

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

MALCOM BARBOSA BISPO

Análise de corrosão em estacas helicoidais utilizadas em fundações de torres de
linhas de transmissão de energia

SÃO CARLOS

2020

MALCOM BARBOSA BISPO

Análise de corrosão em estacas helicoidais utilizadas em fundações de torres de linhas de transmissão de energia

Versão Corrigida

Original encontra-se disponível na unidade que aloja o programa.

Dissertação apresentada à escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de mestre em Geotecnia.

Área de Concentração: Geotecnia

Orientadora: Profa. Dra. Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha

SÃO CARLOS

2020

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B621a Bispo, Malcom Barbosa
Análise de corrosão em estacas helicoidais
utilizadas em fundações de torres de linhas de
transmissão de energia / Malcom Barbosa Bispo;
orientadora Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha. São
Carlos, 2020.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação e Área de Concentração em Geotecnia --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2020.

1. Corrosão. 2. Estaca Helicoidal. 3. Critério de
Trabanelli. 4. Aço Patinável. 5. Resistividade
Elétrica. 6. Potencial de Corrosão. I. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **MALCOM BARBOSA BISPO**.

Título da dissertação: "Análise de corrosão em estacas helicoidais utilizadas em fundações de torres de linhas de transmissão de energia".

Data da defesa: 08/05/2020.

Comissão Julgadora:

Profa. Associada **Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha**
(Orientadora)
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Dr. **Paulo José Rocha de Albuquerque**
(Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP)

Prof. Dr. **Jean Rodrigo Garcia**
(Universidade Federal de Uberlândia/UFU)

Resultado:

Aprovado

Aprovado

Aprovado

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia:
Profa. Associada **Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:
Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

Dedicatória

Dedico o presente trabalho à minha família, que a partir de muito esforço e superação, propiciou ambiente para me pôr na condição de desenvolvê-lo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Margarida e Reginaldo, que sempre propiciaram um ambiente onde eu pudesse focar exclusivamente em meus estudos, além disso pelo apoio incondicional na realização desse trabalho e pelo carinho e cuidado sempre despendido a mim.

Agradeço às minhas avós que, embora não possam ver a realização desse trabalho, estão e sempre estarão torcendo pelo meu sucesso.

À minha família, como um todo, que sempre me incentivou a ir sempre além e conquistar mais e mais, e que hoje vejo como minha maior fonte incentivadora para que eu alcance saltos cada vez mais altos.

À Thaís, minha namorada, que contribuiu para que eu conseguisse realizar minhas atividades e me deu muito suporte, além de sempre acreditar em mim.

Aos meus amigos conquistados nessa jornada em São Carlos, por cada risada e pela parceria nos momentos bons e ruins.

À minha orientadora, Profa. Dra. Cristina de Hollanda Cavalcanti Tsuha que sempre me apoiou, confiou em meus direcionamentos para esse projeto, pela paciência e pela ajuda.

Aos funcionários do departamento de Geotecnia da EESC-USP, Maristela, Neiva e Herivelto e em especial aos técnicos Zé Luis, Oscar e Benedito que contribuíram com os ensaios e com todo o ensinamento que me passaram.

Aos professores do departamento de Geotecnia que dedicaram tempo para a minha formação, especialmente à Profa. Dra. Valéria Guimarães Silvestre Rodrigues, por ceder o laboratório e instruir os ensaios realizados para este trabalho e ao Prof. Dr. Heraldo Luiz Giachetti por ceder as medidas de resistividade elétrica feitas com o RCPT-U.

Aos meus professores de graduação da UFSCar, Profa. Dra. Teresinha J. Bonuccelli, Profa. Dra. Denise Balestrero Menezes e Dr. Jorge Akutsu pela fundamentação para chegar a esse mestrado e para minha formação profissional.

À Vértice Engenharia por ceder material e pela exumação das estacas estudadas.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	XI
LISTA DE TABELAS.....	XIX
RESUMO.....	XXI
ABSTRACT	XXII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 ESTACAS HELICOIDAIIS	4
2.1.1 INTRODUÇÃO.....	4
2.1.2 PROJETOS DE FUNDAÇÕES EM ESTACAS HELICOIDAIIS	5
2.1.3 INSTALAÇÃO	6
2.1.4 EFEITOS DE INSTALAÇÃO NO SOLO	7
2.1.5 DESEMPENHO DAS ESTACAS HELICOIDAIIS.....	8
2.2 AÇO PATINÁVEL	10
2.2.1 AÇO.....	10
2.2.2 AÇO PATINÁVEL	10
2.3 CORROSÃO	14
2.3.1 CORROSÃO ELETROQUÍMICA	14
2.3.2 TIPOS DE CORROSÃO METÁLICA	15
2.3.3 FORMAS DE CORROSÃO METÁLICA.....	20
2.3.4 CORROSÃO DE ELEMENTOS ENTERRADOS	20
2.3.5 MÉTODOS DE PROTEÇÃO À CORROSÃO	31
3 METODOLOGIA	40
3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DA CORROSÃO NAS ESTACAS EXUMADAS	40
3.1.1 AMOSTRAGEM DAS ESTACAS	41
3.1.2 IMAGEM DAS AMOSTRAS CORROÍDAS	48
3.1.3 MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DA CORROSÃO	50
3.2 CLASSIFICAÇÃO DE AGRESSIVIDADE DOS SOLOS	52
3.2.1 AMOSTRAGEM DA CLASSIFICAÇÃO DE AGRESSIVIDADE DOS SOLOS.	54
3.2.2 TEOR DE UMIDADE E PERMEABILIDADE.....	55

3.2.3	RESISTIVIDADE	58
3.2.4	MEDIÇÃO DO pH.....	60
3.2.5	MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO DOS SOLOS	61
3.2.6	MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SAIS	61
3.2.7	CLASSIFICAÇÃO DA AGRESSIVIDADE DO SOLO.....	62
3.3	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CORROSÃO ENTERRADA DE AÇO CARBONO E AÇO PATINÁVEL	62
3.3.1	AMOSTRAGEM DE AÇO CARBONO E AÇO PATINÁVEL.....	63
3.3.2	MÉTODO DE ENSAIO.....	67
3.4	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS.....	68
3.4.1	MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO EM CAMPO	68
3.4.2	MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE EM LABORATÓRIO DE ACORDO COM O GRAU DE COMPACTAÇÃO.....	72
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	78
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DA CORROSÃO DAS ESTACAS EXUMADAS	78
4.1.1	MICROSCOPIA ÓPTICA.....	81
4.1.2	MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DA CORROSÃO (RUGOSÍMETRO).....	82
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA AGRESSIVIDADE DOS SOLOS.....	90
4.2.1	RESISTIVIDADE ELÉTRICA	90
4.2.2	POTENCIAL DE CORROSÃO	92
4.2.3	pH	93
4.2.4	UMIDADE E PERMEABILIDADE	94
4.2.5	SAIS.....	95
4.2.6	APLICAÇÃO DO CRITÉRIO	97
4.3	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CORROSÃO ENTERRADA DE AÇO CARBONO E AÇO PATINÁVEL	101
4.4	ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS.....	103
4.4.1	MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO EM CAMPO	103
4.4.2	MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE EM LABORATÓRIO DE ACORDO COM O GRAU DE COMPACTAÇÃO.....	108
5	CONCLUSÕES	113
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	115
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	116

ANEXO A.....	122
ANEXO B.....	124
ANEXO C.....	156
ANEXO D.....	160
ANEXO E.....	162
ANEXO F.....	163

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de Estaca de Helicoidal (Kulhawy, 1985 apud Tsuha, 2007).....	4
Figura 2 – Retroescavadeira com rotor, instalando a haste guia.	7
Figura 3 – Fotografia de modelo de estaca helicoidal simples em areia compacta: a) depois da instalação, b) depois de carregamento em de tração (Mosquera et al.,2015).....	8
Figura 4 - Esquema das camadas formadas pelo processo de corrosão (Murata, 2011).....	12
Figura 5 – Aspecto do aço patinável utilizado em uma escultura.....	12
Figura 6 – Aspecto superficial de aço patinável ilustrando a variação de coloração da pátina ao longo do tempo de exposição.....	13
Figura 7 - Esquema do mecanismo de corrosão eletroquímica. (Fonte: https://slideplayer.com.br/slide/364846/).....	15
Figura 8 – Previsão da taxa de corrosão de aço galvanizado (King, 1977 apud. Perko 2009).23	
Figura 9 – Esquema do umedecimento durante ensaio de permeabilidade com permeâmetro de Guelph (Soto, Chang e Vilar 2009).....	26
Figura 10 - Diagrama de Pourbaix do ferro em água (Gentil, 1982).....	31
Figura 11 – Tubulação revestida com tinta epóxi alcatrão de hulha https://www.solucoesindustriais.com.br/images/produtos/imagens_10180/p_tinta-epoxi-alcatrao-de-hulha-7.jpg	34
Figura 12 - Fluxograma das divisões da metodologia.....	40
Figura 13 - Fluxograma da metodologia da caracterização dos produtos da corrosão nas estacas exumadas.....	41
Figura 14 - Resultados de ensaios de campo realizados no Campo Experimental de Fundações da EESC. (Adaptada de Vilar e Machado, 2003 e Menegotto, 2004).....	42
Figura 15 - Variação do nível do lençol freático do Campo Experimental da EESC/USP entre novembro/2014 e julho/2018 (Morais, 2019).....	43
Figura 16 –Exumação das estacas.....	43
Figura 17 – Munck exumando as estacas.....	43
Figura 18 – Serra mecanizada extraindo amostras.....	44
Figura 19 – Hastes das estacas acondicionadas com filme PVC.....	44
Figura 20 – Faceamento interno no torno.....	45
Figura 21 – Amostra das Estacas Helicoidais.....	45
Figura 22 – Imersão das amostras na solução decapante.....	47
Figura 23 – Escovação das amostras.....	47

Figura 24 – Amostras antes (A) e depois (B) da decapagem	47
Figura 25 – Imagem da Amostra E2-4-S1 feita com câmera	48
Figura 26 – Imagem da corrosão externa feita em microscópio óptico em seção de estaca que estava a 8m de profundidade	49
Figura 27 – Imagem da espessura corroída, feita em microscópio óptico, em amostra que estava a 8m de profundidade	49
Figura 28 – Rugosímetro nivelado durante ensaio de amostra.....	50
Figura 29 – Medição com deflectômetro.....	51
Figura 30 – Esquema de medição da rugosidade	51
Figura 31 – Fluxograma da Classificação de Agressividade do Solo	52
Figura 32 – Operários inserindo o amostrador com as hastes no furo	55
Figura 33 – Ferramentas utilizadas na abertura do furo de ensaio. Em sequência, trado, haste, nivelador e escova	56
Figura 34 – Permeâmetro de Guelph instalado sem tripé.....	57
Figura 35 – Tensiômetro instalado para medir sucção em campo	57
Figura 36 – Piezocone de Resistividade (Giachetti et al., 2006 apud Peixoto, 2013).....	58
Figura 37 – Condutivímetro Analyser 650	59
Figura 38 – Solução das amostras	60
Figura 39 – pHmêtro Digimed DM21	60
Figura 40 – Potenciômetro Micronal B374	61
Figura 41 - Fluxograma da análise do comportamento da corrosão enterrada de aço carbono e aço patinável.....	63
Figura 42 – Decapagem das amostras utilizadas no ensaio de perda de massa.....	64
Figura 43 – Amostras alocadas na vala de 1,0x2,0x1,5m(LxCxP)	65
Figura 44 – Amostras alocadas na vala	66
Figura 45 – Amostras retiradas do solo	67
Figura 46 – Inserção na solução decapante	67
Figura 47 – Pesagem das amostras	68
Figura 48 – Amostra com solda de prata.....	69
Figura 49 – Eletrodo de referência Cobre/Sulfato de Cobre	70
Figura 50 – Medição do Potencial de Corrosão em Campo	72
Figura 51 – Ferramentas para destorroamento e peneiramento do solo	73
Figura 52 – Betoneira homogeneizando o solo	73
Figura 53 – Molde de Nylon com as abraçadeiras	74

Figura 54 – Arranjo dos equipamentos para medição de I e U	76
Figura 55 – Anel de material inerte, suporte das anilhas.....	76
Figura 56 – Anilhas com massa de 5kg	77
Figura 57 – Corrosão densa e coloração parecida com a da pátina na face interna de amostras	79
Figura 58 – Esquema do perfil dos solos e as zonas mais corroídas.....	80
Figura 59 – Região da ponta de estaca exumada durante e após a extração do terreno	81
Figura 60 – Amostra E0, virgem, sem exposição ao processo de instalação e intempéries.....	83
Figura 61 – Rugosidade da Amostra E0, virgem, com escala de comparação (menor).....	83
Figura 62 – Rugosidade da Amostra E0, com escala de detalhe (maior).....	84
Figura 63 Amostra E3-S-2, que foi exposta às intempéries	85
Figura 64 – Perfil de rugosidade da amostra E3-S-2, escala de comparação (menor).....	85
Figura 65 – Perfil de rugosidade da amostra E3-S-2, escala de detalhe (maior).....	85
Figura 66 - Amostra E2-2S-2, profundidade de ~2m.....	86
Figura 67 – Perfil de rugosidade amostra E2-2S-2, escala de comparação (menor).....	86
Figura 68 - Amostra E2-5M-1, profundidade de 7,5m.....	87
Figura 69 - Perfil de rugosidade amostra E2-5M-1, escala de comparação (menor)	87
Figura 70 – Amostra E2-7I-2, profundidade 11m	88
Figura 71 - Perfil de rugosidade amostra E2-7I-2, escala de comparação (menor)	88
Figura 72 – Perfil de rugosidade amostra E2-7I-2, escala de detalhe (maior)	89
Figura 73 - Curva de permeabilidade x sucção do solo, em profundidade de 0,62cm, a partir do permeâmetro de Guelph.....	95
Figura 74 - Gráficos dos resultados dos parâmetros, do índice total de agressividade e da classificação do solo pelo Critério de TrabANELLI.....	99
Figura 75 - Gráfico das tendências das taxas de corrosão ao longo do tempo de ensaio	103
Figura 76 – Medição, em campo, do potencial de corrosão para as amostras do furo B através do tempo	105
Figura 77 - Medição, em campo, do potencial de corrosão para as amostras do furo C.....	105
Figura 78 - Diagrama de Pourbaix para o ferro, sobreposto com os resultados obtidos das amostras de potencial de campo, para o furo B.....	107
Figura 79 - Diagrama de Pourbaix para o ferro, sobreposto com os resultados obtidos das amostras de potencial de campo, para o furo C.....	107
Figura 80 – Curvas de compactação com energia reduzida, normal e intermediária.....	108

Figura 81 - Análise conjunta da massa específica seca e resistividade em função da umidade gravimétrica para o ensaio de energia reduzida.....	109
Figura 82 - Análise conjunta da massa específica seca e resistividade em função da umidade gravimétrica para o ensaio de energia normal	110
Figura 83 - Análise conjunta da massa específica seca e resistividade em função da umidade gravimétrica para o ensaio de energia intermediária	110
Figura 84 - Relação umidade volumétrica x resistividade, para energia reduzida	111
Figura 85 - Relação umidade volumétrica x resistividade, para energia normal	111
Figura 86 - Relação umidade volumétrica x resistividade, para energia intermediária	112
Figura 87 – Gráfico do fator C	122
Figura 88 - Planilha do Ensaio de permeabilidade Guelph	123
Figura 89 – Amostra E1-1-S-1 não decapada, A) Imagem de câmera(IC) vista superior; B) IC vista externa; C) Imagem de Microscópio(IM) vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	124
Figura 90 - Amostra E1-1-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	125
Figura 91 - Amostra E1-1-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	125
Figura 92 - Amostra E1-1-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	126
Figura 93 - Amostra E1-2-S Não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	126
Figura 94 - Amostra E1-2-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	127
Figura 95 - Amostra E1-2-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	127
Figura 96 - Amostra E1-2-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	128
Figura 97 - Amostra E1-3-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	128
Figura 98 - Amostra E1-3-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	129
Figura 99 - Amostra E1-3-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	129

Figura 100 - Amostra E1-3-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	130
Figura 101 - Amostra E1-4-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	130
Figura 102 - Amostra E1-4-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	131
Figura 103 - Amostra E1-4-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	131
Figura 104 - Amostra E1-4-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	132
Figura 105 - Amostra E1-5-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	132
Figura 106 - Amostra E1-5-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	133
Figura 107 - Amostra E1-5-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	133
Figura 108 - Amostra E1-5-I decapada, A) IM vista externa, escala 1mm; B) IM vista superior, escala 1mm	134
Figura 109 - Amostra E1-6-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	134
Figura 110 - Amostra E1-6-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	135
Figura 111 - Amostra E1-6-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	135
Figura 112 - Amostra E1-6-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	136
Figura 113 - Amostra E1-7-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	136
Figura 114 - Amostra E1-7-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	137
Figura 115 - Amostra E1-Hélice não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	137
Figura 116 - E1-Hélice decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	138

Figura 134 - Amostra E2-5-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	147
Figura 135 - Amostra E2-5-M não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	148
Figura 136 - Amostra E2-5-M decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	148
Figura 137 - Amostra E2-5-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	149
Figura 138 - Amostra E2-5-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	149
Figura 139 - Amostra E2-6-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	150
Figura 140 - Amostra E2-6-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	150
Figura 141 - Amostra E2-6-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	151
Figura 142 - Amostra E2-6-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	151
Figura 143 - Amostra E2-9-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm	152
Figura 144 - Amostra E2-9-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	152
Figura 145 - Amostra E2-Hélice não decapada, A) IM vista superior, escala 1mm; B) IM vista superior frontal, escala 1mm	153
Figura 146 - Amostra E2-Hélice decapada, A) IC vista superior; B) IC vista superior 2; C) IC vista superior 3	153
Figura 147 - Amostra E3-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	154
Figura 148 - Amostra E3-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	154
Figura 149 - Amostra E3-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	155
Figura 150 - Amostra E3-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm.....	155

Figura 151 – Ensaio RCPT-U 1.....	156
Figura 152 – Ensaio RCPT 2.....	157
Figura 153 – Ensaio RCPT-U 3.....	158
Figura 154 – Ensaio RCPT-U 4.....	159

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Espessura Mínima de Sacrifício, de acordo com a NBR 6122	6
Tabela 2 - Especificações de Aços Patináveis.....	11
Tabela 3 – Valores de α *para diferentes textura de solo. (Elrick, Reynolds e Tan 1989) Erro! Indicador não definido.	
Tabela 4 – Amostras da Estaca Exumada 1.....	46
Tabela 5 – Amostras da Estaca Exumada 2.....	46
Tabela 6 – Amostra do Material exposto ao ar livre.....	46
Tabela 7 – Índices Parciais de Agressividade do Solo (Trabanelli, 1972 apud Serra, 2014)...	53
Tabela 8 - Critério de Agressividade do Solo (Trabanelli, 1972 apud Serra, 2014).....	54
Tabela 9 - Tabela com dados de densidade	Erro! Indicador não definido.
Tabela 10 – Tabela com as amostras e suas medidas, os tempos enterradas e as massas iniciais	Erro! Indicador não definido.
Tabela 11 – Tabela de amostras de medição de potencial de corrosão in situ do Furo C.....	71
Tabela 12 – Tabela de amostras de medição de potencial de corrosão in situ do Furo B.....	71
Tabela 13 - Tabela com detalhamento dos parâmetros da energia.....	74
Tabela 14 - Tabela dos parâmetros de rugosidade calculados para as amostras ensaiadas.....	82
Tabela 15 - Tabela de Resistividade Medida em Laboratório.....	91
Tabela 16 - Tabela de potencial medido em laboratório	92
Tabela 17 – Tabela de pH medido em laboratório	93
Tabela 18 – Tabela de umidade medida em laboratório.....	94
Tabela 19 – Tabela de sucções medidas com o tensiômetro	95
Tabela 20 - Tabela de concentração de Sulfato, Sulfeto e Cloreto, medidos pelo laboratório Keller Ambiental	Erro! Indicador não definido.
Tabela 21 - Tabela dos índices totais de agressividade e classificação dos solos.....	100
Tabela 22 - Tabela com os resultados do ensaio de perda de massa Erro! Indicador não definido.	
Tabela 23 - Tabela com os valores médios de perda de massa, espessura perdida e taxa de corrosão	Erro! Indicador não definido.
Tabela 24 - Tabela dos resultados de potencial de corrosão, medidos em campo, ao longo do tempo, com eletrodo Cu CuSO ₄	104
Tabela 25 - Tabela dos resultados de potencial de corrosão, medidos em campo, ao longo do tempo, para o eletrodo normal (ou padrão) de hidrogênio	106

Tabela 26 – Tabela com os valores de potencial inicial e final e pH para cada profundidade	106
Tabela 27 - Densidades secas x umidade, para energia reduzida, normal e intermediária .. Erro!	
Indicador não definido.	
Tabela 28 – Tabela de resistividade x umidade, para cada frequência e energia	109
Tabela 29 – Avaliação do critério de Trabanelli por profundidade.....	162

RESUMO

BISPO, M. B. **Análise de corrosão em estacas helicoidais utilizadas em fundações de torres de linhas de transmissão de energia.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020. 176 f.

Este trabalho se trata de um estudo detalhado sobre a corrosão ocorrida em duas estacas helicoidais após aproximadamente quatro anos de instalação no campo experimental de fundações da EESC-USP em São Carlos. Estas estacas, parcialmente instaladas em solo não saturado, foram submetidas à variação sazonal do nível do lençol freático (N.A.) ao longo de seu comprimento durante este período. Para um melhor entendimento do problema da corrosão deste tipo de estaca em solos similares ao caso estudado, esta pesquisa foi realizada com o objetivo de: (i) entender como a corrosão ocorreu ao longo da profundidade nos elementos de estudo, (ii) qual a agressividade do solo de alocação e (iii) como ocorreu a corrosão enterrada no aço patinável, normalmente utilizado nas estacas helicoidais no Brasil. A análise da corrosão nas estacas ao longo da profundidade foi feita por meio de interpretação qualitativa, usando-se imagens de microscópio óptico, e quantitativa com o auxílio do rugosímetro. Os resultados desta análise mostraram que a estaca sofreu corrosão acentuada na parte próxima à superfície do terreno, e, de forma mais intensa, entre o 7º e 8º metro de profundidade; no entanto, a parcela de estaca situada constantemente abaixo do N.A. praticamente não apresentou corrosão. Para compreender o efeito corrosivo do solo ao longo da estaca foi adotado o critério de TrabANELLI, o qual proporcionou resultados concordantes com os valores de corrosão observados. Para compreender a susceptibilidade do aço patinável na corrosão da estaca, foi feito ensaio de perda de massa em campo, para amostras de aço patinável e de aço carbono, num período de 6 meses. Foi observado que as taxas de perda no aço carbono foram maiores do que no aço patinável no primeiro mês, mas, com o tempo, essa diferença foi diminuindo até se igualarem ao fim dos 6 meses. Paralelamente à essas análises, foram realizados ensaios para medição do potencial de corrosão em campo, e uma análise da influência do grau de compactação sobre a resistividade do solo, feita em laboratório. Por fim, os resultados indicam que, em condições de solo similar ao estudado, o nível de corrosão e a consequente perda de espessura do aço é variável ao longo da profundidade.

Palavras-chave: corrosão, estaca helicoidal, critério de TrabANELLI, aço patinável, resistividade elétrica, potencial de corrosão.

ABSTRACT

BISPO, M. B. **Corrosion analysis of helical piles used as foundations of transmission line towers.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020. 176 f.

This work presents a detailed study about the corrosion occurred in two helical piles after approximately 4 years of installation at the Experimental Site of Foundations at the EESC-USP in São Carlos. These piles, partially installed in unsaturated soil, were subjected to seasonal variation on the groundwater table along its length during this period. For a better understanding of the corrosion problem on this type of pile in soils similar to the case studied, this research was carried out with the objective of: (i) understanding how corrosion occurred along the pile's depth, (ii) evaluating the aggressiveness of the studied soil and (iii) evaluating the buried corrosion of weathering steel, normally used in helical piles in Brazil. The analysis of the corrosion along the pile depth was done through qualitative interpretation, using optical microscope images, and quantitative using a roughnessmeter. The results of this analysis showed that the pile suffered severe corrosion in the part close to the ground surface, and, more intensely, between the 7th and 8th meter depth; however, the portion of pile located constantly below the water table had practically no corrosion. In order to understand the effect of the soil along the pile on the level of corrosion, the TrabANELLI criterion was adopted, which provided results in agreement with the observed corrosion values. To understand the influence of weathering steel on the pile corrosion, a field weight loss test was carried out on samples of weathering steel and carbon steel, in a period of 6 months. It was observed that the loss rates in carbon steel were higher during the first month, however, over time, this difference diminished and the loss rates became equal at the end of 6 months. In parallel to these analyzes, some tests were carried out to measure the corrosion potential of the soil studied (in field), and to verify the influence of the degree of compaction on the soil resistivity (in laboratory). Finally, the results of this work indicate that, in soil conditions similar to the studied case, the damage by corrosion and the consequent loss of thickness is variable along the depth.

Keywords: corrosion, helical pile, unsaturated soils, TrabANELLI criterion, weathering steel, electrical resistivity, corrosion potential.

1 INTRODUÇÃO

A corrosão é entendida, de forma simples, como a volta de um material a sua forma termodinâmica mais estável (Schweitzer, 2010), isso ocorre porque no caso dos metais eles são mudados da sua forma estável, ocorrida em minérios, e são transformados de forma artificial.

Serra (2014), afirma que nos EUA o gasto com manutenções causadas por corrosão em 2002, representou 3,6% do PIB do país, ou seja, US\$275 bilhões. Voltando para o setor elétrico do mesmo país, em 1998, foi estimado que os custos diretos e indiretos com corrosão chegaram à US\$17,3 bilhões, 7,9% das vendas de energia daquele ano, e que 22% seriam evitáveis se tivessem empregados técnicas conhecidas na época.

Sendo levado em consideração o contexto pelo qual o setor energético brasileiro tem passado, com imensas mudanças de matriz e de localização das plantas geradoras, é fácil notar que a necessidade por transmissão da energia para os pontos de consumo é grande. Essa situação se agrava por se tratar de um país com dimensões continentais.

Segundo Azevedo (2011), a competitividade acirrada entre empresas nacionais e internacionais em leilões não aceita demasias nos quantitativos, e uma economia com custos em fundações garante vitórias em leilões e ampliação das margens de lucros.

Dentre os tipos de fundação profunda para esse tipo de obra, as estacas metálicas helicoidais já são utilizadas no Brasil, embora ainda estejam se popularizando, mas são mais difundidas em diversos outros países, como os EUA.

O uso de fundações por estacas metálicas helicoidais para torres de linhas de transmissão de energia tem se expandido rapidamente no Brasil devido a algumas vantagens como rápida execução, e necessidade de equipamentos de pequeno porte para sua instalação. Outras vantagens são sua capacidade de carregamento imediato, logo após execução, bons resultados em suportar carregamentos de tração e de compressão, além de carregamentos laterais, uma vez que podem ser instaladas inclinadas (Ghaly, Hanna e Hanna, 1991; Prasad e Rao, 1994; Perko, Stan e Rupiper, 2000; Tsuha, 2007).

Foram exumadas duas estacas helicoidais, instaladas verticalmente 15 m abaixo do nível do terreno, no Campo Experimental de Fundações da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP) em São Carlos-SP, após aproximadamente quatro anos da data de instalação. Foram retiradas amostras (seções da estaca) a cada metro, para avaliar o processo corrosivo de forma qualitativa, por meio de imagens, inclusive de microscopia óptica, e quantitativa, utilizando um rugosímetro para verificar a perda de espessura em suas superfícies.

Para analisar a agressividade do solo foi necessário caracterizá-lo detalhadamente. Para isso foram realizados grupos de ensaios para obtenção de parâmetros físicos e químicos, como: permeabilidade e teor de umidade, pH, resistividade elétrica, concentração de sais e o potencial de corrosão.

Por fim, a corrosividade no aço patinável (usado nas estacas exumadas) em condição enterrada foi avaliado, em campo, no solo de estudo. Aços patináveis são conhecidos por serem resistentes à corrosão atmosférica, no entanto estudos sobre o seu uso em condição enterrada, como no caso de fundações, são escassos. A corrosão do aço patinável foi avaliada ao longo do tempo por meio de ensaios de perda de massa, que por sua vez forneceram informações sobre as taxas de corrosão, com diferentes idades, do aço patinável e do aço carbono sob ação de um mesmo meio.

Outro objetivo dessa pesquisa foi compreender como alguns parâmetros controláveis poderiam influenciar parâmetros de interesse. Para isso foi testado o potencial de corrosão, de uma amostra do mesmo aço patinável da estaca, sob a ação, em campo, do solo no decorrer do tempo. Também foi analisada, em laboratório, a influência do grau de compactação do solo e da frequência da corrente elétrica nos resultados de resistividade elétrica do solo.

1.1 OBJETIVOS

Esse projeto tem como objetivos:

Objetivos Gerais:

1. Avaliar o processo corrosivo ocorrido ao longo de estacas helicoidais exumadas, previamente instaladas no Campo Experimental de Fundações na Escola de Engenharia de São Carlos da USP
2. Caracterizar a agressividade de corrosão dos 12m superficiais do solo do Campo Experimental de Fundações.
3. Avaliar o desempenho do aço patinável e compará-lo com o do aço carbono para o mesmo meio.

Objetivos Específicos:

1. Avaliar qualitativamente e quantitativamente a variação do nível de corrosão ocorrido ao longo da profundidade nas estacas, por meio de imagens de microscópio óptico e ensaio de rugosidade
2. Caracterizar os solos, onde as estacas metálicas helicoidais estavam alocadas, segundo parâmetros geotécnicos como o tipo de solo, a profundidade, nível d'água e sua variação, e físico-químicos que regem a corrosividade desse meio, sendo eles, o PH, a resistividade elétrica, a concentração de sais, a permeabilidade e o potencial de oxidação, com intuito de classificar a agressividade do meio segundo critério de TrabANELLI
3. Avaliar convergência do método de TrabANELLI com o nível de corrosão observado nas profundidades de análise
4. Analisar o comportamento de corrosão do aço patinável, do mesmo tipo utilizado nas estacas exumadas, sob as condições dos solos presentes no campo experimental, e compará-lo com o do aço carbono
5. Traçar correlações entre os parâmetros, de forma que seja possível entender a variação de potencial de corrosão ao longo do tempo e da resistividade elétrica devido ao grau de compactação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ESTACAS HELICOIDAIS

2.1.1 INTRODUÇÃO

As estacas helicoidais, idealizadas por Alexandre Mitchell, foram utilizadas pela primeira vez em 1838 para a fundação de um farol no Rio Tâmisa (Perko, 2009). O intuito era criar um tipo de fundação que fosse de fácil instalação e que suportasse os esforços de tração e também os de compressão, sendo utilizáveis em diversos tipos de obra (Tsuha, 2007).

As estacas helicoidais atualmente são feitas de aço, compostas por hastes tubulares ou de seção quadrada, onde são soldadas uma ou mais placas helicoidais (Ghaly, Hanna e Hanna, 1991). O primeiro componente da estaca a ser instalado no solo é a seção guia, constituída por uma haste de aço com uma ou mais hélices, depois são conectadas hastes “lisas” (sem hélices) que garantem o avanço da seção guia até encontrar o terreno que proporcione a capacidade de carga requerida em projeto. Normalmente a conexão entre hastes é feita por emenda tipo macho/fêmea aparafusadas (Perko, 2009).

Algumas dimensões definidas na fabricação deste tipo de estaca são: o passo, distância vertical entre a base e o topo de uma mesma hélice, e o espaçamento entre hélices, em caso de estaca multi-hélices (Figura 1). Essas dimensões devem ser adotadas com a intenção de causar a menor perturbação no solo durante a instalação da estaca. Além dessas medidas, o diâmetro da haste e o diâmetro das hélices são calculados para atender a capacidade de carga da fundação definida em projeto.

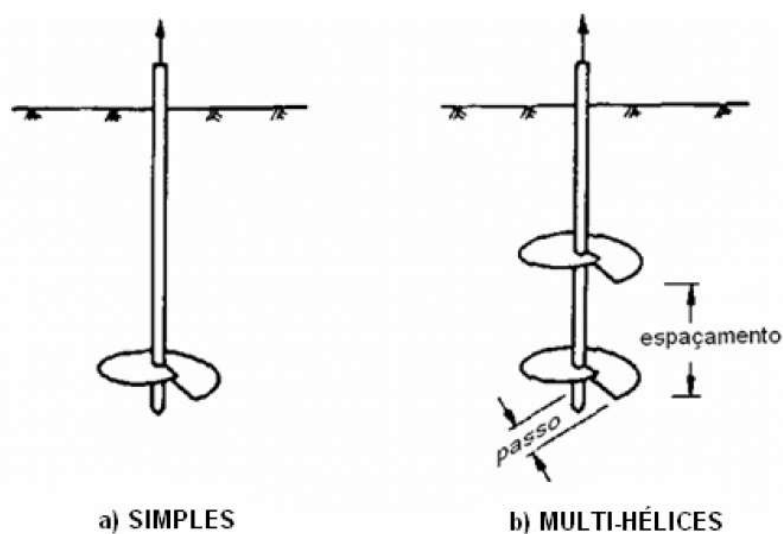


Figura 1 – Esquema de Estaca de Helicoidal (Kulhawy, 1985 apud Tsuha, 2007)

Essas estacas, diferentemente de outros tipos, são aparafusadas no solo durante sua instalação. Esse processo se dá por aplicação de torque com motor hidráulico na haste da estaca, e simultâneo controle da penetração no solo, de modo a garantir um avanço no terreno igual a um passo por volta.

2.1.2 PROJETOS DE FUNDAÇÕES EM ESTACAS HELICOIDAIS

Em projetos de fundações por estacas helicoidais a capacidade de carga pode ser estimada utilizando-se métodos teóricos, com parâmetros de solo obtidos por correlações com resultados de ensaios SPT (*Standard Penetration Test*), prática muito difundida no Brasil, ou por correlações empíricas com o torque final de instalação. O torque final de instalação é predeterminado pelo projetista para atender a capacidade de carga definida em projeto, respeitando-se o torque máximo suportado pela estaca estruturalmente.

Esse tipo de fundação possui ótimo desempenho à tração (efeito da hélice) e também à compressão, por isso tem sido usada em diversos tipos de obras. Além disso, Prasad e Rao (1994) afirmam que, diferentemente de outros tipos de estacas, as estacas helicoidais sofrem uma menor perda de capacidade de carga quando submetidas aos carregamentos laterais cíclicos.

Na etapa de anteprojeto, para escolha do tipo de fundação, é necessário analisar diversos fatores, como: nível d'água do terreno, tipo de vizinhança, logística, tipo de estrutura, tipos de carregamento e propriedades do solo, como sua classificação e os parâmetros físicos e químicos do solo associados à corrosão. Nesses aspectos as estacas helicoidais costumam se destacar, pois são muito versáteis e podem ser utilizadas para diversos tipos de obras e de terrenos, no entanto, no Brasil sua utilização tem sido majoritariamente para fundações de torres de linhas de transmissão de energia elétrica e de telecomunicação.

Durante o projeto de fundação é preciso determinar a capacidade de carga oferecida pelo sistema estaca-solo. Para isso, se faz necessário o dimensionamento das hélices, determinando-se o diâmetro e a quantidade das mesmas, a profundidade do terreno, onde devem ficar instaladas, e o diâmetro da haste central, de modo a atender a carga de trabalho atuante na fundação, com o fator de segurança definido no projeto. Já para fixar o torque final de instalação, usa-se correlações empíricas com a capacidade de carga, que normalmente variam de acordo com o diâmetro da haste.

Durante a instalação da estaca helicoidal, o solo penetrado é modificado e perturbado pela penetração das hélices, o que pode acarretar em deficiência na capacidade de carga e também facilitar a corrosão do elemento estrutural da fundação.

No projeto de fundações, entre muitas coisas, é preciso garantir a durabilidade do elemento estrutural. No caso de fundações em estacas metálicas helicoidais a grande preocupação, relativa à durabilidade, está na corrosão das mesmas. Quanto a este aspecto, de acordo com a NBR 6122 (ABNT, 2019), as estacas de aço que estiverem total e permanentemente enterradas, independentemente da situação do lençol d'água, dispensam tratamento especial, desde que seja descontada a espessura indicada na Tabela 1.

Tabela 1- Espessura de compensação de corrosão, de acordo com a NBR 6122 (2019)

Classe	Espessura Mínima de Sacrifício (mm)
Solos em estado natural e aterros controlados	1,0
Argila orgânica; solos porosos não saturados	1,5
Turfa*	3,0
Aterros não controlados	2,0
Solos contaminados	3,2

*Material orgânico parcialmente decomposto, muito comum em zonas pantanosas.

2.1.3 INSTALAÇÃO

O procedimento de instalação de estacas helicoidais evoluiu ao longo do tempo desde sua criação. Nos primórdios de sua utilização eram instaladas com uso da força humana ou tração animal (Tsuha, 2007).

Com a invenção dos motores, o processo de aparafusamento das estacas mudou e atualmente é feito com motores hidráulicos instalados em retroescavadeiras (Figura 2), caminhões ou até mesmo guindastes (Da Silva, 2014).

