica (como trens, bondes e metrô), instalações de solda elétrica, de eletrodeposição e sistemas de proteção catódica. (KOULOMBI *et al.*, 2002).

Para López e colaboradores (2006) os principais fatores que influenciam na corrosão pelo solo são a condutividade, a atividade de microrganismos e a presença de ânions que aumentam o risco de corrosão, como por exemplo, Cl^- , S^{2-} ou SO_4^{2-} .

4.9. Corrosão em Dutos Enterrados

O aço carbono é frequentemente empregado na fabricação de dutos para uso na indústria do petróleo. Dutos enterrados passam por uma variedade de solos, texturas, profundidades, e em alguns casos, os íons agregam a corrosividade do solo. Assim, o tempo de vida da tubulação depende da espessura do metal, área exposta e técnicas de manutenção/repairo empregadas (OGUZIE *et al.*, 2004).

O modelo de transporte – o dutoviário – vem se revelando como uma das formas mais econômicas de transporte para grandes volumes principalmente de óleo, gás natural e derivados, especialmente quando comparados com os modais rodoviário e ferroviário.

A Agência Nacional de Transportes Terrestres - ANTT classifica o transporte dutoviário nas seguintes modalidades:

- Oleodutos - os produtos transportados são em sua grande maioria petróleo, óleo combustível, gasolina, diesel, álcool, GLP, querosene e nafta.
- Minerodutos - os produtos transportados são sal-gema, minério de ferro e concentrado fosfático.
- Gasodutos - o principal produto transportado é o gás natural. Assim também como fazem com o gás combustível de xisto, gás residual e CO_2 (ANTT, 2005).

4.10. Causas da Corrosão em Dutos Enterrados

O metal é corroído devido à formação de células, compostas por quatro elementos básicos: o eletrólito, dois eletrodos (ânodo e cátodo) e um contato elétrico. O

eletrólito é a solução de uma substância que ioniza em água. O solo é um eletrólito, a menos que ele seja absolutamente isento de água.

As heterogeneidades mais comuns em solos responsáveis pela corrosão eletroquímica são:

- Eletrodos metálicos diferentes

Um exemplo deste tipo de corrosão é o caso de uma linha de serviço de liga de cobre que está diretamente conectada a uma linha principal de aço. O contato entre materiais diferentes ocasiona a formação de uma célula eletroquímica pela diferença de potencial de cada material. Neste caso, a linha de serviço de liga de cobre funciona como cátodo e a linha principal como ânodo.

- Concentração diferencial

Os dutos passam por diversos solos, possuindo variações de composições. Quando dois solos diferentes estão em contato com uma peça metálica existe a grande possibilidade de formação de uma pilha de concentração. A parte do duto em contato com o solo que possui maior concentração de sais dissolvidos funciona como área anódica enquanto o solo de menor concentração de sais dissolvidos, área catódica.

- Aeração diferencial

Ocorre devido à difusão do oxigênio da superfície penetrando através de camadas no solo formando regiões com concentrações diferenciadas de oxigênio. A parte do solo inferior ao duto possui menos oxigênio que a porção superior e, portanto, a superfície do fundo do duto age como ânodo e o restante da superfície, como cátodo.

- Temperatura diferencial

Um fenômeno natural verificado é a variação da temperatura pelas camadas do solo, em que esta aumenta com a profundidade. O duto que se contra a uma maior profundidade da superfície está sujeito a uma maior temperatura, adquirindo características de ânodo em relação ao duto mais próximo da superfície, o cátodo (NACE, 1974).

É possível também haver corrosão sob tensão quando uma parte de um duto está submetida a uma situação de maior tensão que outra. A área sob maior tensão constitui-se no ânodo da célula. Investigações experimentais realizadas por diversos autores (GONZALÉZ e BENTOLILA, 2000; HU *et al.*, 1998; PARKINS *et al.*, 1994) visaram determinar as condições favoráveis de início de corrosão sob tensão em dutos de aço, sendo o ambiente do solo simulado pela solução NS4 com *pH* próximo a neutralidade. A solução NS4 é usada como referência para comparar a agressividade de solos, já que tem em sua composição elementos iônicos (HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , K^+ , Na^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+}) presentes onde o fenômeno de corrosão sob tensão tem sido observado. O *pH* desta solução é aproximadamente 8,5; sendo assim, deve ser desacidificada com a adição de CO_2 , para induzir a uma acidificação até *pH* ~6,5, pois a maioria dos casos observados de corrosão sob tensão transgranular ocorre em solução contendo dióxido de carbono em *pH* próximo da neutralidade.

Pesquisadores (LÓPEZ, 2006; BOTELER, 2000; OSELLA e FAVETTO, 2000; PIRJOLA *et al.*, 2000) estudaram uma causa adicional da corrosão, os efeitos geomagnéticos em tubulações enterradas. Embora o efeito de variação de correntes seja menor que no caso de correntes diretas, as correntes telúricas não devem ser negligenciadas. Elas são mais frequentes em países nórdicos.

Também há a corrosão microbiológica, em que colônias de microrganismos modificam quimicamente o ambiente, liberando produtos de seus metabolismos como ácidos, acelerando o processo corrosivo, além da formação de filmes aderidos a superfície metálica, que promovem a corrosão por aeração diferencial (GENTIL, 2007).

4.11. Corrosão Microbiológica

Vidella (2003), na obra intitulada “*Biocorrosão, biofouling e biodeterioração de materiais*”, define biocorrosão como sendo o desgaste de um material produzido pela

ação dos agentes microbiológicos, conhecido como corrosão microbiológica induzida (CMI).

Os principais micro-organismos que provocam a corrosão dos metais são as bactérias, muito embora também possa ocorrer por algas e fungos. Esses proponentes se comportam como agentes facilitadores e aceleradores do processo corrosivo (GENTIL, 2007).

A CMI é gerada pela interação entre a superfície metálica, produtos abióticos de corrosão (FeS , Fe(OH)_3 , Fe_2O_3 etc.), células microbianas, material polimérico extracelular (EPS), ácidos orgânicos e outros metabólitos (BEECH, 2004).

4.12. Principais Grupos de Bactérias Relacionados à Corrosão

De acordo com Oliveira (2010) existem diversos grupos de bactérias que estão inteiramente envolvidas no processo de corrosão do solo, tais como: bactérias precipitantes do ferro, produtoras de ácidos, produtoras de exopolissacarídeos (*Pseudomonas aeruginosa*) e as bactérias redutoras de sulfatos (BRS).

Os principais parâmetros e características dessas bactérias são:

- Bactérias precipitantes do ferro

Com a finalidade de obter energia, este grupo tem em comum a capacidade de oxidar o íon ferroso (Fe^{2+}) a férrico (Fe^{3+}) (Figura 6).

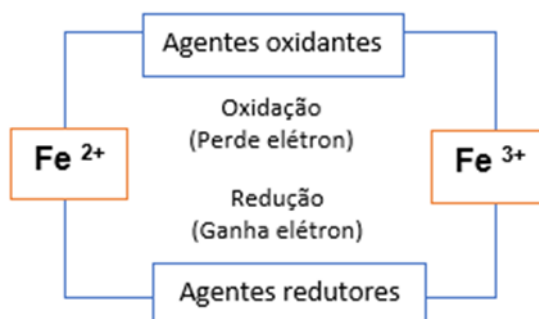


Figura 6. Processo de oxirredução do ferro, adaptado de Oliveira (2010).

O resultado dessa oxidação é geralmente hidróxido férrico precipitado. Desenvolvem-se no intervalo de temperatura entre 0 a 40 °C, sendo faixa ótima entre 6 e 25 °C e no intervalo de *pH* entre 5,5 a 8,2. (GENTIL, 2007).

Videla (2003) e Viana (2009), explicam que as bactérias precipitantes do ferro possuem bainhas perpendiculares aos eixos das células, que dependendo das espécies podem ser constituídas por hidróxidos de ferro ou matriz orgânica impregnada com óxido de ferro e magnésio. Quando estas bainhas se desprendem da bactéria, aumentam a quantidade de sólidos em suspensão no meio. As espécies mais conhecidas envolvidas com a biocorrosão pertencem aos gêneros *Gallionella*, *Siderophacus*, *Sphaerotilus*, *Leptothrix*, *Crenothrix* e *Clonothrix*.

Todos os gêneros possuem espécies com características morfológicas e metabólicas diferenciadas. Como exemplo, a espécie *Gallionella ferrugínea* que tem metabolismo autotrófico, necessidade de baixas concentrações de oxigênio, e difícil isolamento em laboratório; ao contrário da *Sphaerotilusnatans*, que necessita de considerável quantidade de oxigênio e a facilidade de ser isolada em laboratório (OLIVEIRA, 2010).

Estas bactérias participam do processo corrosivo devido a depósitos formados pela sua ação, gerando células de aeração diferencial e facilitando a atuação das bactérias redutoras de sulfato. Por um primeiro mecanismo, os sais ferrosos se oxidam removendo oxigênio da água, causando condições anaeróbicas no fundo dos depósitos, viabilizando desta forma a ação das BRS. Por um segundo mecanismo, em áreas de baixa concentração de oxigênio, as bactérias convertem o íon ferroso em férrico, precipitando-o como hidróxido férrico, na superfície do metal, isolando-a do contato com o oxigênio.

Isto produz uma célula de aeração diferencial, causando a corrosão sob o depósito (RESENDE *et al.*, 2002). Os depósitos provenientes destes micro-organismos provocam entupimentos na indústria extrativa de petróleo, diversos problemas nos sistemas de águas industriais e redução da permeabilidade do solo (VIDELA, 2003).

- Bactérias produtoras de exopolissacarídeos

A EPS pode ser realizada com espécies de bactérias Gram-negativas e Gram-positivas, algumas microalgas e fungos (OLIVEIRA, 2010). A composição do EPS varia em função da espécie, da estirpe e das condições de crescimento, incluindo a composição do meio, o teor de oxigênio, de carbono, a osmolaridade, o *pH* e a idade do biofilme. Em ambientes onde há baixa disponibilidade de carbono, oxigênio e estresse hídrico, a produção de EPS é estimulada (MADIGAN *et al.*, 2004).

As EPS's são compostas principalmente de polissacarídeos, ácidos urônicos, açúcares e proteínas, contendo grupos funcionais como ácidos carboxílicos e amino ácidos, que podem ser ácidos e capazes de formar ligações com íons metálicos. Assim, a EPS também pode afetar as características eletroquímicas da superfície do metal, desempenhando um papel importante na corrosão dos metais (CHRISTENSEN e CHARACKLIS, 1990).

A EPS é considerada fundamental para o início e manutenção da corrosão, e é responsável pela agregação dos micro-organismos presentes no biofilme, conferindo-os maior resistência à ação de agentes químicos e físicos. A resistência aos agentes químicos está relacionada ao caráter aniônico de muitos polissacarídeos, que propicia o aprisionamento de cátions presentes em muitos compostos químicos, diminuindo a concentração destes compostos no meio e, portanto, atenuando a ação biocida aos micro-organismos presentes (VIANA, 2009).

Os gêneros das EPS's que mais interessa para o estudo da corrosão são: *Pseudomonas*, *Flavobacterium*, *Escherichia*, *Aerobacter* e *Bacillus*. Estes micro-organismos operam formando densas massas que isolam a superfície do metal do contato com oxigênio, propiciando o surgimento da corrosão por diferença de aeração, e/ou, favorecendo a atuação das bactérias redutoras de sulfato (RESENDE *et al.*, 2002). Segundo Scotto (1993), os gêneros *Clostridium spp.*, *Flavobacterium spp.*, *Bacillus spp.*, *Desulfovibrio spp.*, *Desulfotomaculum spp.* e *Pseudomonas spp.* também podem produzir EPS e já foram isolados em processos corrosivos de aços inoxidáveis.

- Bactérias aeróbias produtoras de ácidos

Existem várias bactérias heterotróficas que apresentam a capacidade de produzir ácidos orgânicos de cadeia curta, tais como, ácido fórmico, acético, láctico, propiônico,

butílico e úrico. As bactérias produtoras de ácido estão diretamente relacionadas à biocorrosão pela produção de substâncias corrosivas. Nos últimos anos estes micro-organismos vêm recebendo uma atenção especial devida a sua relação com as BRS. Os ácidos secretados pelas bactérias produtoras de ácidos podem ser metabolizados pelas BRS. Assim, o efeito sinérgico desses dois grupos de bactérias pode intensificar a biocorrosão (BOGAN *et al.*, 2004).

Dentre este grupo bactérias pode-se destacar o gênero *Acidithiobacillus* que são micro-organismos aeróbios que se apresentam na forma de bacilos curtos, com cerca de 0,5 µm de diâmetro e de 1,0 a 3,0 µm de comprimento. Possuem mobilidade própria, por meio de um único flagelo polar, não formam esporos e se apresentam geralmente como células isoladas. Sua temperatura ótima de crescimento situa-se entre 10 e 37 °C, mas algumas variedades termófilas são capazes de crescer em temperaturas superiores a 55 °C. Desenvolvem-se em água do mar ou de rio, de acordo com as características halofílicas das espécies. (VIDELA, 2003).

Essa elevada acidez pode conferir grande agressividade ao ambiente, não apenas para superfícies metálicas, mas também para estrutura de pedra e de concreto (WARCHEID e BRAAMS, 2000). Outras espécies bacterianas podem produzir ácidos inorgânicos como o ácido nítrico (*Nitrobacter* e *Pseudomonas*), ácido nitroso (*Nitrosomonas*) e ácido sulfídrico (BRS e *Clostridium*) (VIDELA, 2003).

- Bactérias redutoras de sulfato (BRS)

As BRS compreendem vários grupos de bactérias que utilizam o sulfato como agente oxidante, reduzindo-o a sulfeto. A maioria pode também utilizar compostos de enxofre oxidados tais como o sulfito e o tiosulfato ou enxofre elementar.

A maioria das informações sobre a diversidade de BRS em ambientes naturais tem sido obtida pela utilização de genes marcadores. O gene mais comumente utilizado é o que codifica RNA 16S ribossomal (rRNA) (LEU *et al.*, 1998; WARSCHEID e BRAAMS, 2000). As análises de RNAr 16S permitiram organizar as espécies de BRS em quatro grupos distintos: (1) BRS mesófilas Gram negativas não formadoras de esporos, (2) BRS Gram positivas formadoras de esporos, (3) BRS termófilas e (4) BRS Arqueobactériatermófila (CASTRO *et al.*, 2000).