A instalação deve ser um processo controlado para garantir a qualidade do elemento de fundação. Para isso, o torque máximo que pode ser aplicado tem que ser inferior ao valor que possa causar escoamento do aço das hastes da estaca. O torque de projeto, o avanço, o número de rotações por minuto devem ser controlados, visto que o aparafusamento da estaca helicoidal no terreno deve ser feito com cuidado para se ter o menor revolvimento do solo, pois esse

revolvimento piora as propriedades do solo em seu entorno, de modo a prejudicar a capacidade de carga da fundação submetida à tração.



Figura 2 – Retroescavadeira com rotor, instalando a haste guia.

Para garantir pouca perturbação no solo é necessário controlar a velocidade de rotação e a taxa de avanço, sendo respectivamente, de 10 a 30 rpm, e avanço de um passo por volta. Junto com o momento torçor, é aplicada uma carga vertical mínima no topo da haste da estaca apenas para facilitar o direcionamento desta dentro do solo e garantir a taxa de avanço (Perko, 2009). A inclinação de instalação também tem que ser bem controlada, pois algumas estacas devem ser inclinadas para conferir maior resistência aos carregamentos laterais e por isso precisa haver precisão no ângulo.

2.1.4 EFEITOS DE INSTALAÇÃO NO SOLO

Durante a instalação de estacas helicoidais ocorre o deslocamento do solo atravessado pelas hélices, mudando a sua condição original de solo intacto, como ilustrado na Figura 3 em um caso de instalação em areia compacta.

Mosquera et al. (2015) mostrou a importância da consideração dos efeitos de instalação nos parâmetros de resistência e compressibilidade da areia para a modelagem numérica da ruptura de uma fundação por estaca helicoidal, submetida a carregamento de tração. No entanto, segundo Kanai (2007), a instalação da estaca helicoidal pode causar perturbações mínimas no solo quando comparadas com outras técnicas de execução de estacas. Todavia esses estudos

não fazem uma abordagem relativa à corrosão, uma vez que o processo de instalação das estacas helicoidais se caracteriza no aparafusamento da mesma, método diferente dos outros utilizados, como a cravação e a escavação. Por isso é esperado que o revolvimento causado na instalação acarrete condição distinta para o desenvolvimento do processo corrosivo.

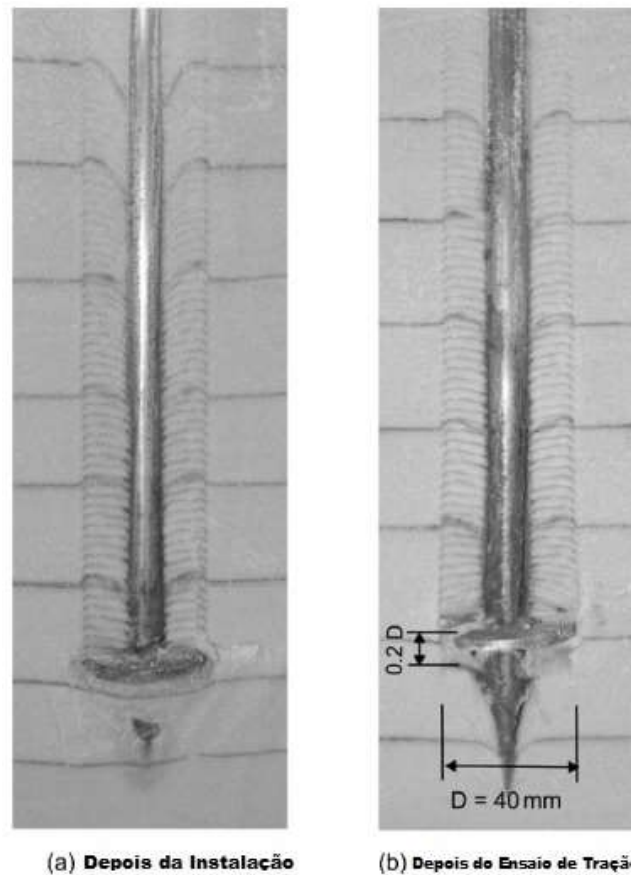


Figura 3 – Fotografia de modelo de estaca helicoidal simples em areia compacta: a) depois da instalação, b) depois de carregamento em de tração (Mosquera et al.,2015)

2.1.5 DESEMPENHO DAS ESTACAS HELICOIDAIS

As estacas helicoidais são reconhecidas por sua praticidade, versatilidade e eficiência. A logística de seu uso é simples, são tranquilamente transportadas, instaladas com facilidade, não precisam de equipamentos complexos ou grandes e podem ser carregadas logo após instalação (Perko, 2009). Seu dimensionamento é simplificado, pode ser feito através de correlação com torque de instalação ou por métodos teóricos usando-se parâmetros do solo estimados por meio de resultados de ensaio SPT.

Podem ser usadas em inúmeras situações, de locais inóspitos, uma vez que requerem equipamentos mais leves e já é disponibilizada pronta para ser feita a instalação, até densamente

povoados, por não causar ruídos e também por ter instalação feita por equipamentos que adentram terrenos pequenos, possuem bom desempenho em obras de diversos tipos e com carregamentos bem distintos, com presença de nível d'água e em solos variados, argilosos ou arenosos.

Sua eficiência em suportar diversos tipos de carregamento com pouca profundidade é um fator preponderante para seu uso. Possui alta resistência à tração e à compressão, devido às hélices, aos momentos fletores e aos carregamentos laterais, devido ao aço, à estrutura do elemento e à possibilidade de incliná-las.

2.1.5.1 VANTAGENS

As fundações por estacas helicoidais apresentam grandes vantagens e por isso seu uso tem sido defendido por muitos autores e em diversas situações (Ghaly, Hanna e Hanna, 1991; Prasad e Rao, 1994; Perko, Stan e Rupiper, 2000; Tsuha, 2007):

- Equipamento de instalação mais leve do que equipamentos utilizados para instalação de outros tipos de estaca;
- Em um solo mole, estacas helicoidais atingem resistências com menores profundidades, devido ao tamanho e quantidade de hélices;
- Instalação por aparafusamento causa menos vibração na vizinhança e menos ruído;
- Facilidade no transporte das estacas, uma vez que são compostas por segmentos;
- Alta capacidade de carga e resistência aos momentos fletores;
- Pode ser solicitado imediatamente após a instalação;
- Existem peças específicas para facilitar a montagem de torres de transmissão de energia elétrica com este tipo de fundação;
- Podem ser instaladas abaixo do nível d'água;
- Perdem pouca capacidade de carga à tração e à compressão após carregamentos laterais cíclicos;
- Correlação direta entre torque de instalação e capacidade de carga;
- Resistem bem ao solapamento em obras de pontes;
- Podem ser removidas, por isso são utilizadas em aplicações temporárias;
- Podem ser instaladas inclinadas para melhorar resistência aos carregamentos laterais e momentos fletores;
- Podem receber camada protetora à corrosão;

- Não há necessidade de retirada de solo (bota-fora) em sua instalação.

2.1.5.2 DESVANTAGENS

Embora sejam ótimos elementos para fundação, as estacas helicoidais possuem suas desvantagens. Sendo elas:

- Têm sua durabilidade prejudicada por processos corrosivos
- Devido ao seu processo de instalação não podem contar com resistência da haste
- Têm limite de torção a qual pode ser submetida
- Não podem ser instaladas em material rochoso ou com SPT muito alto

2.2 AÇO PATINÁVEL

2.2.1 AÇO

O uso do ferro data dos tempos pré-históricos e atualmente é aceito que perpassa por pelo menos sete milênios. Fragmentos de ferro como lâminas e incrustações decorativas foram encontradas no Oriente Médio, datando por volta de 5000 a.C. (Durand-Charre, 2003).

A evolução da manufatura permitiu as condições necessárias para a fundição do ferro. Devido ao uso do carvão, inconscientemente, era causada a difusão do carbono em uma fina camada de metal, criando assim um aço duro.

O aço é resultado da adição do Carbono (C) ao Ferro(Fe) e ele é utilizado por melhorar algumas propriedades do Fe. Devido à sua alta resistência, desde a sua descoberta, o aço foi muito utilizado pelo homem, mas com a sua evolução, melhoria e inserção de outras propriedades que não possuía em seus primórdios, o seu uso se difundiu por diversas áreas de aplicação, inclusive na construção civil. Atualmente existem diversas ligas de aço, cada uma com propriedades distintas e ideal para determinada aplicação, seja maior resistência mecânica, maleabilidade, resistência à altas temperaturas ou resistência à corrosão atmosférica, caso do aço patinável.

2.2.2 AÇO PATINÁVEL

O aço patinável é um aço de alta resistência e baixa liga (ARBL), possui liga metálica com boa resistência à corrosão atmosférica. Foi primeiramente desenvolvido pela U.S Steel em

1933, com o nome de COR-TEN, possuía alta resistência mecânica e resistência à corrosão atmosférica superior ao de outras ligas (Morcillo et al., 2013).

Aços patináveis se diferem do aço carbono pela quantidade de elementos de liga, como: Cromo (Cr), Níquel (Ni), Fósforo (P), Cobre (Cu), em primeiro plano, e outros como complemento, como o Silício (Si), o Molibdênio (Mo), o Titânio (Ti) e o Vanádio (V), todos somados ficam entre 3 e 5% em peso da liga, por isso considerado aço de Alta Resistência e Baixa Liga (ARBL).

Estudos desenvolvidos pela ASTM 53 (Pannoni, 2016), indicam que um teor de (Cu) de 0,3% traz grandes benefícios na diminuição das taxas de corrosão atmosférica quando comparado com um aço com um teor residual (inferior a 0,03%) desse elemento.

Segundo Murata (2011), o Cu, o P e o Cr possuem influência benéfica no desenvolvimento da pátina, já o Ni, o Si, o Alumínio (Al) e o Mo têm pequena contribuição.

Atualmente existem diversas especificações de aços patináveis, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 2 - Especificações de Aços Patinaáveis

Aço	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cu%	Cr%	N%	Obs.
USS COR-TEN A	≤0,12	0,25-0,75	0,20-0,50	0,07-0,15	≤0,05	0,25-0,55	0,50-1,25	≤0,65	-
USS COR-TEN B	≤0,19	0,30-0,65	0,80-1,25	≤0,04	≤0,05	0,25-0,40	0,40-0,65	≤0,40	V 0,02-0,10
ASTMA242	≤0,15	-	≤1,00	≤0,04	≤0,05	>0,20	-	-	-
ASTMA588 A	≤0,19	0,30-0,65	0,80-1,25	≤0,04	≤0,05	0,25-0,40	0,40-0,65	≤0,40	V 0,02-0,10
ASTMA588 B	≤0,20	0,15-0,50	0,75-1,35	≤0,04	≤0,05	0,20-0,40	0,40-0,70	≤0,50	V 0,01-0,10
ASTMA588 C	≤0,15	0,15-0,40	0,80-1,35	≤0,04	≤0,05	0,25-0,40	0,20-0,50	0,25-0,50	V 0,01-0,10
EN 10025-5 (S355J0WP)	≤0,12	≤0,75	≤1,00	0,06-0,15	≤0,035	0,25-0,55	0,30-1,25	≤0,65	Nb/V/Ti; Mo≤0,3; Zr≤0,15
ABNT NBR 5921 (QRC 300)	≤0,17	0,10-1,50	≤1,30	≤0,05	≤0,03	≤0,55	≤1,25	≤0,65	-
ABNT NBR 5921 (QRC 350)	≤0,18	0,1-1,50	≤1,40	≤0,05	≤0,03	≤0,55	≤1,25	≤0,65	Nb/V/Ti

Os diferentes elementos de liga dos aços patinaáveis se justificam na influência sob três pontos mais importantes, efeito sobre a formação da pátina, melhoria das propriedades mecânicas e melhora da soldabilidade (Pannoni, 2016).

Os aços patinaáveis possuem esse nome devido à formação de uma camada chamada pátina. Ela é formada acima do material virgem e possui alta densidade e ótima aderência ao metal base, por isso sua qualidade é preponderante na diminuição da taxa de corrosão do material base ao longo do tempo (Morcillo et al., 2013).

A pátina se distingue do óxido de ferro, pois é enriquecida com os componentes de liga como o Cu, o P e o Cr, entre outros (Figura 4). Esses componentes garantem que a estrutura

não seja porosa como a do óxido de ferro e que essa camada fique mais bem aderida ao material virgem (Murata, 2011).

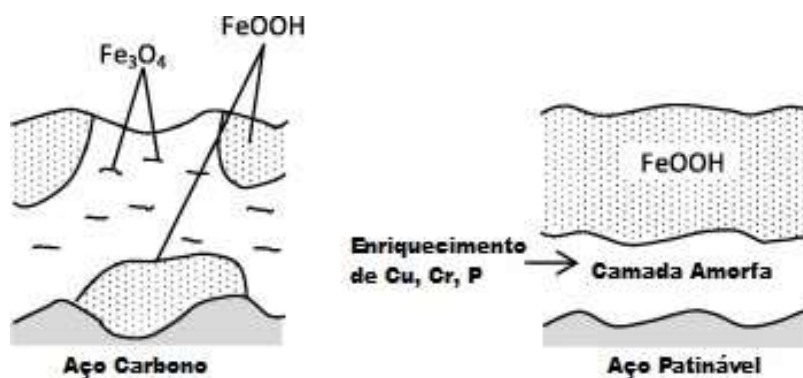


Figura 4 - Esquema das camadas formadas pelo processo de corrosão (Murata, 2011)

A pátina se forma, entre 3 e 5 anos, de um processo cíclico de umedecimento e secagem.

A presença de alguns poluentes interfere na formação da camada, por isso a atmosfera possui papel fundamental no comportamento da pátina, uma vez que é através dela que os poluentes entram em contato com a pátina.

Caso não haja poluentes, como em áreas rurais, a formação da pátina pode demorar mais que o normal, por outro lado, na presença de altos níveis de dióxido de enxofre ou cloretos a pátina não se forma com continuidade, o que acaba impossibilitando a proteção do metal base. No caso de altas concentrações de cloreto é recomendável o enriquecimento de Ni de 3 a 5% (Murata, 2011).

Segundo Schweitzer (2010), abrigar o aço patinável da chuva causará uma mudança em sua coloração, indo para uma cor mais clara, mas ainda terá a mesma resistência à corrosão, no entanto em condições de umidade contínua, como dentro da água ou solo, a resistência será a mesma de um aço sem liga.

Com o passar do tempo a coloração e a textura da pátina varia de uma cor alaranjada, mais porosa, até chegar no preto, menos poroso, (Figura 5 e Figura 6).



Figura 5 – Aspecto do aço patinável utilizado em uma escultura

(Fonte: <http://www.ecivilnet.com/dicionario/o-que-e-aco-patinavel.html>)

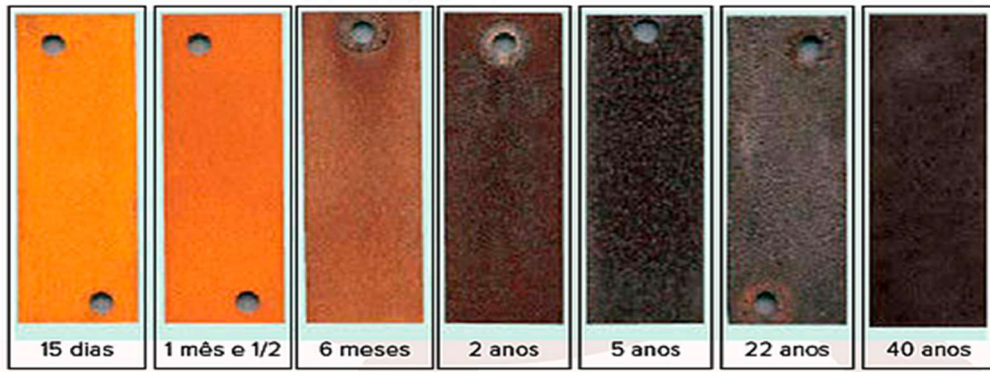


Figura 6 – Aspecto superficial de aço patinável ilustrando a variação de coloração da pátina ao longo do tempo de exposição

(Fonte: <https://www.villametal.com.br/aco-corten?lightbox=dataItem-j2gsw1am>)

2.3 CORROSÃO

Segundo Gentil (1982), “a corrosão é a deterioração de um material por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos”, é um processo natural e espontâneo de oxidação de compostos metálicos, que é o foco do presente estudo.

A corrosão, em sua definição mais simplista, é o processo para um material voltar ao seu estado termodinâmico (Schweitzer, 2010).

A corrosão pode acontecer por mecanismos eletroquímicos, onde há reações químicas que envolvem geração de corrente, químicos, onde ocorrem reações químicas com o meio sem haver transferência de cargas elétricas, e, de acordo com Gentil (1982), a literatura aceita o mecanismo físico, quando ocorre uma dissolução física com formação de liga ou penetração do metal líquido nos envoltos dos grãos de outro metal.

O foco do presente trabalho se dá na corrosão eletroquímica, pois se trata de mecanismo responsável pela maioria da corrosão descrita para materiais metálicos enterrados, uma vez que é raro possuir os elementos necessários para os mecanismos físico e químico, em ambiente enterrado.

2.3.1 CORROSÃO ELETROQUÍMICA

A corrosão eletroquímica de um determinado metal começa pelo aparecimento de uma diferença de potencial entre dois pontos, assim se iniciam reações eletroquímicas de oxidação, que acontece na parte corroída (ânodo), e da redução, que ocorre na região protegida (cátodo), como esboçado na Figura 7 (Serra, 2014).

A maioria dos metais usados são considerados instáveis na atmosfera, esses metais são provenientes da redução artificial de minérios e por isso eles tendem a retornar aos seus estados originais (Schweitzer, 2010).

A diferença de potencial é responsável pela formação de uma célula de corrosão. Essa célula necessita de quatro elementos para seu aparecimento: do anodo, do catodo, do eletrólito e de uma ligação metálica entre o anodo e o catodo.

Durante o processo de corrosão, o anodo sede elétrons para o catodo e para isso ocorrem reações, em que os componentes oxidados do metal reagem com íons e formam outros compostos. Essas reações dependem principalmente do meio, onde estão inseridos, e da liga em questão.

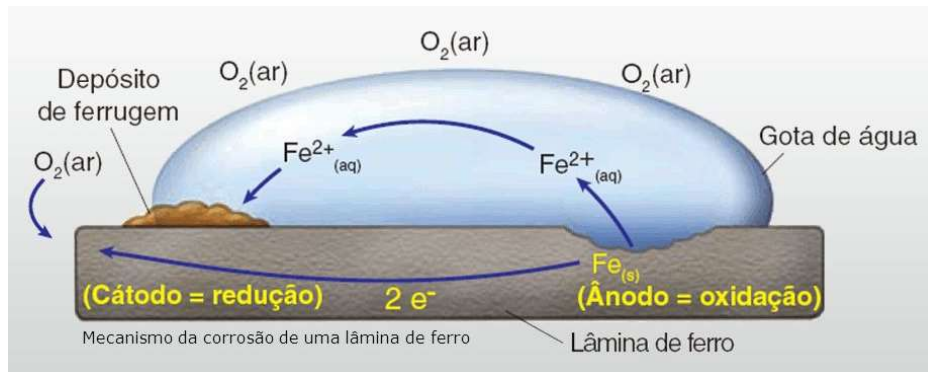


Figura 7 - Esquema do mecanismo de corrosão eletroquímica. (Fonte: <https://slideplayer.com.br/slide/364846/>)

2.3.2 TIPOS DE CORROSÃO METÁLICA

A corrosão pode ocorrer de diversas formas, as mais importantes para corrosão de estacas metálicas (enterradas) são: células de ação local, galvânica, eletrolítica, corrosão induzida por microrganismos e corrosão associada a solicitações mecânicas. Algumas delas são mais complicadas de prever, por isso é de grande importância que as causas do processo corrosivo sejam estudadas e que sejam evidenciadas suas influências.

Existem diversas formas de corrosão. Elas dependem de variados parâmetros, entre eles geometria da seção metálica, tipos de proteção, se está submetido a alguma corrente elétrica externa, se está em meio ácido ou básico, se está submetido a um fluxo d'água, quais íons estão dispersos no eletrólito, entre outros. No presente trabalho são abordados os processos aos quais as estacas helicoidais são submetidas.

2.3.2.1 CÉLULAS DE AÇÃO LOCAL

A corrosão por célula de ação local é base para explicação da corrosão eletroquímica. Na ocorrência dos quatro elementos necessários para a formação de uma célula de corrosão ela ocorrerá. No entanto, para determinar quem será cátodo e ânodo e qual será a taxa de corrosão é importante identificar que tipo de célula foi formada.

Existem três tipos de células de ação local, sendo elas:

- Células de Eletrodos Distintos
- Células de Concentração (Concentração de Sal e de Aeração Diferencial)
- Células de Temperatura

2.3.2.1.1 CÉLULA DE ELETRODOS DISTINTOS

A célula de eletrodos distintos, chamada também de corrosão galvânica, ocorre pela diferença de potencial entre dois eletrodos de materiais distintos. O material com menor potencial, de acordo com a série galvânica de metais, tenderá a oxidar e o com maior potencial tenderá a reduzir. No entanto, uma célula pode ser formada por apenas um material, isso ocorre pois qualquer metal possui heterogeneidades causadas por impurezas e diferenças de estrutura, como contorno e orientação dos grãos (Serra, 2014).

2.3.2.1.2 CÉLULA DE CONCENTRAÇÃO

As células de concentração ocorrem em eletrodos idênticos submetidos a meios distintos. Elas se dividem em dois tipos: as células de concentração iônica e as de aeração diferencial.

A. CÉLULA DE CONCENTRAÇÃO IÔNICA

A célula por concentração iônica ocorre quando dois eletrodos iguais são inseridos em meios com concentração de íons, do mesmo elemento do eletrodo, diferente. Pondo os mesmos em curto, é possível observar que o eletrodo no eletrólito com menor concentração passará a se dissolver, enquanto o eletrodo em um meio mais concentrado apresentará a deposição dos íons sobre ele (Serra, 2014 e Gentil, 1982).

B. CÉLULA DE CONCENTRAÇÃO POR AERAÇÃO DIFERENCIAL

A célula de aeração diferencial ocorre quando dois eletrodos iguais são inseridos em meios com concentração gasosa distinta, sendo mais comum o oxigênio (Scweitzer, 2010).

Nesse caso o eletrodo que fica no meio menos oxigenado será o anodo e se oxidará.

Essa formação de célula é mais relevante, pois se trata de um mecanismo muito usual na corrosão de elementos enterrados e/ou submersos.

Condição essa evidenciada em estudo de Braga (2013), em que o mesmo analisou a corrosão de fundações grelha e percebeu que em metade das estruturas, que apresentaram problemas de corrosão, houve a incidência da corrosão diferencial.

2.3.2.1.3 CÉLULA DE TEMPERATURA

Nesse tipo de célula, eletrodos idênticos são introduzidos em meios com temperaturas distintas, o que gera uma diferença de potencial entre eles. Diferentemente dos outros tipos de célula, a determinação do anodo e do catodo não depende apenas de um fator, no caso a

temperatura (Schweitzer, 2010). A definição do anodo e do catodo irá depender do tipo de material dos eletrodos, da aeração, da composição e da agitação do eletrólito (Serra, 2014).

Segundo Gentil (1982), outro ponto interessante é a influência da temperatura na eliminação dos gases dissolvidos, como o oxigênio, o que contribui na diminuição da taxa do processo corrosivo, além disso, a temperatura pode influenciar as películas protetoras podendo afetar porosidade, volatilidade e plasticidade da mesma.

2.3.2.2 CORROSÃO GALVÂNICA

A corrosão galvânica é um dos tipos mais comuns de corrosão, ocorre quando um metal entra em contato com outro, de diferente potencial elétrico, imersos em um meio, o eletrólito (Serra, 2014).

Esse mecanismo também pode acontecer em meio enterrado, utilizando o solo como eletrólito.

A parte corroída é a mais ativa na série galvânica, ela é a região anódica, ou seja, perde elétrons, enquanto a catódica recebe os mesmos e fica protegida contra corrosão, proteção catódica. Para definir o anodo e o catodo é necessário saber o potencial de oxidação de cada material, o menor entre eles será o catodo (Gentil, 1982). No entanto essa polaridade, na prática, pode inverter-se de acordo com as ligas metálicas utilizadas, íons presentes no meio corrosivo, acidez, temperatura, entre outros, possibilitando a troca do papel de catodo e anodo (Zhang, 2011).

Este tipo de corrosão possui atuação localizada, onde ocorre o contato ou proximidade dos metais, por isso pode causar perfurações rapidamente.

2.3.2.3 CORROSÃO ELETROLÍTICA

A corrosão eletrolítica se diferencia das outras pilhas de corrosão, pois a diferença de potencial é externa, ou seja, não é uma diferença de potencial proveniente dos próprios eletrodos. Nesse caso, é a diferença entre o potencial de um eletrodo interno e de um externo, representado por alguma fonte. Nesse caso a intensidade da corrente pode ser bem maior que as correntes experimentadas na corrosão eletroquímica, logo, a corrosão causada pode ser extremamente severa (Gentil, 1982).

A corrente de fuga (ou corrente de interferência) é uma corrente que escapa do circuito original e vai pelo o solo e/ou água até encontrar algum elemento. Quando essa corrente atinge elementos enterrados, como dutos e estacas, ela causa corrosão localizada grave na superfície do ponto onde abandona esses elementos para voltar para o circuito original.

Ela acontece por deficiência no isolamento do circuito original. Devido ao potencial no solo ser diferente em comparação ao do circuito, essa corrente é direcionada para o solo, mas como os metais são materiais condutores e conseqüentemente possuem resistividade bem baixa servem como caminho preferencial para essas correntes.

Correntes contínuas e as alternadas de baixa frequência são as que causam maior corrosão, segundo Gentil (1982) estima-se que uma corrente alternada de 60Hz cause apenas 1% do dano que uma corrente contínua de mesma intensidade.

A taxa de corrosão nos elementos metálicos devido à corrente de fuga depende de alguns fatores, como:

- Intensidade e densidade da corrente;
- Distância entre as estruturas interferente e interferida e localização da fonte de corrente interferente;
- Existência ou não de revestimento e a qualidade deste;
- Localização de possíveis juntas isolantes;
- Resistividade do solo.

2.3.2.4 CORROSÃO INDUZIDA POR MICRORGANISMOS

A corrosão induzida por microrganismo (microbiana ou microbiológica) pode ser causada por fungos, algas, mas normalmente é causada por bactérias (Gentil, 1982).

Esse tipo de corrosão ocorre em diversos ambientes, água do mar, rios, regiões pantanosas, solos contendo resíduos orgânicos ou que possuam sais como sulfato, sulfeto, nitratos, fosfatos e enxofre (Schweitzer, 2010).

Gu, Ford e Mitchell (2011) afirmam que nos EUA é estimado que 70% da corrosão em gasodutos seja causada por microrganismos, o que representa \$1,4 bilhões por ano.

Assim como em outros mecanismos de corrosão existem condições operacionais que proporcionam ambientes propícios para o desenvolvimento do biofilme. No caso da corrosão microbiana esses fatores são:

- Temperatura – Faixa ótima para crescimento de bactérias é entre 30 e 40°C;
- Velocidade do Fluxo de Água – Quanto mais lento mais volumoso e, conseqüentemente, o biofilme criado será destacável, quanto mais rápido o fluxo, mais denso e mais difícil de remover ficará esse biofilme;
- pH – a elevação de pH dificulta o desenvolvimento de bactérias e pode até impedir o aparecimento das mesmas;

- Oxigênio – A ausência de oxigênio propicia um ambiente ideal para bactérias anaeróbicas (Gentil, 1982).

Esse mecanismo de corrosão pode ser classificado em quatro subtipos, devido à formação de ácidos, por despolarização catódica, por aeração diferencial e por ação conjunta de bactérias.

Gentil (1982) afirma que no campo da corrosão no solo os casos mais frequentes são relacionados às bactérias redutoras de sulfato.

Essas bactérias são anaeróbias e retiram energia da redução de sulfato, na presença de alguns compostos orgânicos e outros nutrientes. O seu desenvolvimento necessita de:

- PH entre 5,5 e 8,5, sendo 7,2 o ideal;
- Ausência de oxigênio, embora sobrevivam em ambientes aerados;
- Presença de sulfato;
- Presença de nutrientes incluindo matéria orgânica;
- Temperatura entre 25 e 44°C, algumas termófilas resistem até 100°C.

Seus processos metabólicos podem tornar o pH da região ácido, chegando a 2.

É notório que a atividade de bactérias redutoras de sulfato está relacionada com o potencial redox do solo (Miller apud Gentil, 1982).

As bactérias anaeróbicas redutoras de sulfato produzem H_2S , que em água gera ácido sulfídrico, composto altamente corrosivo para metais (Gu, Ford e Mitchell, 2011).

Segundo (Schweitzer, 2010) as formas nas quais as bactérias aumentam a corrosão de metais ou a sensibilidade para corrosão localizada, são:

- Produção metabólica. As bactérias podem produzir ácidos orgânicos e inorgânicos e amônia.
- Destruição de camadas protetoras. Revestimento orgânicos podem ser atacados por vários tipos de microrganismos, o que leva à corrosão do material base.
- Fragilização por hidrogênio. Por ser uma fonte de hidrogênio ou de sulfeto de hidrogênio os microrganismos influenciam na fragilização por hidrogênio dos metais.
- Formação de células de concentração na superfície do metal. As células de concentração se formam devido ao crescimento de biofilmes que desenvolvem heterogeneidades na superfície do material, principalmente por diferença de aeração.

- Modificação dos inibidores de corrosão. Algumas bactérias transformam inibidores de corrosão de nitrito, utilizados para proteger alumínio e ligas de alumínio, em nitrato e amônia.

Segundo Sowards e Mansfield (2014), a partir de 2008 fiscais de nove estados dos EUA relatam o aumento da incidência de corrosão repentina de elementos de tanques de combustível enterrados e que análises químicas dos tanques vazios demonstraram a presença de vapor de etanol e de bactérias produtoras de ácido acético.

2.3.3 FORMAS DE CORROSÃO METÁLICA

A corrosão, devido à sua heterogeneidade, degrada o material de diversas formas, muitas vezes possibilitando a correlação entre o formato da degradação e o tipo de mecanismo. Por isso a corrosão pode ser classificada pela sua morfologia, como: uniforme, por placas, alveolar, por pites (pontual), intergranular, intragranular, filiforme, por esfoliação, gráfitica, dezincificação (corrosão apenas do zinco presente na liga do elemento metálico), empolamento pelo hidrogênio e em torno de cordão de solda (Gentil, 1982).

2.3.4 CORROSÃO DE ELEMENTOS ENTERRADOS

Segundo Gentil (1982), “O solo pode ser considerado como um dos meios corrosivos mais complexos para se determinar previamente sua ação agressiva para os materiais metálicos”.

Jack e Wilmott (2011) afirmam que o solo é um meio complexo, e que os muitos parâmetros, que afetam a corrosão enterrada, ainda não são totalmente compreendidos.

Serra (2014), resume a constituição dos solos como a mistura de materiais inertes, sais, água e matéria orgânica e diz que suas características em uma localização são relacionadas com: as características físicas e mineralógicas do material de origem, o clima do local, as condições de fauna e flora, a topografia e o tempo de desenvolvimento daquele solo.

A corrosão em elementos enterrados é de extrema importância, considerando que muitos meios de transporte de matéria prima, como adutoras, oleodutos, gasodutos e minerodutos, além deles, são alocados no solo, reservatórios e fundações de construções.

A corrosão no solo é pouco influenciada pela variabilidade nas propriedades do material metálico, porém depende muito das propriedades físico-químicas do solo. Os efeitos são ainda mais importantes no caso de solos já revolvidos (que sofreram algum tipo de movimentação ou escavação) (Matsushima, 2011).

Segundo Matsushima (2011), em situação normal pode-se dizer que a corrosão abaixo do solo é pequena, normalmente menor que 0,1mm/ano, uma vez que o perfil não é exposto ao ar e, a partir de certa profundidade, nem à importante variação de umidade, por isso é natural dizer que a corrosão é mais acentuada próxima à superfície, onde o solo é mais aerado e ocorre maior variação na umidade, do que em níveis mais profundos. No entanto, de acordo com os mecanismos de corrosão a taxa de corrosão pode ser alta em qualquer profundidade, isso porque o solo é muito heterogêneo e possui variações de acordo com sua estratificação, além disso, algumas condições de trabalho podem variar, como por exemplo, o nível do lençol freático ou ocorrência de contaminações de alguma natureza.

Existem diversos parâmetros que influenciam na formação de um ambiente perfeito para que a corrosão se estabeleça e por isso, para a etapa de projeto, é de extrema importância analisá-los para determinar quais mecanismos podem ocorrer e com qual intensidade.

Segundo Gentil (1982) as variáveis importantes para compreensão da corrosão enterrada são divididas em quatro grupos, sendo eles: relacionados à heterogeneidade na tomada de amostras, às características físico-químicas, às condições microbiológicas e às condições operacionais, e dentro de cada um deles existem diversos parâmetros influenciando.

- Heterogeneidade na Tomada de Amostras:
 - Aeração, umidade e pH;
 - Potencial Redox, Microrganismos;
 - Condições Climáticas;
 - Heterogeneidade do Solo.
- Características físico-químicas:
 - Presença de água, sais solúveis e gases;
 - Acidez;
 - pH;
 - Resistividade elétrica;
 - Potencial Redox.
- Condições Microbiológicas:
 - Influência direta;
 - Modificação na resistência de revestimentos;
 - Origem de Meios Corrosivos.
- Condições Operacionais:
 - Condições climáticas;
 - Emprego de fertilizantes;

- Despejos industriais;
- Profundidade;
- Aeração diferencial;
- Contato bimetálico;
- Corrente de fuga.

A análise das propriedades físico-químicas e microbiológicas é complexa, e as dificuldades se iniciam na retirada de amostras. Além de haver heterogeneidade do solo, a retirada de amostras causa, muitas vezes, alterações nessas propriedades, dificultando, ainda mais, a precisão das análises necessárias para compreensão do processo corrosivo em ambiente enterrado. Essas condições reforçam a necessidade de boa investigação geotécnica, para que o meio seja compreendido e dificulte a ocorrência de surpresas com relação a durabilidade do elemento.

As características físico-químicas do solo constituem a parte mais importante para entendimento do tipo de mecanismo causador do processo corrosivo, pois a partir delas é possível definir o maior potencial de ocorrerem determinados tipos. (Ver o subcapítulo 2.3.2)

Serra (2014) focou nas propriedades químicas, que englobam a determinação dos sais solúveis em água em condições normais, da umidade e acidez, e as físicas, que são aquelas capazes de influenciar a textura do solo.

As condições biológicas também são relevantes, pois alguns microrganismos, normalmente bactérias, podem ocasionar processo corrosivo severo. No entanto, a corrosão bacteriana é considerada quando as circunstâncias do solo são favoráveis para o desenvolvimento da mesma.

As condições operacionais podem, em sua maioria, ser previstas, por outro lado podem mudar com o tempo, o que necessita atenção. Casos como contaminação, fuga de corrente e contato bimetálico, devido às instalações posteriores, são exemplos de que mudanças podem ocorrer e precisam ser gerenciadas.

2.3.4.1 AVALIAÇÃO DA AGRESSIVIDADE DO SOLO

Devido à grande quantidade de parâmetros que influenciam o processo corrosivo, desde Romanoff (1962) é tentado condensar esses parâmetros influentes, de forma que a combinação dos mesmos consiga traduzir a intensidade da corrosão no local. Embora Romanoff tenha medido diversos parâmetros, seu foco foi na resistividade e no pH do solo e sua conclusão foi de que as propriedades dos solos intactos não causam corrosão significativa, independentemente de seus valores.

Com o passar do tempo outros critérios foram sendo utilizados, Roberge (2000, apud Decker, Rollins e Ellsworth, 2008) se baseia apenas na resistividade para indicar a possibilidade de corrosão, King (1977, apud Perko, 2009) que esboçou a Figura 8, levando em consideração também o pH e a resistividade para previsão da taxa de corrosão em aço galvanizado.

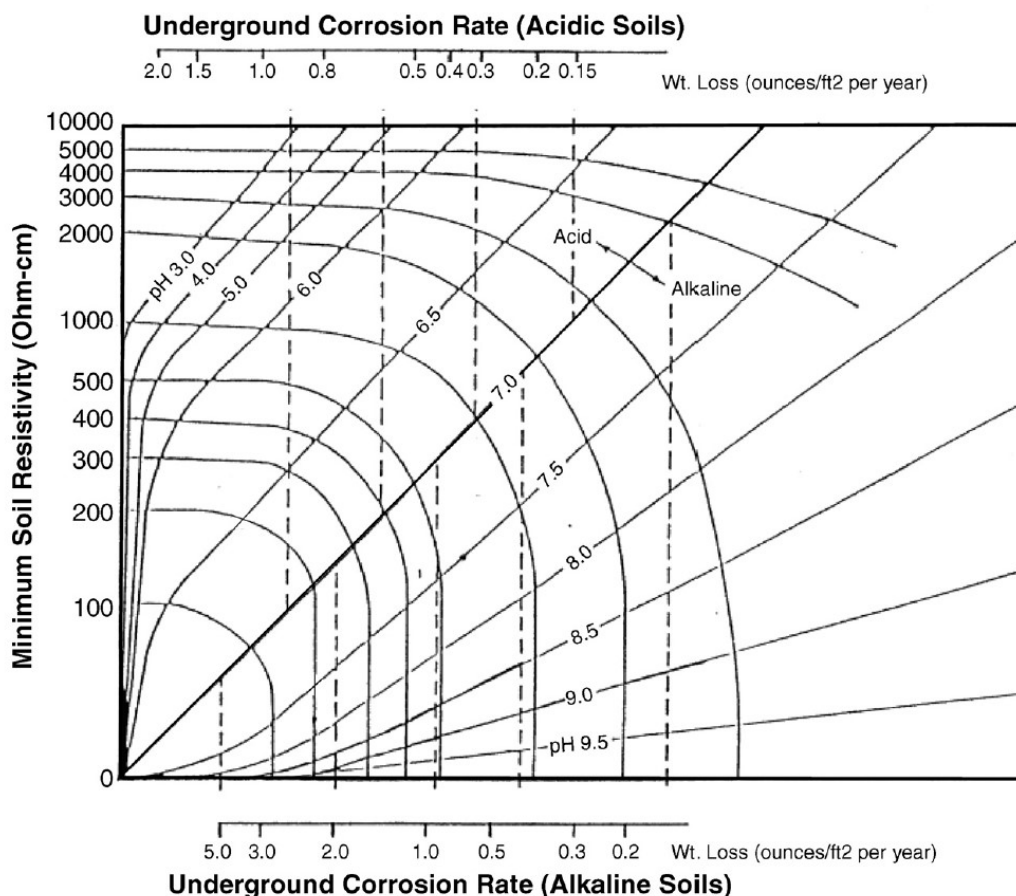


Figura 8 – Previsão da taxa de corrosão de aço galvanizado (King, 1977 apud. Perko 2009)

Com o passar do tempo critérios mais completos foram sendo desenvolvidos e dando ponderação aos parâmetros que antes eram relacionados de forma direta com a agressividade. Nesse grupo se encontra o critério de TrabANELLI (Serra, 2014), que considera resistividade elétrica, potencial redox, pH, umidade (%) e concentração de sais (Cl^- , SO_4^{2-} , S^{2-}). Para cada um dos parâmetros existem faixas em que é dada uma pontuação, e pela soma dessas pontuações classifica-se a agressividade do solo.

2.3.4.2 PARÂMETROS FÍSICO E QUÍMICOS E CONDIÇÕES MICROBIOLÓGICAS

Existem alguns parâmetros físico-químicos que são preponderantes para análise da corrosão em ambiente enterrado. Eles são indicadores para ocorrência e severidade dos mecanismos de corrosão. Esses parâmetros são permeabilidade, umidade, pH, concentração de sais, resistividade e potencial de oxidação.

A seguir será explicada a importância de cada um deles na análise de corrosão.

2.3.4.2.1 UMIDADE E PERMEABILIDADE

A umidade, embora seja um parâmetro simples, é fator importante na caracterização da agressividade do solo. Uma vez que os processos eletroquímicos mais comuns necessitam da umidade como meio para corrosão. Por isso quanto mais frequente e mais úmido for o solo, mais agressiva espera-se que a corrosão seja. No entanto, a análise individual da umidade está sujeita às diversas falhas decorrentes de mudanças climáticas, que influem diretamente na medição da mesma, por isso a análise conjunta da umidade e da permeabilidade esboça um cenário mais completo da real situação em campo.

A permeabilidade regula a retenção de água livre no solo e, conseqüentemente, o tempo em que a umidade se faz presente nele e em contato com o metal, antes que permeie e/ou evapore. Embora a permeabilidade não seja um parâmetro necessário para os critérios, ela é importante na descrição da capacidade de retenção de umidade do solo, uma vez que a umidade é muito afetada pela pluviometria na área.

Nas camadas mais superficiais do solo a permeabilidade é ainda mais importante, pois essas camadas são mais sujeitas às variações de umidade, decorrentes de chuvas e escoamentos superficiais.

Segundo Serra (2014), as propriedades físicas do solo que interferem na corrosão são aquelas que influenciam na permeabilidade do solo. Sendo a distribuição granulométrica responsável por determinar tal parâmetro.

Solos bem aerados e úmidos possuem corrosão mais intensa no início, no entanto o produto dessa corrosão cria película mais aderente e mais protetora do que em solos mal aerados, diminuindo sensivelmente a taxa de corrosão futura (Matsushima, 2011).

A permeabilidade dos solos pode ser adquirida de maneira direta ou indireta e em campo ou em laboratório.

As metodologias diretas são normalmente utilizadas por se tratarem de medidas fáceis de serem realizadas, tanto em campo quanto em laboratório. A maior dificuldade da realização da prática em laboratório é a retirada de amostras em condições naturais, sem que suas propriedades sejam perdidas, como a umidade e o índice de vazios natural. Para esses ensaios de medição direta, são utilizados ensaios de carga constante ou carga variável, em função do tempo.

A escolha por carga variável ou constante deve ser feita de acordo com o tipo de solo que está sendo ensaiado. Segundo Vargas (1981, apud De Aguiar, 2001) em solos arenosos há

a preferência por ensaios de carga constante e em solos argilosos é preferível o ensaio de carga variável devido à permeabilidade muito baixa.

Devido à dificuldade de se conseguir amostras indeformadas, os ensaios de campo foram desenvolvidos e aperfeiçoados, possibilitando ensaiar solos com maior rapidez e menor interferência, no entanto o ônus é que não há controle da zona ensaiada, prejudicando os resultados.

Nos ensaios indiretos, feitos em campo, as medidas são adquiridas relacionando a permeabilidade com outros parâmetros como a sucção de um solo, por exemplo. Já nos métodos diretos, *in situ*, tem-se como opção os poços e/ou furos, os infiltrômetros de anel duplo, entre outros.

O ensaio de permeabilidade com o permeâmetro de Guelph se trata de um método direto, com permeâmetro de furo e com carga hidráulica constante para a aferição da permeabilidade.

O permeâmetro é composto de uma garrafa de Mariotte, que controla a carga aplicada no furo, e um tripé para suporte, para alocação dentro do furo em terrenos irregulares.

Segundo De Aguiar (2001), se trata de um equipamento leve, fácil de ser operado por uma única pessoa. O ensaio é rápido e necessita de pouca quantidade de água para sua realização entre 0,5 e 2L.

Segundo as instruções de operação da SoilMoisture Equipment Corp (2008), a faixa de medição da condutividade hidráulica desse permeâmetro é entre 10^{-2} a 10^{-5} cm/s.

Ragab e Cooper (1990 apud Ragab e Cooper, 1993) classificaram métodos de obtenção de propriedades hidráulicas do solo de acordo com suas condições de aplicação, precisão, custo benefício, vantagens e limitações e concluíram que em condições de campo e na ausência de nível superficial de água o permeâmetro de Guelph é o mais útil. Ele causa mínima perturbação no solo, fácil de utilizar, portátil e duradouro, propicia cálculo rápido da condutividade hidráulica saturada, é preciso e possibilita repetições em curto espaço de tempo.

Segundo Elrick, Reynolds e Tan (1989, apud Reynolds et al. 1985), a fórmula da vazão no furo é composta por duas partes, uma resultante da zona saturada e outra da zona não saturada. Para isso foi criada a Equação 1 da vazão em função da carga de ensaio e do raio do tubo. Isso se faz necessário, pois durante o ensaio ocorre a formação de dois bulbos. Como pode ser observado na Figura 9, o bulbo umedecido, que não atingiu o saturação de campo (bulbo maior), se expande a partir do bulbo saturado (bulbo menor) onde a vazão é representada pelas duas parcelas contidas na Equação 1, sendo que a primeira corresponde ao fluxo saturado e a segunda ao fluxo não saturado (Elrick, Reynolds e Tan, 1989).

$$Q = f(H, a)K_{fs} + g(H, a)\phi_{gm}$$

Equação 1

Sendo:

H, carga hidráulica no ensaio, em cm

a, raio do tubo de saída da garrafa de Mariotte, em cm

K_{fs} , condutividade hidráulica saturada de campo, em cm/s

ϕ_{gm} , fluxo mátrico, em cm^2/s

O ensaio pode ser realizado com apenas um estágio de carregamento ou com dois estágios de carregamento ($H_1 < H_2$), sendo com dois estágios possível calcular o parâmetro alfa (α) da curva. Quando opta-se pelo ensaio de um estágio o α é assumido através de tabelas com a textura do solo, como pode ser visto na Tabela 3.

Para ambas as metodologias é necessário consultar o ANEXO A, para definir o valor C, conhecido como fator de forma.

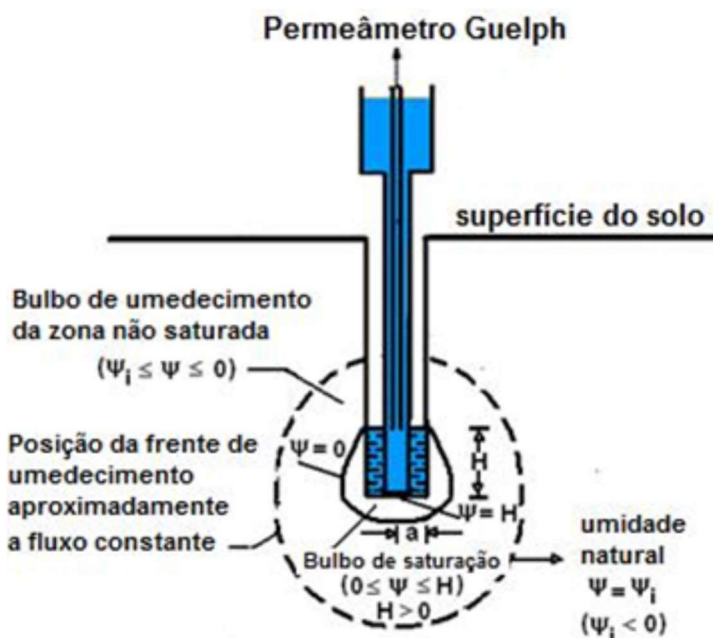


Figura 9 – Esquema do umedecimento durante ensaio de permeabilidade com permeômetro de Guelph (Soto, Chang e Vilar 2009)

Tabela 3 - Valores de α^* para diferentes texturas de solo. (Elrick, Reynolds e Tan 1989)

Textura do Solo - Categoria da Estrutura	$\alpha^*/(\text{cm})$
Compactado, sem estrutura, materiais argilosos ou siltosos como aterros e camadas lacustres ou de sedimentos marinhos, etc.	0,01
Solos que são ambos, textura fina (argilosa ou siltosa) e desestruturados; também pode incluir algumas areias finas.	0,04
Maioria dos solos estruturados, de argilas a margas; também inclui areias finas e médias não estruturadas. A categoria mais frequentemente utilizada em solos cultiváveis.	0,12
Areias grosseiras e areias pedregulhentas; também pode incluir alguns solos altamente estruturados com largas e/ou numerosas rachaduras, macroporos, etc.	0,36

O intuito do ensaio consiste na obtenção da condutividade hidráulica de saturação de campo, K_{fs} . Essa condutividade se distingue da condutividade de saturação em laboratório, pois em campo não é possível fazer a remoção total do ar nos vazios. Além da condutividade é necessário obter o Φ_{gm} , pois o fluxo não saturado contribui para a vazão do permeâmetro. Esses parâmetros são obtidos através da Equação 2 a Equação 8, sendo por fim, através da Equação 9, de Gardner (1958), encontrada a curva de permeabilidade por sucção no solo.

$$K_{fs} = G_2 * Q_2 - G_1 * Q_1 \quad \text{Equação 2}$$

$$G_2 = \frac{H_1 * C_2}{\pi(2H_1 * H_2(H_2 - H_1) + a^2(H_1 * C_2 - H_2 * C_1))} \quad \text{Equação 3}$$

$$G_1 = \frac{G_2 * (H_2 * C_1)}{(H_1 * C_2)} \quad \text{Equação 4}$$

$$\Phi_{Gm} = J_1 * Q_1 - J_2 * Q_2 \quad \text{Equação 5}$$

$$J_1 = \frac{(2H_2^2 + a^2 * C_2) * C_1}{2\pi(2H_1 * H_2(H_2 - H_1) + a^2(H_1 * C_2 - H_2 * C_1))} \quad \text{Equação 6}$$

$$J_2 = J_1 \frac{(2H_1^2 + a^2 * C_1) * C_2}{(2H_2^2 + a^2 * C_2) * C_1} \quad \text{Equação 7}$$

$$\alpha = \frac{K_{fs}}{\Phi_{Gm}} \quad \text{Equação 8}$$

$$k(s) = K_{fs} * e^{-\alpha s} \quad \text{Equação 9}$$

Sendo,

H_1 , carga hidráulica no ensaio 1, em cm

H_2 , carga hidráulica no ensaio 2, em cm

C_1 , fator de forma C do ensaio 1

C_2 , fator de forma C do ensaio 2

Q_1 , vazão do ensaio 1, em cm/s

Q_2 , vazão do ensaio 2, em cm/s

G_1 , valor referente às características geométricas 1

G_2 , valor referente às características geométricas 2

J_1 , valor referente às características geométricas 1

J_2 , valor referente às características geométricas 2

a , raio do furo, em cm

K_{fs} , condutividade hidráulica saturada de campo, cm/s

ϕ_{gm} , fluxo mátrico cm^2/s

α , parâmetro alfa em cm^{-1}

Segundo Soto, Chang e Vilar (2009), o ensaio possui limitações como a constância de valores negativos para os parâmetros quando o ensaio é feito com duas cargas, sendo suscetível a heterogeneidade do solo.

2.3.4.2.2 pH

O pH é um parâmetro importante, pois tem influência direta e indireta na corrosão de metais. Os materiais metálicos sofrem corrosão em meio ácido, ou seja, em pH baixo, isso caracteriza a ação direta. No entanto, os níveis de pH influem em alguns tipos de mecanismos, como a corrosão microbológica e no tipo de resíduo da corrosão, o que pode garantir proteção, ou não, ao metal base.

O pHmêtro é o equipamento mais difundido na medição do pH, uma vez que o mesmo pode ser usado em qualquer ambiente, é rápido nas análises e prático, mas existem outras maneiras de fazer essa medição, como as titulações em laboratório, por exemplo.

O pH também é um parâmetro sujeito às variações devido à retirada de amostras, por isso é necessário que se tome cuidado na remoção e logística das mesmas.

2.3.4.2.3 CONCENTRAÇÃO DE SAIS

A concentração de sais pode influenciar o processo corrosivo de diversas maneiras. Dependendo de qual componente estiver presente pode-se acelerar, causar ou evidenciar determinado mecanismo. Como por exemplo, a aceleração do processo eletroquímico devido à diminuição da resistividade causada por aumento do teor de cloreto, ou até mesmo possibilitando uma troca de corrente entre metais distintos anteriormente sem contato elétrico, ou a acidificação do solo causada pela redução do Sulfato (SO_4^{-2}) por parte de microrganismos.

O Sulfato, por exemplo, é reduzido em Sulfeto (S^{-2}) por algumas bactérias e essas bactérias, por sua vez, utilizam a oxidação do aço para retirar energia necessária para o seu metabolismo, portanto, a presença desses sais indica a necessidade de uma preocupação com a ação bacteriana (Serra, 2014).

Outra situação é quando o eletrólito, solo, possui muitos íons redutíveis de algum material que seja catódico em relação à liga metálica do elemento, o que pode desencadear corrosão galvânica.

O cloreto, que é responsável por diminuir a resistividade do solo, também agrava a evolução da corrosão em determinadas ligas metálicas, como o aço patinável, isso ocorre devido à não formação da pátina (Schweitzer, 2010).

Alguns tipos de contaminantes também podem apressar o processo corrosivo em elementos metálicos enterrados, como: fertilizantes, que possuem muitos sais como nitrato de amônio, fosfato mono e diamônio, cloreto de potássio, e despejos industriais, que podem tornar o solo corrosivo. (Gentil, 1982)

2.3.4.2.4 RESISTIVIDADE

A corrosão, na grande maioria das vezes, ocorre devido a um processo eletroquímico e como tal precisa de um meio condutor para que as correntes consigam fluir da área oxidada até a área reduzida, onde cederá esses elétrons para os íons no eletrólito.

A resistividade é o inverso da condutividade, ou seja, quanto maior a resistividade, pior condutor será o material e conseqüentemente dificultará a ação de mecanismos de corrosão.

Os tipos de corrosão que ocorrem em áreas maiores, como corrosão eletrolítica e galvânica, são ainda mais suscetíveis a essa característica do solo. Em um meio com resistividade alta, a corrente de fuga preferirá fluir pelo material metálico e não pelo solo, por outro lado poderá inviabilizar a corrosão galvânica em situações que os metais não tiverem contato direto, pois a corrente não conseguirá fluir do anodo para o catodo por grandes distâncias.

A resistividade do solo é considerada como uma das características mais importantes, tanto que é possível relacionar diretamente o seu valor com a agressividade do solo (Ohsaki, 1982).

Assim como outros parâmetros, existe uma dificuldade na medição da resistividade, uma vez que o solo é muito heterogêneo e impossibilita a aplicação de um valor característico por todo ele, outro problema é que a resistividade do solo é variável de acordo com o teor de umidade, de sua mineralogia, porosidade e dos componentes químicos presentes nele, que podem variar em casos de contaminação ou lixiviação.

A medição da resistividade do solo pode ser feita em campo ou laboratório. Os ensaios de campo normalmente utilizados são o piezocone com medição de resistividade, conhecido como RCPT-U (*resistivity piezone penetration test*), ou o arranjo de Wenner por eletrorresistividade, já os ensaios de laboratório são realizados com multímetros e geradores de corrente medindo corrente, diferença de potencial e frequência aplicadas a uma amostra, por eletrodos.

A determinação da resistividade se dá através da Lei de Ohm que relaciona a corrente (I), a diferença de potencial (U) e a resistência (R), pela Equação 10. A resistência, que por sua vez é o resultado da função da área (A), comprimento do elemento (L) e da resistividade do material (ρ), Equação 11, e por fim chegar-se em uma correlação da resistividade com a tensão, a corrente e a geometria do elemento (L e A) Equação 12.

$$R = \frac{U}{I} \quad \text{Equação 10}$$

$$R = \frac{\rho * L}{A} \quad \text{Equação 11}$$

$$\rho = \frac{U * A}{I * L} \quad \text{Equação 12}$$

2.3.4.2.5 POTENCIAL DE OXIDAÇÃO

O potencial de oxidação mede a diferença de potencial elétrico de uma célula de corrosão, que consiste de dois eletrodos, a região oxidada e a reduzida. Para definir o potencial de oxirredução de um eletrodo, ou meia-célula, necessita-se de um eletrodo de referência, dada a impossibilidade de medições absolutas do potencial de um eletrodo.

O eletrodo de referência utilizado é o eletrodo normal de hidrogênio (ENH), no entanto sua utilização prática não é muito comum, nem em laboratório e nem em campo. Por isso outros eletrodos de referência, que já possuem correlação com o ENH, são utilizados (Serra, 2014).

Essa grandeza ajuda a caracterizar o ataque que uma meia-célula, uma estaca metálica, por exemplo, está sofrendo pelo meio. No entanto, o potencial de oxidação de uma estaca metálica não é tão representativo, uma vez que consiste de um elemento muito grande submetido a um meio heterogêneo, o solo, por isso os resultados desse elemento inteiro podem, muitas vezes, disfarçar corrosões bem agressivas em determinados pontos.

Já a medição do potencial em laboratório, com a extração de amostras *in situ*, acarreta alterações da real situação amostrada, conseqüentemente alterando o real potencial de corrosão.

Oliveira e Panonni (2012), consideram a medição do potencial de corrosão de estacas de aço cravadas em solos naturais uma ótima ferramenta, uma vez que se trata de metodologia simples, rápida e eficiente para o acompanhamento da performance das mesmas ao longo do tempo.

Segundo diagrama de Pourbaix, Figura 10, se o elemento atacado estiver em um meio com pH e potencial de oxidação conhecido é possível prever se essa corrosão irá ocorrer.

Dentro do diagrama existem basicamente três regiões: a região de passivação anódica, a região de imunidade ou proteção catódica e a região de corrosão, zona rachurada.

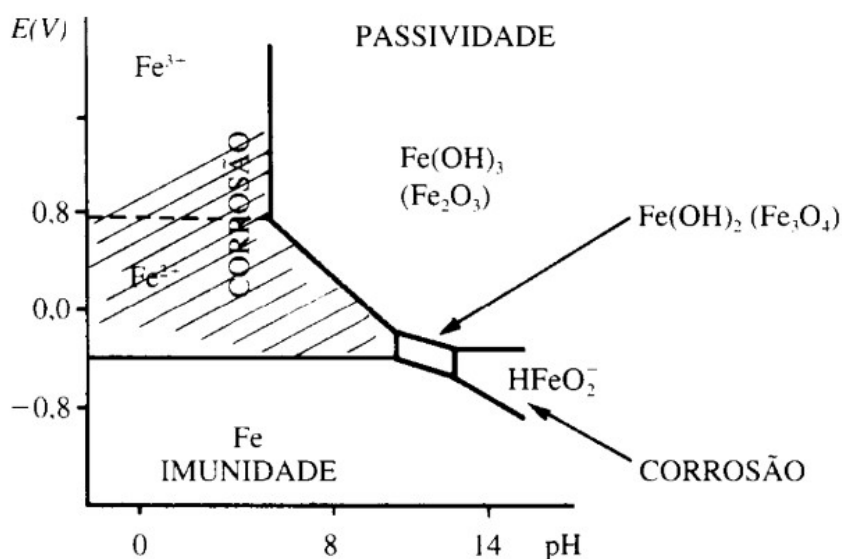


Figura 10 - Diagrama de Pourbaix do ferro em água (Gentil, 1982)

A passivação pode ocorrer por diversos mecanismos, pois ela depende do material, do eletrólito e das condições de operação. Ela ocorre pela oxidação do material em meio conveniente ou por polarização anódica. (Gentil, 1982) No caso da passivação ela contribui diminuindo a corrosão pela formação de camada protetora que dificulta a reação na região anódica, pois impede o contato com o eletrólito.

A proteção catódica de um elemento ocorre quando seu potencial, em relação a outro elemento, é baixo e por isso ele será o cátodo da reação. Nesse caso, outro elemento ou material será o anodo, servindo como material de sacrifício.

Existe outra técnica de proteção catódica que consiste na impressão de corrente elétrica produzida por força eletromotriz externa. Nesse caso o elemento que se quer proteger é catodo e o anodo, auxiliar, é um eletrodo de material inerte, por onde a corrente gerada, pela fonte geradora, fluíra para o catodo (Schweitzer, 2010).

2.3.5 MÉTODOS DE PROTEÇÃO À CORROSÃO

Com a evolução na busca por eficiência e do entendimento dos processos corrosivos, métodos de proteção à corrosão foram inseridos no processo decisório de um projeto. De acordo com a operação, do tipo de elemento, do material e do meio em que estará inserido, um tipo de proteção se mostrará mais vantajosa que outra.

Para mitigar a corrosão em um elemento enterrado, basicamente pode-se interferir em três situações, no meio, ou seja, no solo, no material que sofrerá o ataque ou na relação solo/elemento. Nesses três pontos se baseiam os métodos mais comuns de proteção, como: liga específica para determinado meio, proteções catódicas ou pinturas na estrutura e, em alguns casos pontuais, a melhoria do solo no entorno da estrutura.

As diversas ligas criadas têm o intuito de melhorar propriedades do metal base, sendo uma delas a resistência à corrosão. Nesse sentido, foram criados os aços inoxidáveis, ligas de zinco enriquecidas com alumínio e os aços patináveis, entre muitas outras.

Outra abordagem, e que inclui a maioria dos métodos de proteção, é a mudança da relação solo/elemento. Essa mudança se dá por diversos meios, como pinturas, aplicação de revestimentos e proteção catódica.

A melhoria de solos se torna uma opção mais limitada por demandar um esforço muito grande, principalmente em casos onde os elementos se estendem por muitos quilômetros, como dutos. As melhorias utilizadas para os casos de estacas, seriam substituição do solo, compactação, drenagem, entre outros. Todas caras em caso de estacas profundas.

2.3.5.1 APLICAÇÃO DE REVESTIMENTOS

A aplicação de revestimentos se baseia no isolamento do contato do material com o eletrólito.

Segundo Peabody (2001), para que um revestimento seja totalmente efetivo na prevenção da corrosão ele precisa garantir três premissas: ser um efetivo isolante elétrico, conseguir ser aplicado continuamente, suportar o processo de alocação e operação e constituir uma camada perfeita que se mantenha com o tempo.

Norsworthy (2011), sugere critério para a definição de revestimento de estruturas submersas ou enterradas. Nele são considerados, a segurança, o custo, o ambiente de serviço, a temperatura de operação, a preparação da superfície, o método de aplicação, a área de solda, as juntas e revestimentos de outros componentes, a manutenção, a sinergia com a proteção catódica, o manuseio, o estoque e transporte de estruturas revestidas e as especificidades necessárias para esse revestimento.

Existem diversos tipos de revestimentos utilizados como proteção em estruturas metálicas, sendo eles: galvanização, alcatrão de hulha, asfalto, betume, epóxi ligado por fusão, poliolefinas, uretanos e misturas de uretano.

2.3.5.1.1 GALVANIZAÇÃO E OUTROS REVESTIMENTOS METÁLICOS

Segundo Gentil (1982), os metais utilizados no revestimento de estruturas têm suas ações protetoras explicadas pela formação de películas protetoras de óxidos, hidróxidos ou outros materiais, pelos oxidantes presentes no meio.

Para garantir a devida proteção é necessário que haja uma limpeza ideal das superfícies metálicas e a correta execução do método de aplicação, disso advém a garantia de boa aderência e impermeabilidade da película, essenciais para seu funcionamento.

Gentil (1982) alerta para os revestimentos catódicos em relação ao material revestido, pois quando inseridos no eletrólito é possível que se forme uma pilha galvânica a partir de qualquer falha, agravando seriamente se a relação área catódica/área anódica for elevada.

Aço galvanizado se trata de um aço que foi revestido com zinco (Zn) ou ligas de zinco. Esse tipo de revestimento é amplamente utilizado para estruturas de aço enterradas.

O revestimento de Zn para estruturas menores é comumente feito em imersão a quente, possuindo normalmente entre 0,1 e 0,13mm (715 a 930gZn/m²), para espessuras de 0,14 a 0,21mm (1000 a 1500gZn/m²) o aço é chamado de sobregalvanizado (Serra, 2014).

Nesse caso o revestimento de zinco funciona como anodo da estrutura, sendo sacrificado no lugar do aço, por isso o grau de proteção é medido através da massa de zinco presente no revestimento, desde que o mesmo seja aplicado corretamente.

De acordo com Gentil(1982), em ambientes muitos severos a taxa de corrosão do zinco pode ser muito alta, sendo ideal a utilização de alguma tinta para impedir o contato do zinco com os agentes corrosivos. Schweitzer (2010) afirma que isso ocorre, pois em meios urbanos a atmosfera contém muitos compostos de enxofre, que em contato com a umidade, transformam, os impermeáveis, carbonato de zinco e óxido de zinco, em sulfato de zinco e sulfureto de zinco, ambos solúveis e com pouca adesão à superfície de zinco, podendo ser lavados facilmente.

2.3.5.1.2 ALCATRÃO DE HULHA, ASFALTO E BETUME

Betumes e asfaltos são materiais provenientes da destilação do petróleo e compostos por hidrocarbonetos alifáticos, enquanto os alcatrões advêm da destilação seca do carvão mineral (Gentil, 1982).

Segundo Schweitzer (2010), o alcatrão de hulha possui excelente resistência à água e seu uso é comum em tanques de água. Na versão epóxi - alcatrão de hulha possui ótima resistência a ácidos fracos, alcalinos fracos, água salgada e água pura sendo uma ótima opção para tanques de óleo cru, estações de tratamento de esgoto e trabalhos com água.

Norsworthy (2011) relata que o alcatrão de hulha foi um dos primeiros tipos de revestimento a ser bem sucedido como proteção anticorrosão.

Os asfaltos e alcatrões possuem ótima resistência aos agentes químicos e à água, no entanto para melhorar características, como adesão e a dureza da película, outras resinas sintéticas são utilizadas, como: alquídicas e fenólicas (Gentil, 1982).

O asfalto não possui a mesma resistência química, flexibilidade e nem a mesma efetividade sob altas temperaturas que o alcatrão de hulha, embora seja mais barato que o mesmo (Norsworthy, 2011).

Existem diversos tipos de revestimentos proveniente da mistura do alcatrão com outros materiais. Sua aplicação pode ser tanto por spray quanto por pintura em superfícies limpas e preparadas por escovação ou jateamento.

Esse material tem a vantagem de ser facilmente reparado em campo, através da limpeza e reaplicação, no entanto não tem uma resistência à abrasão tão forte.

Norsworthy (2011) afirma que o alcatrão tem sido aplicado em estruturas submersas e enterradas com ótimos resultados (Figura 11), por outro lado o asfalto não costuma ser aplicado a metais submersos ou enterrados.

Serra (2014) reforça que, embora muito eficiente como revestimento, esses materiais têm sido preteridos devido à sua alta toxicidade.



Figura 11 – Tubulação revestida com tinta epóxi alcatrão de hulha

https://www.solucoesindustriais.com.br/images/produtos/imagens_10180/p_tinta-epoxi-alcetrao-de-hulha-7.jpg

2.3.5.1.3 EPÓXI LIGADO POR FUSÃO

As resinas epóxi são polímeros que, segundo Gentil(1982), são um dos meios mais importantes na prevenção da corrosão.

O método de aplicação de epóxi ligado por fusão é utilizado, com sucesso, desde a década de 60 (Norsworthy, 2011).

Os métodos atuais não necessitam da aplicação de primer e, a maioria das aplicações em plantas industriais, não precisam de aquecimento pós aplicação. (Peabody, 2001)

As espessuras utilizadas também mudaram através do tempo, Norsworthy (2011) afirma que as espessuras eram mais finas que os 0,30-0,41mm utilizados no fim da década de 90. Enquanto isso, Schweitzer (2010), diz que por muito tempo o FBE (Fusion-Bonded Epoxy) foi aplicado com espessuras de 0,20 - 0,25mm e atualmente costuma ser entre 0,30 e 0,63mm. O mesmo afirma que a tendência atual são aplicações finas de 0,406mm de espessura, o que é uma das vantagens do FBE, uma vez que ele não encobre os defeitos no metal permitindo a inspeção do elemento.

2.3.5.1.4 FILMES DE POLIOLEFINA

Os filmes de Poliolefina são utilizados sobre outra camada, uma vez que não aderem ao aço, podendo ser um adesivo, FBE ou primer de epóxi (Norsworthy, 2011).

Atualmente, o polietileno é a poliolefina mais utilizada, no entanto para temperaturas de operação elevadas, maiores que 65 até 88°C, a escolha costuma ser por polipropileno (Peabody, 2001).

O revestimento mais utilizado de poliolefina é o aplicado sobre o FBE. Esse método normalmente é aplicado em duas ou três camadas, sendo a primeira camada de FBE, com espessura entre 0,3 e 0,625mm. No caso do método de três camadas, a segunda, e em caso do método de duas camadas, a mais externa, seria de poliolefina quimicamente modificada (CMP). A ligação do CMP e do FBE é consideravelmente mais forte, isso porque ela é química e mecânica, o que dificulta a separação das mesmas, e quando se trata de sistema com três camadas o CMP tem boa ligação com a camada de poliolefina mais externa (Norsworthy, 2011).

Segundo Norsworthy (2011), poliolefina é um dos melhores materiais para evitar a infiltração de água e além disso lida bem com tensões do solo, com o transporte e com a execução, é resistente a diversos elementos químicos, ambientes e ataques bacteriológicos e excelente para operações em alta temperatura.

Esse revestimento é um dos melhores, especialmente para dutos, porque tem boa aderência, resistência à corrosão, resistência mecânica e resistência ao descolamento catódico, quando houver proteção catódica (Gentil, 1982).

2.3.5.1.5 URETANOS E MISTURAS COM URETANOS

Segundo Schweitzer (2010), os uretanos têm uma boa resistência à abrasão, ótima resistência aos ácidos minerais fortes e bases minerais fortes, considerável resistência a solventes e é mais utilizado em máquinas de lavar louça ou lava-jatos mecânicos.

Norsworthy (2011), afirma que os uretanos estão se tornando mais populares em estruturas enterradas e submersas. A aplicação delas sobre o FBE tem tido bons resultados uma vez que apresentou melhor proteção mecânica em construções em regiões rochosas, e para cruzamento de rodovias e rios. No entanto, é relatado que o mesmo perde eficiência devido à alta umidade, em utilizações submersas e enterradas com alta umidade.

2.3.5.2 PROTEÇÃO CATÓDICA

A proteção catódica (PC) é um método de redução da taxa de corrosão por meio da transformação do material protegido em cátodo da pilha eletroquímica (Peabody, 2001).

Serra (2014) considera a PC como a forma de proteção mais empregada e eficiente no controle de proteção de estruturas enterradas, que pode estar associada aos revestimentos orgânicos para aumentar ainda mais a proteção à corrosão.

Gentil (1982) ressalta que a utilização e o conhecimento sobre o tema se tornam cada vez mais importantes, uma vez que o uso da proteção catódica aumenta, com: novos oleodutos, gasodutos, adutoras, minerodutos, emissários submarinos, estacas de píeres, cortinas metálicas, camisas metálicas para poços, estacas metálicas de fundação entre outros elementos.

A PC ocorre quando a intensidade de corrente aplicada supera a corrente descarregada nas áreas anódicas e ainda há uma corrente residual percorrendo toda a superfície do elemento. Quando se tem essa condição então toda a superfície do elemento será cátodo da célula eletroquímica e por isso a taxa de corrosão será cessada (Peabody,2001).

Embora a PC possa ser feita em instalações sem revestimentos, a utilização em conjunto com algum revestimento protetor faz com que a aplicação da PC seja muito mais simples e consideravelmente mais econômica, já que nesse caso a PC é suplementar ao revestimento na resistência à corrosão (Gentil,1982).

Para a PC funcionar é necessário que a corrente proveniente do anodo seja descarregada no solo. O solo tem a função de receber a corrente e para isso acontecer os anodos têm que

ceder corrente para o mesmo com certa facilidade (resistividade baixa). Do material componente do anodo espera-se a que seja consumido com a taxa (QuilosAmpère/Ano) mais baixa possível provendo a corrente necessária e sem variações.

2.3.5.2.1 PROTEÇÃO CATÓDICA COM ANODOS GALVÂNICOS

Na proteção catódica com anodos galvânicos, um dos elementos metálicos é mais ativo na série galvânica que o outro elemento (o protegido), por isso é o anodo e corrói, por esse motivo nesse método a corrosão não é evitada, apenas é deslocada para um anodo externo. Essa célula de corrosão galvânica é constituída intencionalmente para que sua corrente produzida possa confrontar as células formadas normalmente no elemento protegido. Para isso é esperado que ela seja forte o suficiente para gerar corrente e voltagem para proteger o elemento, mas para que isso aconteça é necessário que o anodo do par galvânico fique alocado em solo com baixa resistividade, o que permite que o anodo descarregue uma boa intensidade de corrente (Gentil, 1982).

Devido às características intrínsecas do material, utilizado como anodo, a corrente disponível é limitada, conseqüentemente a voltagem também, por isso esse método costuma ser utilizado quando a corrente necessária para proteção do elemento não é alta (Peabody, 2001).

Segundo Schweitzer (2010), nos Estados Unidos a maioria dos anodos de sacrificio são de magnésio ou ligas do mesmo. A diferença de potencial entre o magnésio e o aço é da ordem de 1V, o que limita o comprimento protegido, mas permite uma flexibilidade e ganho de eficiência.

Gentil (1982) contribui afirmando que a utilização de PC com anodos galvânicos é mais utilizada em faixas de resistividade do solo de até 3000 Ohm.cm, uma vez que os potenciais são pequenos. Já Fitzgerald III (2011), afirma que os anodos galvânicos são utilizados em diversos tipos de estruturas podendo ser utilizados em ambientes com resistividade abaixo de 10000 Ohm.cm e pontua diversas vantagens, tais como:

- Sem necessidade de energia externa
- Pouca manutenção
- Instalação relativamente fácil
- Menor quantidade de inspeções e de banco de dados

E também desvantagens, como:

- Falta de ajustes, sem resistores em circuito de anodos
- Impressão limitada de corrente
- Possíveis custos elevados de substituição

- Necessidade de bom revestimento
- Necessidade de isolamento elétrica da estrutura protegida

2.3.5.2.2 PROTEÇÃO CATÓDICA COM CORRENTE IMPRESSA

Nessa metodologia o fluxo de corrente necessário para a proteção do elemento é gerado externamente por uma fonte geradora de corrente contínua, normalmente utiliza-se uma retificadora ligada à corrente alternada. Segundo Peabody (2001), embora esses equipamentos possam trabalhar em tensões menores que 10V chegando a até 100V, na maioria dos casos eles trabalham entre 10 e 50V, existindo equipamentos com correntes máximas menores que 10A indo até centenas de amperes.

Nesse sistema para descarregar a corrente no solo são utilizados anodos inertes, que dependem das características e aplicações do meio em que serão introduzidos. Os materiais normalmente utilizados são o grafite, o silicone, o titânio e nióbio banhado a platina (Schweitzer, 2010).

Serra (2014) sugere anodos inertes de grafite, de Fe-Silício (Si 14,5%) e de Fe-Si (14,5%)-Cromo (Cr 4,5%). Já Gentil (1982) sugere os mesmos e mais Chumbo (Pb 93%)-Antimônio (Sb 6%)-Prata (Ag 1%), Titânio, Nióbio ou Tântalo banhado a Platina, Titânio revestido com óxido de cério, Magnetita e Ferrita.