A maioria das BRS é classificada como mesófila, com um ótimo de crescimento entre 25 e 40 °C, mas algumas espécies podem tolerar até -5 °C (psicrofílicas), enquanto outras podem apresentar crescimento ótimo em temperaturas superiores a 75 °C (hipertermofílicas). Com relação aos valores de *pH*, crescem em valor ótimo de 7,2; entretanto, encontram-se espécies que toleram ambientes altamente ácidos (*pH* = 4,0) e alcalinos (*pH* = 9,5).

Deve-se destacar ainda a capacidade das BRS suportarem altas pressões, como valores em torno de 105 kPa (espécies barofílicas). Todas essas características demonstram a habilidade desse grupo de micro-organismos para crescer em condições extremas e sua adaptabilidade a vários ambientes naturais (POSTGATE, 1984; BARTON, 1995).

As BRS's constituem um grupo de micro-organismos amplamente distribuídos na natureza e em muitos ambientes anaeróbios, têm um papel importante no ciclo biogeoquímico do enxofre e na degradação da matéria orgânica em diferentes ambientes anaeróbios. GALL e XAVIER (1996) demonstraram que as BRS não são estritamente anaeróbias.

Certas espécies têm a capacidade de tolerar a presença de oxigênio no meio e de utilizar o oxigênio como acceptor final de elétrons, como acontece na respiração aeróbia (SASS *et al.*, 1997; FRELEIRA *et al.*, 2003).

4.13. Avaliação da Corrosividade pela Taxa de Perda de Massa

Consiste na observação do comportamento do corpo de prova metálico em função do tempo, pela determinação da perda de massa por unidade de superfície. O teste fornece valores objetivos da agressividade do solo para casos de corrosão generalizada (TRABANELLI *et al.*, 1972).

É o método de avaliação da corrosão mais simples e extensivamente utilizado. Procedese a inserção de chapas de materiais similares aos que se deseja avaliar em regiões cuja corrosividade é representativa do sistema. Normalmente os corpos de prova (cupons) são submetidos a duas análises: a primeira é visual, quando se deseja buscar caracterizar o tipo de corrosão (uniforme, localizada) e a segunda, de caráter quantitativo,

que permite a determinação da taxa de corrosão por medição da perda de massa (diferença entre a massa inicial e a final do cupom, ou seja, antes da sua instalação e após a sua remoção).

Todavia existem algumas limitações:

- Os corpos de prova não devem ser utilizados para avaliação de mudanças rápidas ou bruscas de processos corrosivos, visto que o princípio básico está na perda de massa com conseqüente dependência do tempo de exposição na condição de corrosividade.
- Corrosão de característica localizada não deve ser determinada através de cupons, considerando o seu período de nucleação; além disso, o valor da taxa de corrosão não representará o perigo desta forma de corrosão.
- As taxas de corrosão calculadas a partir de cupons de corrosão não podem ser associadas diretamente ao sistema como um todo e sim às regiões cujas características são similares às do teste.
- Algumas formas de corrosão não são detectáveis por cupons de corrosão, por exemplo aqueles processos associados ao tipo de fluxo, efeitos de transferência de calor, mecanismos de danos combinados e cuja geometria do equipamento é fundamental para sua ocorrência (corrosão-erosão).

O guia padronizado G4 (ASTM G-4, 1995) sugere que o tempo de exposição seja determinado com base no conhecimento das taxas de deterioração dos materiais em uso. Todavia, recomenda que esse tempo não seja inferior ao estabelecido, ou melhor a taxa de deterioração representada pela Equação (3):

$$t = \frac{2,08}{TC} \quad (3)$$

onde TC é a taxa de corrosão em milímetros por ano e t é o tempo de exposição em dias.

As taxas de corrosão são determinadas pela perda de massa dos cupons no tempo considerado, através da Equação (4), referente a taxa de corrosão (ASTM G-5, 1998; N-2364 – PETROBRAS, 2003):

$$TC = \frac{K \times \Delta m}{A \times t \times \rho} \quad (4)$$

onde K é a constante de proporcionalidade tabelada (mm ano^{-1}) igual a $8,76 \times 10^4$; Δm é a diferença entre as massas, antes e após a exposição, em g; A é a área exposta do corpo de prova, cm^2 ; t é o tempo de exposição, em h, e ρ é a massa específica, g cm^{-3} (aço carbono, $7,86 \text{ g cm}^{-3}$).

Nos casos em que não se têm dados sobre o histórico do sistema é sugerida a execução dos ensaios em duas ou três etapas: a primeira - de curta duração - com 4 a 7 dias de exposição, na qual se determinará a taxa de passivação do cupom; a segunda e terceira fases - de longa duração - 30 dias para alguns cupons e de 30 a 90 dias para os remanescentes, quando efetivamente serão determinadas as taxas de corrosão médias do sistema (FOFANO, 1999).

A Tabela 4 relaciona a taxa de corrosão em *mpy* de ligas típicas de ferro e níquel com a sua resistência à corrosão, segundo Fontana (1986).

Tabela 4. Classificação da resistência relativa à corrosão de ligas típicas de ferro e níquel de acordo com a taxa de corrosão em *mpy*.

Resistência Relativa à Corrosão	<i>mpy</i>
Notável	< 1
Excelente	1 – 5
Boa	5 – 20
Média	20 – 50
Pouca	50 – 200
Inaceitável	> 200

5. METODOLOGIA

5.1. Amostras de Solo

Como solo típico da região foram utilizadas amostras de solo argiloso da camada superficial do subsolo provenientes da: província petrolífera de Urucu-Coari (coordenada geográfica: S 04° 59' 01,68" e O 65° 19' 59,20"), da Rodovia AM 354, no km 15 (S 04° 59' 01,68" e O 55° 20' 60,21"), Manaus-Puraquequara (S 03° 05' 3,54" e O 59° 51' 48,60") e da Rodovia BR 319, no km 183 (S 05° 43' 41,40" e O 62° 16' 35,00"). Essa coleta foi realizada no mês de janeiro de 2018, período chuvoso conforme relatórios de 2018 do INMET (Figura 7), sendo essa etapa de acordo com a metodologia usada por Ferreira (2005).

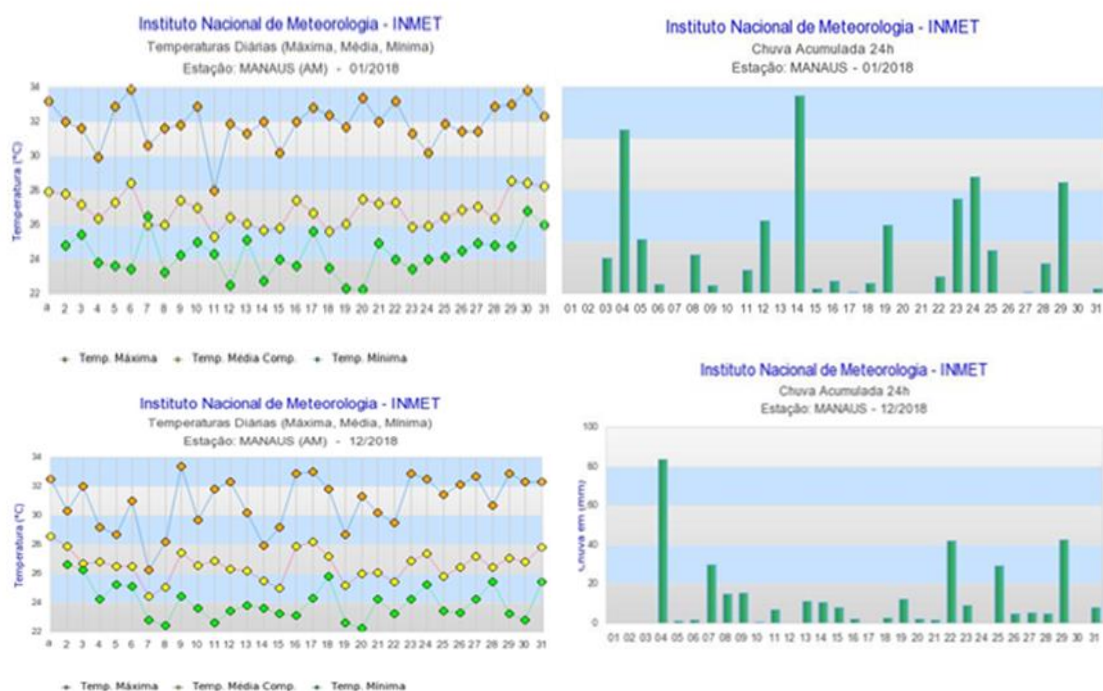


Figura 7. Gráficos de temperaturas diárias e chuvas acumuladas no ano de 2018 (INMET, 2018).

As amostras de solo foram coletadas em um raio máximo de 1 m da estaca metálica helicoidal, à profundidade de 0,5 a 1 m com o auxílio de um trado em quantidades de 1 kg, aproximadamente. Cada amostra foi transferida para um saco

plástico, vedado com fita adesiva, identificada e levada ao laboratório para secagem, separação, maceração e análises. Uma segunda coleta foi realizada no mês de dezembro de 2018, no Terminal Aquaviário de Coari (TA-Coari), nas proximidades dos dutos de recebimento e envio de GLP e petróleo. Após a coleta, as amostras foram levadas imediatamente ao laboratório para as análises. Identificadas como recebimento de petróleo (A1) e GLP (A2); e, envio de petróleo (A3) e GLP (A4). A Figura 8 mostra os pontos de coleta.

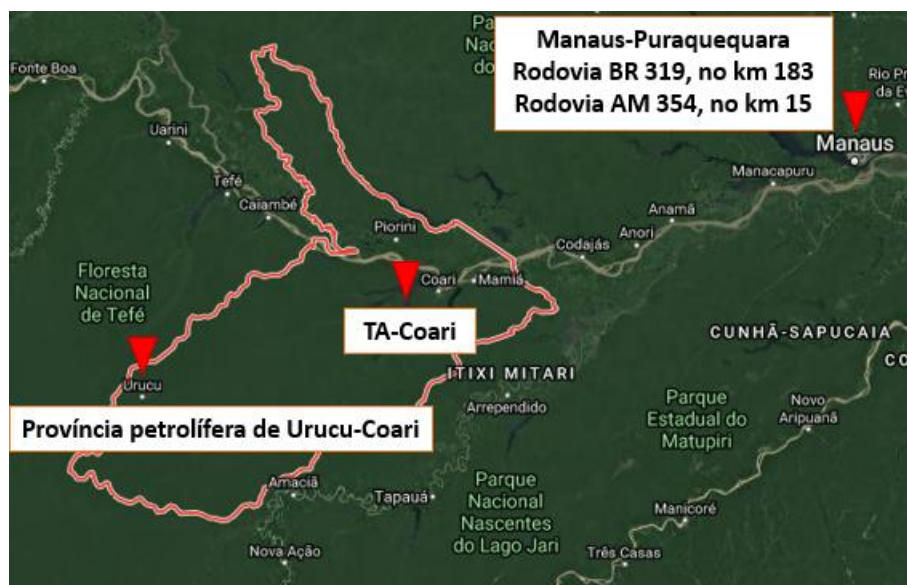


Figura 8. Pontos de coleta das amostras de solo adaptado do MAPS/Amazonas (2019).

5.2. Corpo de Prova (Aço AISI 1020)

As amostras de aço AISI 1020 correspondem a tarugos de 2,54 cm de diâmetro, em cortes de 3 cm cada, cedidas pelo professor Dr. Laurence Colares Magalhães, Coordenador do Laboratório de Usinagem/FT/UFAM. Essas amostras foram mantidas em ambiente seco e conservados. Esse corpo de prova consistiu em uma liga de aço carbono com propriedades químicas similares àquelas tubulações metálicas utilizadas nas indústrias petrolíferas, mostrado pela Figura 9.

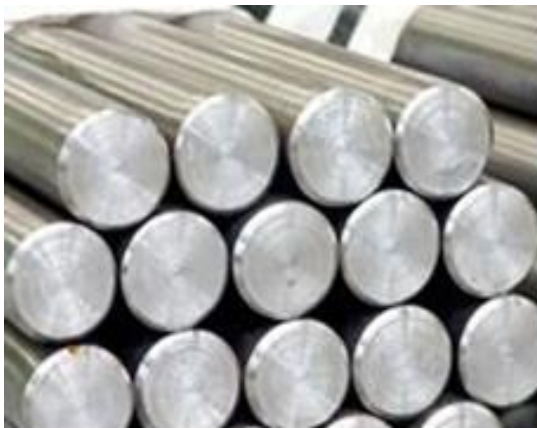


Figura 9. Amostras de tarugos de aço AISI 1020.

A composição química e propriedades mecânicas da amostra de aço 1020 são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5. Composição química e propriedades mecânicas do Aço AISI 1020 (NBR 87/2000).

Composição	% m m ⁻¹
C	0,19
Mn	0,40
P	0,04
S	0,05
Propriedades Mecânicas	Valor
Alongamento	36
Resistência a Tração (MPa)	400
Resistência ao Escoamento	255

5.3. Análises Geotécnicas

As análises geotécnicas foram conduzidas de acordo com Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), no Laboratório de Mecânica dos Solos, na Universidade Nilton Lins:

- Massa específica dos grãos, de acordo com os procedimentos NBR 6458/2016, para obter informações sobre a resistência e estabilidade do solo;
- Análises granulométricas, segundo a metodologia preconizada na NBR 7181/2016, a fim de mostrar a distribuição de tamanho dos grãos no solo, ou seja, encontrar a distribuição textural do solo;
- Limites de liquidez (teor de água no qual o solo adquire comportamento de um líquido, isto é, a relação entre a massa e o volume dos sólidos) e de plasticidade

(teor de umidade onde o solo perde a capacidade de ser moldado e passa a ser quebradiço, ou seja, caracterizar a fração fina do solo quanto ao seu comportamento), seguindo-se os procedimentos NBR 6459/2016 e NBR 7180/2016, respectivamente.