A vantagem da corrente impressa é que não há um limite de corrente e tensão, serão utilizadas as que forem necessárias, dada a resistividade do eletrólito ($>3000\text{Ohm.cm}$), a natureza do meio e o grau de aeração. Sendo normalmente utilizado entre 5,38 e 215,28mA/m² para estruturas sem revestimento (Schweitzer, 2010).

Gentil (1982) alerta para os problemas gerados pela superproteção, em primeiro caso o aumento dos gastos com o sistema (energia e anodos), mas caso essa superproteção seja excessiva outras desvantagens ocorrem, como a fragilização do aço ou empolamento do revestimento devido à liberação excessiva de hidrogênio, excesso de íons OH^- na superfície da estrutura, o que acelera a corrosão de metais como zinco, chumbo, estanho e alumínio na área catódica, em casos de revestimentos não compatíveis com meio básico pode ocorrer saponificação dos mesmos e causar corrosão eletrolítica em estruturas não protegidas presentes na vizinhança da estrutura protegida.

Em casos em que o anodo fica em solo, é interessante que seja feito um enchimento ao redor do mesmo, possibilitando a diminuição da resistividade. Gentil (1982), Schweitzer (2010) e Serra (2014) afirmam que o ideal é um enchimento com coque metalúrgico, sendo que o

segundo e o terceiro recomendam uma mistura do coque metalúrgico com gesso hidratado e cloreto de sódio e o primeiro fala em resistividade elétrica máxima de 100 Ohm.cm.

3 METODOLOGIA

A metodologia adotada para este estudo foi dividida em quatro partes (Figura 12), sendo: (1) caracterização dos produtos da corrosão nas estacas exumadas, (2) classificação da agressividade dos solos, (3) análise do comportamento da corrosão de aço carbono e aço patinável no mesmo solo estudado, e (4) análise do comportamento dos parâmetros.

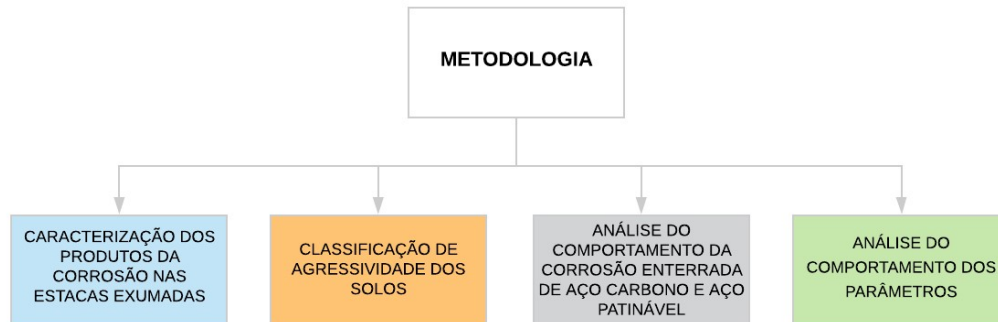


Figura 12 - Fluxograma das divisões da metodologia

3.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DA CORROSÃO NAS ESTACAS EXUMADAS

A caracterização dos produtos da corrosão nas estacas exumadas é necessária para interpretar o que houve com o elemento e como ocorreu o ataque corrosivo. Para isso, foram necessárias análises de imagens, com microscopia óptica e medição da espessura corroída ao longo do tempo de exposição (Figura 13).

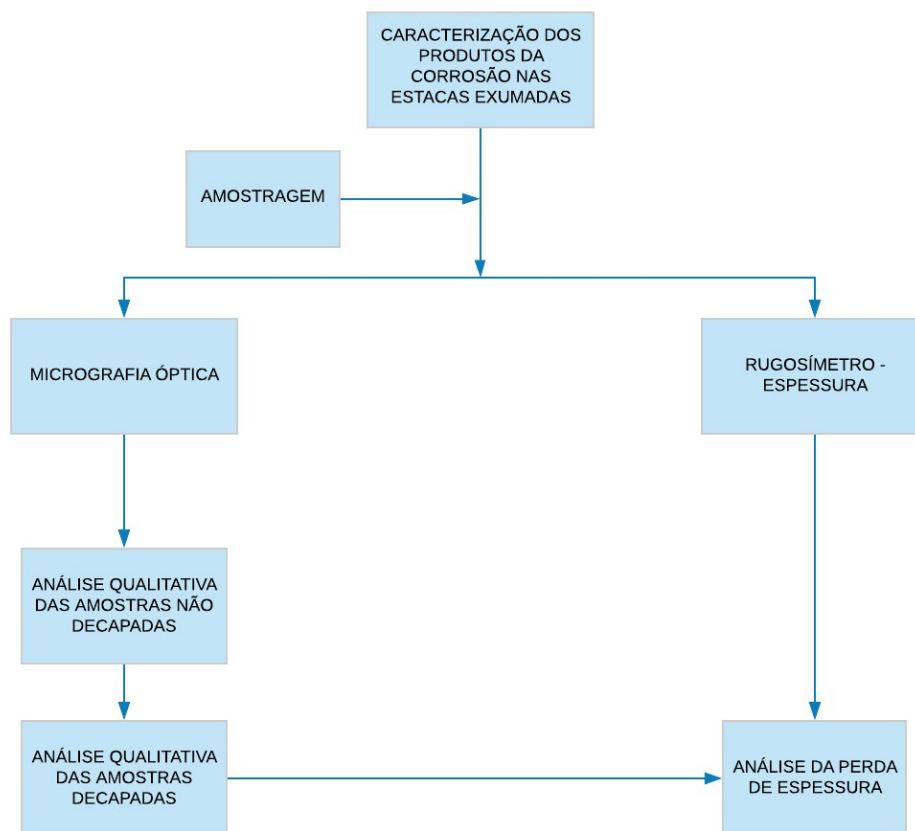


Figura 13 - Fluxograma da metodologia da caracterização dos produtos da corrosão nas estacas exumadas

3.1.1 AMOSTRAGEM DAS ESTACAS

As amostras utilizadas para a análise de caracterização do produto de corrosão são provenientes de duas estacas helicoidais (E1 e E2), com propriedades geométricas resumidas na Tabela 4, com 15m de profundidade extraídas do Campo Experimental de Fundações da EESC-USP, em São Carlos-SP. Estas estacas foram inicialmente utilizadas no trabalho de Schiavon, Tsuha e Thorel (2018), ficaram instaladas no solo por aproximadamente quatro anos, desde 05/2014 até 02/2018, quando foram exumadas para esta pesquisa. Para efeito de comparação, foi também analisada uma amostra de estaca E3, que foi instalada no solo e retirada, e permanecendo por aproximadamente 2 anos (E3 - 27/11/2015 – 02/2018) exposta às intempéries da atmosfera. Suas propriedades geométricas estão resumidas na Tabela 5.

O terreno do Campo Experimental da EESC/USP é representativo de grande parte da região centro-oeste do Estado de São Paulo, com características lateríticas e perfil não saturado. Em pesquisas anteriores, foram realizados ensaios SPT em sondagens de simples reconhecimento e ensaios de cone (Figura 14). O perfil do terreno é formado por uma camada superficial intemperizada, com espessura variando entre 5 e 7m, de origem coluvial e aluvial,

geologicamente denominada de Sedimento Cenozóico. A camada superficial deste terreno é considerada porosa, pouco compacta e de comportamento colapsível.

Tabela 4 – Propriedades geométricas das estacas E1 e E2

Diâmetro Externo Haste	101,6mm
Espessura da Parede	7,1mm
Diâmetro da Hélice	305mm
Profundidade	15m
Número de Hélices	1

Tabela 5 - Propriedades geométricas da haste E3

Diâmetro Externo	88,9 mm
Espessura da Parede	7,62mm

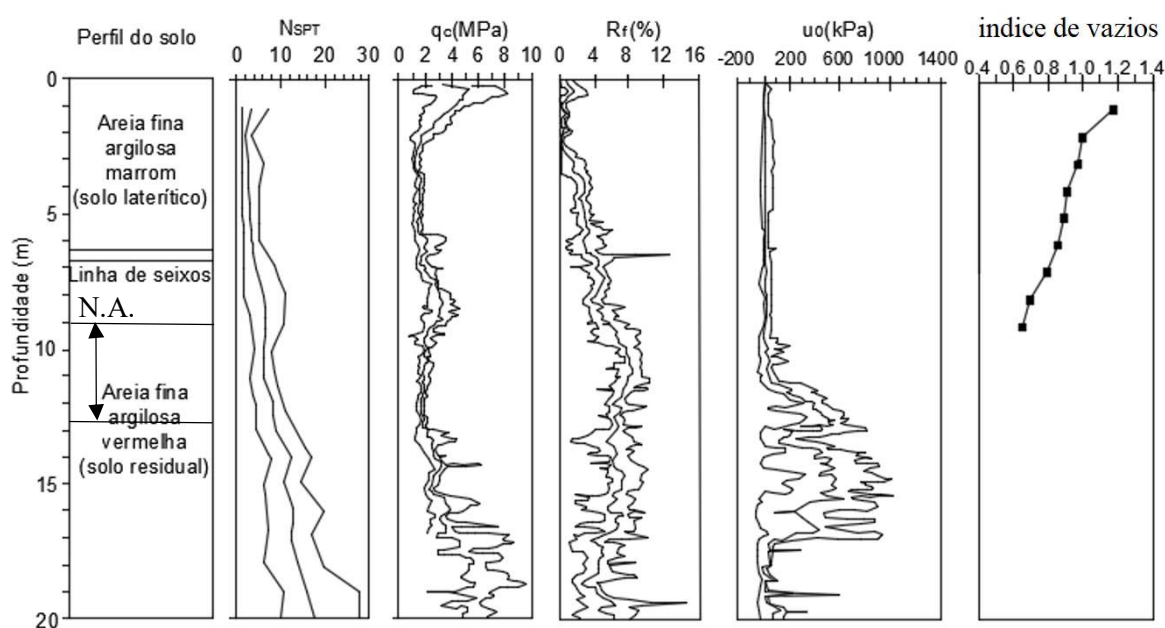


Figura 14 - Resultados de ensaios de campo realizados no Campo Experimental de Fundações da EESC. (Adaptada de Vilar e Machado, 2003 e Menegotto, 2004)

O nível do lençol freático neste terreno varia aproximadamente de 9 a 12 m de profundidade de acordo com a época do ano. Moraes (2019) monitorou o nível do N.A. no Campo Experimental de Fundações da EESC (Figura 15) em período que abrange o que as estacas estudadas permaneceram enterradas no terreno (entre 05/2014 até 02/2018). Durante o período em que a estaca ficou instalada no solo, o N.A. variou de -9,1 m a -12,7 m abaixo do nível do terreno.

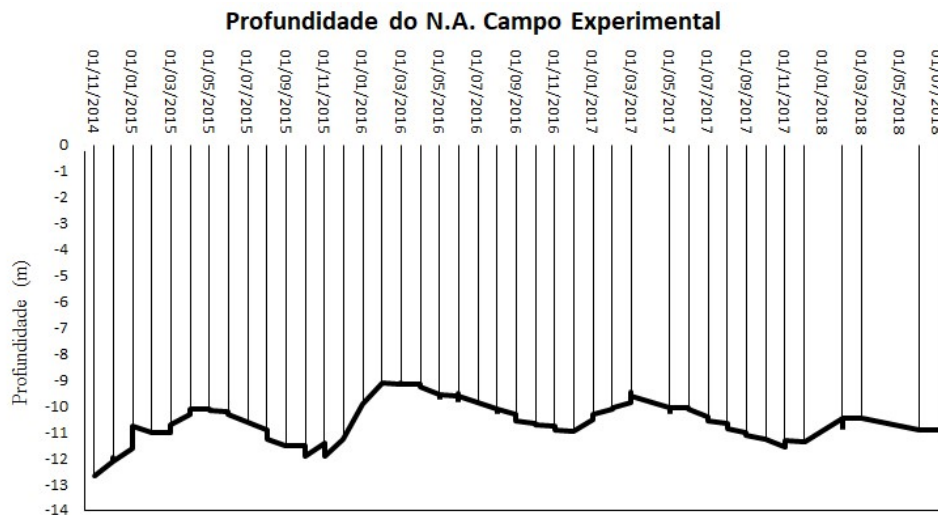


Figura 15 - Variação do nível do lençol freático do Campo Experimental da EESC/USP entre novembro/2014 e julho/2018 (Morais, 2019)

Para o processo de exumação das estacas estudadas foi utilizado caminhão munck com rotor acoplado ao braço (Figura 16 e Figura 17). Estas estacas são compostas de várias hastes tubulares emendadas. Conforme as hastes eram retiradas do solo, elas iam sendo embaladas com filme de PVC para que o contato com oxigênio e umidade fosse limitado até a usinagem das amostras (Figura 19).



Figura 16 –Exumação das estacas



Figura 17 – Munck exumando as estacas

Para a análise da corrosão dessas estacas, foram extraídas seções transversais (“anéis”) das hastes. Cada haste teve de duas a três seções extraídas, de pontos visualmente representativos do que ocorreu naquela profundidade. Cada seção transversal possuía aproximadamente 20 mm de espessura.

A extração das amostras foi feita na oficina mecânica da EESC com auxílio de serra mecanizada. Após essa etapa, foi realizado o faceamento interno das amostras, depois a divisão ao meio e então o lixamento das seções transversais provenientes dessa divisão (Figura 18, Figura 20 e Figura 21).

Cada amostra de seção transversal foi nomeada de acordo com a estaca de origem (E1 ou E2 para as estacas exumadas e E3 para a haste exposta a atmosfera por 2 anos) e de qual pedaço de estaca (haste) foi retirada (1, 2 e etc.), sendo a número 1 relativa a haste em contato com a superfície (crescendo com a profundidade). Também foram identificadas de acordo com a região da haste de onde foram extraídas (topo da haste ou da parte mais profunda, respectivamente superior - S ou inferior - I), e também quanto à metade da seção analisada (metade do “anel”), sendo assim nomeadas de 1 ou 2. Esse sistema é demonstrado nas Tabela 6, Tabela 7 e Tabela 8, que descrevem as amostras e suas profundidades, quando se aplicar, senão não se aplica (N/A).



Figura 19 – Hastes das estacas acondicionadas com filme PVC



Figura 18 – Serra mecanizada extraindo amostras

Para as análises por imagens feitas com câmera fotográfica e microscópio óptico, as amostras foram utilizadas nestas condições citadas acima. Para a análise voltada a quantificar a corrosão ocorrida na amostra, foi necessário comparar as amostras das estacas E1 e E2, retiradas do solo, com amostras expostas à atmosfera. Para isso foi necessário que as mesmas passassem por um processo de decapagem, para remoção de toda a camada do produto resultante da mistura dos resíduos do processo corrosivo com o solo. Esse processo de limpeza foi feito através de banho de uma solução decapante.

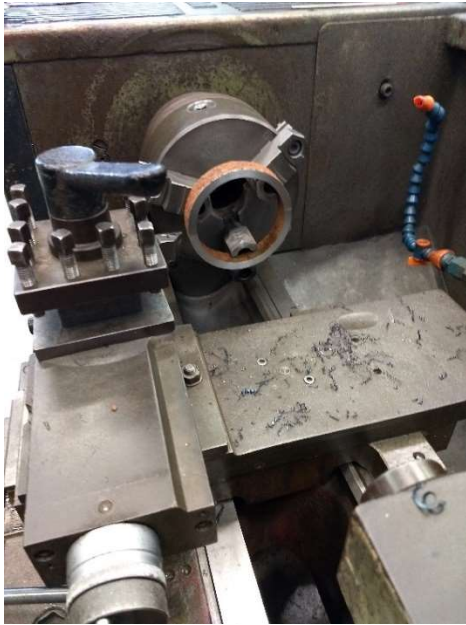


Figura 20 – Faceamento interno no torno



Figura 21 – Amostra das Estacas Helicoidais

A solução decapante utilizada, recomendada pela AASHTO G1 – 03 (AASHTO, 2017), é composta por 2,5 g de hexametenotetramina, 500 ml de ácido clorídrico 37% e água deionizada até completar 1000 ml.

Tabela 6 – Amostras da Estaca

Exumada 1

AMOSTRAS DA ESTACA ENTERRADA 1	
AMOSTRA	PROFUNDIDADE(m)
E1-1-S1	0,5m
E1-1-S2	0,5m
E1-1-I1	1,4m
E1-1-I2	1,4m
E1-2-S1	2,2m
E1-2-S2	2,2m
E1-2-I1	2,7m
E1-2-I2	2,7m
E1-3-S1	3,8m
E1-3-S2	3,8m
E1-3-I1	4,5m
E1-3-I2	4,5m
E1-4-S1	5,6m
E1-4-S2	5,6m
E1-4-I1	6,2m
E1-4-I2	6,2m
E1-5-S1	7,0m
E1-5-S2	7,0m
E1-5-I1	7,8m
E1-5-I2	7,8m
E1-6-S1	8,8m
E1-6-S2	8,8m
E1-6-I1	9,5m
E1-6-I2	9,5m
E1-7-S1	10,5m
E1-7-S2	10,5m
E1-7-I1	11,3m
E1-7-I2	11,3m
E1-8-S1	12,4m
E1-8-S2	12,4m
E1-8-I1	12,8m
E1-8-I2	12,8m
E1-9-S1	14,0m
E1-9-S2	14,0m
E1-9-I1	14,4m
E1-9-I2	14,4m
HÉLICE	15,0m

Tabela 8 – Amostra do haste exposta

ao ar livre

AMOSTRAS DA ESTACA EXPOSTA AO AR LIVRE	
AMOSTRA	PROFUNDIDADE(m)
E3-S1	N/A
E3-S2	N/A
E3-S3	N/A
E3-S4	N/A

Tabela 7 – Amostras da Estaca

Exumada 2

AMOSTRAS DA ESTACA ENTERRADA 2	
AMOSTRA	PROFUNDIDADE(m)
E2-1-S1	0,4m
E2-1-S2	0,4m
E2-1-I1	0,8m
E2-1-I2	0,8m
E2-2-S1	1,8m
E2-2-S2	1,8m
E2-2-I1	2,5m
E2-2-I2	2,5m
E2-3-S1	3,5m
E2-3-S2	3,5m
E2-3-I1	4,2m
E2-3-I2	4,2m
E2-4-S1	5,3m
E2-4-S2	5,3m
E2-4-I1	6,0m
E2-4-I2	6,0m
E2-5-S1	7,2m
E2-5-S2	7,2m
E2-5-M1	7,5m
E2-5-M2	7,5m
E2-5-I1	8,0m
E2-5-I2	8,0m
E2-6-S1	8,8m
E2-6-S2	8,8m
E2-6-I1	9,2m
E2-6-I2	9,2m
E2-7-S1	10,3m
E2-7-S2	10,3m
E2-7-I1	11,0m
E2-7-I2	11,0m
E2-8-S1	12,2m
E2-8-S2	12,2m
E2-8-I1	12,6m
E2-8-I2	12,6m
E2-9-S1	13,7m
E2-9-S2	13,7m
E2-9-I1	14,0m
E2-9-I2	14,0m
HÉLICE	15,0m

A solução foi produzida em b quer de 1000 ml, onde foi introduzido 2,5g de hexametenotetramina, pesado previamente em balança de precisão (0,001 g). Depois, era acrescentado 500 ml de ácido clorídrico (HCl) e então completava-se 1 L com água destilada. A mistura era feita com bastão de vidro e sob temperatura ambiente, como preconiza a norma de referência.

A inser o das amostras na soluço foi feita em uma bandeja plástica, por dez minutos (Figura 22). Passado o tempo, as amostras eram lavadas em água corrente e escovadas, com escova de aço, com cuidado (Figura 23). Caso algum produto ainda sobrasse na superfície da amostra, a imersão era repetida, mas dessa vez por apenas cinco minutos e o processo se repetia até a total remo o do produto de corrosão.



Figura 22 – Imersão das amostras na soluço decapante



Figura 23 – Escova o das amostras

Quando terminado o processo de decapagem essas amostras estavam prontas para que fossem feitas imagens ópticas e para os ensaios com o rugosímetro. Um exemplo de amostra antes e depois da decapagem é mostrado na Figura 24.



Figura 24 – Amostras antes (A) e depois (B) da decapagem

3.1.2 IMAGEM DAS AMOSTRAS CORROÍDAS

A captura de imagens foi feita com câmera e microscópio óptico. As imagens na câmera foram feitas para permitir a visualização ampla das amostras (Figura 25), possibilitando entender como o processo corrosivo se deu na amostra como um todo, por sua vez as imagens no microscópio óptico têm foco em caracterizar a estrutura e a coloração dos pontos visualmente mais críticos (Figura 26 e Figura 27).

As imagens feitas com câmera foram efetuadas da parte interna, externa e vista superior, retratando a seção transversal. Já no caso da microscopia, as imagens aumentadas foram feitas da superfície externa, da interna e da vista superior, mostrando a redução de espessura da seção transversal da haste da estaca helicoidal. Essas imagens foram feitas tanto das amostras com carepa, quanto das amostras decapadas, isso habilita a relacionar a textura do resíduo da corrosão sobre a superfície da amostra com a corrosão causada na amostra.



Figura 25 – Imagem da Amostra E2-4-S1 feita com câmera

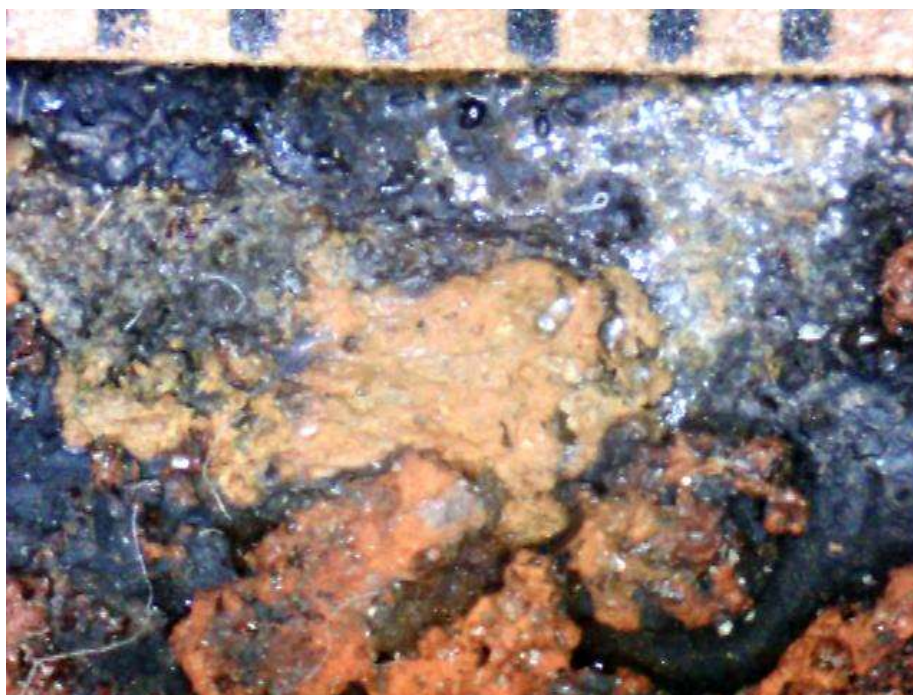


Figura 26 – Imagem da corrosão externa feita em microscópio óptico em seção de estaca que estava a 8m de profundidade

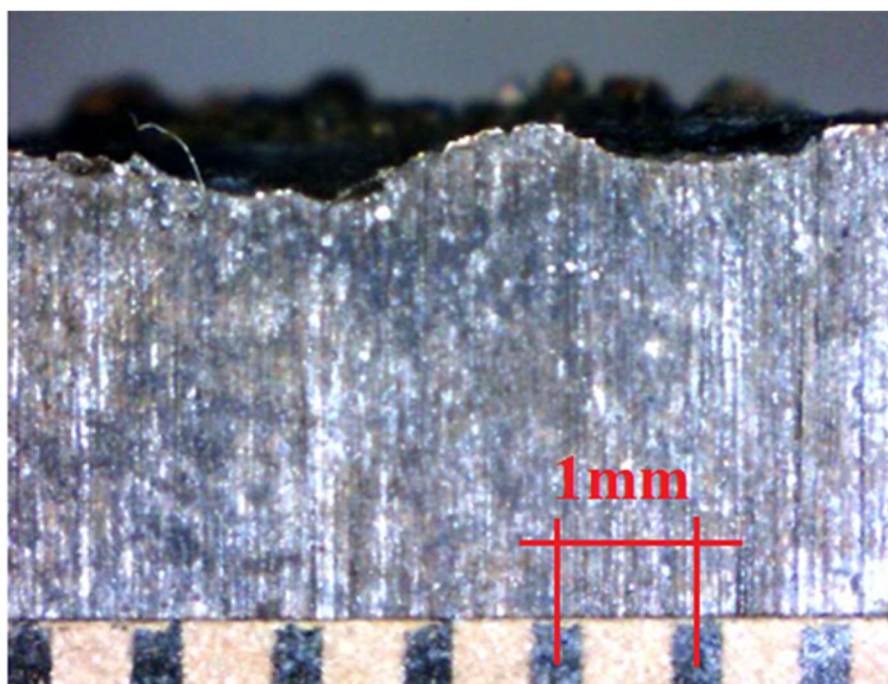


Figura 27 – Imagem da espessura corroída, feita em microscópio óptico, em amostra que estava a 8m de profundidade

3.1.3 MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DA CORROSÃO

O método quantitativo para medição da profundidade corroída foi a análise do perfil da superfície, das amostras removidas das estacas, com o rugosímetro.

Essa análise foi feita em cinco amostras distintas, sendo elas: E2-2-S2, E2-5-M1, E2-7I-2, E3-S-2 (Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8) e amostra de controle (E0). A amostra de controle se trata de um material que nunca passou por um processo de instalação no solo e nem ficou exposto às intempéries.

Com ajuda de régua e esquadro foi feita uma linha guia nas amostras, por onde seria passado o deflectômetro. O local da linha guia foi escolhido de acordo com análise visual prévia, tentando escolher pontos que eram representativos para superfície da amostra.

O ensaio com rugosímetro consiste em um deflectômetro, com precisão de 0,001mm, instalado sobre um suporte que, por sua vez, está sobre uma prancha, que permite o deslocamento longitudinal graduado desse suporte. Nos quatro pés da prancha existem niveladores que permitem que ela seja nivelada (Figura 28).



Figura 28 – Rugosímetro nivelado durante ensaio de amostra

No suporte fica o deflectômetro que se desloca junto com o mesmo, por isso é viável passar o deflectômetro sobre determinada superfície (Figura 29).

Para garantir as melhores condições do ensaio, foi utilizado níveis de mão, para assegurar o nivelamento da prancha, e um torno morsa para certificar a estabilidade das amostras durante o ensaio (Figura 30).



Figura 29 – Medição com deflectômetro



Figura 30 – Esquema de medição da rugosidade

Devido à sensibilidade de 0,001mm do deflectômetro e da gradação longitudinal de aproximadamente 0,0625mm foi possível ter um perfil adequado da rugosidade da superfície analisada. Como as amostras foram ensaiadas perpendicularmente ao seu eixo, a análise foi feita considerando-se que na linha, onde o deflectômetro passaria, a superfície fosse horizontalmente plana. Por esta razão, na análise gráfica foi feita a rotação das curvas para corrigir qualquer desvio que a não perpendicularidade da linha guia tivesse causado.

Em casos em que a linha guia não ficou em superfície plana, ou seja, sem perpendicularidade da linha guia com a amostra, era calculada, através da ferramenta Solver do Excel, a equação da reta que resultasse no menor erro quadrado. Com isso era garantido que o R quadrado desse próximo de 1, o que significa com ótimo ajuste.

Com essa equação calculada era possível fazer a rotação da curva e utilizar a reta calculada como referência para cálculo da rugosidade.

A partir dos gráficos da superfície, da curva rotacionada e da reta de referência foi possível fazer os cálculos para análise da rugosidade como rugosidade média (R_m), altura máxima de pico (R_{pc}), profundidade máxima de pite (R_{pt}) e altura máxima do perfil de rugosidade (R_p) do percurso medido (L_m).

Sendo a rugosidade média a soma dos módulos de todos picos e pites medidos dividida pelo número de divisões do percurso medido (n), a altura máxima de pico, a profundidade

máxima de vale e a altura máxima do perfil rugosidade, que é a soma da altura máxima de pico e da profundidade máxima de vale.

3.2 CLASSIFICAÇÃO DE AGRESSIVIDADE DOS SOLOS

Uma das partes fundamentais para entendimento do processo corrosivo é o eletrólito. No entanto, quando se trata de corrosão enterrada o eletrólito é o solo, meio heterogêneo, por isso é essencial delimitar os parâmetros, que influenciam o processo corrosivo, que serão considerados, para que, assim, seja possível nortear a investigação. Para definir quais são os parâmetros de análise nesta pesquisa, foi feita a escolha de um critério de agressividade do solo, o critério de Trabanelli.

O critério de agressividade do solo de Trabanelli, elencado como um dos mais completos (Serra, 2014), considera sete parâmetros (Figura 31) para a classificação da agressividade, sendo eles: umidade, resistividade, pH, potencial de corrosão, presença de cloreto, sulfato e sulfeto. Para cada um desses parâmetros existem faixas onde são atribuídos índices parciais (Tabela 9), e, posteriormente, a soma desses índices parciais resulta em um índice total.

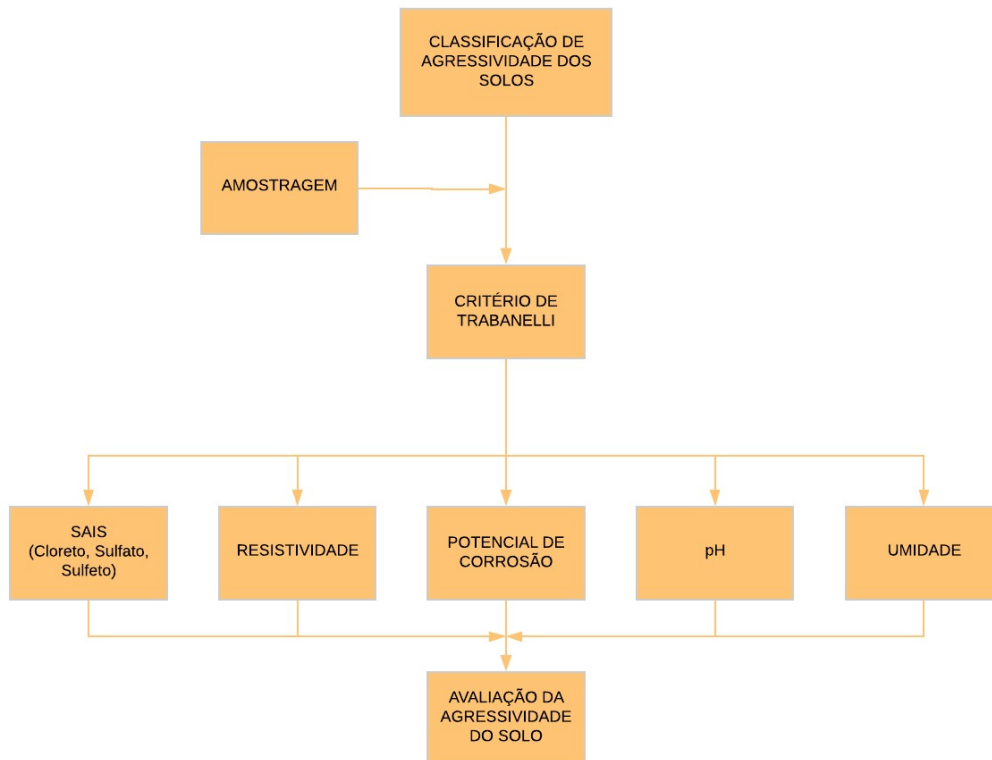


Figura 31 – Fluxograma da Classificação de Agressividade do Solo

O critério é composto por quatro classificações de agressividade e a cada uma delas é dado um intervalo de índice total de agressividade (ITA), sendo elas: Não Agressivo ($ITA \geq 0$),

Ligeiramente Agressivo ($-1 \geq ITA \geq -8$), Medianamente Agressivo ($-8 \geq ITA \geq -10$) e Muito Agressivo ($ITA < -10$), por isso o solo é classificado de acordo com o intervalo em que seu índice total de agressividade se aloca (Tabela 10).

A metodologia consiste na amostragem de solo em diversas profundidades e de ensaios para medir, com confiabilidade, os parâmetros necessários para alimentar o critério escolhido.

Tabela 9 – Índices Parciais de Agressividade do Solo (Trabanelli, 1972 apud Serra, 2014)

Parâmetros do Solo	Faixa	Índice Parcial
Resistividade (ohm.cm)	> 12000	0
	12000 a 5000	-1
	5000 a 2000	-2
	< 2000	-4
E redox (mV/ENH)	> +400	2
	+400 a +200	0
	+200 a 0	-2
	< 0	-4
pH	> 5	0
	< 5	-1
Umidade (%)	< 20	0
	> 20	-1
Cl- (mg/kg)	< 100	0
	100 a 1000	-1
	> 1000	-4
Sulfato (mg/kg)	< 200	0
	200 a 300	-1
	> 300	-2
Sulfeto(mg/kg)	Ausente	0
	< 0,5	-2
	> 0,5	-4

Tabela 10 - Critério de Agressividade do Solo (Trabanelli, 1972 apud Serra, 2014)

Classificação do Solo	Índice Total de Agressividade
Não Agressivo	0
Ligeiramente Agressivo	-1 a -8
Medianamente Agressivo	-8 a -10
Muito Agressivo	< -10

Com posse das informações sobre a corrosão ocorrida nas estacas estudadas é possível traçar conexões entre a corrosão observada nas amostras e o esperado pelo critério supracitado e verificar se existe, ou não, uma convergência entre eles.

3.2.1 AMOSTRAGEM DA CLASSIFICAÇÃO DE AGRESSIVIDADE DOS SOLOS

A metodologia nessa etapa é composta tanto por ensaios de campo, quanto por ensaios em laboratório. A amostragem dos ensaios que constituem essa etapa é formada por coleta de água do lençol freático e de amostras de solo para cada metro de profundidade do terreno estudado.

Para a extração de amostra de solo foi utilizado o trado com hastes e o amostrador de SPT. Além disso precisou-se da contribuição de dois operários e do peso de 65kg, para efetuar a retirada de amostras até 12m de profundidade (Figura 32).

Para cada metro foram extraídos de 3 a 4kg de amostra de solo, quantidade suficiente para que todos os ensaios fossem feitos. Depois de removidas, cada amostra de solo necessitava de um tipo de preparo, a depender da metodologia de ensaio que seria realizado, por isso, quando pertinente, será explicado o que precisou-se fazer com as mesmas.



Figura 32 – Operários inserindo o amostrador com as hastes no furo

3.2.2 TEOR DE UMIDADE E PERMEABILIDADE

A partir das amostras de solo retiradas em diversas profundidades em condições de umidade natural, foram ensacadas e mantidas embaladas até que pudessem ser acondicionadas para o ensaio de determinação do teor de umidade do solo.

Ele foi medido em laboratório, a partir das amostras retiradas do campo, pesadas (massa úmida) e colocadas em estufa, submetendo-as à 105°C por 24h, pesando-as novamente depois (massa seca), como descrito na NBR 6457 (ABNT, 2016).

A medição do teor umidade foi realizada com três repetições, para que então, ao fim do ensaio, fosse calculado o teor médio de umidade de determinada profundidade.

Para a medição do grau de permeabilidade do solo optou-se pelo ensaio de duas cargas do permeâmetro de Guelph. O mesmo foi escolhido pois além de ser prático, precisa de pouca água, é rápido e se associado com tensiômetro permite traçar a curva de permeabilidade vs. sucção do solo. Ademais, a intenção era medir a condição de permeabilidade da camada mais

superficial, que nesse caso se trata de uma areia argilosa com permeabilidade esperada dentro da faixa de medição do equipamento.

Para a realização do ensaio de permeabilidade com o permeâmetro de Guelph, foi utilizado um trado, anexado a uma haste, para escavar até aproximadamente 60cm.

Com o furo pronto, foi instalado o permeâmetro de Guelph, que devido à regularidade do terreno foi instalado o Guelph sem o tripé (Figura 34).

Para cálculo da condutividade hidráulica saturada de campo e do fluxo mátrico foi utilizado o método com duas cargas, sendo elas: 5cm (H_1), e 10cm (H_2).



Figura 33 – Ferramentas utilizadas na abertura do furo de ensaio. Em sequência, trado, haste, nivelador e escova

O preenchimento das informações era feito na planilha do ensaio que está no ANEXO A.

Ambos os ensaios foram realizados com reservatório duplo de 35,47cm² aberto.

O critério utilizado para considerar o fluxo constante foi de três taxas de infiltração constantes, sendo cada uma delas feitas a cada minuto para a carga H_1 e para carga H_2 .

Além do ensaio de permeabilidade, foi utilizado um tensiômetro (Figura 35), na mesma profundidade do permeâmetro, para acompanhar a sucção no solo por sete dias e assim orientar a faixa em que o solo trabalha, permitindo, através da Equação 9, traçar o gráfico Permeabilidade x Sucção.



Figura 34 – Permeâmetro de Guelph instalado sem tripé



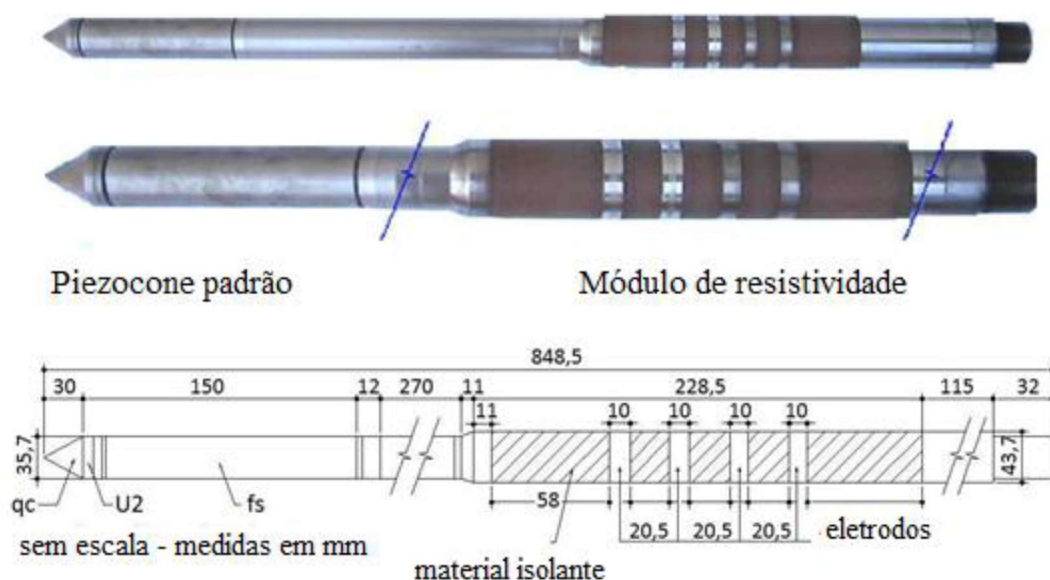
Figura 35 – Tensiômetro instalado para medir sucção em campo

3.2.3 RESISTIVIDADE

3.2.3.1 MEDIÇÃO EM CAMPO

A resistividade elétrica, do terreno em estudo, medida pelo ensaio de campo de penetração de piezocone de resistividade (RCPT-U) executado pelo Prof. Heraldo Giachetti, da UNESP de Bauru, em 2002. Além desses dados, na presente pesquisa foi feita a medição em laboratório para confirmação dos valores obtidos em campo, uma vez que as medições RCPT-U foram feitas há quase duas décadas. No entanto, a não ser que tivesse ocorrido interferências externas, como troca da camada de solo ou contaminação do mesmo, é pouco esperado que tenham ocorrido mudanças drásticas nos resultados.

O ensaio RCPT-U consiste em um ensaio de cone piezométrico com sensores chamados de módulos resistivos, que medem a resistividade (Figura 36).



O ensaio RCPT-U é executado a partir da cravação de uma haste padronizada no solo. De acordo com a resistência à cravação no solo, os sensores obtêm a resistência de ponta e a lateral. Com o desenvolvimento do ensaio, outros sensores foram sendo acoplados, como: o piezômetro, que mede a poropressão durante a cravação, e o módulo de resistividade, que é composto de dois a oito sensores (Weemes, 1990 apud Pacheco, 2004). O sensor mais próximo da ponta é o de potencial, ele é responsável por gerar a corrente elétrica, enquanto o mais distante é o sensor aterrado, ou seja, de potencial nulo, já os intermediários são utilizados para calcular a diferença de potencial. Conforme o cone vai sendo cravado as medições de poropressão e de resistividade são feitas concomitantemente.

Todos os resultados obtidos durante o ensaio estão presentes no ANEXO B.

Segundo Campanela et al.(1990 apud Pacheco, 2004) esse tipo de ensaio possui erros de 1%, muito abaixo dos erros de outros métodos que vão de 5 à 10%.

3.2.3.2 CÁLCULO DA RESISTIVIDADE ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DA CONDUTIVIDADE EM LABORATÓRIO

O cálculo da resistividade do solo em laboratório foi realizado para confirmar a leitura feita os dados de campo, uma vez que se trata de um dos parâmetros mais importantes para a análise de agressividade do solo.

Esse cálculo foi feito através da medição da condutividade elétrica do solo, uma vez que a resistividade é o inverso da condutividade, com um condutivímetro Analyser 650 (Figura 37).



Figura 37 – Condutivímetro Analyser 650

Para a realização do cálculo da resistividade dos solos em laboratório foram utilizadas as amostras de solo retiradas em diversas profundidades e a partir delas foram feitas soluções solo:água deionizada, com proporção, em massa, de 1:2,5 (Figura 38).

Primeiro, foi colocado 10g de amostra de solo, medido em uma balança com precisão até a segunda casa decimal, em um copo descartável e depois colocado em torno de 2,5 vezes a massa em água deionizada. Com o auxílio de um bastão de vidro foi feita a homogeneização da solução e então aguardava-se 30min para começar a medição da condutividade.

Para cada profundidade foram realizadas três medições, que consistem na submersão do eletrodo do condutivímetro na solução até que o leitor indique a estabilização do valor. Com três medidas para cada profundidade foram calculadas as médias e então o cálculo da resistividade média, como na Equação 13.

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad \text{Equação 13}$$

Sendo,

ρ , a resistividade elétrica

σ , a condutividade elétrica.



Figura 38 – Solução das amostras

3.2.4 MEDIÇÃO DO pH

As amostras utilizadas para medição do pH foram as mesmas que as utilizadas na medição da condutividade. Elas se tratam de três repetições de solução produzidas com solo e água deionizada em proporção solo:água de 1:2,5, que então eram agitadas com bastão de vidro e deixadas repousando por 30min, por fim eram feitas as medições com a utilização de um phmetro digital, marca Digimed e modelo DM21 (Figura 39).



Figura 39 – pHmetro Digimed DM21

O eletrodo é submergido na solução e espera-se o valor medido estabilizar, para então ler o valor apresentado pelo equipamento. Com três medidas para cada profundidade foi possível calcular o valor médio do pH na profundidade.

3.2.5 MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO DOS SOLOS

A medição do potencial de corrosão das amostras de solo foi feita com a utilização de um potenciômetro, da marca Micronal e modelo pHmetro B374 (Figura 40), que possui um eletrodo capaz de medir a diferença de potencial entre o meio, ao qual ele está submetido, e o eletrodo de referência, no caso referenciado ao eletrodo de hidrogênio.

Esse equipamento foi utilizado nas mesmas amostras que serviram para medição de pH e de condutividade. Assim como nos outros parâmetros, o eletrodo era submergido na solução e era aguardado a estabilização do valor no leitor.

A partir dos três valores para cada profundidade foi possível calcular a média na profundidade.



Figura 40 – Potenciômetro Micronal B374

3.2.6 MEDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SAIS

A medição da concentração de sais nas amostras de solo foi feita para cloreto, sulfato e sulfeto, como requer o critério de classificação de agressividade do solo do TrabANELLI. Essas medições foram realizadas em amostras de solo retiradas em diferentes profundidades, acondicionadas no gelo e levadas, antes de 24h, para o laboratório.

O laboratório que realizou as medições foi o laboratório Keller Ambiental, localizada na cidade de Araraquara – SP e com acreditação, dada pela Anvisa, Nº 0400. Ver ANEXO F.

As medições de sulfato foram feitas através do método ME 48, revisão 10, que consiste em um ensaio de cromatografia de íons. A acreditação para essa metodologia possui limite de quantificação (LQ) de 12,1mg/kg de solo. Para o cloreto foi utilizada a mesma metodologia, mas por se tratar de um parâmetro diferente, com LQ de 6,3mg/kg.

Para o sulfeto, o método utilizado foi o ME 60, revisão 05, com LQ de 10mg/kg. Esse método consiste na determinação do sulfeto através do método colorimétrico com azul de metileno.

3.2.7 CLASSIFICAÇÃO DA AGRESSIVIDADE DO SOLO

Após feitas todas as medições, foi possível classificar a agressividade do solo atribuindo índices parciais para o valor de cada parâmetro (Tabela 9), e somando os índices parciais para obter o índice total, necessário para a classificação do solo pela Tabela 10.

Com a classificação da agressividade das camadas de solo e os resultados das amostras exumadas foi possível avaliar a convergência do método de classificação com os resultados obtidos das amostras corroídas.

3.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CORROSÃO ENTERRADA DE AÇO CARBONO E AÇO PATINÁVEL

Essa etapa indica como o aço carbono e o aço patinável se comportam sob a agressividade de um mesmo solo, no caso do presente estudo os solos do Campo Experimental da EESC-USP.

Esse ensaio consiste na análise da forma da corrosão ocorrida em amostras metálicas e na medição da perda de massa das mesmas submetidas a um meio (solo neste caso) ao longo do tempo. Os resultados permitem relacionar as possíveis diferenças de perda de massa com o tipo de liga do aço corroído (Figura 41).

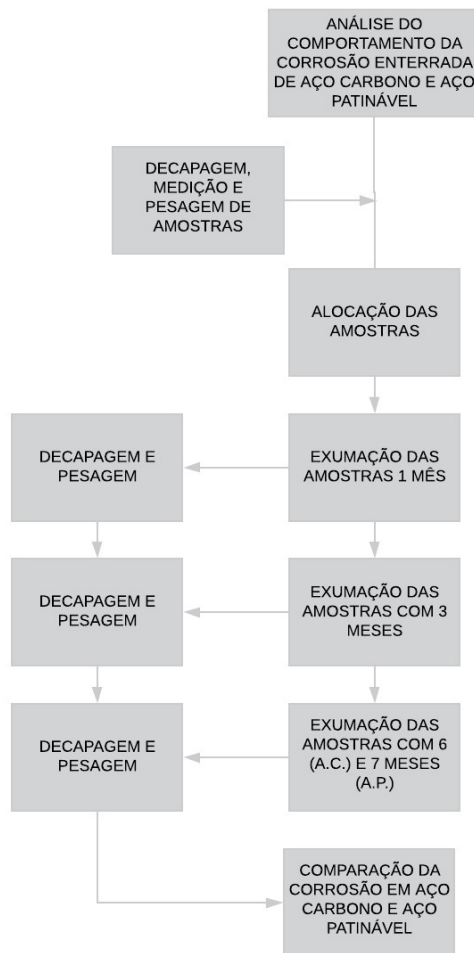


Figura 41 - Fluxograma da análise do comportamento da corrosão enterrada de aço carbono e aço patinável

3.3.1 AMOSTRAGEM DE AÇO CARBONO E AÇO PATINÁVEL

As análises de corrosão foram feitas em amostras de aço patinável e de aço carbono, sob a atuação, in situ, do solo que compõe o perfil do campo em estudo.

Primeiramente, foram cortadas, com erosão a fio, amostras de aço patinável para que ficassem com a espessura menor e tivessem forma e dimensões mais controladas. Após essa usinagem, as amostras foram banhadas com solução decapante (água deionizada, ácido clorídrico e hexametilenotetramina) com intuito de deixar apenas o metal virgem em contato com o solo (Figura 42).

A medição e a pesagem dessas amostras fizeram-se necessárias para que se determinasse a densidade média do material.

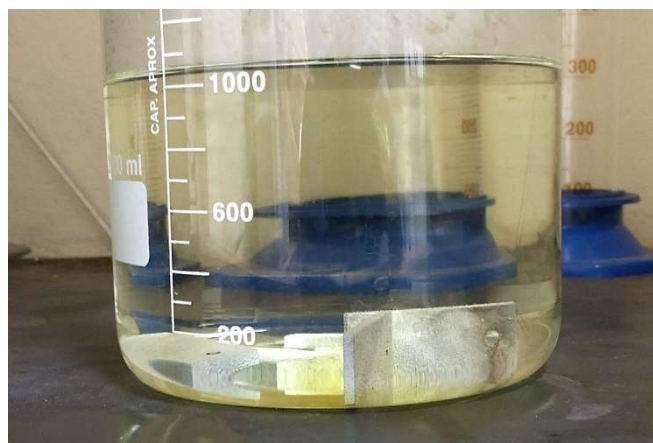


Figura 42 – Decapagem das amostras utilizadas no ensaio de perda de massa.

Os resultados médios obtidos, considerando nove amostras, foram: $7,712\text{g/cm}^3$ para o aço patinável e $7,741\text{g/cm}^3$ para o aço carbono, enquanto os desvios padrão foram $0,047$ e $0,138\text{g/cm}^3$ respectivamente, e então era calculado o coeficiente de variação (CV), com valores de $0,6\%$ e $1,79\%$, respectivamente (Tabela 11).

As amostras de aço carbono foram decapadas, pesadas e medidas para que fosse feito o mesmo processo empregado nas amostras de aço patinável. Após o controle dimensional das mesmas, elas foram enumeradas, com auxílio de linha de pesca e etiquetas plastificadas, e levadas para seu ponto de alocação no terreno de estudo.

Para a realização do ensaio de perda de massa in situ, foi necessário o auxílio de uma retroescavadeira para que fosse escavado uma vala de $1,0 \times 2,0 \times 1,5\text{m}$ (largura x comprimento x profundidade) (Figura 43).

Foram alocadas três amostras de aço carbono para um lado da vala, com espaço de 20cm entre elas, e para o outro três amostras de aço patinável, também espaçadas de 20cm (Figura 44). Após a alocação das amostras foi iniciado o aterramento da vala, que foi feito de forma manual e sem controle de compactação. A cada 10cm a superfície era compactada com enxada.

As amostras, depois de enterradas, foram submetidas a todas as intempéries de campo, bem como a agressividade do solo onde estavam alocadas.

O processo de exumação consistia na escavação manual, com uso de cavadeira, até o nível das amostras, mas tentando escavar o mínimo necessário para não causar desconfinamentos das amostras que continuariam sendo ensaiadas. Quando eram extraídas o poço era recoberto sem nenhum controle.

Para o processo de exumação das amostras tinham-se três marcos, de um mês, onde foram retiradas seis amostras, três de aço carbono e três de aço patinável. O próximo marco foi com três meses, onde novamente foram exumadas seis amostras, três de cada tipo de aço.

O último marco seria com seis meses, porém com seis meses foram removidas apenas as três amostras de aço patinável, já as amostras de aço carbono foram removidas do solo com sete meses (Tabela 12).

Tabela 11 - Tabela com dados de massa específica

Liga	Massa Específica (g/cm ³)	Massa Específica Média (g/cm ³)	Desvio padrão	Coefficiente de Variação
Aço Patinável	7,795	7,712	0,047	0,60%
	7,728			
	7,681			
	7,764			
	7,743			
	7,662			
	7,670			
	7,714			
Aço Carbono	7,930	7,741	0,138	1,79%
	7,946			
	7,750			
	7,760			
	7,799			
	7,486			
	7,684			
	7,719			
7,594				



Figura 43 – Amostras alocadas na vala de 1,0x2,0x1,5m(LxCxP)



Figura 44 – Amostras alocadas na vala

Tabela 12 - Tabela contendo as características físicas e geométricas das amostras

Aço Patinável					
Amostras	Tempo Enterradas	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa Inicial (g)
P1	1 mês	2,50	37,00	16,38	11,81
P2	1 mês	2,50	36,84	16,48	11,73
P3	1 mês	2,52	36,92	16,40	11,72
P4	3 meses	2,52	36,90	16,40	11,84
P5	3 meses	2,52	36,88	16,48	11,86
P6	3 meses	2,52	36,96	16,48	11,76
P7	6 meses	2,52	36,92	16,48	11,76
P8	6 meses	2,50	36,94	16,48	11,74
P9	6 meses	2,52	36,92	16,46	11,72
Aço Carbono					
Amostras	Tempo Enterradas	Espessura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Massa Inicial (g)
C1	1 mês	1,42	74,32	14,90	12,47
C2	1 mês	1,42	76,38	14,76	12,72
C3	1 mês	1,46	74,64	14,92	12,60
C4	3 meses	1,48	74,94	14,78	12,72
C5	3 meses	1,44	74,54	14,98	12,54
C6	3 meses	1,52	74,44	14,90	12,62
C7	7 meses	1,48	74,48	14,90	12,62
C8	7 meses	1,48	74,42	14,82	12,60
C9	7 meses	1,52	74,46	14,80	12,72

3.3.2 MÉTODO DE ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CORROSÃO ENTERRADA DE AÇO CARBONO E AÇO PATINÁVEL

Após a exumação era analisado como a corrosão tinha ocorrido na superfície desses corpos de prova (CP) (Figura 45), e então decapava-se as mostras, com inserção na solução decapante (água deionizada, hexametilenotetramina e ácido clorídrico) (Figura 46), e por fim eram pesadas na balança de precisão (0,01g), Gehaka BG4000, (Figura 47), de modo que fosse possível calcular qual foi a perda de massa e, com a densidade do material e dimensões iniciais dos CP's, quanto essa perda representaria em espessura para toda a superfície, transformando-a em uma taxa de corrosão anualizada (mm/ano) graças ao tempo conhecido de ensaio das amostras.



Figura 45 – Amostras retiradas do solo



Figura 46 – Inserção na solução decapante



Figura 47 – Pesagem das amostras

3.4 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS

Para mitigar a corrosão em um elemento enterrado, basicamente pode-se interferir em três partes: no meio, ou seja, no solo, no material que sofrerá o ataque ou na relação solo/elemento.

Na tentativa de entender a influência de alguns parâmetros que podem contribuir com o aumento da resistência à corrosão, essa parte da pesquisa tem o intuito de analisar o comportamento de parâmetros através da influência de outros que serão controlados e/ou monitorados. Para isso foram feitos dois ensaios, um ensaio de monitoramento do potencial de corrosão em campo, ao longo do tempo, e outro para entender o impacto da compactação do solo na resistividade do mesmo.

3.4.1 MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO EM CAMPO

A medição do potencial de corrosão em campo foi feita no Campo Experimental de Fundações da EESC-USP.

Esse ensaio é constituído pela análise do potencial de corrosão de eletrodos enterrados em diversas profundidades, ao longo do tempo, e utilizando diagrama de Pourbaix, realizado para o ferro, é possível definir em que região do diagrama a amostra está e, conseqüentemente, se a corrosão ocorre e como ela ocorre.

3.4.1.1 AMOSTRAGEM DA MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO EM CAMPO

Para a realização desse ensaio foram utilizadas amostras de aço patinável, do mesmo material das estacas helicoidais, de pequena dimensão no formato de blocos retangulares de aproximadamente 4x2,5x1,5cm (comprimento; largura e espessura).

Essas seis amostras foram banhadas com a mesma solução decapante citada anteriormente no subcapítulo 3.1.1 da metodologia.

A decapagem foi feita para que a amostra não contivesse nenhuma camada protetora proveniente da corrosão devido ao tempo exposta à atmosfera. Após a decapagem, foi feita uma solda em prata, ligando a amostra a um conector, tipo jacaré, por meio de um cabo de diâmetro de 1,5mm² (Figura 48).

A solda de prata foi escolhida, pois configura maior resistência para a conexão cabo/amostra do que a solda de estanho convencional, mantém a condutividade necessária para medição e não sofre ataque da solução decapante.

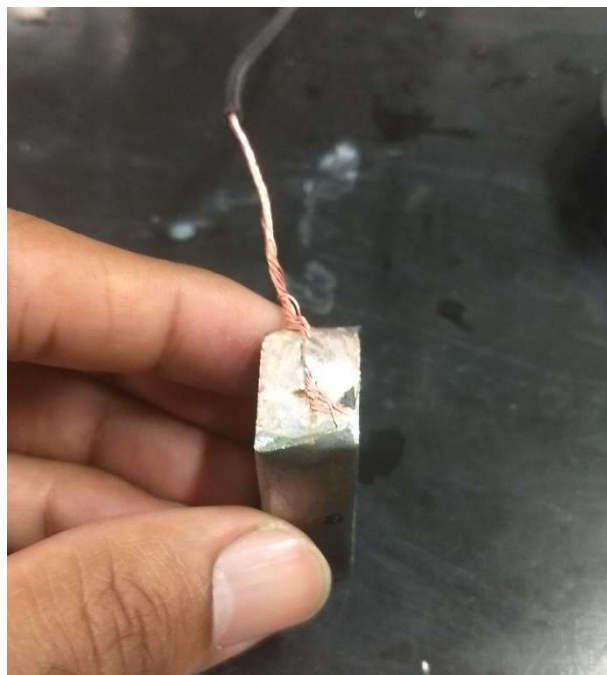


Figura 48 – Amostra com solda de prata

O eletrodo de referência utilizado nessa etapa foi construído para esse ensaio e se trata de um eletrodo de cobre/sulfato de cobre (Cu/CuSO₄), mais recomendado para medições de campo. (Serra, 2014) Esse eletrodo foi construído com tubo PVC de 1pol, sulfato de cobre, bastonete de cobre, madeira caixeta, cap de borracha e rolha de borracha (Figura 49).



Figura 49 – Eletrodo de referência Cobre/Sulfato de Cobre

Primeiramente foi cortado segmentos de 15cm de bastonete de cobre, que seriam introduzidos em uma rolha de borracha, que antes precisou ser furada para permitir a passagem de aproximadamente 10cm do bastonete, que ficariam para dentro da carcaça.

Usinando a madeira de caixeta foi feito um cap para o tubo de PVC, de modo que encaixasse justamente a ele. O cap de borracha servia para cobrir essa ponta de madeira, dificultando o vazamento de solução quando não estivesse sendo feito os ensaios.

Para a funcionalidade do eletrodo é necessário preencher o tubo de PVC com uma solução de sulfato de cobre, para isso foi feita uma solução com proporção água deionizada:sulfato de cobre de 5:1, de modo que a mesma ficasse saturada e houvesse sólido depositado no fundo após a homogeneização.

A solução foi colocada no tubo de forma que deixasse apenas 3cm do topo sem solução e em seguida a ponta livre era fechada com a rolha com bastonete de cobre no meio.

Vale salientar que foram construídos dois eletrodos, isso se fez necessário para que fosse feita a calibração deles mesmos, sendo a diferença de potencial teórica entre eles de 0mV. Na prática, antes do uso foi utilizado outro critério que será explicado no método do ensaio.

Para a alocação das amostras foram feitos 3 furos, sendo o A, o B e o C, no campo experimental de fundações da EESC-USP, todos próximos dos pontos onde estavam as estacas (~20m). Antes da execução desses furos foram definidas as profundidades de alocação, com base na análise prévia da severidade da corrosão ocorrida nas estacas, depois, para a perfuração, foi utilizado o cone.

A execução do furo A e B foi no mesmo dia e a instalação das amostras no furo B aconteceu no dia 24/11/2018. Já o furo C teve suas amostras instaladas no dia 20/12/2018.

As profundidades escolhidas foram 8m, 5m e 2m e para isso foi usado um cone que atingiu os 8m de profundidade, no entanto, devido à sua pequena dimensão (2pol) e à não utilização de tubos de revestimento, o furo se fechava a essa profundidade, sendo possível, em um dos furos (C), apenas alocar as amostras até 7,2m, (Tabela 13 e Tabela 14).

Tabela 13 – Tabela de amostras de medição de potencial de corrosão in situ do Furo B

Furo B - 24/11/2018	
Amostra	Prof (m)
1	2
2	5
3	8

Tabela 14 – Tabela de amostras de medição de potencial de corrosão in situ do Furo C

Furo C - 20/12/2018	
Amostra	Prof (m)
1	2
2	5,5
3	7,2

Uma vez feito os furos, foi possível descer as amostras até a profundidade desejada ou conseguida, após isso elas eram presas para que não ocorresse movimentação e iniciava-se o processo de preenchimento dos furos.

Para preencher os furos foi utilizado solo da superfície, que foi secado ao sol por 3 dias, homogeneizado e peneirado, em peneira #4 (4,8mm). Para a utilização do solo, foi necessário empregar um funil, de modo que fosse possível preencher o furo, com solo, cuidadosamente.

Com uma defasagem de quase um mês (Furo B – 24/11/2018 e Furo C – 20/12/2018), foi feito mais um furo, com uma distância entre eles de 1m, e mais três amostras foram alocadas em profundidades semelhantes.

3.4.1.2 MÉTODO DA MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO EM CAMPO

Para a medição do potencial de corrosão das amostras ao longo do tempo, foi utilizado um multímetro da marca Minipa e modelo ET-1110A. O mesmo também serviu para a calibração dos eletrodos.

Antes de iniciar as medições em campo se faz necessário aferir a similitude dos eletrodos. A calibração foi realizada para garantir que, durante as medições, os dois eletrodos tivessem a menor diferença de potencial possível entre eles, ou seja, as leituras seriam sempre muito próximas. Para fazer a calibração, ambos os eletrodos eram colocados em recipiente, feito de material isolante, com água, conectados ao multímetro e então era feita a medida da diferença de potencial. Caso a diferença ficasse abaixo de 3mV os eletrodos eram aceitos para medição. Em caso do valor de diferença de potencial fosse ultrapassado, então os eletrodos eram abertos, feita a mistura da solução de sulfato de cobre saturada dos dois eletrodos, se

necessário era feito mais, e depois era feita a medida da lâmina de solução dentro do eletrodo, tentando garantir a maior paridade entre eles.

As amostras tinham seu potencial medido através da ligação das mesmas, pelos seus cabos, com a entrada positiva (vermelha) de um multímetro de alta impedância, que por sua vez era ligado, pelo lado negativo (preto), ao eletrodo de referência Cu/CuSO₄, que está em contato com o solo em furo superficial alagado, para melhorar a condutividade da corrente (Figura 50) **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

As medições de potencial foram feitas por um período de pelo menos um mês, para a amostra instalada por último. A ideia foi observar se dentro desse tempo os valores chegariam próximos do equilíbrio, isso significaria que as condições estaca/solo tinham se estabilizado. Essa situação se faz necessária, pois o processo de instalação, no caso o furo para a alocação das amostras, causa o desconfinamento da região do entorno das amostras, como no das estacas helicodais.



Figura 50 – Medição do Potencial de Corrosão em Campo

3.4.2 MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE EM LABORATÓRIO DE ACORDO COM O GRAU DE COMPACTAÇÃO

Essa prática se mostra interessante para entender como o grau de compactação do solo pode interferir em sua resistividade. Isso porque o processo de instalação da estaca no solo interfere na compactação em seu entorno, no caso das estacas helicoidais, que possuem um processo de instalação diferenciado, esse processo causa revolvimento.

Para esse ensaio foram feitas amostras compactadas com energia de compactação e umidade diferentes, para que então fosse feita a medição da resistividade do solo com correntes alternadas com variação da frequência.

3.4.2.1 AMOSTRAGEM DA MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE EM LABORATÓRIO DE ACORDO COM O GRAU DE COMPACTAÇÃO

A amostra desse ensaio consistiu na coleta de 25kg de solo superficial do campo experimental de fundações. Após a coleta, foi feita a homogeneização com a utilização de uma betoneira e então o mesmo foi destorroado e peneirado, com peneira #4 4,8mm, e depositado em bandejas que foram postas para secar ao ar livre (Figura 51 e Figura 52).

Depois da secagem ao ar livre, foram retiradas três amostras para medição da umidade higroscópica, através do método de medição de umidade NBR6457 (ABNT, 2016). Com isso foi possível identificar que essa umidade era aproximadamente 5% para essas amostras.



Figura 51 – Ferramentas para destorroamento e peneiramento do solo



Figura 52 – Betoneira homogeneizando o solo

Para a realização desse ensaio foi necessário confeccionar um molde de compactação de material isolante, uma vez que os moldes tradicionais, feitos de material metálico, poderiam afetar o resultado dos ensaios elétricos, por isso foi feito um molde de Nylon, material resistente e isolante, no entanto mais deformável e por esse motivo foram utilizadas abraçadeiras para deixar o material comprimido, dificultando qualquer deformação durante a compactação da amostra (Figura 53).

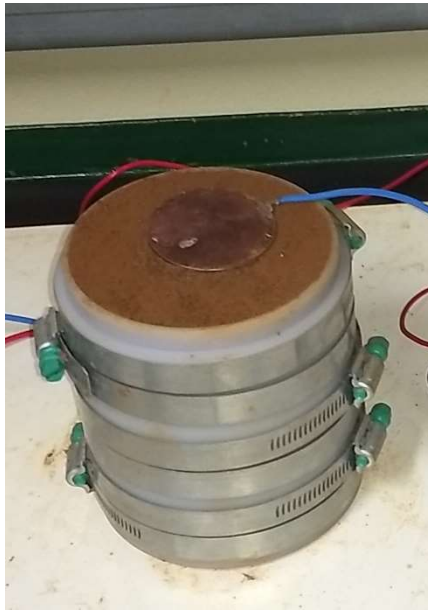


Figura 53 – Molde de Nylon com as abraçadeiras

3.4.2.2 MÉTODO DA MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE EM LABORATÓRIO DE ACORDO COM O GRAU DE COMPACTAÇÃO

O método consiste na realização de ensaios de compactação com variação da energia e da umidade das amostras de solo compactadas, para que, através da medição de corrente e de tensão elétrica aplicadas nas mesmas, fossem medidas as respectivas resistências elétricas e deste modo calculados os valores de resistividade.

Para esta parte do trabalho foi feito o ensaio Próctor Normal, de acordo com a norma NBR 7182 (ABNT, 2016). Após essa compactação, foram pesados, tanto o cilindro de compactação quanto a amostra de solo compactado, e então era feito o destorroamento do solo visando retirar três amostras para medição do teor de umidade gravimétrica (w), de acordo com a NBR6457(ABNT, 2016).

Esse ensaio foi repetido para cinco umidades distintas para cada energia, a normal, a reduzida e a intermediária. Como pode ser visto na Tabela 15, para cada energia utilizou-se um soquete, com altura de queda e quantidade de golpes diferentes.

Tabela 15 - Tabela com parâmetros da energia de compactação

Energia	Soquete	Massa (Kg)	Nº Golpes /camada	Altura (cm)
Reduzida	Pequeno	2,5	13	30,5
Normal	Pequeno	2,5	26	30,5
Intermediária	Grande	4,5	21	45,7

Para a energia normal foi feito o ensaio Próctor Normal, já para a energia reduzida foi aplicado metade dos golpes, por camada, que para a energia normal, mas com o mesmo soquete, e para energia intermediária foi utilizado o mesmo molde, dividido em três camadas, compactadas com o soquete de 4,5kg, com 21 golpes por camada, caindo de uma altura de 45,7 cm.

Para cada nível de energia foram feitos ensaios com cinco umidades. Depois da compactação e da pesagem foram retiradas três amostras do solo para medição da umidade gravimétrica em estufa. Quando obtidas as umidades foi possível calcular, através da Equação 14, a massa de solo seco que compunha o maciço de 1000cm³ (V_0). Essas medidas foram necessárias para o cálculo da massa específica seca (δ_{seca}). Após essas etapas foi possível esboçar uma curva w (%) x δ_{seca} (g/cm³), para determinada energia, e assim verificar graficamente a umidade ótima w_{Ot} .

$$\delta_{seca} = \frac{M_{solo}}{V_0 * (1 + \frac{w_{solo\%}}{100})} \quad \text{Equação 14}$$

Uma vez esboçado o gráfico e determinada a umidade ótima, eram escolhidas outras quatro umidades (+4, +2, -2 e -4%), além da própria umidade ótima, para repetir o ensaio de compactação.

Uma vez finalizado o processo de compactação e pesada a amostra, iniciava-se o ensaio para aferição da resistividade.

Para montar o ensaio foi necessário um gerador de correntes (FeelTech FY3200S), que deve gerar uma tensão RMS de 6V, com ondas senoidais de 50% e frequência de 500Hz e 1000Hz, dois multímetros, um ligado em paralelo com o maciço (Minipa ET 1110A), medindo tensão elétrica, e outro em série (Minipa ET 1002), medindo corrente (Figura 54).

A corrente foi aplicada nas amostras de solo por meio de dois eletrodos circulares de cobre, com 5cm de diâmetro. Para melhorar a distribuição da corrente no solo foi utilizado gel condutor (Mercur) para aumentar a condutividade e sobre o eletrodo superior foi colocado um anel de material isolante, que serviu de suporte para um peso de 5,0kg, utilizado para aumentar a adesão do eletrodo com o solo (Figura 55 e Figura 56).

Para a realização do ensaio, a amostra era colocada sobre uma tábua, utilizada como base, depois era aplicado o gel condutor em ambos os eletrodos e os mesmos eram centralizados nas extremidades do maciço.

Com a amostra preparada, era ligado o gerador de correntes, já ajustado com os parâmetros de corrente, como citados acima, e então era medida a voltagem em um multímetro e a corrente elétrica em outro. Após a medição da corrente e da tensão elétrica, é mudado o

valor da frequência no gerador de correntes, de 1000Hz, valor que gera mínima interferência, de acordo com Weemes (1990, apud Pregolato, 2014), para 500Hz e assim acompanhar o efeito da frequência na resistividade do elemento.

Com as informações de corrente (I) e voltagem (U) é possível, através da Lei de Ohm, calcular a resistência, Equação 10, e por fim, de acordo com as propriedades geométricas do elemento, calcular sua resistividade, Equação 12.

Com posse de todas essas informações foi possível analisar a variação da resistividade de acordo com as variações de umidade, do grau de compactação e da frequência.

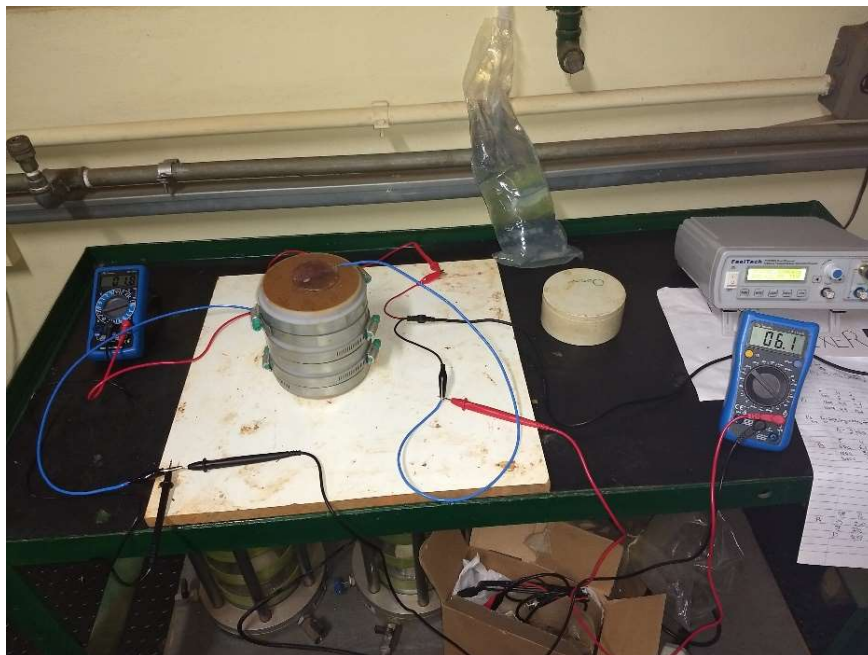


Figura 54 – Arranjo dos equipamentos para medição de I e U



Figura 55 – Anel de material inerte, suporte das anilhas



Figura 56 – Anilhas com massa de 5kg

Após o esboço dos gráficos umidade x resistividade elétrica e umidade x densidade seca, foi calculada a correlação entre ambas as curvas. Para isso foi utilizada a função Correl, do Excel, que utiliza a Equação 15.

$$Correl(X, Y) = \frac{\Sigma(x - \bar{x}) * (y - \bar{y})}{\sqrt{\Sigma(x - \bar{x})^2 * \Sigma(y - \bar{y})^2}} \quad \text{Equação 15}$$

Sendo:

x e y, os valores individuais dos dados correlacionados

\bar{x} e \bar{y} , as médias para os dados correlacionados

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS PRODUTOS DA CORROSÃO DAS ESTACAS EXUMADAS

Os resultados e conclusões apresentados neste item são válidos para estacas helicoidais em terreno similar ao estudado após um período de vida da fundação de aproximadamente 4 anos. As duas estacas helicoidais exumadas do Campo Experimental de Fundações da EESC foram instaladas em solo que, segundo Machado e Villar (2003), se trata de uma areia fina argilosa até 6m, entre 6m e 7m há uma linha de seixos, e abaixo dessa linha uma areia fina para média argilosa (solo residual) (Figura 14). Pelas amostras de solo extraídas posteriormente no presente trabalho, foi possível avaliar a diferença de coloração, mais amarronzada na camada superior e mais avermelhado na inferior (solo residual). Além das duas estacas exumadas (E1 e E2), foi avaliada a haste de uma estaca que ficou exposta ao ar livre para amostragem (E3).

Para esta parte da pesquisa, foram analisadas 80 amostras extraídas da seção transversal das estacas, sendo 39 delas da estaca E2, 37 da estaca E1, e 4 da estaca E3 (exposta ao ar livre). Com estas amostras foi possível fazer uma análise qualitativa detalhada da ação da corrosão, de acordo com a profundidade de instalação da estaca no terreno.

Pela análise visual nas faces interna e externa das amostras, da estaca, não é possível evidenciar a ocorrência de formação da pátina, seriam necessários mais ensaios. No entanto, a face interna das seções da estaca que ficaram instaladas próximas à superfície do terreno (1m e 2m de profundidade) possuem uma camada superficial mais semelhante a pátina (Figura 57). Em caso de comprovação isso indicaria que o uso do aço patinável em estacas helicoidais poderia ser justificado para evitar a perda de espessura da seção da estaca causada pela corrosão da parte interna, instalada próxima à superfície do terreno. Outra vantagem do aço patinável para estas estacas seria no armazenamento em áreas externas (exposição às intempéries) onde a pátina “protegeria” os elementos no processo de corrosão atmosférica.