5.4. Caracterização Mineralógica, Química e Óptica

- Espectroscopia na Absorção de Infravermelho (ATR) - utilizada para identificação e caracterização de minerais a partir dos grupos funcionais observáveis, como Al–O, Si–O, O–H e outros. Os espectros no infravermelho foram obtidos em um espectrômetro Thermo Scientific (Nicolet IS10), do Laboratório de Espectroscopia de Infravermelho do IFAM, no intervalo de 4000 a 600cm^{-1} , 32 varreduras e resolução de 4 cm^{-1} . Cada amostra foi misturada com KBr na proporção de 1:100 (*m/m*) e prensada na forma de pastilha.
- Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) por energia dispersiva permite a identificação dos elementos químicos que compõem a amostra a partir dos valores de energia de raios X característicos emitidos pelos elementos químicos, quando devidamente excitados. Para tanto, as análises das amostras foram realizadas em equipamento PANalytical, modelo EPSILON 3 XL, do Laboratório de Materiais da Amazônia e Compósitos - LAMAC/FT/UFAM, com tensão máxima de 50 kV, corrente máxima de 3 mA e a presença do gás hélio.
- Difração de Raios X (DRX, método do pó) - para identificar as principais fases mineralógicas nas amostras de solo. Os dados de difração foram obtidos em um difratômetro PANalytical (modelo Empyrean), do Laboratório de Materiais do Departamento de Física do ICE/UFAM, operando com radiação $\text{CuK}\alpha$ sob tensão de 40 kV e corrente de 40 mA, com passos de $0,01^\circ$ e faixa de varredura de 10 a $80^\circ/2\theta$. O silício foi usado como padrão interno.
- *pH* e acidez total – visou identificar a influência do *pH* nas amostras de solos e correlacionar com a presença de bactérias. Ambas análises foram realizadas no Laboratório de Pesquisa de Físico-Química, do Departamento de Química do ICE/UFAM. As análises foram realizadas em um pHmetro da marca Quimis (modelo Mpa 210), como mostra a Figura 10.

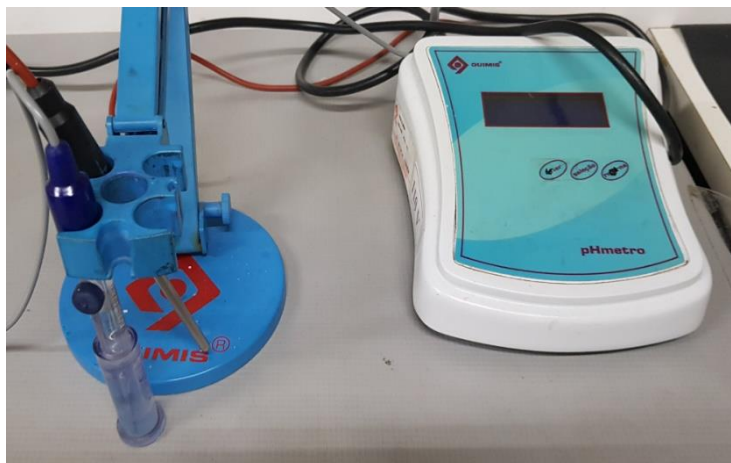


Figura 10. pHmetro de bancada da Quimis.

A acidez total foi determinada por titulação volumétrica. Em cerca de 4 g de amostra de solo foram adicionados 50 mL de KCl 1 mol L⁻¹. A mistura foi mantida sob agitação por 30 minutos, em seguida foi filtrada. No filtrado foram adicionadas 6 gotas de fenolftaleína e titulado com a solução de NaOH 0,10 mol L⁻¹, até obtenção da solução de cor rosada e registrado o volume titulado (V_{tit}). A acidez total (AT) foi calculada com auxílio da expressão matemática descrita na Equação (5):

$$AT = \frac{V_{tit} \times [\text{NaOH}] \times 100}{m_{solo}} \quad (5)$$

onde m é a massa de solo, em gramas.

O resultado de pH foi comparado conforme manual de análises químicas do solo da EMBRAPA (1997), que pode ser visto na tabela 6.

Tabela 6. Parâmetro de pH do solo adaptado de EMBRAPA (1997).

pH	Acidez
< 4,5	Excessivamente ácido
4,6 a 5,8	Muito ácido
5,9 a 6,4	Ácido
6,5 a 7,1	Pouco ácido
7,2 a 14,0	Alcalino

- Metalografia – visou-se identificar os contornos de grãos da amostra de aço. A análise metalográfica foi realizada em uma politriz e um microscópio óptico da Pantec, modelo MMI 2000, do Laboratório de Metalurgia, na Faculdade de Tecnologia da UFAM, com software de análise de imagem UMIAS Pro, nas seguintes etapas:
 - (i) Lixamento e polimento – visou remover a superfície deformada do material e introduzir uma superfície plana com danos mínimos, até ficar espelhado e sem nenhum arranhado aparente, como mostra a Figura 11.



Figura 11. Esquerda – politriz e Direita – corpo de prova polido.

- (ii) Ataque químico – consistiu em fazer com que a solução de ataque reaja com os elementos da amostra, onde as regiões que ocorreram as reações ficarão mais baixas e mais escuras. Após o ataque químico com Nital 2 %, por cerca de 30 segundos, o tarugo foi lavado com álcool e seco. Nessa etapa, observou-se que a superfície espelhada passou a ser fosca.
- (iii) Análise óptica – as micrografias foram geradas em microscópio óptico, com auxílio de uma tela de computador (Figura 12), que reproduziu a imagem vista pelo microscópio, utilizando-se lentes de 40 \times , 100 \times , 200 \times e 400 \times .

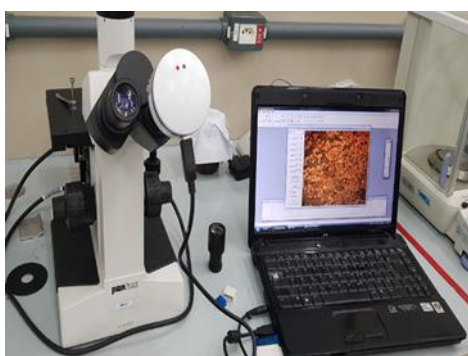


Figura 12. Microscópio óptico da Pantec e modelo MMI 2000 acoplado ao notebook.

- Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) - permitiu fornecer informações quanto a morfologia e composição química das amostras. As microimagens foram obtidas em um microscópio eletrônico de varredura, fabricante TESCAN, modelo VEGA3, do Laboratório Temático de Microscopia Óptica e Eletrônica do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia - INPA, sendo necessário o recobrimento das amostras com ouro (processo de metalização), com distância WD = 4,9, 7,13 e 7,14 mm e aceleração de 12 e 18 kV.

5.5. Caracterização Microbiológica

As análises microbiológicas foram realizadas no Laboratório de Controle de Qualidade Microbiana, Sala de Manipulação e Crescimento Microbiano e Laboratório Didático de Bacteriologia e Virologia, do ICB-01, sob o acompanhamento e gerenciamento do Prof. Dr. Takeshi Matsuura, Setor Sul do Campus Universitário da UFAM.

Para a caracterização microbiológica foram utilizados extratos aquosos do solo argiloso coletado para se obter amostras bacterianas conforme procedimento inicial de preparo do solo descrito por Ferreira (2005).

Primeiramente, separou-se aproximadamente 500 g de solo. Em seguida, espalhou-se em uma bandeja plástica para secar ao ar livre, durante 5 dias. Posteriormente, retirou-se com pinça eventuais folhas, gravetos e raízes presentes. Peneirou-se na malha de 2,5 mm, em seguida, o solo foi macerado em gral de ágata. Por fim, preparou-se o extrato aquoso do solo para a determinação da concentração das espécies solúveis que poderiam interferir no processo de corrosividade do solo. Dentre essas, existe particular interesse pela concentração de sulfatos, cloretos, potássio, sódio e cálcio. A preparação do extrato aquoso consistiu, basicamente, em uma solução composta de solo e água (1:100 V/V), onde ficou em constante agitação por 24 h, tempo suficiente para ocorrer a dissolução dos íons desejados.

Uma alíquota de 1 mL da amostra foi inoculada em um meio nutritivo composto por triptose, lactose, sais biliares, fosfato monopotássico, fosfato dipotássico, cloreto de sódio e água destilada, sendo incubado por um período de 48 h em estufa bacteriológica

a uma temperatura de 35 °C. Esta temperatura foi mantida para a seleção de bactérias mesófilas (a maioria das bactérias preferem temperaturas de crescimento de 37 °C). Após este período, foram preparadas culturas desta amostragem meio ácido ($pH = 1$), sendo 30 mL de ácido sulfúrico a $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, 10 mL do meio nutritivo, 60 mL de água destilada, a qual foi colocada para incubar por 24 h a 35 °C.

A identificação final foi dada por meio de caldo específico para o bacilo *Acidithiobacillus thiooxidans*, composto dos seguintes sais: KH_2PO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{CaCl}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, diluídos em água destilada. Para o bacilo *Acidithiobacillus ferrooxidans*, foi utilizado o meio composto dos seguintes sais: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, KCl , KH_2PO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, H_2SO_4 a $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ e água destilada para diluição.

Os dois meios foram distribuídos em tubos de ensaio e inoculados com 1 mL do concentrado obtido do meio nutritivo e incubados em estufa bacteriológica a uma temperatura de 35 °C por um período de três a cinco dias. Para um resultado positivo, a solução deverá ficar turva, indicando a presença de micro-organismos.

Após este período, foram preparadas culturas desta amostra em meio ácido ($pH = 1$) a qual foi colocada para incubar por 36 h, a 35 °C.

Para as primeiras identificações das bactérias, foi utilizado o Manual BERGEY (1994), sendo inicialmente pré-selecionados dois possíveis organismos, *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Acidithiobacillus ferrooxidans*, sendo os dois Gram-negativos e que poderiam crescer nestes parâmetros de pH e temperatura onde se realizaram os experimentos.

Para o material coletado em dezembro de 2018, foi realizado o seguinte procedimento, sendo um modelo adaptado de VIDELA (2002): após a coleta, retirou-se com pinça eventuais folhas, gravetos e raízes presentes. Em seguida, preparou-se o extrato aquoso do solo (1:100 V/V). Após isso, foi preparado o meio de cultura a fim de favorecer o crescimento das bactérias em estudo. Assim sendo, foram pesados, em balança analítica, os sais inorgânicos (KH_2PO_4 , $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{CaCl}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, KCl , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, acrescido de ágar, ajustando-se o pH , com H_2SO_4 a 0,1

mol L⁻¹ e NaOH 0,1 mol L⁻¹, para os seguintes valores: 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8. Em seguida, foram colocados em placas de Petri e distribuídos em estufas bacteriológicas, nas temperaturas 25, 30 e 35 °C, por um período médio de 3 a 5 dias (72 a 120 h). Após esse período, pela percepção do aspecto das colônias formadas, essas bactérias foram isoladas, no respectivo meio de cultura e *pH*, a fim de preservar e favorecer o crescimento de um único tipo de bactéria, podendo assim, identificá-las. A identificação foi realizada conforme descrição de Holt (1994), onde foram feitos os testes de coloração de Gram e teste químico, *pH*, temperatura, motilidade, oxidase, catalase e redução de nitrato.

- Coloração de Gram – é baseado na capacidade das paredes celulares de bactérias gram-positivas de reterem o corante cristal violeta no citoplasma durante um tratamento com etanol-acetona e as paredes celulares de bactérias gram-negativas não o fazem. Assim sendo, permite a observação da morfologia bacteriana e fornece informações a respeito do comportamento do seu material celular diante dos corantes de Gram. Consiste em cobrir a lâmina com soluções indicadoras (cristal violeta, lugol, álcool etílico e safranina) e as devidas lavagens com água e/ou álcool. Posteriormente, colocar uma gota de óleo de imersão sobre a lâmina e realizar a leitura no microscópio. Para as bactérias gram-negativas, espera-se uma coloração rosa/vermelha.
- *pH* – a fim de averiguar o *pH* ideal para crescimento. Os testes foram realizados nos valores descritos mais acima, faixa para exclusão de espécies que não sejam a proposta deste trabalho. Para os micro-organismos de estudo, espera-se um crescimento em *pH* = 4.
- Temperatura - a fim de averiguar a temperatura ideal para crescimento. Os testes foram realizados nos valores descritos mais acima. Para os micro-organismos de estudo, espera-se um crescimento em torno de 35 °C, temperatura comum para as duas espécies.
- Motilidade – visa determinar a capacidade das células para se deslocarem no meio onde se encontram em meio SIM, incuba-se a bactéria, num período de 24 h. O Ágar SIM é semissólido devido à baixa concentração de ágar. Essa característica permite uma fácil determinação visual da motilidade que aparece como um crescimento que prolonga a partir do ponto original de inoculação. Para as bactérias *Acidithiobacillus*, espera-se um resultado positivo.

- Oxidase - auxilia no processo de identificação de BGN (Bacilos Gram Negativos) não fermentadores da glicose. Para essa técnica, são colocadas tiras de papel absorvente impregnadas com N-N-dimetil-p-fenilodiamina a 1 % e solução alcoólica de α -naftol a 1 %. O resultado positivo dar-se-á com o aparecimento de uma coloração azul-púrpura no papel. Sendo as *Acidithiobacillus* aeróbias, espera-se que a reação seja positiva.
- Catalase – a fim de verificar a presença da enzima catalase, que converte o peróxido de hidrogênio em oxigênio e água, essa técnica é utilizada para identificar bactérias Gram-positivas produtoras de catalase. A liberação do oxigênio se observa pela formação de bolhas, ao inocular a cultura em placa de Petri contendo PCA (*Plate Count Agar*). Para esse teste, espera-se que não haja reação.
- Redução de Nitrato - determina a capacidade de redução do nitrato em nitrito por bactérias anaeróbias. A realização desse teste é recomendada para diferenciação e identificação de bactérias anaeróbias. Nessa reação, o nitrato é reduzido para nitrito, que pode ser posteriormente reduzido para gás nitrogênio ou amônia. A redução do nitrato em nitrito é detectada pela adição do ácido sulfanílico e α -naftil-amina, que se combinam com o nitrito para formar um composto vermelho, o *p*-sulfobenzeno-azo-alfa-naftilamina (que indica um teste positivo). Se, após a adição dos reagentes não ocorrer alteração de cor (reação negativa), é adicionado pó de zinco para determinar a presença de nitrato não reduzido ou de outros produtos além de nitrito (isto é, amônia, nitrogênio, óxido nítrico, hidroxilamina). Caso o nitrato tenha sido reduzido para além de nitrito, os íons de zinco não irão produzir alteração de cor (resultado positivo). Uma reação positiva para o zinco e negativa para o nitrito indica, presumivelmente, que o nitrato foi reduzido para os produtos obtidos depois do nitrito. Como resultado para este trabalho, espera-se que as fases 1 e 2 sejam negativas, com solução incolor e vermelha, respectivamente.