A mesma análise visual permitiu perceber que a corrosão teve intensidade variada de acordo com a profundidade da estaca, sendo possível limitar zonas onde a corrosão ocorreu preferencialmente. As imagens das amostras que ilustram a variação da corrosão são apresentadas no ANEXO B desta dissertação. Como pode ser visto no esquema da Figura 58, as zonas mais corroídas foram, superficial (até 2,5m) e entre 7 e 9m, sendo a região entre 7,5 e 8m a mais agredida.

Assim como em Braga (2013), a corrosão mais intensa, próxima a superfície, também se justifica pela aeração diferencial a que a estaca está submetida, devido à delimitação da atmosfera e do subsolo.



Figura 57 – Corrosão densa e coloração parecida com a da pátina na face interna de amostras

Para Decker, Rollins e Ellsworth (2008) a zona de solo submetida a variação do lençol freático é crítica para corrosão sendo normalmente os picos próximos ao nível d'água. Como citado no capítulo anterior, o nível do N.A. no terreno de estudo varia sazonalmente ao longo do ano, e durante o período em que as estacas E1 e E2 ficaram instaladas, o N.A. variou de -9,1 m a -12,7m abaixo do nível do terreno. Neste caso, de acordo com o histórico da flutuação do lençol no local, a zona mais crítica ficou aproximadamente de 1 a 1,5m acima da faixa de máximo N.A.. Romanoff (1962) afirma que a zona crítica vinculada ao lençol freático deve considerar algo na ordem de 60cm acima do mesmo.

Na zona de material não saturado imediatamente acima do lençol freático, conhecida como franja capilar, ocorre ascensão capilar e podem conter quantidades significativas de água. A espessura desta zona de ascensão capilar é da ordem de alguns decímetros nas areias e alguns metros em solos argilosos (Pinto et al. 2003). No terreno em estudo, esta franja capilar fica localizada em areia argilosa (solo residual), e sua posição varia ao longo do ano de acordo com a variação sazonal do N.A.. Portanto, a zona mais corroída da estaca, em torno de 8m de profundidade, coincide com a zona que sofre ascensão capilar periodicamente, ficando com a condição de saturação variável ao longo do ano no contato aço-solo.

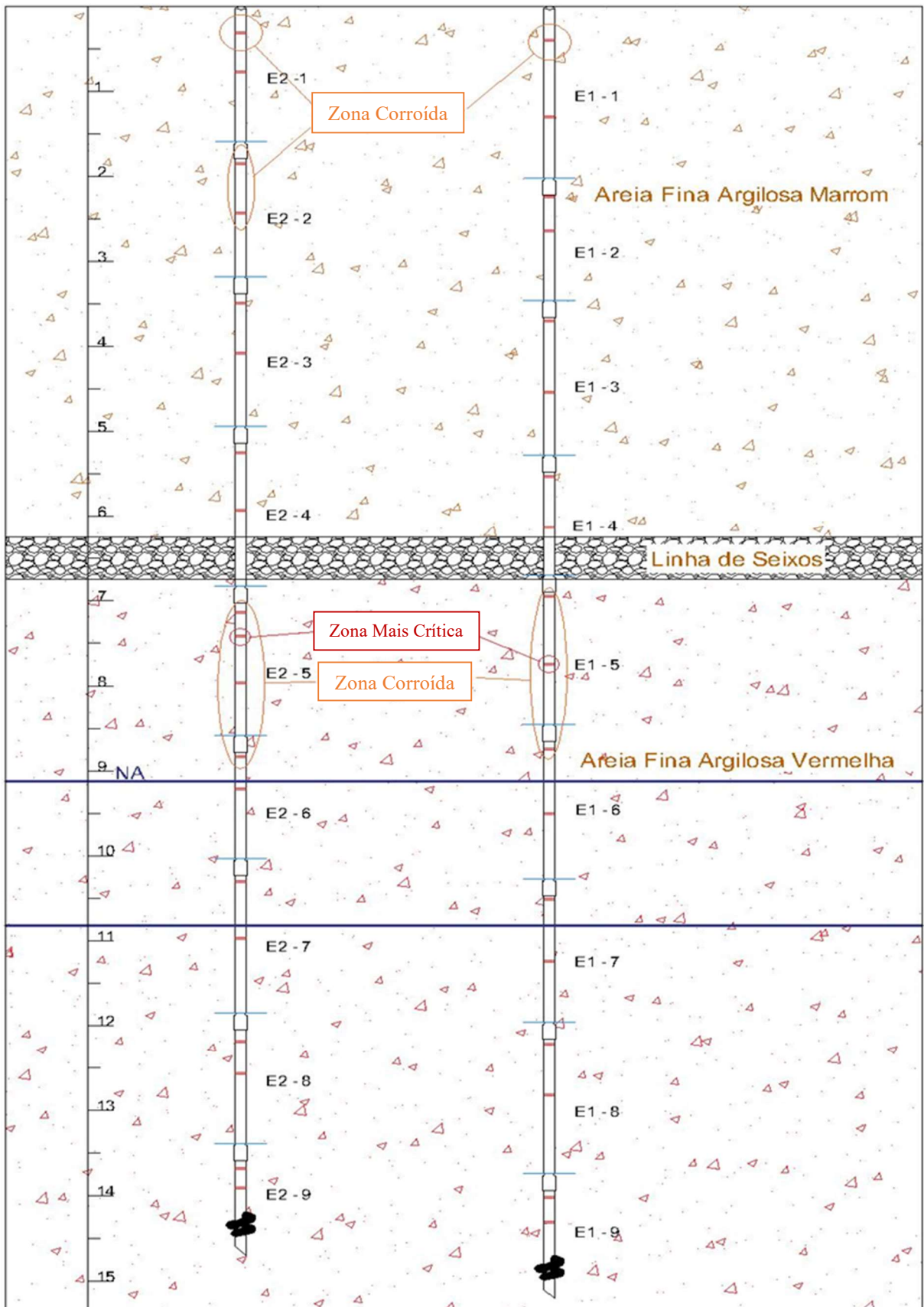


Figura 58 – Esquema do perfil dos solos e as zonas mais corroídas

Entre 2,5m e 7m o material foi corroído, mas de forma mais branda que as faixas citadas acima, já abaixo de 9m de profundidade foi observado que a corrosão foi praticamente inexistente. Na Figura 59, é apresentada a extração da parte da haste de estaca exumada na região da ponta (que contém uma hélice). Esta parte da estaca que ficou instalada continuamente em solo saturado, praticamente não apresentou indícios de corrosão. Esses resultados em parte ratificam Oliveira e Panonni (2012) sobre a difusão dificultada do oxigênio, que é um fator limitante para o processo de oxidação em regiões profundas, no entanto a incidência de severidade da corrosão em profundidade não é explicada por esse mecanismo, uma vez que, segundo essa ótica, se esperaria corrosão branda.



Figura 59 – Região da ponta de estaca exumada durante e após a extração do terreno

4.1.1 MICROSCOPIA ÓPTICA

A microscopia possibilitou a análise da morfologia da corrosão na superfície externa das hastes das estacas exumadas.

Na grande maioria das amostras ficou evidente uma corrosão por pites, ou seja, corrosão pontual, o que, a princípio, é menos grave para as estacas helicoidais, já que não constituem significativa diminuição da área da seção transversal, e conseqüentemente perda da resistência estrutural durante o carregamento da fundação. No entanto, essa corrosão pontual pode se estender com o tempo causando piora do cenário.

No Anexo C é possível ver as imagens feitas com câmera e microscópio antes e após decapagem para ambas as estacas exumadas (E1 e E2), e para a haste de estaca que ficou exposta ao ar livre (E3).

4.1.2 MEDIÇÃO DA PROFUNDIDADE DA CORROSÃO (RUGOSÍMETRO)

Como explicado na metodologia foram feitos ensaios com o rugosímetro em cinco amostras, sendo elas, E2-2-S2, E2-5-M1, E2-7I-2, E3-S-2 (Tabela 6, Tabela 7, Tabela 8) e E0 e a partir desse ensaio foram calculadas a rugosidade média, a altura máxima de pico, a profundidade máxima de pite e a altura máxima do perfil de rugosidade.

Como pode ser visto na Tabela 16, a rugosidade média da amostra E0 ficou abaixo dos valores de rugosidade das amostras extraídas das estacas exumadas acima do lençol freático, o que era esperado devido à perda de massa por corrosão. Esta tabela ilustra também que a haste de estaca que ficou permanentemente em solo saturado (amostra a 11m de profundidade) apresenta praticamente as mesmas características de rugosidade da E0 (amostra de estaca nova usada como referência).

Os valores de profundidade máxima e de rugosidade média da amostra E0 foram semelhantes aos da amostra E3-S-2, a qual foi instalada e removida do solo e depois ficou 2 anos exposta ao ar livre, o que indica que esta estaca de aço patinável exposta às intempéries não apresentou consideráveis problemas de corrosão atmosférica neste período e que o processo de instalação, sozinho, não é responsável por alterar significativamente as características de rugosidade.

Tabela 16 - Tabela dos parâmetros de rugosidade calculados para as amostras ensaiadas

Amostras	Profundidade	Rugosidade Média (mm)	Altura Máxima de Pico (mm)	Profundidade Máxima de Pite (mm)	Altura Máxima do Perfil de Rugosidade (mm)
E0	Amostra de Controle	0,0029	0,0083	0,0067	0,0150
E3-S-2	Amostra ao Ar Livre	0,0015	0,0149	0,0067	0,0217
E2-2S-2	1,8m	0,3711	0,1050	0,7760	0,8810
E2-5M-1	7,5m	0,4386	0,0000	1,0660	1,0660
E2-7I-2	11m	0,0025	0,0057	0,0074	0,0131

Na Figura 60 e Figura 61 é ilustrada a amostra E0 e sua rugosidade. Na escala de comparação, é nítido que a amostra possui superfície lisa, o que corrobora com os valores da Tabela 16.

No gráfico com escala ampliada, Figura 62, fica evidente que não houve uma perpendicularidade perfeita da amostra com o defletômetro, por isso foi calculada uma linha tendência, para os dados medidos, e através dela a rugosidade medida foi rotacionada pra ficar relativa a um eixo horizontal ($y=0$), chamada de rugosidade rotacionada, permitindo a interpretação sem a influência da angulação entre a linha guia e o eixo transversal da amostra.

Para a amostra E0, a linha tendência foi de $y = -0,0033553x$, com um coeficiente de determinação R^2 de 0,9752.



Figura 60 – Amostra E0, virgem, sem exposição ao processo de instalação e intempéries

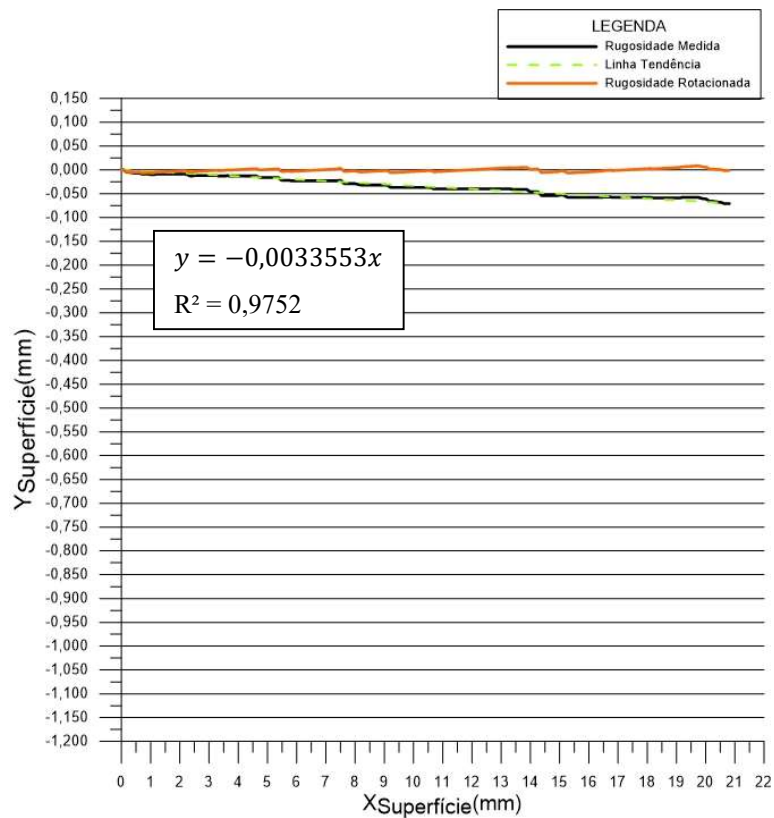


Figura 61 – Rugosidade da Amostra E0, virgem, com escala de comparação (menor)

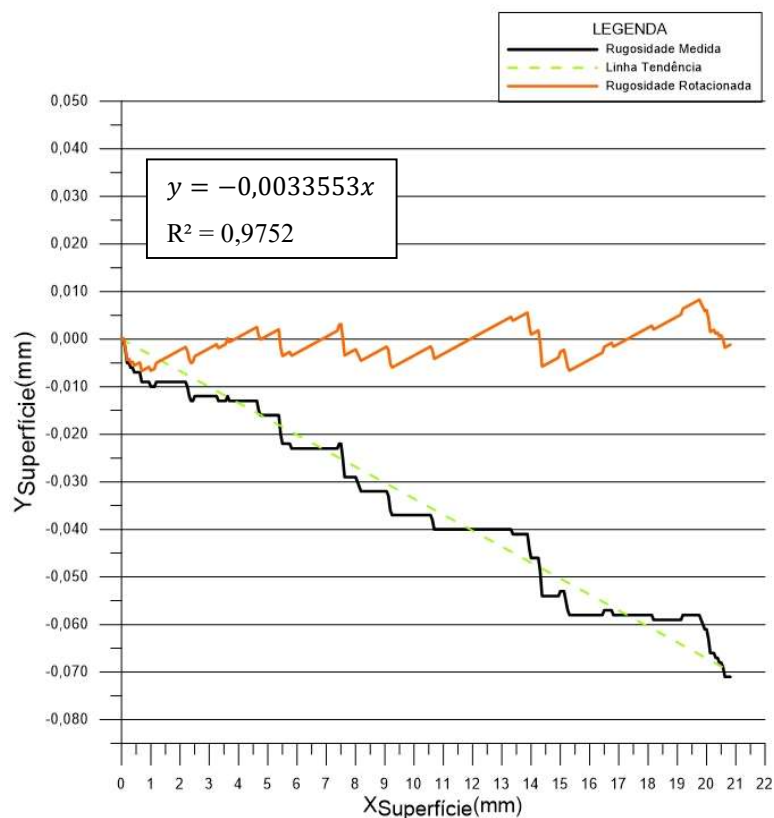


Figura 62 – Rugosidade da Amostra E0, com escala de detalhe (maior)

Para a amostra E3-S-2 foi obtida uma situação semelhante a E0, rugosidade baixa, sem pontos visíveis de corrosão, seja em forma de pite ou generalizada.

Como pode ser visto na Figura 63 e Figura 64, a amostra E3-S-2 também possui uma superfície lisa, tendo uma rugosidade média pequena, bem como profundidade máxima de pite e máxima altura no perfil de rugosidade, como fica mais visível na Figura 65.

A equação de reta utilizada para rotacionar a curva, foi $y = 0,0011468x - 0,01494$, com um coeficiente de determinação R^2 de 0,9318.



Figura 63 Amostra E3-S-2, que foi exposta às intempéries

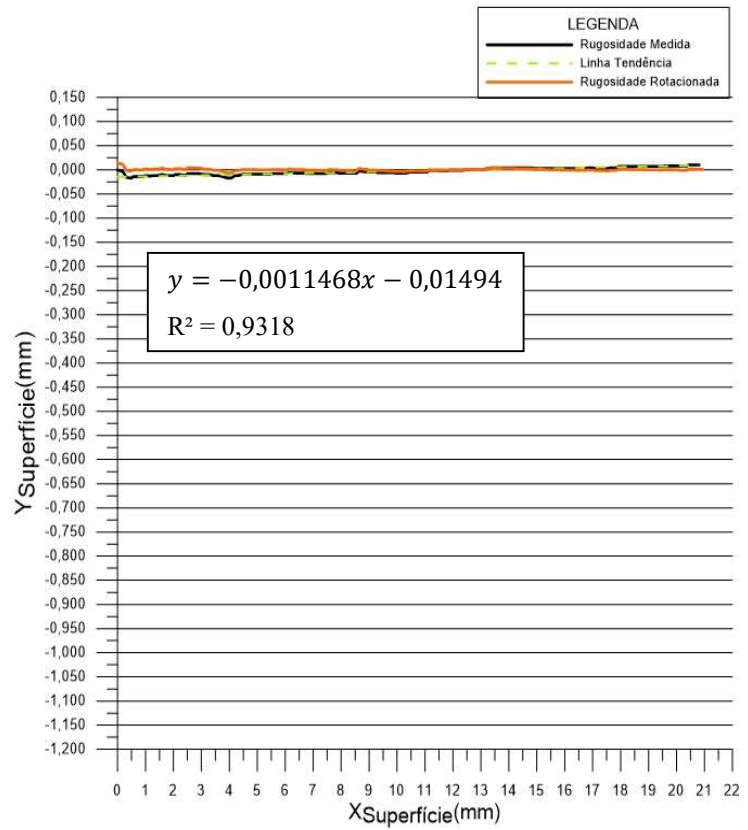


Figura 64 – Perfil de rugosidade da amostra E3-S-2, escala de comparação (menor)

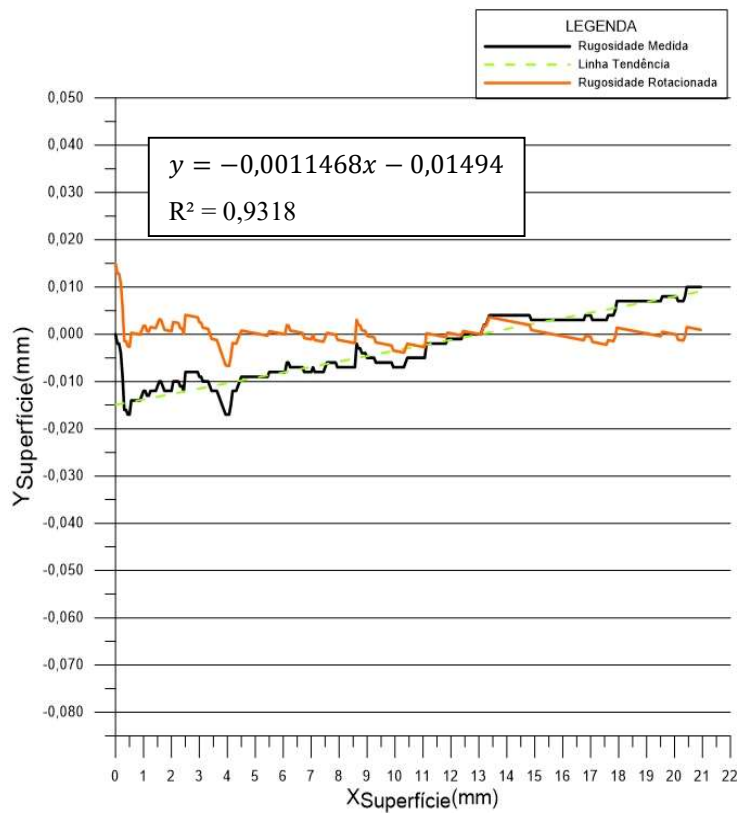


Figura 65 – Perfil de rugosidade da amostra E3-S-2, escala de detalhe

Para as amostras extraídas das estacas exumadas nas profundidades de 1,8m e 7,5m, os resultados de rugosidade média, profundidade máxima de pite e altura máxima do perfil de rugosidade tiveram magnitude maior que das amostra anteriores, indicando que o prejuízo na seção, causado pelo processo corrosivo, foi maior.

A camada superficial da estaca sofreu corrosão intensa e isso é confirmado no perfil de rugosidade da amostra E2-2S-2 (~2m), nota-se que a corrosão acontece em toda a extensão da amostra, mas de forma mais pontual, pites, e não de maneira generalizada, no entanto em alguns pontos os pites se aglomeraram, formando crateras consideráveis, como na Figura 66 e Figura 67. Nessa amostra foi medida uma profundidade máxima de pite de 0,776mm, sendo a rugosidade média de 0,371mm.



Figura 66 - Amostra E2-2S-2, profundidade de ~2m

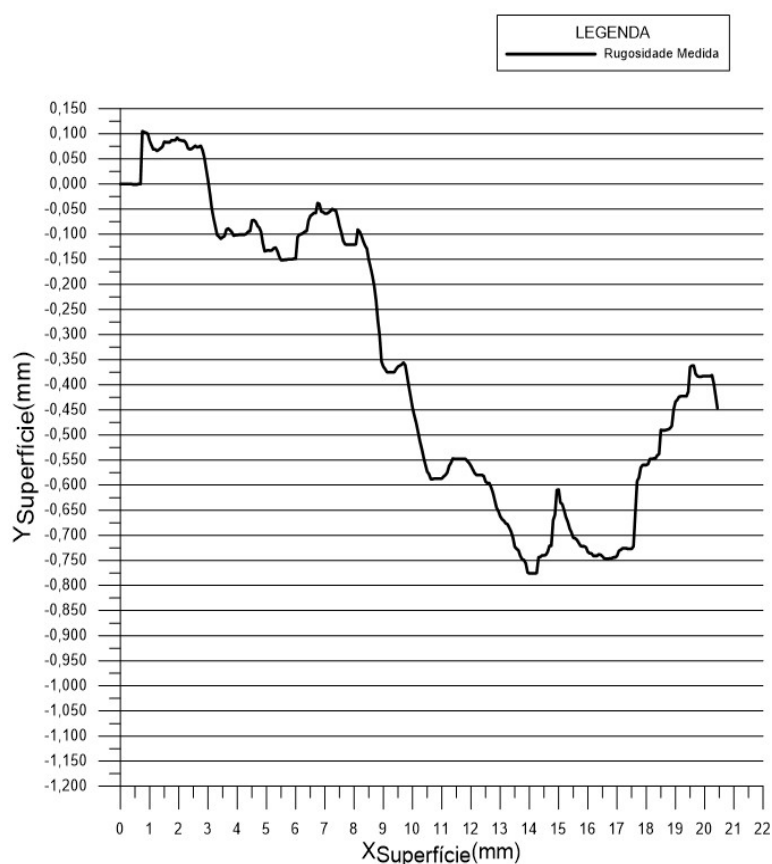


Figura 67 – Perfil de rugosidade amostra E2-2S-2, escala de comparação (menor)

A amostra E2-5M-1, extraída de uma zona ao redor dos 7,5m de profundidade, é de uma região da estaca onde o processo corrosivo ocorreu com a maior intensidade. Isso fica evidente na Figura 68 e Figura 69.

A corrosão nessa amostra aparenta ter uma morfologia mais generalizada, ou seja, mais ampla, somado a esse fato, foram obtidas profundidades de corrosão maiores, sendo a

profundidade máxima de pite igual a 1,066mm e a rugosidade média de 0,439mm. Nessa amostra, devido à corrosão intensa, não foi achado altura máxima de pico diferente de 0.



Figura 68 - Amostra E2-5M-1, profundidade de 7,5m

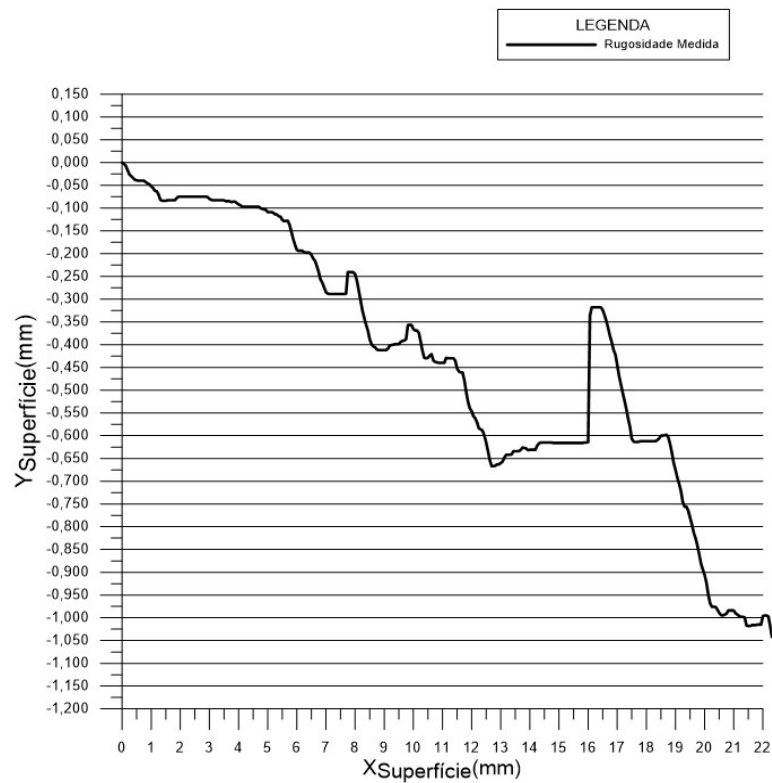


Figura 69 - Perfil de rugosidade amostra E2-5M-1, escala de comparação (menor)

A amostra E2-7I-2 é proveniente de uma profundidade em torno de 11m da estaca exumada, vale salientar que essa amostra estava alocada abaixo do lençol freático e por isso, segundo Panoni (2012), sua corrosão é mais branda, uma vez que a mesma não tinha disponibilidade de oxigênio, em quantidade suficiente, para ter taxas de corrosão altas. Como visto na Tabela 16, os parâmetros calculados de rugosidade foram muito semelhantes aos dados da amostra E0, de elemento não utilizado, e da amostra E3-S-2, exposta à atmosfera, demonstrando o baixíssimo nível de interferência sofrida, como pode ser visto na Figura 70 e Figura 71.

Na Figura 72 foi utilizada a reta $y = 0,0022111x$, com R^2 de 0,9523 indicando bom ajuste, para fazer a rotação do perfil de rugosidade medido, o que indica baixa rugosidade média e pequena profundidade máxima de pite.



Figura 70 – Amostra E2-7I-2, profundidade 11m

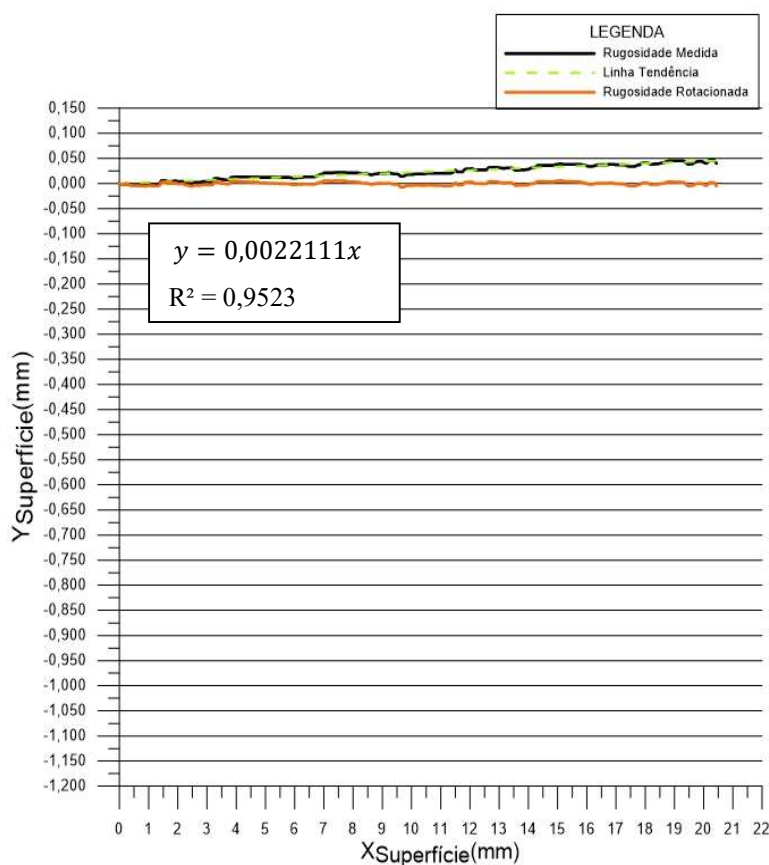


Figura 71 - Perfil de rugosidade amostra E2-7I-2, escala de comparação (menor)

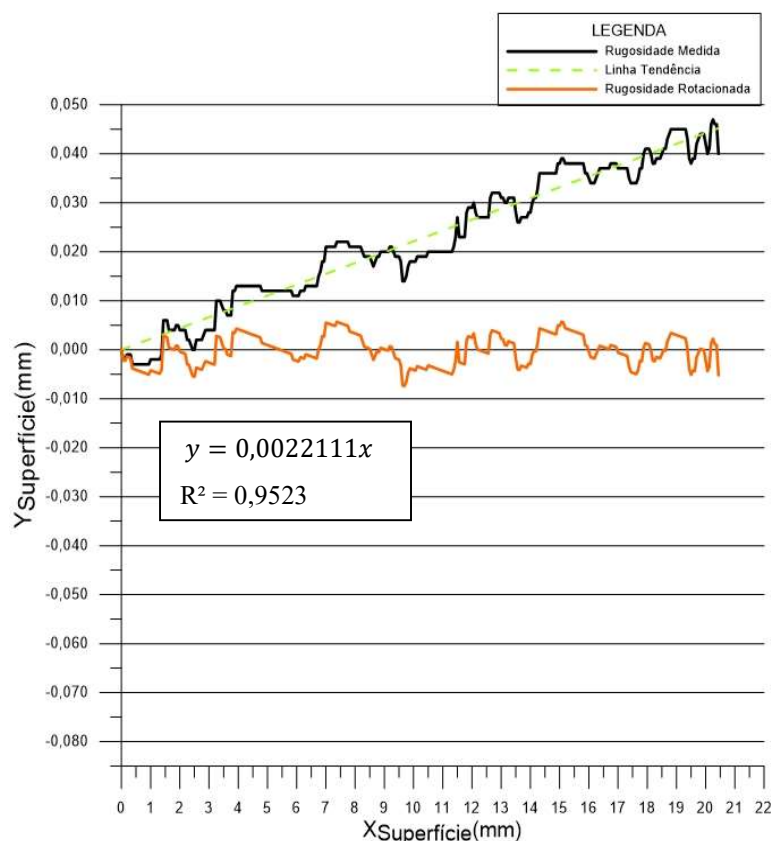


Figura 72 – Perfil de rugosidade amostra E2-7I-2, escala de detalhe (maior)

Embora impossibilite uma análise geral da superfície das hastes das estacas, os ensaios de rugosidade permitiram uma avaliação quantitativa da perda de espessura em pontos avaliados como críticos.

Para o carregamento de fundação com estacas helicoidais, seja tração ou compressão, a perda de espessura em um pequeno comprimento da haste pode ser responsável pela diminuição de resistência do elemento estrutural, devido à redução da área transversal carregada.

No caso das amostras estudadas, a espessura nominal da parede das hastes tubulares é de 7,1mm e diâmetro externo de 101mm, ou seja possuem seção transversal com 2094,47mm² (Equação 16). Considerando a amostra com a pior rugosidade média, de aproximadamente 0,44mm, como taxa em toda a superfície da amostra, teríamos uma perda de área, de aproximadamente 6,6%, onde a área resultante seria 1955,46mm² (Equação 17).

$$A_{ri} = A_{ei} - A_i = (50,5^2 * \pi) - (43,4^2 * \pi) = 2094,47mm^2 \quad \text{Equação 16}$$

$$A_{rf} = A_{ef} - A_i = ((50,5 - 0,44)^2 * \pi) - (43,4^2 * \pi) = 1955,46mm^2 \quad \text{Equação 17}$$

Onde:

A_{ri} = área da seção transversal da estaca antes da corrosão

A_{ei} = área externa da seção transversal da estaca antes da corrosão

A_i = área interna da seção transversal da estaca

A_{rf} = área da seção transversal da estaca após corrosão

A_{ef} = área externa da seção transversal da estaca após corrosão

Tungeskiv, Moum e Fischer(1975) relatam em seu estudo, que a perda da capacidade de carregamento do elemento estrutural da fundação pode ser ainda maior do que somente a proveniente da perda de área transversal, eles obtiveram uma perda de 13,6% de área e a perda de resistência foi de 25%.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA AGRESSIVIDADE DOS SOLOS

Nessa parte do trabalho foi analisada a possível aplicabilidade do critério de Trabanelli para estimar os resultados de corrosão observados nas amostras das estacas. A seguir são apresentados os resultados de cada parâmetro para as profundidades analisadas.

4.2.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Para análise do parâmetro de resistividade elétrica foram utilizados ensaios distintos, o ensaio de campo, RCPT-U, feito anteriormente pelo Professor Giachetti, e depois um ensaio de medição da condutividade em laboratório, em amostras retiradas de local próximo ao das estacas.

Os resultados dos ensaios de laboratório são mostrados na Tabela 17. Nela fica claro que para as profundidades de 1, 2 e 8m são encontrados valores de resistividade elétrica mais baixos, com valores pelo menos três vezes menores do que nas outras profundidades. Para essas faixas foi obtida avaliação mínima, pelo critério de Trabanelli, de -4, indicando que são valores baixos de resistividade.

Pelo comportamento apresentado nos gráficos do ANEXO C fica evidente que, entre o sétimo e o nono metro, a resistividade é bem baixa (permite maior corrosividade). Inclusive, nos ensaios 1, 2 e 4 são os pontos mais baixos, justamente na profundidade onde foram encontradas corrosões mais agressivas, (~8m).

Comparando a Tabela 17 com os resultados no ANEXO C, é possível perceber que existe relevante concordância entre os resultados de resistividade e corrosão observada, o que permite confirmar as medições obtidas.

Tabela 17 - Tabela de resistividade medida em laboratório

Profundidade (m)	Amostra	Resistividade (ohm.cm)	Média Resistividade (ohm.cm)	Análise Critério
1	1	210,08	600,12	-4
	2	902,53		
	3	687,76		
2	1	429,18	1405,60	-4
	2	2197,80		
	3	1589,83		
3	1	12987,01	13023,01	0
	2	13245,03		
	3	12836,97		
4	1	6578,95	9396,16	-1
	2	11363,64		
	3	10245,90		
5	1	10881,39	11000,77	-1
	2	11286,68		
	3	10834,24		
6	1	29154,52	28658,94	0
	2	28653,30		
	3	28169,01		
7	1	21367,52	23148,24	0
	2	23980,82		
	3	24096,39		
8	1	714,80	1033,62	-4
	2	1061,57		
	3	1324,50		
9	1	37037,04	34951,04	0
	2	34482,76		
	3	33333,33		
10	1	25000,00	25000,00	0
	2	25000,00		
	3	25000,00		
11	1	1508,30	8415,81	-1
	2	2000,00		
	3	21739,13		
12	1	2688,17	4235,85	-2
	2	5494,51		
	3	4524,89		
Água Retirada do Lençol	1	2040,82	3467,11	-2
	2	2512,56		
	3	5847,95		

4.2.2 POTENCIAL DE CORROSÃO

A medida do potencial de corrosão, em relação ao eletrodo de hidrogênio, foi obtida de 39 amostras.

Como pode ser visto na Tabela 18, os resultados ficaram dentro da faixa de 24 e 426 mV/ENH, portanto nenhum valor chegou a atingir a avaliação máxima do critério. Sendo a menor avaliação de -2, que ocorreu apenas no segundo metro. É válido salientar que, para essa profundidade, uma das amostras teve valor bem abaixo das demais, sendo o segundo menor valor de potencial 8 vezes maior que o primeiro. Isso pode significar uma intrusão naquele ponto, o que diminuiu significativamente a média naquela profundidade.

Tabela 18 - Tabela de potencial medido em laboratório

Profundidade (m)	Amostra	Eh (+mV)	Média Eh (+mV)	Análise Critério
1	1	267	264	0
	2	246		
	3	280		
2	1	24	135	-2
	2	193		
	3	187		
3	1	426	291	0
	2	209		
	3	238		
4	1	222	229	0
	2	234		
	3	230		
5	1	242	235	0
	2	233		
	3	231		
6	1	239	244	0
	2	247		
	3	246		
7	1	236	245	0
	2	253		
	3	247		
8	1	311	314	0
	2	314		
	3	317		
9	1	327	322	0
	2	309		
	3	329		
10	1	351	350	0
	2	355		
	3	345		
11	1	345	353	0
	2	364		
	3	349		
12	1	356	353	0
	2	351		
	3	351		
Água Retirada do Lençol	1	277	263	0
	2	261		
	3	252		

4.2.3 pH

O pH das amostras de solo variou de básico (8,30) à ácido (3,86). na Tabela 19 pode ser observado que o pH, que era neutro na superfície, foi, de maneira geral, diminuindo com a profundidade, o que é esperado para solos residuais maduros, que já passaram por lixiviação dos elementos alcalinos. Essa afirmação se adequa ao perfil de solo mostrado (Figura 58), onde a linha de seixos, divisor entre os solos transportados e os residuais, está por volta dos 7m de profundidade.

Nesse caso, foram obtidos resultados de 0 a -1 na avaliação do critério, sendo as profundidades com pH menor que 5 avaliadas com -1 e maior que 5 com 0. A partir do oitavo metro o pH é menor que o limite da faixa, obtendo avaliação -1.

Tabela 19 – Tabela de pH medido em laboratório

Profundidade (m)	Amostra	pH	Média pH	Análise Critério
1	1	7,78	7,75	0
	2	7,72		
	3	7,75		
2	1	7,84	7,86	0
	2	7,88		
	3	7,86		
3	1	8,30	8,27	0
	2	8,30		
	3	8,20		
4	1	7,80	7,87	0
	2	7,90		
	3	7,90		
5	1	7,50	7,57	0
	2	7,60		
	3	7,60		
6	1	7,50	7,37	0
	2	7,30		
	3	7,30		
7	1	7,80	7,70	0
	2	7,70		
	3	7,60		
8	1	4,75	4,99	-1
	2	5,58		
	3	4,64		
9	1	4,33	4,47	-1
	2	4,82		
	3	4,27		
10	1	4,00	3,93	-1
	2	3,90		
	3	3,88		
11	1	4,41	4,05	-1
	2	3,86		
	3	3,88		
12	1	3,96	4,38	-1
	2	4,59		
	3	4,59		
Água Retirada do Lençol	1	7,43	7,47	0
	2	7,41		
	3	7,58		

4.2.4 UMIDADE E PERMEABILIDADE

Para o solo superficial do terreno de estudo foram obtidos valores de umidade gravimétrica de 18,15 a 14,53%, todas menores que 20% (Tabela 20), ou seja, pontuação de 0 pelo critério de Trabellini. Isso ocorre devido aos solos se tratarem de areias argilosas com drenagem média, comprovada pelo ensaio de permeabilidade de Guelph (Figura 73). Com uma condutividade hidráulica saturada de campo de $3,6 \cdot 10^{-4}$ cm/s e nas faixas de sucção medidas em campo (Tabela 21), o menor valor foi $1,73 \cdot 10^{-6}$ cm/s. Analisando os dois parâmetros conjuntamente fica mais nítido que o solo não possui elevada umidade e ao mesmo tempo, devido à sua permeabilidade, não possui tendência a reter a água por muito tempo.

Tabela 20 – Tabela de umidade medida em laboratório

Profundidade (m)	Amostra	Umidade (%)	Umidade Média (%)	Análise Critério
1	1	15,08	14,95	0
	2	15,01		
	3	14,75		
2	1	14,59	14,53	0
	2	14,50		
	3	14,50		
3	1	13,09	14,68	0
	2	15,34		
	3	15,61		
4	1	15,21	15,48	0
	2	15,51		
	3	15,73		
5	1	15,73	16,06	0
	2	15,97		
	3	16,47		
6	1	16,07	16,37	0
	2	16,35		
	3	16,68		
7	1	17,29	17,14	0
	2	17,00		
	3	17,14		
8	1	14,33	14,58	0
	2	14,51		
	3	14,89		
9	1	15,12	14,61	0
	2	14,85		
	3	13,87		
10	1	16,61	16,07	0
	2	15,62		
	3	15,97		
11	1	18,46	18,15	0
	2	18,63		
	3	17,37		
12	1	17,21	17,29	0
	2	17,12		
	3	17,56		
Água Retirada do Lençol	1	0,00	0,00	0
	2	0,00		
	3	0,00		

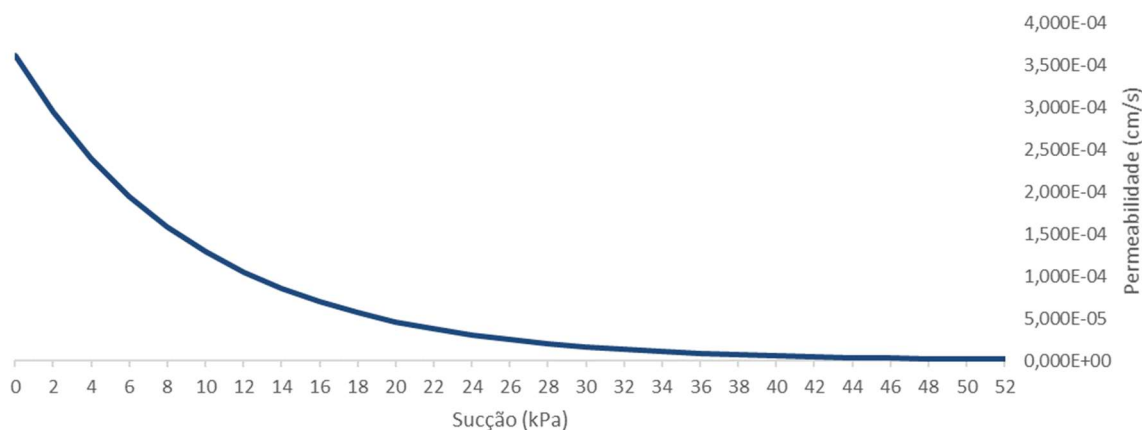


Figura 73 - Curva de permeabilidade x sucção do solo, em profundidade de 0,62cm, a partir do permeâmetro de Guelph

Tabela 21 – Valores de sucção do solo medidos com o tensiômetro

Data	Sucção (kPa)	Permeabilidade (cm/s)
05/09/2017	32	1,3502E-05
06/09/2017	36	8,95348E-06
08/09/2017	40	5,93724E-06
09/09/2017	44	3,93711E-06
11/09/2017	50	2,12602E-06
12/09/2017	52	1,73127E-06

4.2.5 SAIS

Foram medidas as concentrações de três sais nas amostras do solo estudado, sendo eles: cloreto, sulfato e sulfeto.

As concentrações de cloreto e sulfato ficaram abaixo dos mínimos do critério que são de 100mg/kg e 200mg/kg, respectivamente, por isso foi obtido valor de critério 0 para ambos os parâmetros. No entanto, todas as concentrações de sulfeto ficaram dentro da faixa intermediária, abaixo de 0,5 e maior que 0 mg/kg de solo e por isso receberam -2 em todas as profundidades medidas (Tabela 22).

Tabela 22 - Tabela de concentração de Sulfato, Sulfeto e Cloreto, medidos pelo laboratório Keller Ambiental

Profundidade (m)	Sulfato (mg/kg)	Análise Critério	Sulfeto (mg/kg)	Análise Critério	Cloreto (mg/kg)	Análise Critério
1	12,1	0	0,1522	-2	6,3	0
2		0		-2		0
3		0		-2		0
4	12,1	0	0,2330	-2	6,3	0
5		0		-2		0
6		0		-2		0
7		0		-2		0
8	12,1	0	0,1557	-2	6,3	0
9	12,1	0	0,2260	-2	6,3	0
10		0		-2		0
11		0		-2		0
12	12,1	0	0,3103	-2	6,3	0
Água Retirada do Lençol		0		-2		0

4.2.6 APLICAÇÃO DO CRITÉRIO

A tabela com todos os valores dos parâmetros e dos índices parciais do critério para cada profundidade está no **ANEXO E**. Na Figura 74 é possível analisar os gráficos com todos os resultados dos parâmetros e os índices totais, com suas respectivas classificações, e rugosidade média medida para determinada profundidade.

A classificação do solo, segundo o critério de Trabanelli, é, em sua maioria, de Ligeiramente Agressivo, tendo pontuação entre -2 e -7 (Tabela 23).

Na profundidade de 2m ocorreu corrosão acentuada, enquanto de acordo com o critério foi obtido índice total de -8, ou seja, medianamente agressivo, sendo a única profundidade em que foi obtida tal classificação.

Na profundidade de 8m, apesar dos resultados de corrosão observados serem mais agressivos do que no segundo metro, o valor do índice total deu -7, ou seja, ligeiramente agressivo, mas no limite com a classificação superior, medianamente agressiva. Porém, vale ressaltar que o critério de Trabanelli não considera o efeito da variação do N.A., presente logo abaixo desta profundidade, fato que aliado aos outros parâmetros avaliados neste critério fez com que a estaca nesta profundidade fosse a mais corroída.

Comparando os resultados parciais das duas profundidades, 2 e 8m, fica visível que a pontuação menor no segundo metro se deu devido à média de potencial de corrosão do solo, onde um dos valores, contabilizados para média, foi de 24mV e por isso a média na profundidade ficou abaixo dos 200mV, enquanto para 8m essa média foi 314mV e por isso obteve avaliação zero para o quesito.

A medição da amostra que obteve 24mV foi refeita e resultou valores próximos, por isso descartou-se erro operacional, no entanto, é possível que a amostra analisada tenha alguma heterogeneidade que causou esse valor baixo. Analisando os outros parâmetros, a profundidade de 8m obteve a menor pontuação em todas, confirmando que é um dos pontos mais agressivos.

De modo geral, a avaliação do critério foi convergente com os resultados obtidos em campo, onde as profundidades superficiais (1 e 2m) e no entorno de 8m tiveram corrosão mais contundentes. Embora a profundidade de 8m não tenha ficado com o menor índice total, coincidindo com os resultados de campo, ela alcançou resultados próximos e obteve o menor valor de índice total, quando desconsiderado o potencial de corrosão do solo.

Vale salientar que alguns parâmetros obtiveram correlação forte com os resultados de corrosão medidos, enquanto outros simplesmente não tiveram influência evidenciada.

O potencial apresentou-se inversamente proporcional no segundo metro, no entanto ao longo da estaca não apresentou correlação visível. Para o pH, a correlação com a corrosão também não ficou evidente, apesar de ocorrer importante redução do mesmo aos 8m de profundidade, exatamente na zona de corrosão mais crítica. Isso pode ter ocorrido devido à coincidência do solo mais ácido com a zona saturada da estaca. Saturação que impede o contato com o oxigênio. Portanto, os resultados da Figura 74 devem ser analisados em conjunto com o perfil de saturação do terreno e os dados de variação sazonal do N.A. (Figura 15).

De maneira individualizada, a resistividade foi o parâmetro que demonstrou correlação com a corrosão realizada. Ficando baixa nas camadas superficiais e por volta dos 8m, logrou uma correlação inversamente proporcional com a corrosão, o que era esperado.

O teor de umidade do solo teve boa correlação com a corrosão. Nos pontos onde se apresentou mais baixa houveram corrosões mais intensas e após a saturação, a corrosão apresentada foi próxima zero.

Sulfato e cloreto, tiveram valores bem abaixo do critério e até do limite de quantificação dos métodos utilizados, até por isso seus valores não apresentaram influência sobre os resultados da corrosão no caso estudado.

Segundo o critério, valores acima de zero para sulfeto já são avaliados com -2, o que não pareceu apropriado, uma vez que é difícil a concentração ser zero. Independentemente da faixa, os valores de sulfeto apresentaram correlação inversa com a corrosão, o que não é esperado, já que sua presença indica a possibilidade de existência de bactérias redutoras de sulfato (BRS).

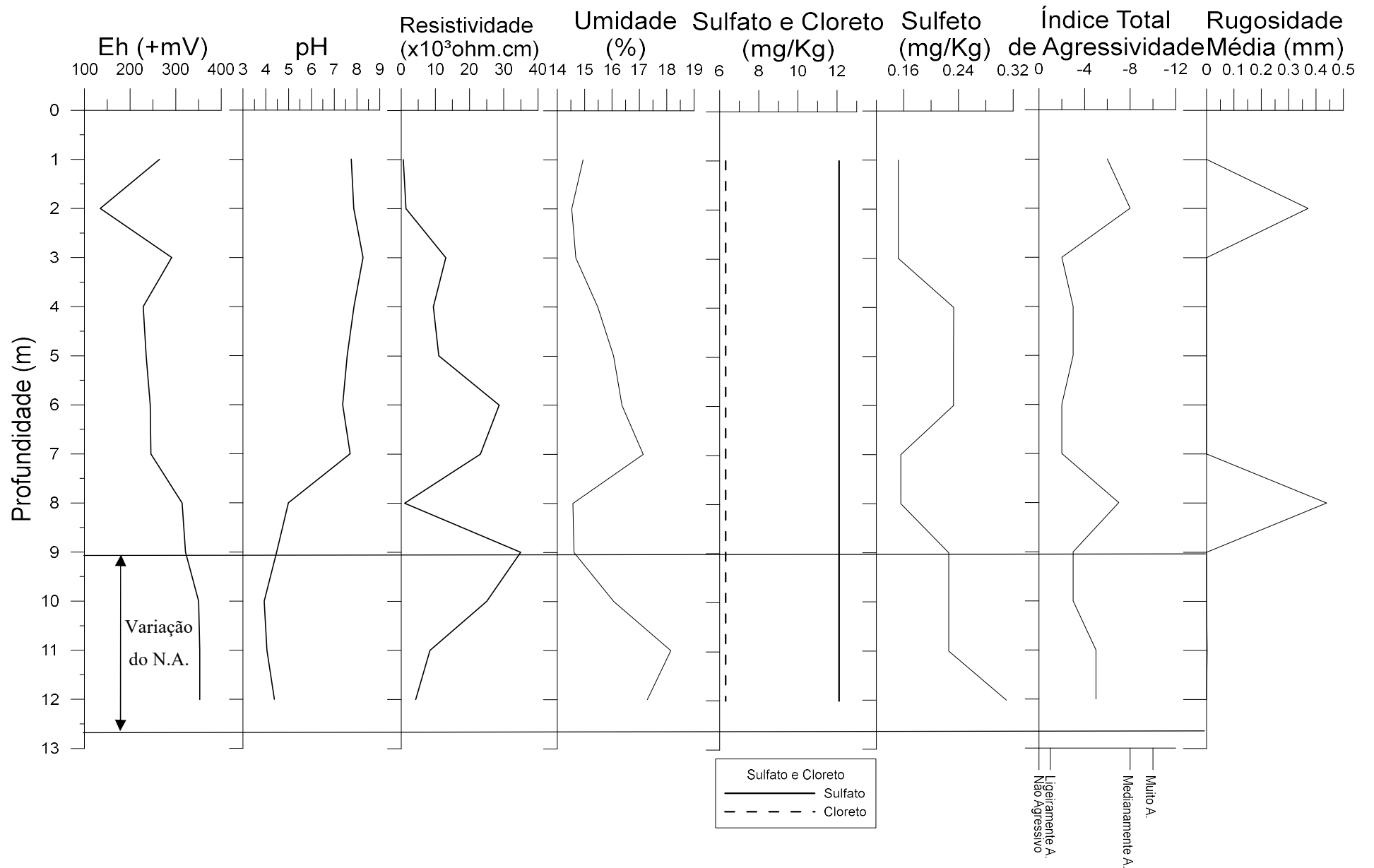


Figura 74 - Gráficos dos resultados dos parâmetros, do índice total de agressividade e da classificação do solo pelo Critério de Trabaneli

Tabela 23 - Tabela dos índices totais de agressividade e classificação dos solos

Profundidade (m)	Índice Total de Agressividade	Classificação do Solo
1	-6	Ligeiramente Agressivo
2	-8	Medianamente Agressivo
3	-2	Ligeiramente Agressivo
4	-3	Ligeiramente Agressivo
5	-3	Ligeiramente Agressivo
6	-2	Ligeiramente Agressivo
7	-2	Ligeiramente Agressivo
8	-7	Ligeiramente Agressivo
9	-3	Ligeiramente Agressivo
10	-3	Ligeiramente Agressivo
11	-5	Ligeiramente Agressivo
12	-5	Ligeiramente Agressivo
Água Retirada do Lençol	-4	Ligeiramente Agressivo

4.3 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA CORROSÃO ENTERRADA DE AÇO CARBONO E AÇO PATINÁVEL

A análise do comportamento da corrosão enterrada de dois aços distintos se deu para compreender como o processo corrosivo ocorre ao longo do tempo e as diferenças em perda de massa para as ligas avaliadas.

A Tabela 24 contém os resultados obtidos no ensaio de perda de massa, que permitiram compreender como foi a dispersão da perda de massa, quais foram as espessuras perdidas e as taxas de corrosão anualizadas de cada amostra.

Tabela 24 - Tabela com os resultados do ensaio de perda de massa

Amostras	Tempo Enterradas (Dia)	Tempo Enterradas (Ano)	Massa Inicial (g)	Massa Final (g)	Superfície (cm ²)	Perda de Massa (g)	Espessura Corroída (mm)	Taxa de Corrosão (mm/ano)
Aço Patinável								
P1	30	0,08219	11,81	11,74	14,79	0,07	0,0061	0,0747
P2	30	0,08219	11,73	11,68	14,81	0,05	0,0044	0,0533
P3	30	0,08219	11,72	11,67	14,80	0,05	0,0044	0,0533
P4	90	0,24658	11,84	11,73	14,79	0,11	0,0096	0,0391
P5	90	0,24658	11,86	11,77	14,84	0,09	0,0079	0,0319
P6	90	0,24658	11,76	11,63	14,88	0,13	0,0113	0,0460
P7	188	0,51507	11,76	11,53	14,86	0,23	0,0201	0,0390
P8	188	0,51507	11,74	11,53	14,85	0,21	0,0183	0,0356
P9	188	0,51507	11,72	11,46	14,84	0,26	0,0227	0,0441
Aço Carbono								
C1	30	0,08219	12,47	12,34	24,68	0,13	0,0068	0,0828
C2	30	0,08219	12,72	12,45	25,14	0,27	0,0139	0,1688
C3	30	0,08219	12,60	12,56	24,89	0,04	0,0021	0,0253
C4	90	0,24658	12,72	12,37	24,81	0,35	0,0182	0,0739
C5	90	0,24658	12,54	12,19	24,91	0,35	0,0182	0,0736
C6	90	0,24658	12,62	12,38	24,90	0,24	0,0125	0,0505
C7	220	0,60274	12,62	12,11	24,84	0,51	0,0265	0,0440
C8	220	0,60274	12,60	12,16	24,70	0,44	0,0230	0,0382
C9	220	0,60274	12,72	12,32	24,75	0,40	0,0209	0,0346

Como pode ser visto, para as condições do ensaio e para uma mesma idade ensaiada, as amostras de aço carbono apresentaram uma taxa de corrosão maior do que o do aço patinável nas idades iniciais e depois tenderam a se igualar. Na Tabela 25, são apresentados os dados em forma de média.

Em ambos os tipos de aço as taxas mostraram uma diminuição com o tempo do ensaio, como pode ser visto na Figura 75, o que é esperado da taxa de corrosão anualizada, uma vez que o espessamento da camada de material corroído dificulta ainda mais a corrosão do material ainda virgem.

Tabela 25 - Tabela dos valores médios de perda de massa, espessura perdida e taxa de corrosão

Aço Patinável				
Amostra	Tempo Enterrada (Dia)	Perda de Massa Média (g)	Espessura Perdida Média (mm)	Taxa de Corrosão Média (mm/ano)
P1	30	0,06	0,0050	0,0604
P2				
P3				
P4	90	0,11	0,0096	0,0390
P5				
P6				
P7	188	0,23	0,0204	0,0396
P8				
P9				
Aço Carbono				
Amostra	Tempo Enterrada (Dia)	Perda de Massa Média (g)	Espessura Perdida Média (mm)	Taxa de Corrosão Média (mm/ano)
C1	30	0,15	0,0076	0,0923
C2				
C3				
C4	90	0,31	0,0163	0,0660
C5				
C6				
C7	220	0,45	0,0235	0,0389
C8				
C9				

Devido à diferença de idade na remoção das últimas três amostras, para as duas ligas, as curvas apresentam intervalos diferentes e isso pode ter influenciado no ajuste da curva, no entanto o formato das curvas resultantes do ensaio são bem condizentes com que se esperava para a taxa de corrosão ao longo do tempo.

Para as normas a NBR 6122 (ABNT, 2019) e Eurocode (Eurocode - 3, 2007), sendo considerado o solo, do presente estudo, como solo em estado natural e agressivo, e com horizonte de projeto por volta de 30 anos, é recomendada espessura mínima de sacrifício de 1mm para ambas as normas. Considerando a taxa medida para sete meses de ensaio para o aço carbono (0,0389mm/ano), é esperado que a espessura de 1mm seja atingida por volta de 26 anos de operação, enquanto para o aço patinável, considerando a taxa de 6 meses de exposição (0,0396mm/ano), seria alcançado após 25 anos de utilização.

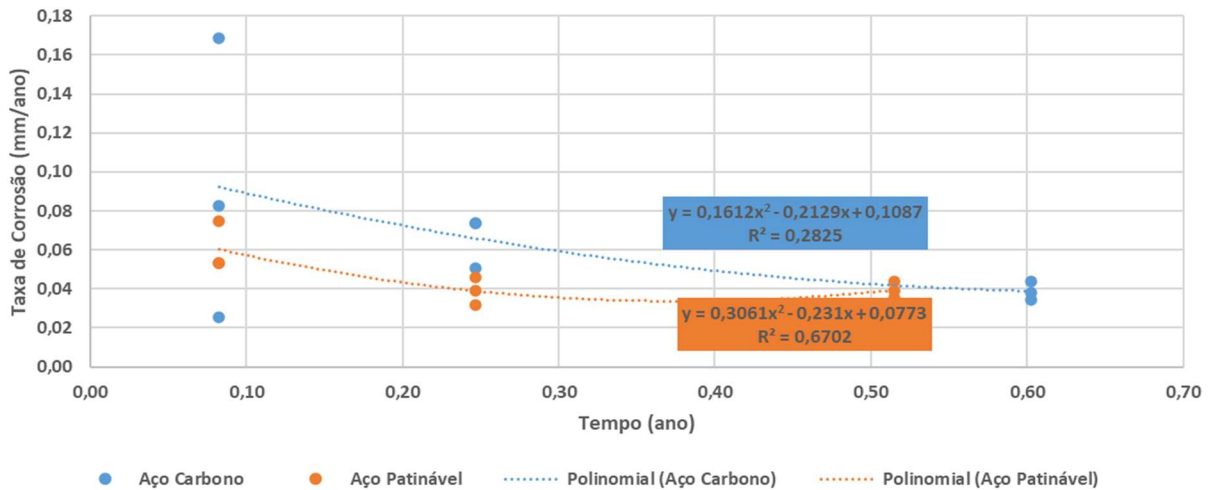


Figura 75 - Gráfico das tendências das taxas de corrosão ao longo do tempo de ensaio

Para o tempo de análise do presente experimento, a afirmação de Schweitzer (2010), de que “as taxas de corrosão de aços patináveis seriam as mesmas de aços sem ligas, quando o mesmo for continuamente exposto à umidade como em solos e água”, foi confirmada já que com 6 meses as taxas de corrosão são próximas.

4.4 ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS

O intuito dessa parte da pesquisa foi reconhecer como alguns parâmetros são influenciados a partir da alteração de parâmetros controláveis.

A primeira análise foi do potencial de corrosão de aço patinável, do mesmo tipo utilizado na estrutura exumada neste estudo, e a segunda foi da influência do grau de compactação na resistividade do solo.

4.4.1 MEDIÇÃO DO POTENCIAL DE CORROSÃO EM CAMPO

A medição do potencial de corrosão em campo foi realizada em dois furos com três amostras cada, através de um eletrodo $Cu|CuSO_4$. A partir das medições esporádicas, foram analisadas as tendências do potencial de corrosão de cada uma das amostras em profundidades diferentes, ao longo do tempo (Tabela 26).

Tabela 26 - Tabela dos resultados de potencial de corrosão, medidos em campo, ao longo do tempo, com eletrodo Cu|CuSO₄

Potencial de Corrosão (-mV)					
Furo B - 24/11/2018					
Amostra	Prof (m)	20/dez	18/jan	28/jan	29/jan
1	2	-99,5	-115,5	-254,5	-246,0
2	5	-366,0	-357,5	-354,5	-335,5
3	8	-367,0	-328,5	-326,0	-320,5
Furo C - 20/12/2018					
Amostra	Prof (m)	20/dez	18/jan	28/jan	29/jan
1	2	-10,0	-134,0	-170,0	-163,0
2	5,5	-123,0	-165,0	-175,5	-168,5
3	7,2	-295,0	-328,5	-325,5	-320,0

Na Figura 76 e Figura 77 são apresentados os gráficos dos valores de potencial, por profundidade, em idades diferentes de ensaio, para ambos os furos.

Os potenciais das amostras mais próximas da superfície são maiores, desde os primeiros dias, o que indica que naquele ponto o ambiente é mais agressivo. Já para as amostras nas profundidades de 5 e 8m foram obtidos comportamentos distintos entre os furos, o furo B com variação positiva e o furo C com variação negativa.

Ao longo do tempo, os resultados variaram mais para o furo C do que para o furo B, isso ocorreu devido à diferença de idade das amostras no primeiro ensaio. O furo B foi lido, a primeira vez, com aproximadamente um mês, enquanto o furo C foi lido no dia de sua instalação. Essa informação é ratificada analisando isoladamente o furo C, que após um mês de exposição ao solo não teve mais variação significativa.

Os valores de estabilização foram próximos apenas para as amostras a 8m de profundidade, por volta de -320mV, já nos 5m os valores divergiram, sendo para o furo B tão baixo quanto para 8m e no furo C maior, com -168,5mV.

Devido aos problemas na instalação, o furo A teve as amostras perdidas, isso dificultou a análise, uma vez que os três furos permitiriam a confirmação dos valores obtidos.

Outra análise interessante a ser feita é do pH x potencial de corrosão, possibilitando a utilização do diagrama de Pourbaix para compreensão de que região do diagrama o elemento se encontra e conseqüentemente como ocorre a corrosão.

Para tal interpretação se fez necessário transformar os valores da Tabela 26, referenciados ao eletrodo Cu|CuSO₄, para o eletrodo normal de hidrogênio, para isso somam-se os valores da mesma com +318mV, segundo Gentil (1982), o que resulta na Tabela 27.

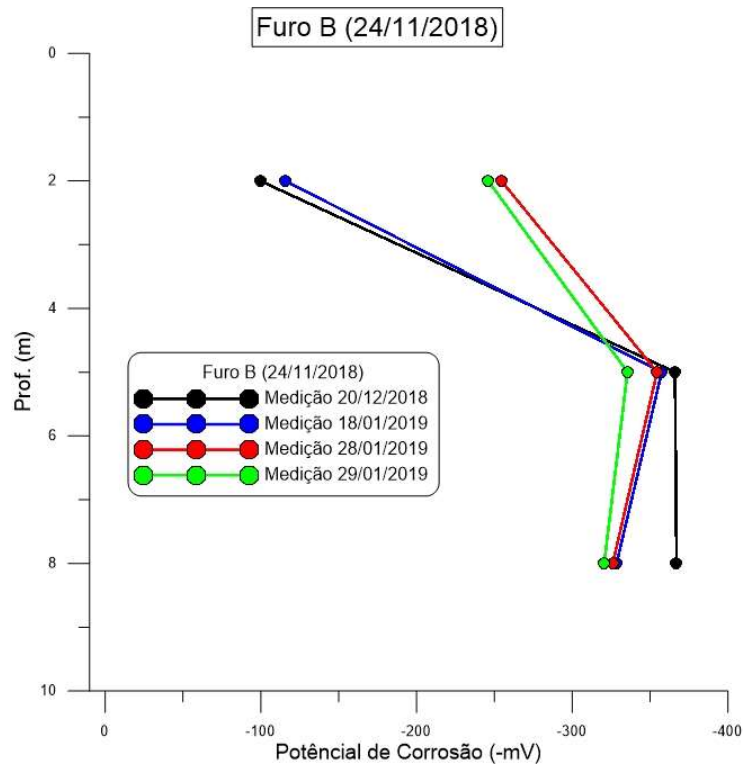


Figura 76 – Medição, em campo, do potencial de corrosão para as amostras do furo B

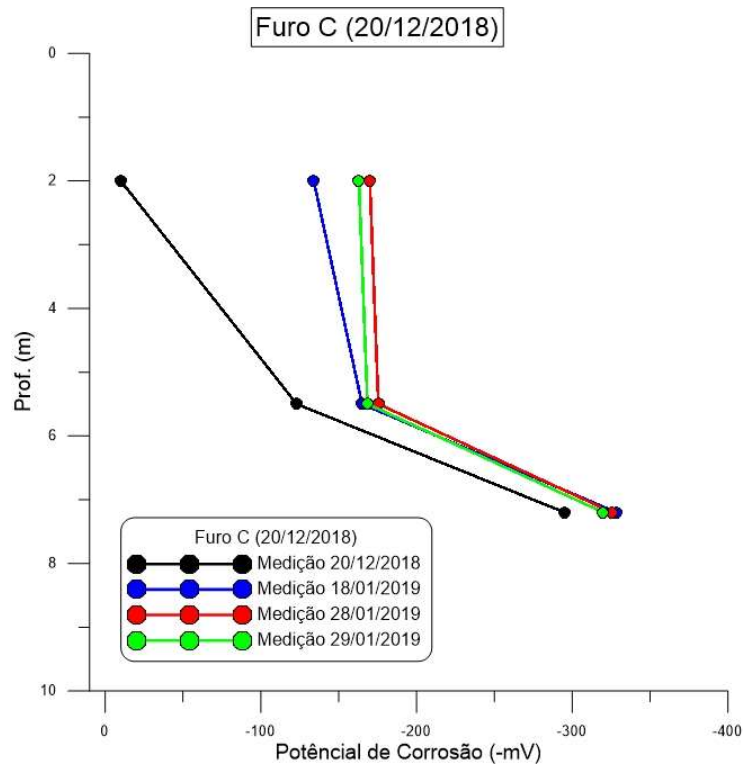


Figura 77 - Medição, em campo, do potencial de corrosão para as amostras do furo C

Tabela 27 - Tabela dos resultados de potencial de corrosão, medidos em campo, ao longo do tempo, para o eletrodo normal (ou padrão) de hidrogênio

Potencial de Corrosão ENH (mV)					
Furo B - 24/11/2018					
Amostra	Prof (m)	20/dez	18/jan	28/jan	29/jan
1	2	218,6	202,5	63,5	72,0
2	5	-48,0	-39,5	-36,5	-17,5
3	8	-49,0	-10,5	-8,0	-2,5
Furo C - 20/12/2018					
Amostra	Prof (m)	20/dez	18/jan	28/jan	29/jan
1	2	308,0	184,0	148,0	155,0
2	5,5	195,0	153,0	142,5	149,5
3	7,2	23,0	-10,5	-7,5	-2,0

Com os resultados da primeira e da última medição da Tabela 27 e com os valores de pH, para cada profundidade da Tabela 19, foram compilados os dados na Tabela 28, com os pontos e com seus respectivos pares pH:ENH(mV), situando cada uma das amostras, com seus valores iniciais(20/12/18) e finais (29/01/19), no diagrama de Pourbaix para o Fe.

Para o furo B pode-se analisar os resultados na Figura 78, onde fica nítido que todas as amostras, do primeiro ao último ensaio, ficam dentro da zona de corrosão, embora o valor inicial para a amostra 1, mais superficial, tenha ficado bem próxima da zona de passividade, para então se deslocar para a zona de corrosão.

Tabela 28 – Tabela com os valores de potencial inicial e final e pH para cada profundidade

Potencial de Corrosão ENH (mV)				
Furo B - 24/11/2018				
Amostra	Prof (m)	pH	20/dez	29/jan
1	2	7,9	218,6	72,0
2	5	7,6	-48,0	-17,5
3	8	4,9	-49,0	-2,5
Furo C - 20/12/2018				
Amostra	Prof (m)	pH	20/dez	29/jan
1	2	7,9	308,0	155,0
2	5,5	7,4	195,0	149,5
3	7,2	5,0	23,0	-2,0

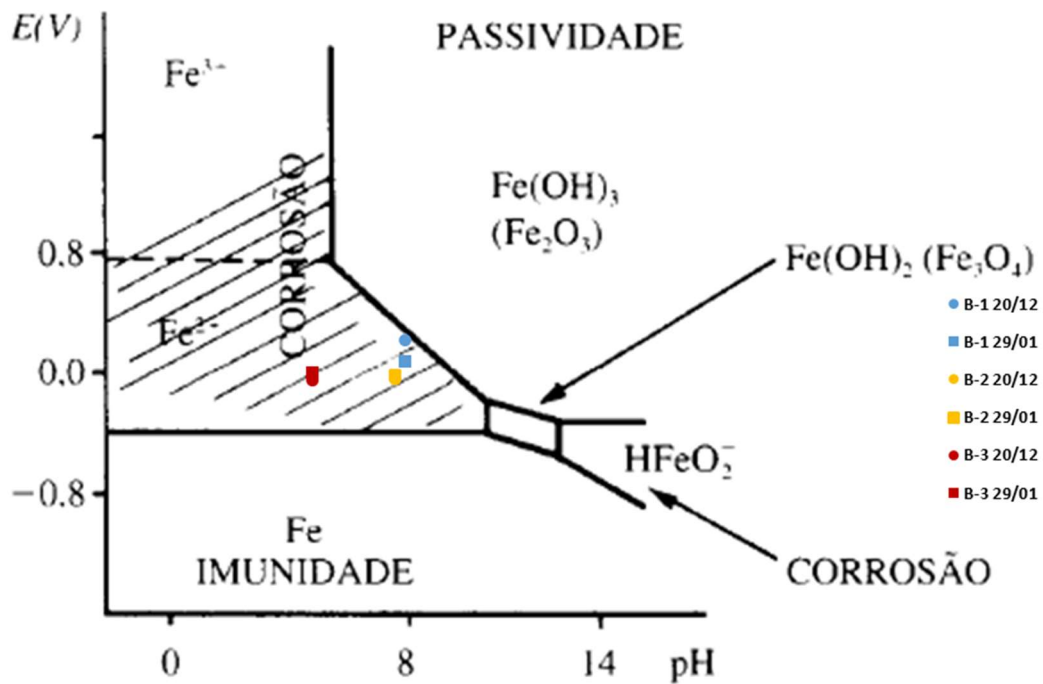


Figura 78 - Diagrama de Pourbaix para o ferro, sobreposto com os resultados obtidos das amostras de potencial de campo, para o furo B

Para o furo C foi feita a mesma análise, os resultados obtidos foram próximos aos obtidos para o furo B, uma vez que as três amostras ficaram na mesma região do gráfico, sendo que, mais uma vez, a amostra mais superficial (1) em seu primeiro ensaio ficou na margem da zona de passividade para então se deslocar para a zona de corrosão (Figura 79).

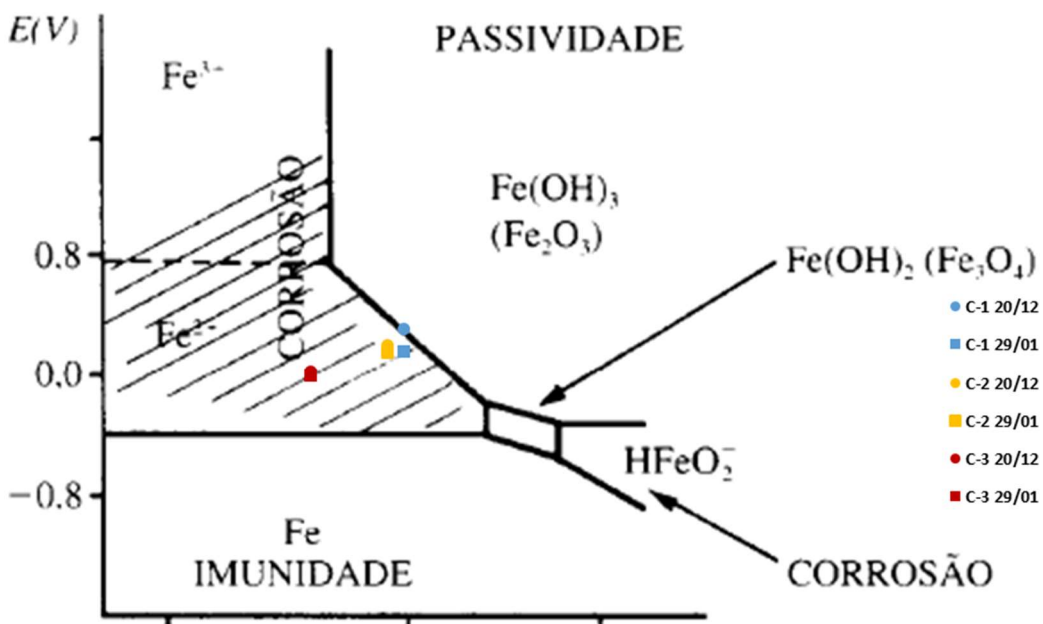


Figura 79 - Diagrama de Pourbaix para o ferro, sobreposto com os resultados obtidos das amostras de potencial de campo, para o furo C

A análise dessas imagens permite afirmar que após apenas um mês de ensaios os valores de potencial de corrosão se estabilizaram, o que concorda com o que Oliveira e Panonni (2012) afirmaram.

4.4.2 MEDIÇÃO DA VARIAÇÃO DA RESISTIVIDADE EM LABORATÓRIO DE ACORDO COM O GRAU DE COMPACTAÇÃO

Dos ensaios de compactação com diferentes energias foi possível traçar as curvas para identificação da massa específica seca máxima e a umidade ótima do solo (Figura 80 e Tabela 29). Nela foi ajustado uma função polinomial, para cada energia.

A partir desse ensaio foi possível definir quais seriam os valores de teor de umidade do solo que seriam utilizados para o ensaio de medição da resistividade, sendo elas 11, 13, 15, 17 e 19%.