5.6. Taxa de Perda de Massa

A determinação da perda de massa (diferença entre a massa inicial e a final do corpo de prova) permite calcular a taxa de corrosão e, por conseguinte, avaliar a

intensidade do processo corrosivo e estimar o desgaste do material metálico em um dado ambiente (CASTRO, 2013).

Para realização desse ensaio, os corpos de prova foram tratados e medidos as massas, antes do início dos experimentos. O tratamento consistiu em um lixamento numa politriz, da marca Arotec, com lixas nº 80, 120, 200, 400, 600, 800 e 1200, para melhor visualização da corrosão. As medidas das massas foram pesadas diariamente, em uma balança analítica, num período de 30 dias para o cálculo de velocidade de corrosão, sendo estes submetidos a situações que simulam um aço de uma tubulação ou um duto enterrado no solo. As três formas de avaliação e tratamento do aço no solo foram realizadas de acordo com a norma ASTM G1-90 (2003):

- Tratamento 1 com o solo *in natura* + aço 1020;
- Tratamento 2 contendo o extrato aquoso do solo + aço 1020 (limpo com álcool isopropílico);
- Tratamento 3 com extrato aquoso do solo + aço 1020.

A estimativa de taxa de corrosão será feita com os resultados de perda de massa, a partir Equação 3, mostrada anteriormente.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Solo

6.1.1. Análises Geotécnicas

Uma análise visual foi brevemente realizada, a fim de observar a característica do material coletado através da cor. Jack e colaboradores (1996), relata que a cor do solo pode estar relacionada à permeabilidade de oxigênio, onde temperaturas quentes e drenagem estimulam a formação de óxidos de ferro, que conferem ao solo esse tom avermelhado, observado na Figura 13. Já, as cores amareladas ou de ferrugem ocorrem em solos ligeiramente mais úmidos devido aos óxidos de ferro em forma hidratada.

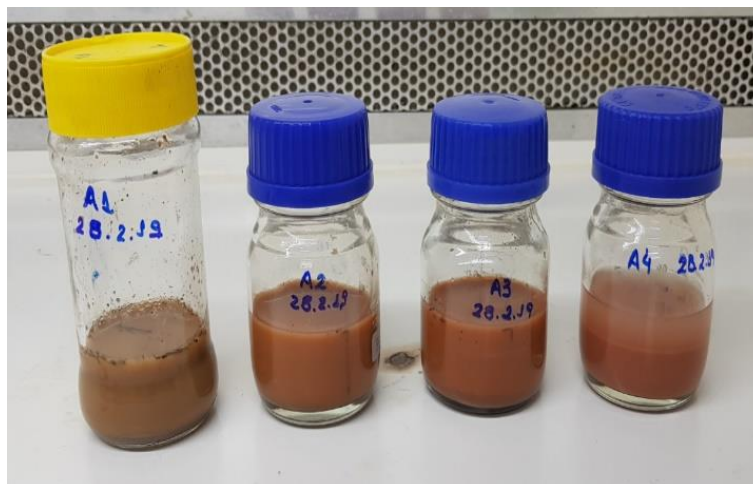


Figura 13. Extrato aquoso das amostras de solo coletadas.

A quantidade de umidade presente no solo é diretamente proporcional à superfície disponível, e, portanto, ao tamanho da partícula. Trabanelli e colaboradores (1972) reportaram que os solos argilosos, por possuírem partículas finas, de baixa permeabilidade, há uma tendência de retenção de umidade que normalmente favorece a corrosão do metal. Isso acontece devido à baixa difusividade do oxigênio e a reação catódica que ocorre é a redução de H^+ proveniente da reação de troca catiônica da argila.

Os resultados das análises granulométricas indicaram uma matriz argilosa, conforme tabela 7.

Tabela 7. Resultado das análises geotécnicas

Amostras	Granulometria (%)	Massa específica ($g\ cm^{-3}$)	Limites de Liquidez (%)	Limites de Plasticidade (%)
A1	76,08	2,571	83	41
A2	76,02	2,568	81	40
A3	77,01	2,575	83	41
A4	76,07	2,570	82	42

Quanto mais úmido o solo, maior possibilidade de servir como nutriente para a formação de metabólitos microbianos que colaboram como agente de corrosividade, sendo que a água promove a ionização dos eletrólitos presentes no solo, pois as ligações de hidrogênio são fracas, mas suficientemente fortes para evitarem a penetração da água entre as unidades estruturais (SEDRIKS, 2004).

6.1.2. Análises Químicas, Mineralógicas e Ópticas

6.1.2.1. Fluorescência de Raios X (FRX)

Os resultados da análise de FRX das amostras de solo são apresentaram na Tabela 8, em porcentagens dos óxidos mais estáveis dos elementos.

Tabela 8. Resultados da análise de FRX para as amostras de solo.

Óxidos	Solo 1	Solo 2	Solo 3	Solo 4
	%m m ⁻¹			
Al ₂ O ₃	33,788	33,808	34,245	34,819
SiO ₂	45,545	46,517	45,793	45,430
P ₂ O ₅	0,895	0,902	0,888	0,987
K ₂ O	0,026	0,023	0,029	0,028
CaO	0,496	0,478	0,495	0,486
TiO ₂	1,823	1,832	1,829	1,825
Fe ₂ O ₃	16,656	15,666	15,659	15,652
ZrO ₂	0,506	0,502	0,509	0,506
Ag ₂ O	0,119	0,117	0,118	0,119
ΣOE	0,146	0,155	0,435	0,148

Legenda: ΣOE- somatória de outros elementos (Ga, Br, Rb, Sr, Y, Nb, Sn, Eu, Hf e Pb).

Com base nos dados obtidos, observa-se a semelhança na composição entre as amostras. A sílica é o óxido predominante nas quatro amostras analisadas. O alto teor de alumínio e sílica, correspondem as fases da caulinita e do quartzo, respectivamente. A porcentagem de titânio ocorre em todas as argilas, na forma de TiO₂, podendo estar relacionado com a presença de anastásio e/ou rutilo, que é uma das três formas do dióxido de titânio e os minerais comuns. A quantidade de ferro encontrada está relacionada com o pH (mais disponível quando o pH é maior que 6,0), presença de matéria orgânica e de fósforo (solos ricos em matéria orgânica são aqueles mais provavelmente pobres em ferro) e com o intemperismo (os óxidos e hidróxidos de ferro aumentam). A presença de ferro é um fator que determina a coloração das argilas. (CAMARGO *et al.*, 1986).

Além disso, a quantidade moderada de ferro nas amostras pode ter uma relação com a presença das bactérias *Acidithiobacillus ferrooxidans*, uma vez que a energia para

o crescimento dessa espécie é obtida da oxidação de íons Fe^{2+} , enxofre elementar e compostos reduzidos de enxofre (S^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ e $\text{S}_3\text{O}_8^{2-}$).

Quanto à presença dos outros elementos é possível considerá-los como contaminantes do material ou óxidos residuais, visto que, estão em pequenas percentagens e não foi identificado uma forma cristalina para eles.

6.1.2.2. Espectroscopia no Infravermelho -ATR

As amostras analisadas resultaram no espectro da Figura 14, onde aparecem as bandas encontradas. Todas apresentaram as mesmas características.

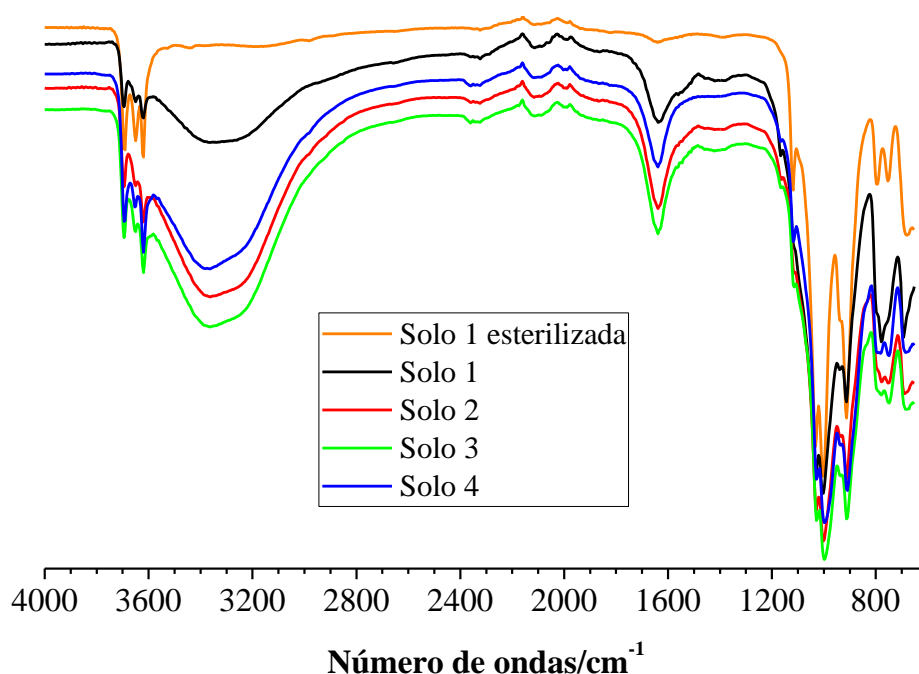


Figura 14. Espectros no IV das amostras de solo.

As bandas de absorções de vibrações em 3696, 3652 e 3620 cm^{-1} , apresentadas na figura acima, são típicas de estiramentos de O-H ligados às camadas interna e externas do mineral caulinita com razoável e cristalinidade. Nos espectros de todas as amostras observou-se a presença de grupos silanóis em torno de 3370 cm^{-1} (KAUFHOLD *et al.*, 2012). Por outro lado, as bandas de absorções em 1100 a 1008 cm^{-1} são de vibrações de estiramentos simétricos e assimétricos de $-\text{Si}-\text{O}$ nos sítios tetraédricos.

A Figura 17 mostra as bandas em 914 cm^{-1} é atribuída a vibração de dobramento de $-\text{OH}$ ligados aos Al no sítio tetraédrico. As bandas em 694 a 793 cm^{-1} são de vibrações de dobramentos de $\text{Si}-\text{O}-\text{Si}$.

A banda em 541 cm^{-1} corresponde às vibrações de dobramentos de $\text{Al}-\text{O}-\text{Si}$, o que pode implicar que os tetraedros de silício da caulinita estão intactos e sem deformações. No intervalo de 471 a 431 cm^{-1} é possível observar o dobramento de $-\text{Si}-\text{O}$ (PAVIA *et. al.*, 2012).

6.1.2.3. Difração de Raios X (DRX, método pó)

Os dados de difração de raios X das amostras de solo, incluindo amostra de solo 1 esterilizada, apresentam padrões gráficos muito semelhantes, o que sugere que ocorrência das mesmas fases cristalinas (Figura 15).

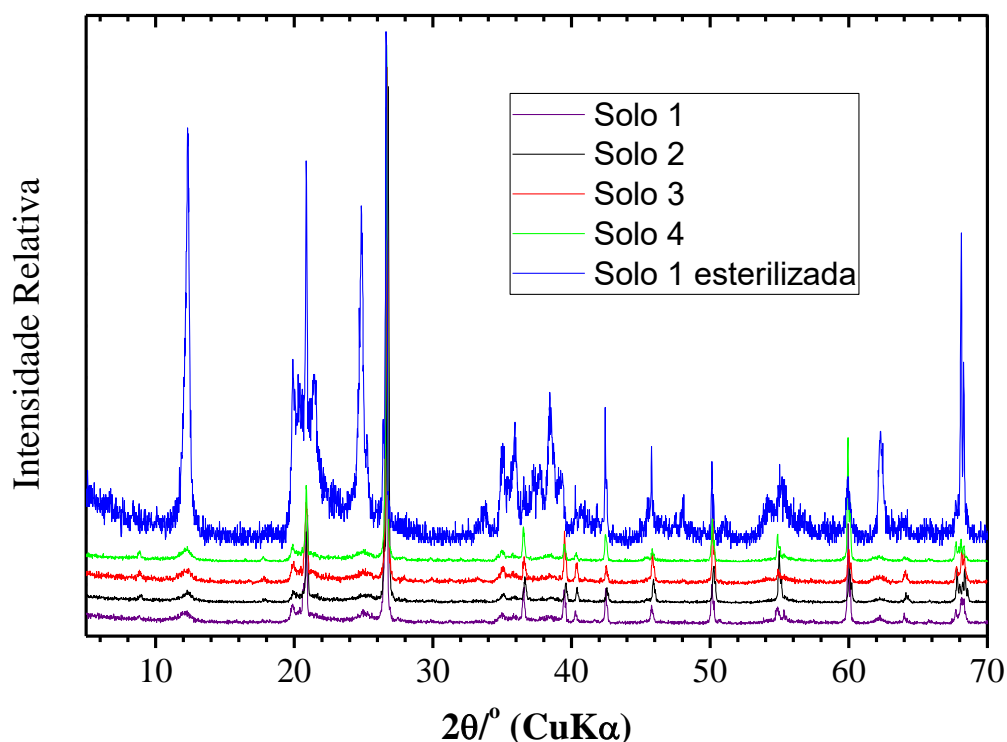


Figura 15. Padrão de difração de raios X das amostras de solo.

As fases cristalinas foram identificadas por comparação com os dados dos padrões cristalográficos da base de dados da *Inorganic Crystal Structure Database* (ICSD), sendo os cartões N° 80082 – caulinita [$\text{Al}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$], 83849 – quartzo (α - SiO_2), 82084 – anatásio (α - TiO_2), 71808 – goethita [α - $\text{FeO}(\text{OH})$] e 24791 – hematita (α -

Fe₂O₃), para ilustrar a Figura 6 mostra em detalhes as comparações com as posições de Bragg dos dados experimentais de DRX da amostra Solo 1.

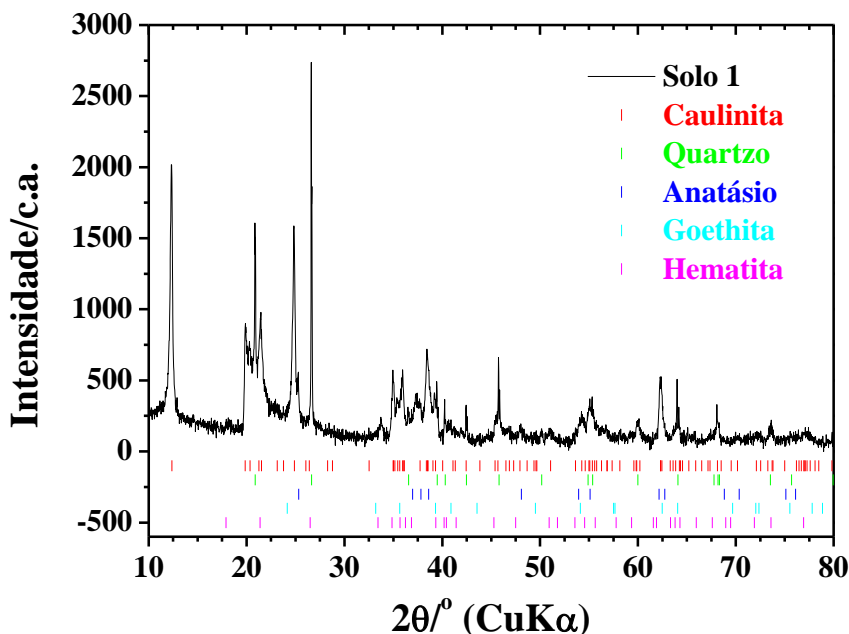


Figura 16. Padrão de difração de raios X das amostras de solo 1.

Aparentemente as fases de caulinita e quartzo são predominantes nas amostras, por outro lado, as fases de óxidos de ferro, aqui nesse caso a goethita e hematita ocorrem também, sendo a fase de goethita majoritária uma vez que as amostras têm predominância da cor alaranjada, típica do solo com esse mineral. E resíduo de anatásio também foi identificado, tipo mineral de óxido de titânio de ocorrência nos solos amazônicos.

6.1.2.4. Acidez total e pH

A acidez do solo pode ser representada de duas maneiras: *pH* e acidez total. Os resultados de *pH* e acidez total são apresentados na Tabela 9, o que indica um solo argiloso ácido, conforme manual de análises químicas de solos da EMBRAPA (1997).

Esses valores também variam com a quantidade de chuva. Maior quantidade de chuva, maior acidez. A água (H₂O) se combina com dióxido de carbono (CO₂) para formar um ácido fraco - ácido carbônico (H₂CO₃). O ácido fraco ioniza, liberando hidrogênio (H⁺) e bicarbonato (HCO₃⁻). Os íons de hidrogênio liberado substituem os íons

de cálcio retidos pelos coloides do solo, fazendo com que o solo se torne ácido. Os íons do cálcio deslocado (Ca^{2+}) se combinam com os íons do bicarbonato para formar o bicarbonato de cálcio que, sendo solúvel, é lixiviado do solo. O efeito líquido é a maior acidez do solo. O alumínio (Al^{3+}) também contribui para a acidez do solo. Em resumo, os solos se tornam ácidos quando elementos básicos como cálcio, magnésio, sódio e potássio retidos por coloides de solo são substituídos por íons de hidrogênio. (TREVINO, 2003).

Tabela 9. Resultados das análises de pH e acidez total.

Amostra	pH	Acidez Total (meq/100 g)
A1	6,0	28,15
A2	6,2	26,66
A3	5,4	31,58
A4	5,6	31,92

Fassbender e Bornemisza (1987) concordam com Trevino (2003), afirmando que a reação do solo depende do conteúdo de hidrogênio ionizável, do alumínio em diferentes formas dissociáveis e, em grau menor, dos íons de manganês e ferro, todos em equilíbrio com a solução do solo, onde ocorrem várias reações de hidrólise.

A maior parte da acidez encontra-se ligada na fase sólida de forma não dissociada e é chamada de acidez total ou potencial, os íons Al^{3+} e H^+ são os responsáveis por essa acidez. Brady (1989) denominou acidez total devido ao fato de que o hidrogênio e o alumínio adsorvidos passam para a solução do solo quando esta solução se reduz. O deslocamento do íon hidrogênio da fase sólida para a líquida mantém o equilíbrio entre as duas fases, não permitindo assim, grandes variações nas concentrações desse íon na solução do solo, havendo uma determinada resistência à mudanças bruscas no valor de pH. A esta resistência a mudança de pH se dá o nome de poder tampão do solo. O poder tampão será tanto maior quanto mais elevado o teor de matéria orgânica, de argilominerais, e de óxidos de ferro e alumínio, que são fontes de Al^{3+} e H^+ para a solução do solo.

6.1.2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Na Figura 17 são apresentadas as microimagens das amostras de solo (fração argilosa) da região amazônica registradas em 2 μm e ampliação de 10.000x, para fins de comparação entre as amostras.

A caulinita aparece nas imagens em forma de lamelas de cristais dispostos face a face. Também pode ser observada a ocorrência em placas com hábito pseudo-hexagonais.

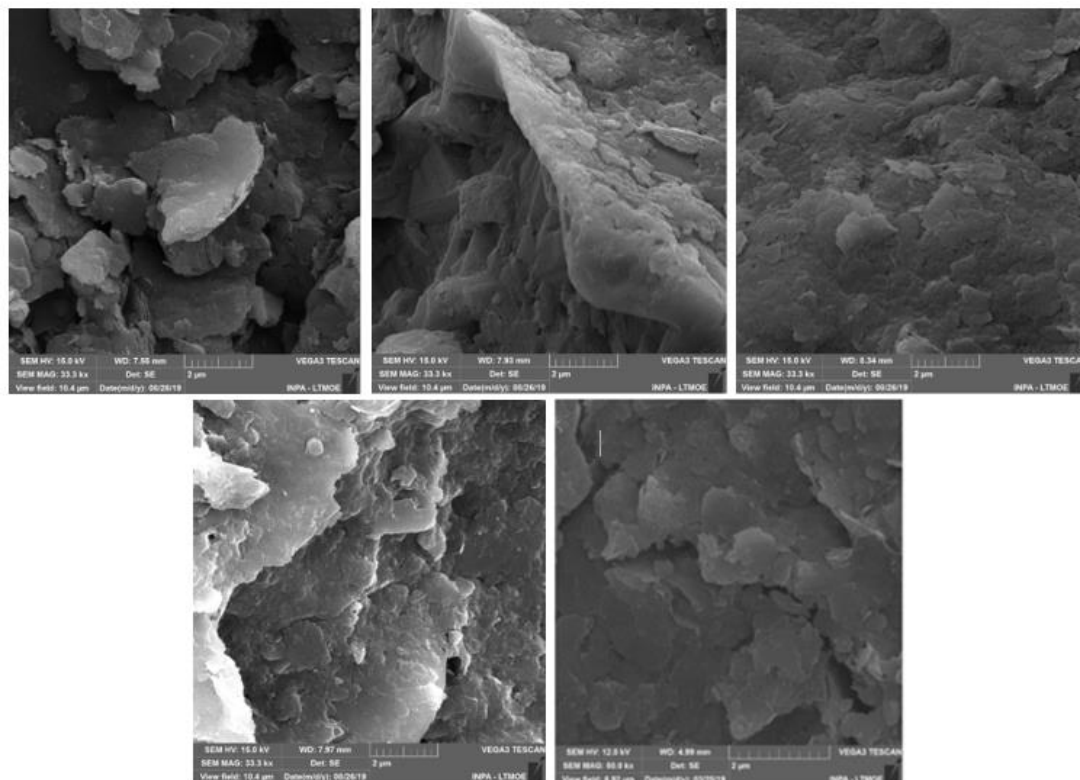
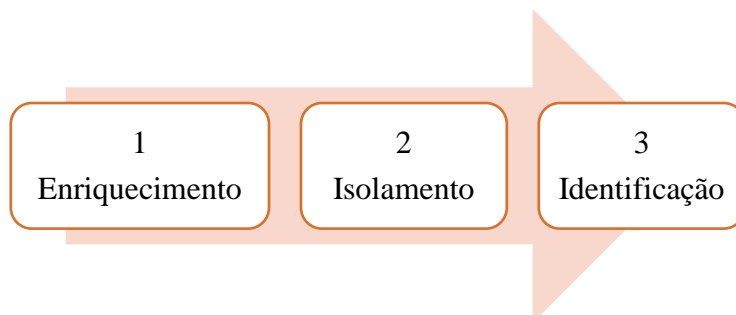


Figura 17. Micrografias de MEV da amostra de solo. Superior esquerda – A1. Superior meio – A3. Superior direita – A3. Inferior esquerda – A4. Inferior direita – A5 (amostra esterilizada).

6.1.3. Análises Microbiológicas

As análises microbiológicas foram realizadas nas seguintes etapas.



Etapa 1 – Enriquecimento - consistiu em semear cada amostra em placas de Petri, com ágar e sais, com o objetivo de averiguar as colônias que cresceriam neste meio, nas condições de pH e temperaturas pré-estabelecidas.

Etapa 2 – Isolamento - em novas placas de Petri, foram semeadas em estrias cada colônia identificada na Etapa 1.

Etapa 3 – Identificação - realizou-se de acordo com os parâmetros do manual Bergey (1994), através dos testes de coloração de Gram e teste químico, *pH*, temperatura, motilidade, redução de nitrato, oxidase e catalase. A Tabela 10 apresenta os parâmetros de identificação de micro-organismos.

Tabela 10. Parâmetros de identificação de micro-organismos adaptado de Holt (1994).

Espécie	<i>A. thiooxidans</i>	<i>A. ferrooxidans</i>
Motilidade	+	+
pH	2 a 4	2 a 4
Redução de Nitrato	-	-
Temperatura Ótima	25 a 30	30 a 35
Oxidase	+	+
Catalase	Sem reação	Sem reação

6.1.3.1. Temperatura e pH

As amostras foram colocadas em tubos de ensaio e organizadas para que fossem distribuídas da seguinte forma:

- Temperatura 25°C – *pH* na faixa de 2,0 a 5,0.
- Temperatura 30°C – *pH* na faixa de 2,0 a 5,0.
- Temperatura 35°C – *pH* na faixa de 2,0 a 5,0.

Brewis (1996) diz que as espécies *Acidithiobacillus ferrooxidans* e *Acidithiobacillus thiooxidans* crescem no intervalo de *pH* 1,0 a 6,0, sendo o *pH* ótimo para alcançar a máxima velocidade de crescimento na faixa de 2,0 a 2,5. Assim sendo, julga-se que o gradiente de *pH* através da membrana citoplasmática é um dos maiores de todos os organismos. De modo análogo, sobrevive em um intervalo de temperatura de 2 a 40 °C, mas o intervalo de 28 a 35 °C é o mais favorável.

No manual Bergey (1994), consta que o *pH* ideal para crescimento de ambas espécies é de 2,0 a 4,0, com temperaturas nas faixas de 25 a 30 °C e 30 a 35 °C, para *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Acidithiobacillus ferrooxidans*, respectivamente.

Nesse teste observou-se um crescimento significativo de colônias de bactérias em *pH* = 4,0, na temperatura de 35 ± 2,0 °C, em um período de 5 dias (120 h). Os resultados podem ser vistos na tabela 11.

Tabela 71. Resultado *pH* versus temperatura.

<i>pH</i>	Temperatura/°C		
	25	30	35
2	Não observado crescimento no período de 15 dias	Não observado crescimento no período de 15 dias	Não observado crescimento no período de 15 dias
3	Não observado crescimento no período de 15 dias	Não observado crescimento no período de 15 dias	Não observado crescimento no período de 15 dias
4	Crescimento lento (± 13 dias)	Crescimento lento (± 10 dias)	Crescimento moderado (3 a 5 dias)
5	Crescimento lento (± 15 dias)	Crescimento lento (± 10 dias)	Crescimento moderado (3 a 5 dias)

Starosvetsky e colaboradores (2013) encontraram, os primeiros indícios de colônias bacterianas entre três e quatro dias, na temperatura de 31 ± 0,5 °C, sendo utilizados o verde de bromo cresol e o vermelho de fenol, num período total de dez dias.

6.1.3.2. Coloração de Gram

Após o isolamento das colônias crescidas, realizou-se o teste de coloração de Gram, para verificação da forma, arranjo celular e coloração, identificadas através do resultado em Gram positivo e Gram negativo.

Observando a Figura 18, pode-se constatar a presença de bactérias, Gram negativas, em forma de bastonetes (bacilos) e arranjadas em diplobacilos.

Jensen e Webb (1994), no entanto, diz que *Acidithiobacillus* também podem ocorrer sozinhas ou como estreptobacilos.

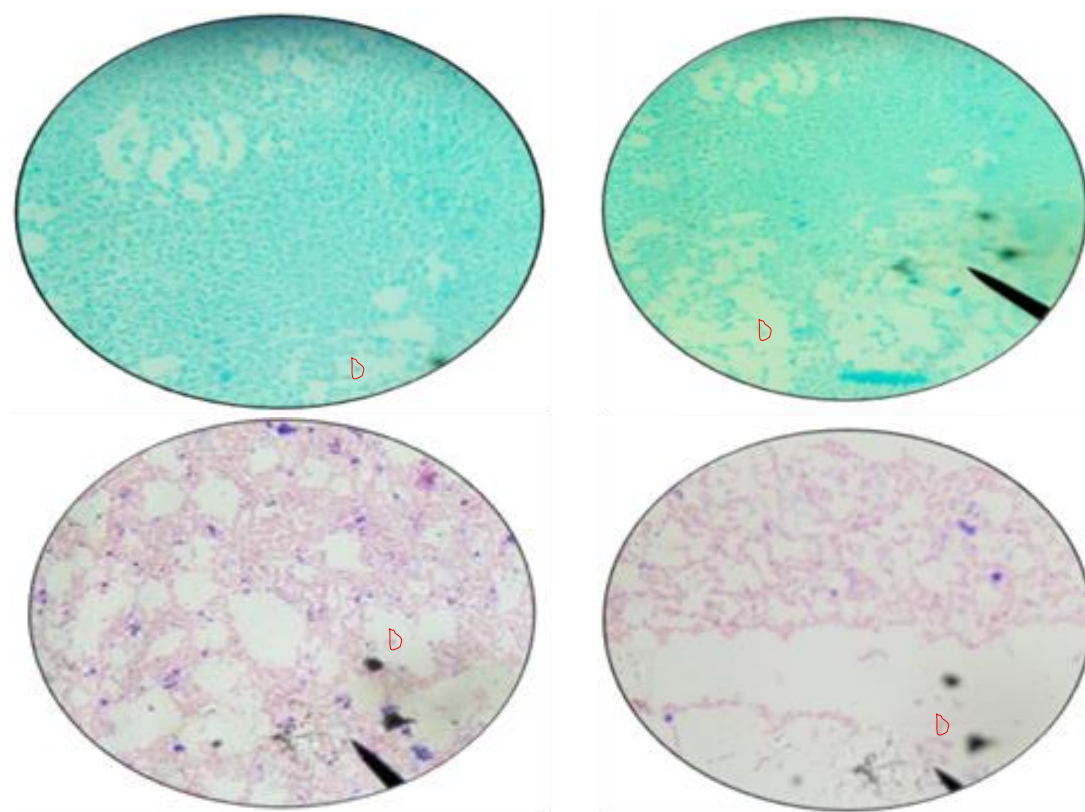


Figura 18. Coloração de Gram. Esquerda superior – amostra A1, Direita superior – amostra A2, Esquerda inferior – amostra A3 e Direita inferior – amostra A4.

6.1.3.3. Motilidade

Com o objetivo de visualizar a capacidade de locomoção do micro-organismo, foram distribuídos em quatro tubos de ensaios. Após a incubação de 24h, em meio semi-

sólido, foi possível visualizar que as bactérias cresceram ao longo da linha de incubação, indicando a capacidade de se locomover, como mostra a Figura 19. Também é possível identificar a motilidade quando o meio fica turvo. (HOURY *et al.*, 2018).

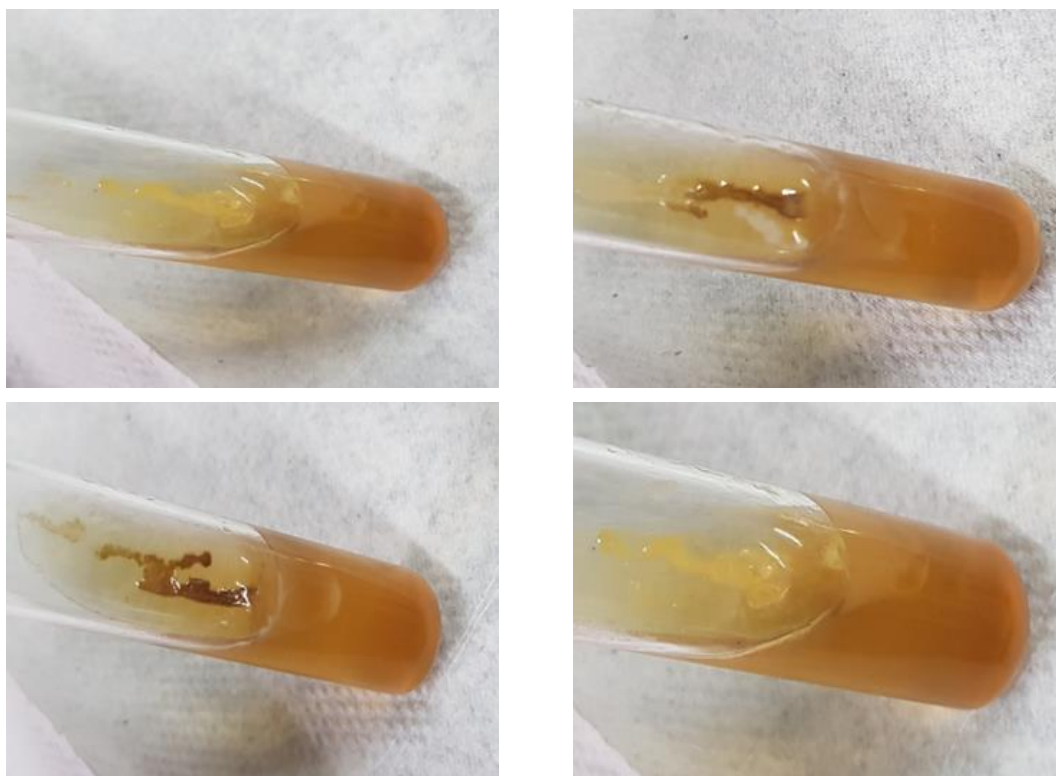


Figura 19. Teste de Motilidade. Esquerda superior – amostra A1, Direita superior – amostra A2, Esquerda inferior – amostra A3 e Direita inferior – amostra A4.

6.1.3.4. Redução de nitrato

As enzimas responsáveis pela redução de nitrato a nitrito pelos microrganismos são as nitrato redutases, podendo o nitrato ser metabolizado de diferentes formas dependendo do tipo de nitrato redutase que cada espécie possui (MORENO, 1999).

Para a realização desse teste, adicionou-se a bactéria no meio com nitrato (caldo). A incubação foi realizada por 5 dias, à 37 °C. Após esse período, realizou-se os testes em duas etapas. A primeira, adicionando-se 1 mL da solução A (ácido sulfanílico) e a segunda, pela solução B (α -naftil-amina). O teste em duas fases se faz necessário porque algumas bactérias convertem o nitrato a nitrito e o nitrito a nitrogênio em alta velocidade, como consequência, não há mudança de cor; e, ao adicionar o pó de zinco, este reage com o nitrato presente.

De acordo com o manual Bergey (1994), espera-se um resultado negativo para as duas fases, sendo uma coloração incolor, na fase 1 e vermelha, na 2. Com isso, pode-se dizer que as bactérias selecionadas nas amostras não foram capazes de reduzir o nitrato a nitrito *in vitro*, que pode ser visto na figura 20, que representa as quatro amostras.

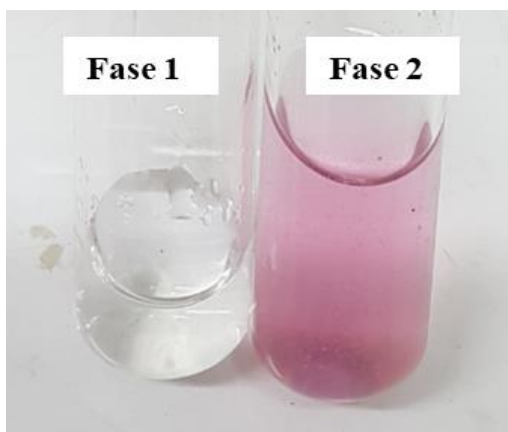


Figura 20. Teste de redução de nitrato.

6.1.3.5. Catalase

Algumas bactérias são capazes de produzir a enzima catalase, que converte o peróxido de hidrogênio em oxigênio e água. A liberação do oxigênio se observa pela formação de bolhas. Com o intuito de averiguar a presença dessa enzima nas bactérias selecionadas, uma lâmina foi dividida em quatro partes. Um concentrado de bactéria foi colocado em cada parte, adicionando 1 mL de peróxido de hidrogênio.

Para interpretação dos resultados, utilizou-se o manual Bergey (1994), cujo resultado esperado para esses tipos de bactérias é um resultado negativo.

Conforme Figura 21, não foi visualizada a formação de bolhas ou efervescência.

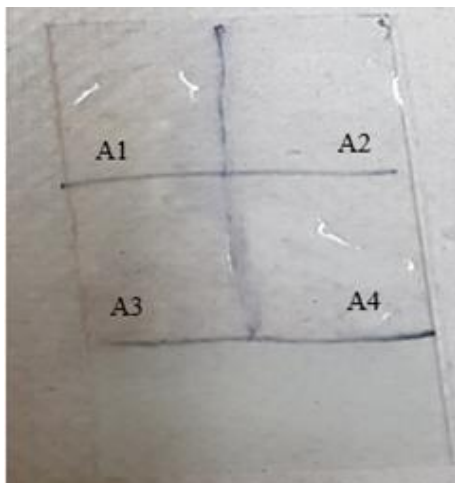


Figura 21. Teste de catalase.

6.1.3.6. Oxidase

É um procedimento qualitativo e serve para determinar a presença ou ausência de atividade da oxidase no citocromo C nas bactérias. Usado como teste para diferenciar as Gram negativas do grupo aeróbio e anaeróbio facultativo. Essa atividade depende da presença de um sistema de citocromo oxidase intracelular que catalise a oxidação do citocromo C através de oxigênio molecular que, por sua vez, irá funcionar como o receptor no sistema de transporte de elétrons do organismo. Os organismos que contêm o citocromo C como parte da sua cadeia respiratória são positivos para a oxidase e tornam o reagente na cor púrpura. Os organismos que não contêm o citocromo C como parte da sua cadeia respiratória não oxidam o reagente, deixando-o incolor dentro dos limites de tempo do teste (3 a 5 minutos) por isso, são negativos para a oxidase (STEEL, 1961). O resultado foi positivo, como mostra a figura 22; e, corroboram com o que diz o manual Bergey (1994).



Figura 22. Teste oxidase, da Esquerda para Direita. Primeiro – amostra A1, Segundo – amostra A2, Terceiro – amostra A3 e Quarta – amostra A4.

6.2. Aço

6.2.1. Análises Químicas

6.2.1.1. Fluorescência de Raios X (FRX)

O corpo de prova analisado apresentou valores coerentes no que diz respeito ao padrão NBR 87/2000 (Tabela 12).

As análises de composição química realizadas por ensaio de espectroscopia de fluorescência de raios X (FRX) revelou percentuais dos elementos químicos constituintes do corpo de prova. Os percentuais de Fe, Mn, P e S atendem aos requisitos da NBR 87/2000.

Tabela 82. Resultado da análise de FRX para o corpo de prova.

Elemento	%m m ⁻¹	Óxidos	%m m ⁻¹
Fe	98,752	Fe ₂ O ₃	98,822
Mn	0,390	Mn O ₂	0,278
P	0,018	P ₂ O ₅	0,033
S	0,011	SO ₃	0,022
Al	0,159	Al ₂ O ₃	0,274
Σ Outros Elementos	0,7	Σ Outros Óxidos	0,7

Legenda: ΣOE- somatória de outros elementos (Si, Ga, Ag, Al, Eu, Yb, Re, Zn, Cu, Na e Mg).

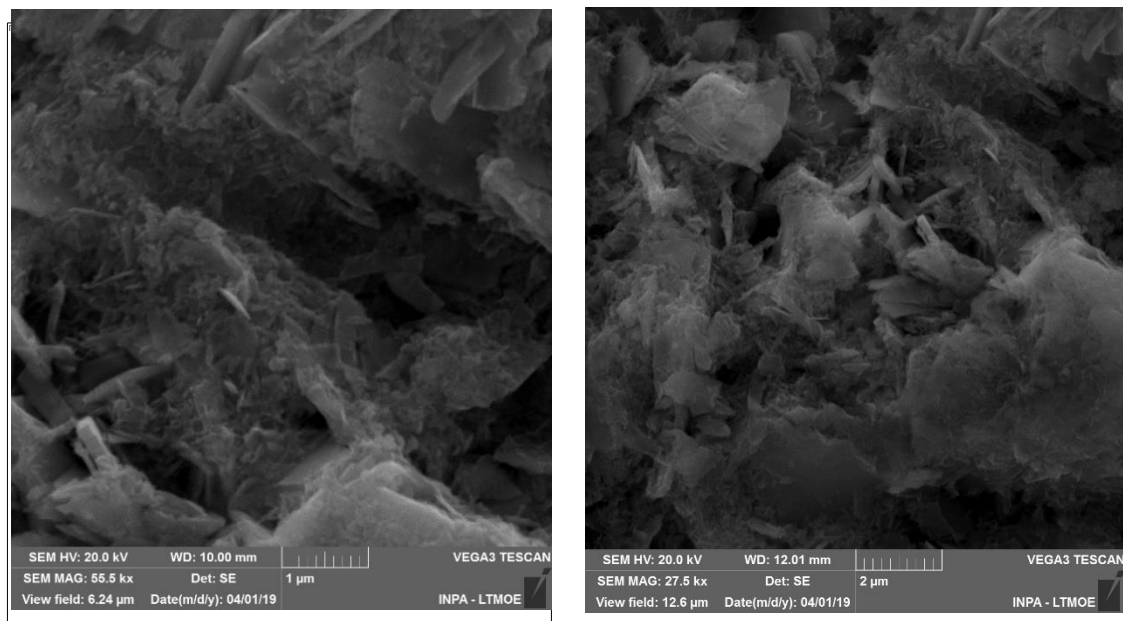
6.2.1.2. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A fim de identificar a presença de corrosão microbiológica através da indicação de presença das bactérias *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Acidithiobacillus ferrooxidans*, foi utilizado o corpo de prova que passou pelo tratamento 1. A Figura 23 mostra o tarugo antes e depois da exposição ao extrato aquoso formado com o solo argiloso. Os corpos de prova metálicos foram previamente pesados antes do início dos experimentos.



Figura 23. Amostra de tarugo de aço. Esquerda - antes da exposição ao tratamento 1 e Direita – após 30 dias de exposição ao tratamento 1.

Através das imagens micrográficas, pode-se observar uma continuidade no padrão de corrosão, havendo também o acúmulo de material biológico sobre a superfície do aço, que pode ser observado na Figura 24.



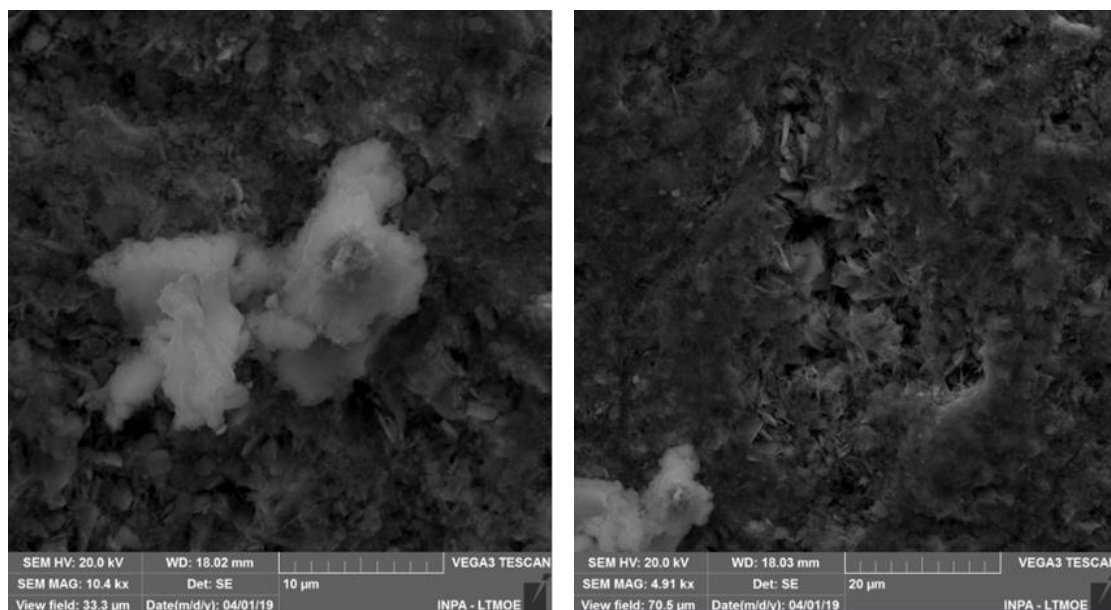
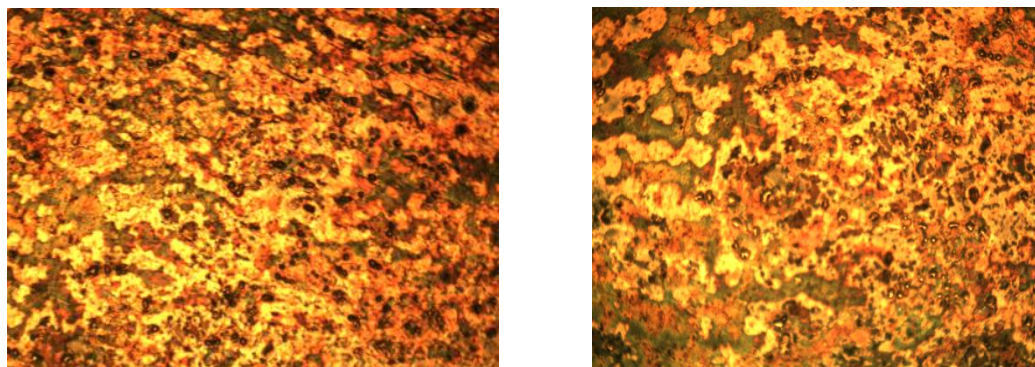


Figura 24. Microimagens de MEV da amostra de aço. Superior esquerda – ampliação 10.000× (2 μm). Superior direita – ampliação 10.000× (1 μm). Inferior esquerda – ampliação 10.000× (20 μm) e Inferior direita – ampliação 10.000× (5 μm).

Nessas imagens são mostradas a superfície do aço AISI 1020 somente polida. Nesta micrografia é possível notar as ranhuras causadas pelo polimento da peça metálica. Comparando-a com as micrografias do experimento, é possível visualizar a superfície esponjosa formada pela deterioração vinculada a micro-organismos.

6.2.1.3. Metalografia

Na Figura 25 observa-se a microestrutura granular do aço AISI 1020 e seus microconstituintes. Entre um grão e outro, encontram-se os interstícios onde está o carbono e as diferentes colorações representam as estruturas do aço analisado.



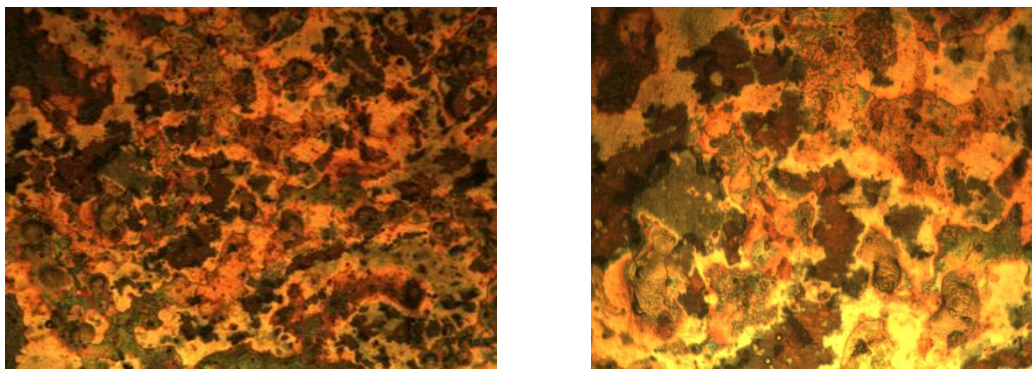


Figura 25. Microimagens da superfície oxidada da amostra de aço AISI 1020. Esquerda superior - ampliação de 40×, Direita superior – ampliação de 100×, Esquerda inferior - ampliação de 200× e Esquerda superior - ampliação de 400×.

Observou-se a presença de cementita e ferrita, pelas colorações verde e marrom, respectivamente (COLPAERT, 1989).

6.2.1.4. Taxa de Corrosão

Para os testes de perda de massa ou taxa de corrosão, verificaram-se os dados obtidos experimentalmente para as amostras com esterilização, a fim de tornar o material isento de qualquer contaminante, e sem esterilização do solo.

O teste realizado conforme Ferreira (2005) com isso, obteve-se os resultados dispostos na Tabela 13.

Tabela 13. Resultado da taxa de corrosão com solo esterilizado.

Tratamento	Taxa de corrosão (mm ano ⁻¹)			
	A1	A2	A3	A4
1	0,001	0,001	0,002	0,001
2	0,017	0,018	0,020	0,020
3	0,006	0,005	0,007	0,006

Para o critério de avaliação da corrosividade em dutos, foi adotada a Norma NACE RP-07-75, que define a intensidade do processo corrosivo, conforme a Tabela 14. Observou-se que o resultado para a amostra esterilizada foi considerado baixo, visto que estava isento de atividades microbianas e qualquer outro fator contaminante.

Tabela 14. Classificação da tabela NACE-RP-07-75.

Potencial de Corrosividade	Taxa Uniforme (mm ano ⁻¹)
Severo	> 0,125
Moderado	0,025 a 0,125
Baixo	< 0,025

Já para a amostra sem esterilização, o solo foi classificado com um potencial severo, o que pode ser visualizado na Tabela 15.

Tabela 15. Resultado da taxa de corrosão para solo não esterilizado.

Tratamento	Taxa de corrosão (mm ano ⁻¹)			
	A1	A2	A3	A4
1	2,622	2,631	2,657	2,599
2	8,022	7,989	8,033	7,987
3	0,587	0,569	0,574	0,580

Houve a existência de um significativo diferencial da taxa de corrosão na amostra 1 em comparação com as amostras 2 e 3, já que ela se refere a uma amostra com o solo argiloso *in natura* e as outras trata-se de amostras com extrato aquoso de solo.

7. CONCLUSÃO

As características geotécnicas mostraram que as amostras de solo foram classificadas como argiloso, possuindo uma capacidade grande de retenção de água, influenciando no teor de umidade do solo, o que pode influenciar nas atividades microbianas e na disponibilidade de nutrientes. Através das características físico-químicas e mineralógicas foi visto uma presença predominante da caulinita. De acordo com a tabela NACE, o solo estudado foi classificado como tendo agressividade severa, através das avaliações de taxa de perda de massa.

Conforme a metodologia de identificação do manual Bergey, encontrou-se a presença de dois micro-organismos, *Acidithiobacillus thiooxidans* e *ferrooxidans*, responsáveis pelo processo de biocorrosão, além de fungos filamentosos. A presença dessas bactérias não gera uma classificação para o solo, porém, sabe-se que estas podem acelerar o processo de corrosão quando em contato com uma estrutura metálica.

Neste trabalho buscou-se correlacionar as características do solo amazônico representativo como processo de corrosão de dutos enterrados devido à presença de micro-organismos, o que corresponderia à uma corrosão microbiológica. Embora, em muitos casos, exista desconfiança da exatidão das técnicas de monitoramento de corrosão, foram utilizadas as técnicas de perda de massa e identificação microbiológica, o qual se teve um resultado positivo em relação à microbiologia, além de enfatizar a ideia de que esse acompanhamento da taxa de corrosão deve ser feito com técnicas complementares, que foi o caso das técnicas de caracterização química e mineralógica das amostras utilizadas.

8. PERSPECTIVAS

Com base nos resultados obtidos e experimentos realizados, esse trabalho de dissertação poderá contribuir, com uma maior abrangência, para:

- Ampliar a pesquisa local na UFAM, em materiais aplicados em oleoduto e gasoduto;
- Favorecer a formação de especialistas em nível de pós-graduação, com temas atuais de interesse social;
- Divulgar resultados em congressos, como meio de disseminação da pesquisa em materiais;
- Publicar artigo(s) em revista(s) especializada da área de engenharia de materiais e biotecnologia;
- Realizar experimentos, com maior duração e alternando coletas, em diferentes épocas do ano, com objetivo de mapear a influência de fatores naturais para o crescimento das bactérias;
- Mapear a influência da composição dos corpos de prova de aço carbono para a probabilidade de corrosão microbiológica;
- Mapear a influência das bactérias nas propriedades mecânicas e de resistência do aço carbono à corrosão microbiológica;
- Identificar e caracterizar outros tipos de bactérias e fungos relacionados à corrosão microbiológica, que possam ter crescimento favorecido nas mesmas condições utilizadas neste trabalho;
- Estudar a biodeterioração do aço AISI 1020 (ou similar) por *Thiobacillus Thiooxidans* e *Thiobacillus Ferroxidans*.
- Estudar a biodeterioração do aço AISI 1020 (ou similar) por outras bactérias e/ou fungos envolvidas no processo de corrosão.
- Estudar a aplicação de biocidas e a eficiência da bioeletroquímica aplicada a inibição de biofilmes em superfícies de metais.
- Utilizar a bioeletroquímica como monitoramento ou ação protetora em superfícies metálicas.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTT. Transporte Dutoviário. Disponível em www.antt.gov.br.(Acesso em: 15/07/2018).

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM D 422: Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils, USA, 1998.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM D 4318: Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils, USA, 2000.

ASTM - American Society for Testing and Materials. ASTM D 854: Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer, USA, 2002.

ASTM G1 - 90/2003 - Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens I, 2003.

ASTM G-4: Conducting Corrosion Coupon Tests in Field Applications, 1995: v. 03.02: 1998.

ASTM G-5: Reference Test Method for Making potentiostatic and Potencyodynamic Anodic Polarisation Measurements, 1997. v. 03.02: 1998.

Barcelona: Formatex Research Center; 2015. p. 497.

BARTON, L. Sulphur bacteria. Vol. 2, 1995.

BERGEY, D. H.; HOLT, J. G. Bergey's Manual of Determinative Bacteriology, Ed. Lippincott Williams & Wilkins, 1994, 787 p.

BOGAN, B. W.; LAMB, B. M.; HUSMILLO, G.; LOWE, K.; PATEREK, R. J.; KILBANE II, J. J. Development of an environmentally benign microbial inhibitor to control infernal pipeline corrosion. Gas Technology Institute, Final Report, 2004.

BOTELER, D. H. Geomagnetic Effects on the Pipe-to-Soil Potentials of a Continental Pipeline. Advances in Space Research, v. 26, n. 1, p. 15-20, 2000.

BRADFORD, S. Practical Handbook of Corrosion Control in Soils. Alberta: CASTI Publications, 2002.

BRADY, N. C. Natureza e propriedades dos solos. 7ª ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989, 878 p.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2009 – Ano base 2008: Resultados Preliminares. Rio de Janeiro: EPE, 2009, p. 19 – 20.

BREWIS, T. Extracción de metales por oxidación bacteriana. MINING, Abril 1996.

CALLISTER Jr, W. D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A. 2002, 588 p.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos. Instituto Agronômico de Campinas, Campinas SP, 1986.

CASTRO. D. F. Estudo da corrosão do aço 1020 no solo natural argiloso da Região Amazônica. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos naturais da Amazônia da Universidade Federal do Amazonas, 2013, 83 p.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/>. (Acessado em 24/6/2019).

CHRISTENSEN, B. E.; CHARACKLIS, W. G. Biofilms. New York: John Wiley & Sons, p. 93-130, 1990.

COLPAERT, H. Metalografia dos produtos siderúrgicos comuns. 3ª ed., Edgard Blucher Ltda., São Paulo, 1989.

COUCEIRO, P. R. C. Características químico-mineralógicas de óxidos de ferro e de filossilicatos de alguns latossolos representativos da Amazônia. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Química da Universidade Federal de Minas Gerais, 2004, 215 p.

CRUZ, T. C. S., ARGOLO, E. J., OLIVEIRA, S. H., DA SILVA, R. G. C., DE QUEIROZ, V. B., LIMA, M. A. G. A., FILHO, S. L. U., DE FRANÇA, F. P. Degradation of carbon steel AISI 1020 coupons immersed in blends containing 90 % Diesel B6 and 10 % Seawater, 90 % Diesel B30 and 10 % Seawater. In: VI I International Conference on Environmental, Industrial and Applied Microbiology. BIOMICROWORLD. Oct 28-30; 2015. Book. Microbes in the spotlight: recent progress in the understanding of beneficial and harmful microorganisms. pp. 65-69; ISBN: 978-1-62734-612-2; Editor: A. Méndez-Vilas; Publisher: Brow Walker Press; Publication date 2016. Barcelona, Spain. Anais... BIOMICROWORLD.

CUT Central Única dos Trabalhadores, 2017. Disponível em <https://www.cut.org.br/noticias/mg-acidente-quase-caoa-tragedia-em-refinaria-da-petrobras-a07f> (Acessado em 20/6/2019).

DA SILVA, S. N. Estudo da corrosão no solo de aços para dutos protegidos catodicamente. 2007. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegre, 2007.

DE BELIE, N.; MONTENY, J.; BEELDENS, A.; VINCKE, E.; GEMERT, D. V.; VESTRAETE W., Experimental research and prediction of the effect of chemical and biogenic sulphuric acid on different types of commercially produced concrete sewer pipes, *Cement and Concrete Research*, 34, 2223–2236, 2004.

EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solos. 2ª ed., Claessen, M. E. C.; Barreto, W. O.; Paula, J. L.; Duarte, M. N. Rio de Janeiro, Brasil: EMBRAPA; 1997, 212 p.

ESPÍNOLA, F.C.S. Comparação de métodos da infiltração da água no solo. 77 p. (Dissertação de mestrado), Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria – RS, 1977.

FASSBENDER, H. W.; BORNEMISZ, E. Química de suelos com énfasis em suelos de América Latina. Cap. 5, p. 161-186: Reaccion del suelo. San José: IICA, 1987.

FERREIRA, A. M. Estudo da corrosão pelo solo – avaliação da corrosividade de amostras de solo do continente antártico e da Região Sudeste do Brasil. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

FETUSGATO, L. O uso da relação porosidade/teor de cimento na estimativa a resistência à compressão de um solo artificialmente cimentado In: Salão de Iniciação Científica (17 p.: 2005: Porto Alegre, RS) Livros de resumos, Porto Alegre: UFRGS, 2005, p.2006, resumo 100.

FOFANO, S. Avaliação de Técnicas Eletroquímicas na Monitoração de Corrosão por Sulfetos em Sistema de Água de Resfriamento Industrial. Curitiba, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Programa Interdisciplinar de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, 1999.

FRELEIRA, P.; SANTOS, B. S.; ANTONIO, C.; MORADAS-FERREIRA, P.; LEGALL, J.; XAVIER, A. V.; SANTOS, H. Response of a strict anaerobe to oxygen: survival strategies in *Desulfovibrio gigas*, *Microbiology*, p. 149; 153-1522, 2003.

FROTA, C. A.; NUNES, F. R. G.; SILVA, C. L.; MELO, D. M.; SANTOS, M. G. R. Desempenho mecânico de misturas asfálticas confeccionadas com agregados sintéticos de argila calcinada. *Revista Cerâmica*, n. 53, p. 255-262, 2007.

FONTANA, G. M., *Corrosion Engineering*, McGraw-Hill, International Editions, Third Edition, 1986.

GALL, J. L.; XAVIER, A. Anaerobes respond to oxygen: the sulfate-reducing bacteria. *Anaerobe*, v. 2, p. 1-9, 1996.

GENTIL, V. *Corrosão*. 5ª.ed., Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 2007, 100 p.

GOMES, L. P. Diagnóstico de Corrosão e Proteção Catódica em Tubulações Enterradas de Plantas Industriais, *Boletim Técnico da IEC – Instalações e Engenharia de Corrosão Ltda*, nº, IEC-SPD001-IT-001, 2001, 30 p.

GONZALÉZ, J.; BENTOLILA, A. PDVSA Study Suggests Neutral pH Soils not SCC Contributor. *Corrosion Technology*, v. 83, n. 5, p. 92-104, 2000.

GOOGLE MAPS. Disponível em: www.google.com.br/maps/place/Amazonas/. Acessado em 20/4/2019.

HONEYCOMBE, R. W. K. *Steels: microstructure and properties*. London: Edward Arnold, 1981.

HOURY, A.; BRIANDET, R.; AYMERICH, S.; GOHAR, M. Involvement of motility and flagella in *Bacillus cereus* biofilm formation. *Microbiology*, 156 (2018), pp. 1009-1018.

HU, R. P.; MANOLATOS, P.; JEROME, M.; MEYER, M.; GALLAND, J. Hydrogen absorption by cathodically protected underground steel piping in thiosulfate containing media. *Corrosion Science*, v. 40, n. 4/5, p. 619-629, 1998.

International Zinc Association. Disponível em: www.zinc.org/. Acessado em 19/6/2019.

JACK, T. R. BOVEN, G. V.; WILMOTT, M. J.; WORTHINGHAM, R. G. Evaluating performance of coatings exposed to biologically active soils. *Mater. Perform.* v. 35, p 39-45, 1996.

JENSEN, A.B.; WEBB, C. Ferrous sulphate oxidation using *Thiobacillus ferrooxidans*: A review. *Process Biochemistry*, v. 30, n. 3, p. 225-236, 1994.

KAUFHOLD, S.; HEIN, M.; DOHRMANN, R.; UFER, K. Quantification of the mineralogical composition of clays using FTIR spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*, v. 59, p. 29-39, 2012. Doi:10.1016/j.vibspec.2011.12.012.

KOULOMBI, N. et al. Study of the effect of AC-interference on the cathodic protection of a gas pipeline, *Anticorrosion Methods and Materials*, v. 49, nº5, p. 335-345, 2002.

LABEGALINI, P. R.; LABEGALINI, J. A.; FUCHS, R. D.; ALMEIDA, M. T. *Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão*. 2ªed., São Paulo: Edgar Blücher, 1992.

LEPSCH, I. F. *Formação e Conservação dos Solos*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

LEU, J. Y.; MCGOVERNTRAA, C. P.; PORTER, A. J. R; HARRIS, W. J.; HAMILTON, W. A. Identification and phylogenetic analysis of thermophilic sulfate-reducing bacteria in oil field samples by 16S rDNA gene cloning and sequencing. *Anaerobe*, v. 4 p. 165-174, 1998.

LEVLIN, E. Aeration cell corrosion of carbon steel in soil: in situ monitoring cell current and potential. *Corrosion Science*, v. 38, n. 12, p. 2083-2090, 2004.

LÓPEZ, E.; OSELHA, A.; MARTINO, L. Introduction to Corrosion Science. *Corrosion Science.*, v. 48, n. 2, p. 389-395, 2006. DOI: 10.1007/978-1-4419-0455-3.

LUCHESE, E. B.; FAVERO, L. O. B.; LENZI, E. *Fundamentos da Química do Solo*. 2ª ed., Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2002, 11 p.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M. PARKER, J. *Microbiologia de Brock*. Tradução de Cynthia Maria Kiaw. 10ª ed. São Paulo: Prentice Hall, 2004, 608 p.

MAGALHÃES, F.C.; BAPTISTA, W.; PENNA, M.O., Critérios de avaliação da corrosividade de solos por bactérias redutoras de sulfato, In: 6º Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador-Brasil, 2002.

MARTINS, M; CASTELETTI, L. C; BONAVINA, L. F; FORTI, L. R. N. Análise microestrutural de aços inoxidáveis altamente ligados: da amostragem à interpretação. In:

IX Seminário Brasileiro do Aço Inoxidável- INOX 2008, São Paulo. Seminário INOX 2008. São Paulo: Núcleo INOX, 2008, p. 86-95.

MACDONALD, D.D.; SIKORA, E.; ENGELHARDT, G., Characterizing electrochemical systems in the frequency domain, *Electrochimica Acta*. (43) 87–107, 1998.

MEURERE, E. J. Fundamentos de Química do Solo, UFRGS, Porto Alegre, 2000, 174 p.

MORENO, V. C; CABELLO, P.; MARTÍNEZ, L. M.; BLASCO, R.; CASTILLO, F. Prokaryotic nitrate reduction: Molecular properties and functional distinction among bacterial nitrate reductases. *Journal of Bacteriology*, v. 181, n. 21, p. 6573-6584, 1999.

N 2364 - PETROBRAS, Avaliação de corrosão interna através de cupom de perda de massa. Revisão A, Rio de Janeiro, 2003.

NACE Standard RP0715 - 1999, Control of external corrosion on underground or submerged metallic piping systems, Houston, TX: NACE, 1999.

NBR 6458/2016. Solo - Determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 6459/2016. Solo - Determinação do limite de liquidez. Errata 1:2017. Rio de Janeiro, 2017.

NBR 7180/2016. Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 7181/2016. Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

NBR 87/2000. Aço carbono e ligados para construção mecânica - Designação e composição química. Rio de Janeiro, 2000.

NOBREGA, C.A.; CHANG, H. K. Avaliação preliminar da corrosividade de solo com o emprego de resistividade elétrica em uma planta industrial utilizada para armazenamento de derivados de petróleo, São Paulo, UNESP, Geociências, v 22, N, Especial, 2003, p. 83-93.

NOGUEIRA, P. M. Estudo da viabilidade da utilização de filmes de carbono tipo diamante como camada de revestimento interno. *Boletim Técnico da Petrobrás*, v. 2, n. 45, 2002.

OGUZIE, E. E.; AGOCHUKWU, I. B.; ONUCHUKWU, A. I. Monitoring the corrosion susceptibility of mild steel in varied soil textures by corrosion product count technique, *Materials Chemistry and Physics*, v. 84, p. 1-6, 2004.

OHLWEILER, O. A. *Química analítica quantitativa*. 2ª ed., Rio de Janeiro: Livro técnico e Científico, 1980, 644 p.

OLIVEIRA, S. H. Estudo da utilização da xantana e hipoclorito de sódio como estratégia para controle da biocorrosão. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Pernambuco, XVI, 118 f., 2010.

OSELLA, A.; FAVETTO, A. Effects of soil resistivity on currents induced on pipelines. *Journal of Applied Geophysics*, v. 44, p. 303-312, 2000.

OTENIO, M. H.; SILVA, M. T. L.; MARQUES, M. L. O.; ROSEIRO, J. C.; BIDOIA, E. D. Benzene, toluene and xylene biodegradation by pseudomonas. CCM 852. *Brazilian Journal of Microbiology*. n. 36, p. 258-261, 2005.

PANOSSIAN, Z. *Corrosão e proteção contra a Corrosão em Equipamentos e Estruturas Metálicas*, 1ª ed., São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1993, v. 2, 356p.

PARKINS, R. N.; BLANCHARD JR, W. K.; DELANTY, B. S. Transgranular stress corrosion cracking of high-pressure pipelines in contact with solutions of near neutral pH. *Corrosion*, v. 50, n. 5, p. 394-408, 1994.

PAVIA, D.L.; LAMPMAN, G.M.; KRIZ, G.S.; VYVYAN, J.R. *Introdução à espectroscopia*. 4ª edição norte-mericana, São Paulo: CEGAGE Learning, 2012, p. 29-99.

PIRJOLA, R.; VILJANEM, A.; PULKKINEN, A.; AMM, O. Space weather risk in power systems and pipelines. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 25, n. 4, p. 333-337, 2000.

POSTGATE, J. R. *The sulphate-reducing bacteria*. 2ª ed., Cambridge: University Press. 1984, 209 p.

RAMASWAMY, S. D.; ROY, S. K. The importance of evaluating subsoil corrosion and its effects on buried structures. *Symposium on Recent Development in the Analysis of Soil Behavior and their Application to Geotechnical Structures*, Australia. p. 325-334, 1975.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CÔRREA, G. F. Pedologia – base para distinção de ambientes. Viçosa: NEPUT, 2002, 338 p.

ROBERGE, P. R. Handbook of Corrosion Engineering, McGraw-Hill, 1999, 30 p.

RODRIGUES, L. M. Estudo da corrosão do aço para dutos API 5L X56 em solos do RS. 2006. 97 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia da UFRGS, Porto Alegre, 2006.

ROHDE, R.A. metalografia preparação de amostras. Uma abordagem prática. Santo Ângelo (RS), 2010. Disponível em: Acesso em: 26/6/2019.

SANTANA, G. P.; SILVA, M. S. Caulinita: estrutura cristalina, técnicas físicas de estudo e adsorção. Scientia Amazonia, v. 2, n. 3, p. 54-70, 2013. www.scientia.ufam.edu.br. 2013.

SASS, H.; CYPIONKA, H.; BABENZIEN, H-D. Vertical distribution of sulfate-reducing bacteria at the oxic-anoxic interface in sediments of the oligotrophic Lake Stechlin. FEMS Microbiology Ecology, v. 22, p. 245-255, 1997.

SCOTTO, V. Microbial and biochemical factors affecting the corrosion behaviour of stainless steels in seawater. A working party report on marine corrosion of stainless steels: chlorination and microbial effects. Institute of Materials London, n. 10, p. 21-33, 1993.

SEDRICKS, A. J. Advanced materials in marine environments. Materials Performance, v. 3, n. 2, p. 56-63. 2004.

SHERMAN, D.M.; WAITE, T.D. Electronic spectra of Fe oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV. American Mineralogist, Washington, v. 70, p. 1262-1269, 1985.

SILVA, J. M.; BRASIL, S. L. Critério de avaliação da corrosividade de solos baseado na sobretensão de hidrogênio. Corrosão e Proteção de Materiais. Lisboa-Portugal, v. 29, n. 1, p. 19-25. 2010.

SOUZA, S. A. Composição química dos aços. 1ª ed., Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 2001, 43 p.

STAROSVETSKY, J; ZUKERMAN, U.; ARMON, R. H. A simple medium modification for isolation, growth and enumeration of *Acidithiobacillus thiooxidans* (syn. *Thiobacillus*

thiooxidans) from water samples. *Journal Microbiol Methods*, v. 92, n. 2, p. 178-82, 2013.

STEEL, K. J. The oxidase reaction as a taxonomic tool. *Journal General Microbiology*. v. 25, p. 297-306, 1961.

TRABANELLI, G.; ZUCCHI, F.; ARPAIA, M. Methods of determination of soil corrosiveness with respect to metallic structures. *Chimica Pura e Applicata*, v. III, n. 4, p. 43-59, 1972.

TREVINO, J. C. M.; COLES, C. A. Kaolinite properties, structure and influence of metal retention on pH. *Applied Clay Science*. v. 23, p. 133– 139, 2003.

UHLIG, H. H. *The Corrosion Handbook*. Editora John Wiley & Sons. New York, 1948.

VIANA, M. G. Avaliação de produtos naturais sobre biofilmes formados em sistemas dinâmicos. 72 f. Dissertação de Mestrado em Ciência e Engenharia do Petróleo. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

VIDELA, H. A. *Biocorrosão, biofouling e biodeterioração de materiais*. 1ª ed., Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 2003, 148 p.

WARSCHEID, T.H.; BRAAMS, J. Biodeterioration of stone: A review. *International Biodeterioration & Biodegradation*, v. 46, p. 343-368, 2000.

www.inmet.gov.br/sim/abre_graficos.php (Acessado em 19/6/2019).