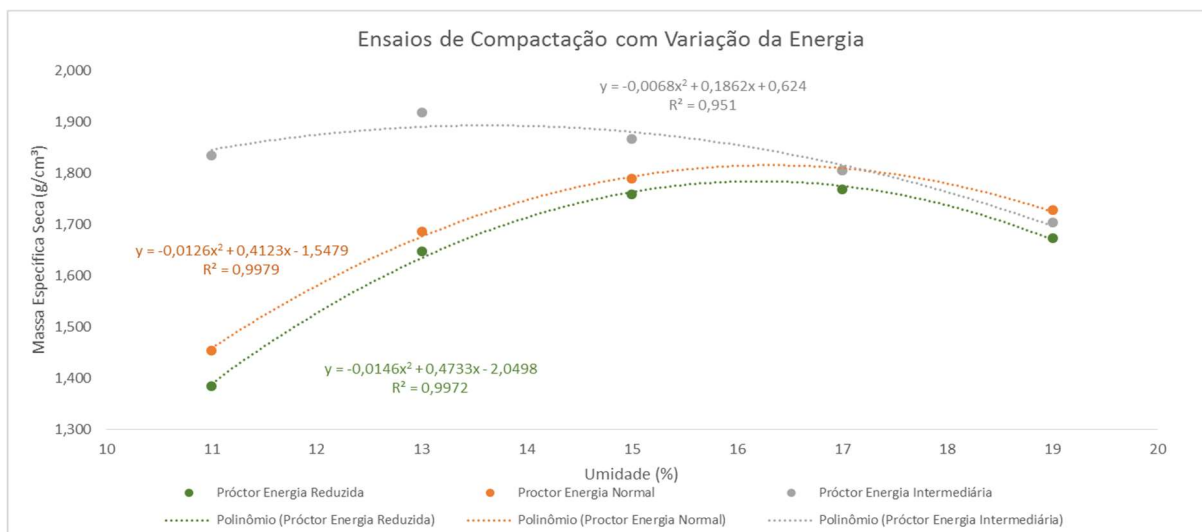


Figura 80 – Curvas de compactação com energia reduzida, normal e intermediária

Tabela 29 - Massa específica seca x umidade, para energia reduzida, normal e intermediária

MASSA ESPECÍFICA SECA (g/cm ³)			
Umidade(%)	Energia Reduzida	Energia Normal	Energia Intermediária
11	1,384	1,454	1,834
13	1,648	1,687	1,919
15	1,758	1,790	1,868
17	1,769	1,805	1,805
19	1,674	1,728	1,704

Nos ensaios para medição de resistividade do solo, variando-se a frequência foram obtidos os resultados mostrados na Tabela 30. Os dados mostram que, pelo menos para a faixa

de 500 a 1000Hz, a frequência não tem influência sobre os valores de resistividade, uma vez que, para ambos os valores de frequência para uma mesma umidade, os resultados de resistividade foram iguais ou semelhantes. Partindo desse princípio, passou-se a utilizar para análise apenas os resultados para o ensaio de 1000Hz, utilizado como referência.

A influência da frequência, para essa faixa, é praticamente imperceptível, no entanto foi possível evidenciar a relação entre a umidade e a resistividade assim como já era esperado (Tabela 30).

Tabela 30 – Tabela de resistividade x umidade, para cada frequência e energia

RESISTIVIDADE (Ohm.cm)						
Umidade/Freq	Energia Reduzida		Energia Normal		Energia Intermediária	
	500Hz	1000Hz	500Hz	1000Hz	500Hz	1000Hz
11%	185089,90	185089,90	231362,38	231362,38	35594	34276
13%	29853,21	29853,21	31912,05	29853,21	24354	23729
15%	19690,42	19280,20	25706,93	25012,15	25707	25012
17%	22571,94	22571,94	28920,30	29853,21	25707	25707
19%	25012,15	23729,47	22034,51	21522,08	22572	21522

Nas figuras a seguir foram feitas, para uma mesma energia, sobreposições dos resultados de compactação (umidade x massa específica seca) e resistividade (umidade x resistividade), permitindo visualmente a correlação dos parâmetros massa específica seca e resistividade.

Como pode ser visto na Figura 81, para o trecho estudado, os parâmetros possuem correlação inversa, de -0,9553 para a compactação com energia reduzida.

Para o gráfico feito com energia normal, Figura 82, foi obtido o mesmo comportamento das curvas e consequentemente coeficiente de correlação inverso da mesma ordem, -0,9405.

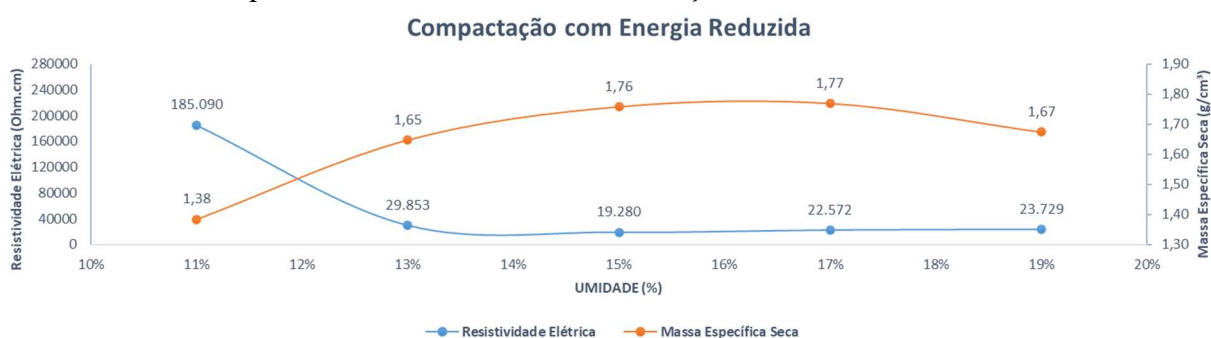


Figura 81 - Análise conjunta da massa específica seca e resistividade em função da umidade gravimétrica para o ensaio de energia reduzida

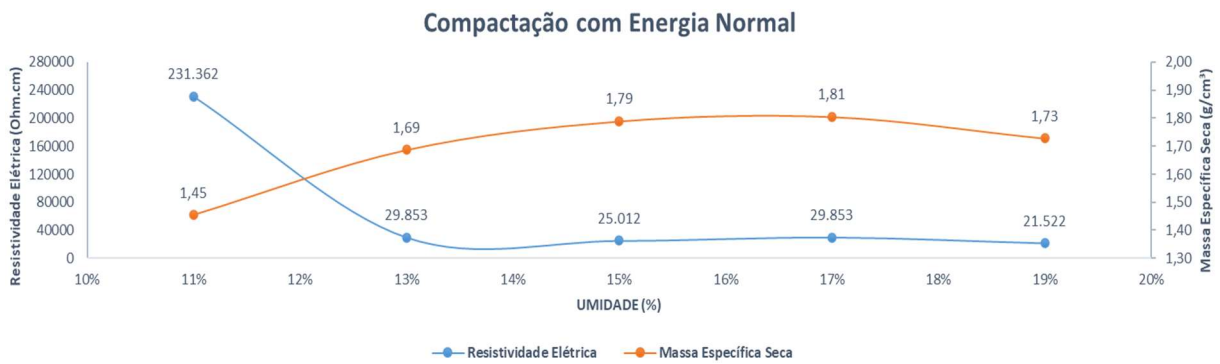


Figura 82 - Análise conjunta da massa específica seca e resistividade em função da umidade gravimétrica para o ensaio de energia normal

A Figura 83 evidencia que a correlação entre os parâmetros, massa específica seca e resistividade, não é boa, isso é confirmado em seu coeficiente de correlação de apenas 0,2361. Na Figura 83, foi esboçado, em maior parte, o trecho úmido da curva de compactação, que não tem correlação entre os parâmetros (resistividade e massa específica seca), já que neste trecho a massa específica seca tende a diminuir enquanto a resistividade tende a se estabilizar com a saturação.

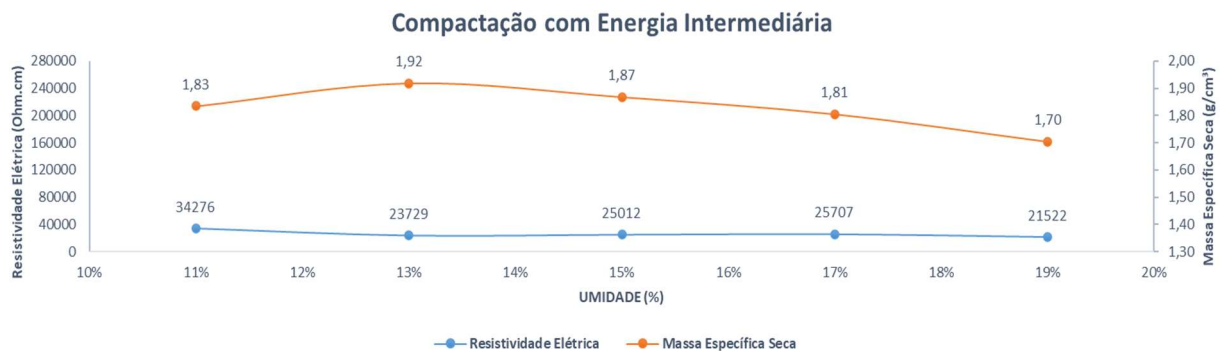


Figura 83 - Análise conjunta da massa específica seca e resistividade em função da umidade gravimétrica para o ensaio de energia intermediária

Essa diferença de resultados de correlação, da resistividade com a massa específica seca, nos dois trechos da curva de compactação (úmido e seco), indica que o fator responsável pelo aumento e diminuição da resistividade não é apenas a compactação, embora ela também influencie, uma vez que foram obtidos valores diferentes de resistividade para energias distintas mas com a mesma umidade. Esses resultados convergem para as afirmações de Bai, Kong e Guo (2013), que relacionam a diminuição da resistividade, devido à compactação, com a saturação, e consequentemente com a umidade volumétrica. Quando compactado, os espaços vazios no solo são diminuídos, mas a água presente no mesmo se mantém com mesmo volume, por isso a umidade volumétrica aumenta. O aumento da presença de água em um mesmo volume garante caminhos melhores para a condução da eletricidade, consequentemente diminuindo a resistividade. No entanto ocorre a estabilização dos valores de resistividade

elétrica quando a umidade ultrapassa um determinado teor, isso porque não há mais diminuição da distância percorrida com os novos caminhos.

Utilizando-se a massa da amostra de solo e o teor de umidade gravimétrica foi possível calcular a umidade volumétrica para todas as amostras, e relacionar, através de gráficos, a umidade volumétrica e a resistividade.

Nas Figura 84, Figura 85 e Figura 86, é possível identificar que a correlação da resistividade com umidade volumétrica acompanha ambos os trechos da curva de compactação. Por meio destas figuras, fica evidente que a resistividade cai com o aumento da umidade volumétrica até 22%, depois disso ela mantém o valor, independentemente do aumento da umidade volumétrica.

Para esses casos foram obtidos fatores de correlação inversa, por meio da função Correl do Excel, de -0,8247, -0,8062 e -0,8265 para energia reduzida, normal e intermediária, respectivamente, o que corrobora com a influência da umidade volumétrica sobre a resistividade elétrica para ambos os trechos (seco e úmido) da curva de compactação.

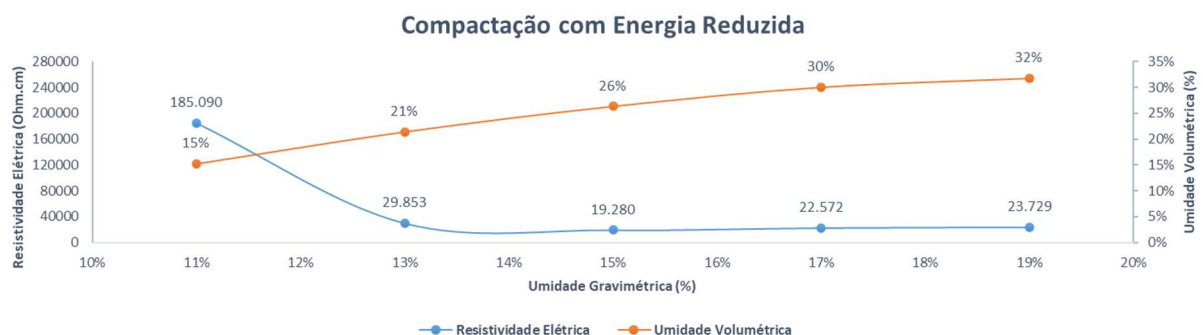


Figura 84 - Relação umidade volumétrica x resistividade, para energia reduzida

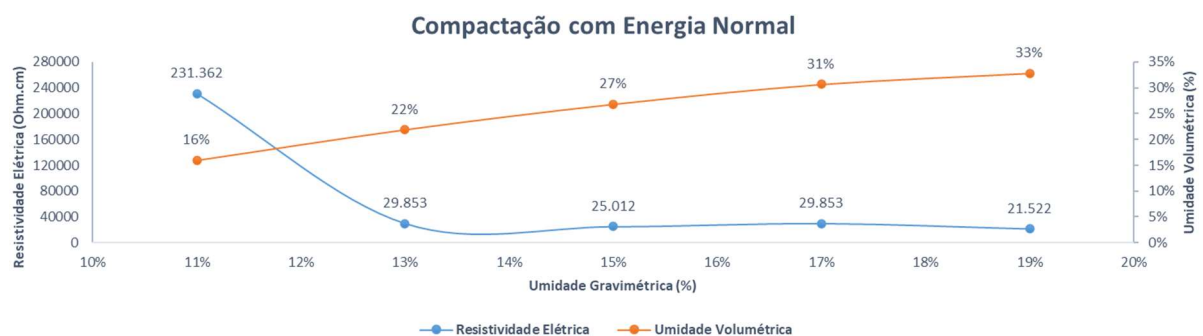


Figura 85 - Relação umidade volumétrica x resistividade, para energia normal

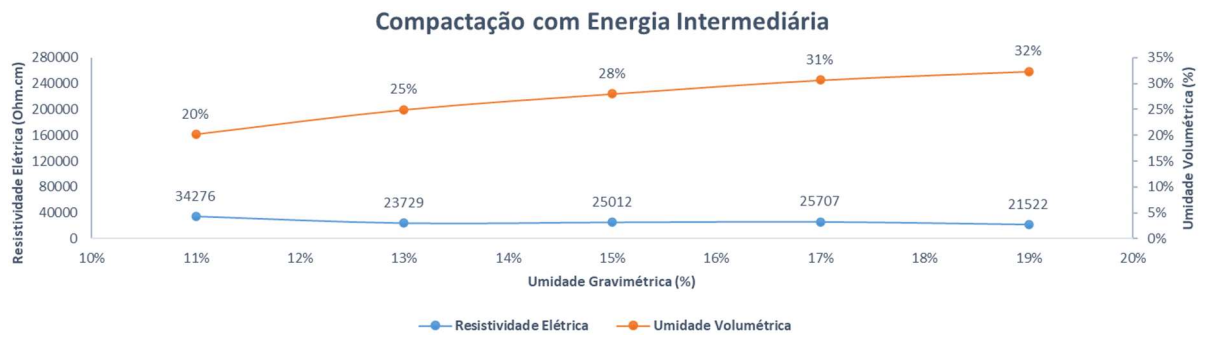


Figura 86 - Relação umidade volumétrica x resistividade, para energia intermediária

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar por distintos procedimentos a corrosão ocorrida em estacas helicoidais, fabricadas em aço patinável, instaladas no Campo Experimental de Fundações da EESC, após um período de aproximadamente quatro anos de instalação. Para compreender os resultados de corrosão observada, ao longo da profundidade de 15 m das estacas, a partir das características do solo foi aplicado o critério de Trabaneli. Também foi avaliado no trabalho o uso de aço patinável para corrosão enterrada, onde buscou-se compreender a diferença de resultados provenientes de ligas distintas. Por fim, avaliou-se como determinados parâmetros podem influenciar no comportamento de corrosão dos elementos enterrados.

Primeiramente foi observado que o nível de corrosão ao longo da profundidade de instalação das estacas helicoidais variou. As zonas de corrosão mais severas ocorreram na camada mais próxima a superfície e na zona ao redor a 8m de profundidade, que fica próximo ao topo da camada de solo residual, e logo acima do N.A. máximo medido ao longo dos anos de análise (varia sazonalmente entre 9 e 12m de profundidade aproximadamente). No entanto, a região entre 2 e 6m de profundidade de estaca apresentou corrosão branda. Na região da estaca que fica constantemente abaixo do N.A. a corrosão verificada com o rugosímetro foi semelhante ao do aço nunca utilizado e nunca exposto a atmosfera, ou seja, insignificante. Estes resultados indicam que na análise da corrosão de estacas metálicas não se pode considerar apenas uma taxa de corrosão única para todo o elemento. A análise deve considerar a agressividade do solo ao longo da estaca, as condições de umidade do terreno e possível variação sazonal do N.A., sob risco de haver faixas onde a corrosividade do solo seja maior, do que a prevista pela taxa homogênea, e comprometa toda a resistência do elemento.

Os resultados de rugosidade apresentaram que a perda da área de aço da seção, na profundidade em que a condição de corrosão é mais crítica, foi da ordem de 6,6%, para o período de aproximadamente quatro anos, considerada pequena para uma taxa que tende a diminuir com o tempo. Já pelos ensaios de perda de massa em campo feitos neste trabalho, a perda da espessura mínima exigida por normas para 30 anos de vida útil (1mm) seria atingida somente após 25 anos de vida da estaca. No entanto, a NBR, diferentemente do Eurocode, não considera um aumento dessa espessura conforme o aumento da vida útil de projeto, que para esse tipo de estrutura seria entre 50 e 100 anos.

Nas estacas estudadas, de forma geral, a corrosão apresentou-se em forma de pite (forma predominante), o que não é considerado grande problema, uma vez que não há risco de

vazamentos e nem perda seção. No entanto, a profundidade de pites encontrada na zona mais crítica da estaca foi da ordem de 1mm, após os quatro anos. Essa forma de corrosão facilita a ocorrência de perda de resistência mecânica devido à corrosão intragranular e à corrosão sob tensão causada pelos carregamentos, o que afetaria a estaca além da simples perda de seção.

A classificação da agressividade do solo ao longo da estaca pelo critério de TrabANELLI, apresentou resultados compatíveis com a corrosão observada nos elementos de estudo. O critério se mostrou pertinente e uma forma de classificação interessante para utilização em projetos de estacas helicoidais, no entanto deve ser avaliado juntamente com dados de variação sazonal do lençol freático ao longo da profundidade das estacas.

Com os resultados do ensaio de perda de massa ficou evidente que, para o tempo analisado, as taxas de corrosão do aço patinável e do aço carbono (em condição enterrada) foram semelhantes. Apesar de nas menores idades as medições terem resultado em maior perda de massa do aço carbono, ao longo do tempo essas taxas acabaram se aproximando. No entanto, vale salientar que o prazo de análise (seis meses) não é o ideal para indicar o comportamento da curva em períodos superiores.

Na medição de potencial de corrosão em campo foi apresentado, que para os dois meses em que elas foram analisadas, as amostras estabilizaram seus valores, obtendo variações pequenas após o primeiro mês. Quando se combinam os resultados de potencial com os de pH e plota-se sobre o diagrama de Pourbaix para o Fe, fica evidente que, apesar da estabilização dos valores de potencial, todas as amostras, para ambos os furos, ficaram na zona de corrosão, tendo um deslocamento para dentro dessa zona, com o tempo.

Os resultados da medição da resistividade de acordo com o grau de compactação, evidenciaram que a influência da compactação sobre a resistividade não é direta, isso porque foram obtidas correlações discrepantes nos trechos seco e úmido das curvas de compactação, mas que, indiretamente, a compactação influi, pois a sua variação interfere nos valores de resistividade elétrica. A partir dessa conclusão, foi investigada a influência da umidade volumétrica, parâmetro influenciado pelo grau de compactação, sobre a resistividade elétrica e foi observado que pra esse caso há correlação ao longo de ambos os trechos (seco e úmido) da curva de compactação.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros:

- Utilização de tecnologias, como Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Difração de Raio-X (DRX), para caracterização do material corroído e, no caso dos aços patináveis, para investigar a formação da pátina
- Ensaios de perda de massa, em campo, com maior duração para melhor estimativa da taxa de corrosão com o tempo
- Devido à heterogeneidade dos parâmetros de análise e da corrosão, é recomendado utilizar mais amostras para diminuir representatividade de cada uma. Somado a isso, deve-se aplicar ferramentas estatísticas para garantir confiabilidade dos resultados e possibilitar extrapolação dos mesmos
- Busca por métodos de proteção contra corrosão que se encaixem nas características operacionais das estacas helicoidais como fundação de linhas de transmissão
- Investigação da influência do processo de instalação, das estacas helicoidais, na condição de aeração e de resistividade do solo, devido ao revolvimento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e Execução de Fundações**. Rio de Janeiro, p.103. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457: Amostras de solo – Preparação para Ensaio de Compactação e Ensaio de Caracterização**. Rio de Janeiro, p. 12. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182: Solo – Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, p. 12. 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM G1: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens**. West Conshohocken, p. 09. Ed. 3, 2017.

BAI, W.;KONG, L.; GUO, A. (2013). **Effects of physical properties on electrical conductivity of compacted lateritic soil**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. Wuhan, China. v. 5, p. 406-411.

BRAGA, G.E. (2013). **Avaliação daIntegridade Estrutural de Fundações Metálicas de Linhas de Transmissão Devido à Corrosão**. Engenharia Estudo e Pesquisa. ABPE, v.13, p.28-38.

CAMPOS, L. G. (2015). **Variação da Resistividade Elétrica para Três Solos Não Saturados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - UNESP, Bauru.

DA SILVA, B. C. (2014). **Estimativa da Capacidade de Carga à Tração de Estacas Helicoidais com Base no Ensaio SPT**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - EESC (USP), Departamento de Geotecnia, São Carlos.

- DE AGUIAR, A. B. (2001). **O Emprego do Permeâmetro de Guelph na Determinação da Permeabilidade do Solo, de Camadas de Lixo e Sua Cobertura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRJ, Rio de Janeiro.
- DE OLIVEIRA, L. S.; PANNONI, F. D. (2012) Medidas de Potencial de Corrosão de Estacas de Aço Cravadas em Santos. Em: FEIRA DA INDÚSTRIA DE FUNDAÇÕES E GEOTECNIA, 7., 2012. São Paulo.
- DECKER, J. B.; ROLLINS, K. M.; ELLSWORTH, J. C. (2008). **Corrosion Rate Evaluation and Prediction for Piles Based on Long-Term Field Performance**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. ASCE. v. 134, n. 3, p. 351.
- DURAND-CHARRE, M. (2003) Microstructure Of Steels And Cast Irons. Paris, França: Ed. Sirpe.
- ELRICK, D. E.; REYNOLDS, W. D.; TAN, K. A. (1989). **Hydraulic Conductivity Measurements in the Unsaturated Zone Using Improved Well Analyses**. Groundwater Monitoring & Remediation. v. 9, p 184-193.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de Métodos de Análise de Solo (2º ed.)**. Rio de Janeiro, p. 212. EMBRAPA, 1997.
- EUROCODE 3. **Design of steel structures Part 5: Piling**. Brussels: CEN, 2007.
- FITZGERALD III, J. H. “**Engineering of Cathodic Protection Systems**”, Em: “Uhlig’s Corrosion Handbook”, 3rd Ed., R. Winston Revie (Ed.), The Electrochemical Society Series e Wiley, New York, 2011, p. 1001.
- GARDNER, W. R. (1958). **Some Steady-State Solutions of the Unsaturated Moisture Flow Equation with Application to Evaporation from a Water Table**. U. S. Department of Agriculture.
- GHALY, A.; HANNA, A.; HANNA, M. (1991). **Uplift of Screw Anchors in Sand. I: Dry sand**. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, v.117, n. 5, p. 773-793.

- GENTIL, V. (1982). **Corrosão** (3º ed.). Rio de Janeiro, RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- GU. J, -D.; FORD, T. E.; MITCHELL, R. “**Microbiological Corrosion of Metallic Materials**”, Em: “Uhlig’s Corrosion Handbook”, 3rd Ed., R. Winston Revie (Ed.), The Electrochemical Society Series e Wiley, New York, 2011, p. 549.
- JACK, T. R.; WILMOTT, M. J. “**Corrosion by Soils**”, Em: “Uhlig’s Corrosion Handbook”, 3rd Ed., R. Winston Revie (Ed.), The Electrochemical Society Series e Wiley, New York, 2011, p. 333.
- KANAI, S. (2007). **A Seismic Retrofitting Application by Means of Multi-Helix Micropiles**. Em: Proceedings of the 23rd U.S.–Japan Bridge Engineering Workshop, Tsukuba, Japan.
- MACHADO, S. L.; VILAR, O. M. (2003). **Geotechnical Characteristics Of Na Unsaturated Soil Deposit At São Carlos, Brazil**. Characterisation and Engineering Properties of Natural Soils, v. 2. p. 1305-1321.
- MATSUSHIMA, I. “**Carbon Steel - Corrosion by Soils**”, Em: “Uhlig’s Corrosion Handbook”, 3rd Ed., R. Winston Revie (Ed.), The Electrochemical Society Series e Wiley, New York, 2011, p. 609.
- MENEGOTTO, M. L. (2004). **Previsão da curva tensão-recalque de ensaios de placa em solo não saturado**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - EESC- USP. São Carlos - SP.
- MORAES, T. S. O. (2019). **Comportamento térmico e termomecânico de fundações por estacas trocadoras de calor em solos não saturados em região de clima subtropical**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - EESC-USP. São Carlos -SP.
- MOSQUERA, Z. S. Z. et al. (2015), **Discussion of "Field Investigation of the Axial Resistance of Helical Piles in Dense Sand"**. Canadian Geotechnical Journal, 51(11): p. 1343-1354.

- MORCILLO et al. (2013, **Atmospheric corrosion data of weathering steels. A review.** Corrosion Science. v. 77, p. 6-24.
- MURATA, T. “**Weathering Steels**”, Em: “Uhligh’s Corrosion Handbook”, 3rd Ed., R. Winston Revie (Ed.), The Electrochemical Society Series e Wiley, New York, 2011, p. 621.
- NORSWORTHY, R. “**Selection and Use of Coatings for Underground or Submission Service**”, Em: “Uhligh’s Corrosion Handbook”, 3rd Ed., R. Winston Revie (Ed.), The Electrochemical Society Series e Wiley, New York, 2011, p. 985.
- OLIVEIRA, L. S.; PANNONI, F. D. (2012) **Medidas De Potencial De Corrosão De Estacas De Aço Cravadas Em Santos.** Anais SEFE 7 - Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia.
- OHSAKI, Y. (1982). **Corrosion of Steel Piles Driven in Soil Deposits.** *Soils and Foundations*, 22, p. 57-76.
- PACHECO, A. D. (2004). **Ensaio com Cone Resistivo em Solos Saturados.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRJ, Rio de Janeiro.
- PANNONI, F. D. (2016). **Gerdau: Aços Patináveis.** Disponível em: <<https://www.comercialgerdau.com.br/pt/productsservices/products/Document%20Gallery/artigo-acos-patinaveis.pdf>>
- PEABODY, A. W. **Peabody's Control of Pipeline Corrosion.** Houston, Texas: NACE International. Ed. 2. 2001.
- PEIXOTO, A. S. P. (2013). **Fatores Intervenientes na Medida do Torque e na Medida da Resistividade em Ensaio de Campo.** Tese (Livre-Docência em Geotecnia Ambiental) - Faculdade de Engenharia de Bauru (UNESP), Departamento de Engenharia Civil, Bauru.

- PERKO, H. A.; STAN, J.; RUIPHER, P. E. (2000). **Helix Pier Engineering Handbook 2000**. Ingal Precision Foundation, INC. Worldwide Helix Pier Distributors.
- PERKO, H. A. (2009). **Helical Piles: A Practical Guide to Design and Installation**. Hoboken, New Jersey: Editora John Wiley & Sons, Inc.
- PINTO, N. D. S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; & Gomide, F. L. S. (2003). **Hidrologia básica**. Edgard Blucher. São Paulo - SP.
- PRASAD, Y. V. S.N.; RAO, S. N. (1994). **Pullout Behavior of Model Pile and Helical Pile Anchors Subject to Lateral Cyclic Loading**. Canadian Geotechnical Journal, v. 31, n.1, p. 110-119.
- PREGNOLATO, M. C.(2014). **Avaliação de Desempenho do Dispositivo de Medida de Resistividade Elétrica em Laboratório**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UNESP, Bauru - SP.
- RAGAB, R.; COOPER, J. D.; (1993). **Variability of unsaturated zone water transport parameters: implications for hydrological modelling. 1. In situ measurements**. Journal of Hydrology, v. 148, p. 109-131.
- ROMANOFF, M. (1962). **Corrosion of Steel Pilings in Soils**. National Bureau of Standards Monograph 58. Department of Commerce.
- SCHIAVON, J. A.; TSUHA, C. H. C; THOREL, L. (2018). **Monotonic, cyclic and post-cyclic performances of single-helix anchor in residual soil of sandstone**. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. v. 11, p. 824-836.
- SCHWEITZER, P. A.(2010). **Fundamentals of Corrosion: Mechanisms, Causes, and Preventative Methodes**. Boca Raton, Florida: Editora CRC Press.
- SERRA, E. T. (2014). **Corrosão e Proteção Anticorrosiva dos Metais no Solo (1º ed.)**. Rio de Janeiro, Rj: Editora Interciência.

- SOILMOISTURE EQUIPMENT CORP. (2008). **2800K1 Operating Instructions**. Santa Barbara, California.
- SOTO, M. A.; CHANG, K. H.; VILAR, O. M. (2009). **Análise do Método do Permeâmetro Guelph na Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada**. *Águas Subterrâneas*, v. 23, n. 01, p 137-152.
- SOWARDS, J. W.; MANSFIELD, E. (2014). **Corrosion of copper and steel alloys in a simulated underground storage-tank sump environment containing acid-producing bacteria**. *Corrosion Science*, v. 87, p. 460-471.
- TSUHA, C. H. C. (2007). **Modelo Teórico para Controle da Capacidade de Carga à Tração de Estacas Metálicas Helicoidais em Solo Arenoso**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - EESC (USP), Departamento de Geotecnia, São Carlos.
- TUNGESKIV, K.; MOUM, J.; FISCHER, K. P. (1975). **Investigations of Corrosion Rates on Steel Piles in Norwegian Marine Sediments**. 7º Scandinavian Corrosion Congress, Trondheim, Norway.
- YAMASAKI, M. T.; PEIXOTO, A. S.; LODI, P. C. (2014). **Evaluation of Electrical Resistivity in a Tropical Sandy Soil Compacted**. *EJGE*, 19.
- ZHANG, X. G., “Galvanic Corrosion”, Em: “Uhlig’s Corrosion Handbook”, 3rd Ed., R. Winston Revie (Ed.), The Electrochemical Society Series e Wiley, New York, 2011, p. 123.

ANEXO A

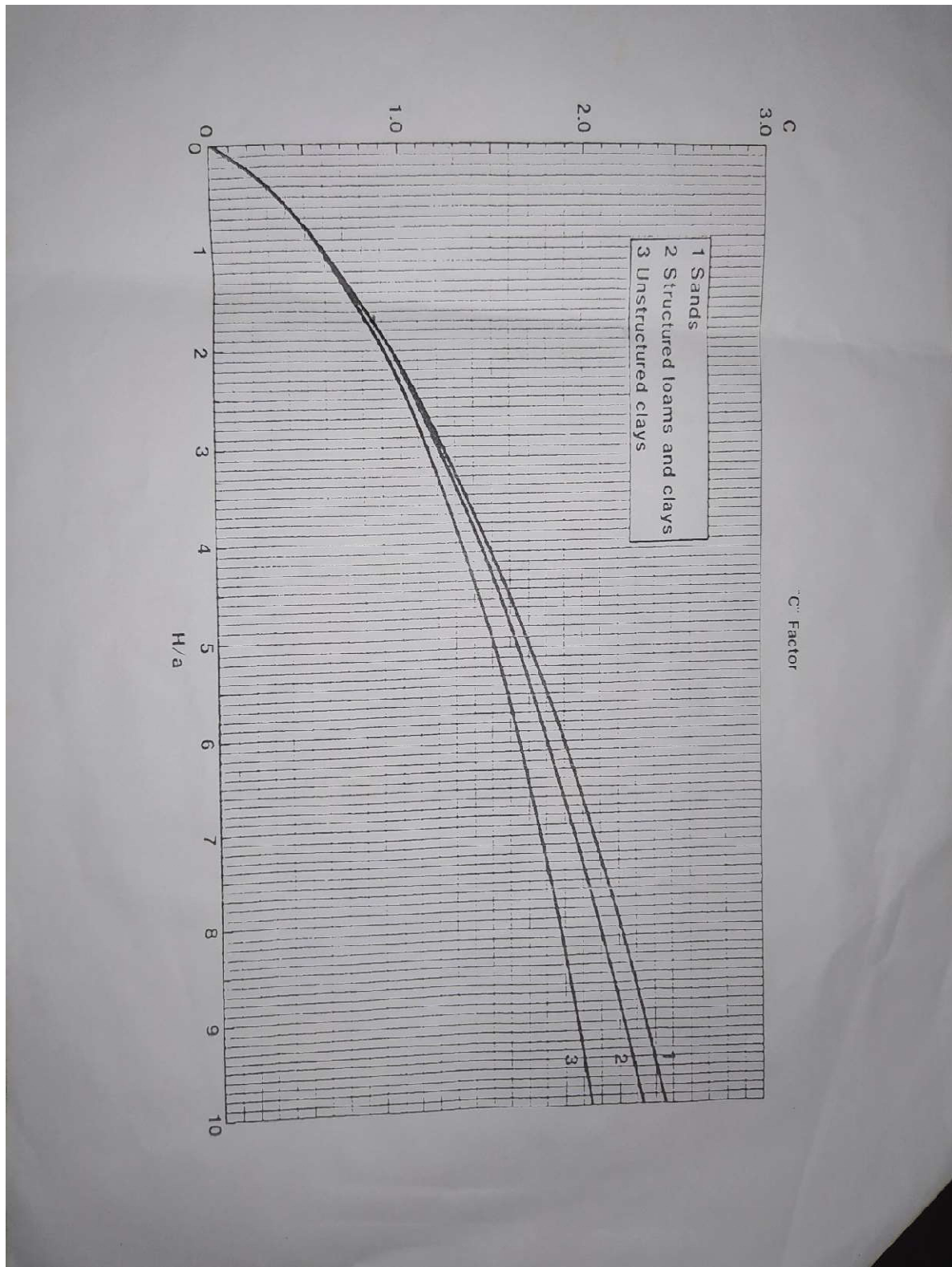


Figura 87 – Gráfico do fator C

EESC	SGS	USP									
PERMEABILIDADE GUELPH - ASTM D5126											
Solo: _____											
Local: <u>Campus Experimental</u>		Profundidade (m): <u>0,62</u>									
Oper.: _____		Amostra: _____									
Data: <u>17/08</u>											
DADOS DE ENSAIO											
Reservatório: Interno / <u>Duplo</u> (cm ²): _____		Área: <u>35,47 cm²</u>									
Profundidade do Furo (cm): <u>0,62</u>		Raio = a (cm): <u>3,00</u>									
Leituras p/ 1º estágio = H ₁ (cm): <u>5</u>		Leituras p/ 2º estágio = H ₂ (cm): <u>10</u>									
H ₁ /a: <u>1,67</u> C ₁ : <u>0,85</u>		H ₂ /a: <u>3,33</u> C ₂ : <u>1,3</u>									
Leitura Nº	(A) Tempo (min)	(B) Intervalo de Tempo (min)	(C) Nível de Água no Reservatório (cm)	(D) Variação do Nível de Água (cm)	(E) R ₁ = D/B (cm/min)	Leitura Nº	(A) Tempo (min)	(B) Intervalo de Tempo (min)	(C) Nível de Água no Reservatório (cm)	(D) Variação do Nível de Água (cm)	(E) R ₂ = D/B (cm/min)
1	0	0	12	0	-	1	0	0	28	-	-
2	1	1	13,5	1,5	1,5	2	1	1	30,5	2,5	2,5
3	2	1	15	1,5	1,5	3	2	1	33,5	3	3
4	3	1	16	1	1	4	3	1	36	2,5	2,5
5	4	1	17	1	1	5	4	1	39	3	3
6	5	1	18,5	1,5	1,5	6	5	1	41,5	2,5	2,5
7	6	1	19,5	1	1	7	6	1	44,5	3	3
8	7	1	20,5	1	1	8	7	1	46	1,5	1,5
9	8	1	21,5	1	1	9	8	1	49,5	3,5	3,5
10	9	1	22,5	1	1	10	9	1	51,5	2	2
11						11	10	1	56	4,5	4,5
12						12	11	1	58	2	2
13						13	12	1	60	3	3
14						14	13	1	64	3	3
15						15	14	1	67	3	3
CÁLCULO DOS PARÂMETROS											
1º estágio R ₁ = <input type="text"/> / 60 = <input type="text"/> cm/s											
2º estágio R ₂ = <input type="text"/> / 60 = <input type="text"/> cm/s											
K _{fs} = <input type="text"/> \cdot <input type="text"/> = <input type="text"/> cm/s											
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>área reservat. R₂</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>área reservat. R₁</p> </div> </div>											
φ _{Gm} = <input type="text"/> \cdot <input type="text"/> = <input type="text"/> cm ² /s											
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>área reservat. R₁</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>área reservat. R₂</p> </div> </div>											
α = <input type="text"/> / <input type="text"/> = <input type="text"/> cm ⁻¹											
<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>K_{fs}</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>f_m</p> </div> </div>											

Figura 88 - Planilha do Ensaio de permeabilidade Guelph

ANEXO B

IMAGENS ÓPTICAS DAS AMOSTRAS

ESTACA 1

E1-1-S-1

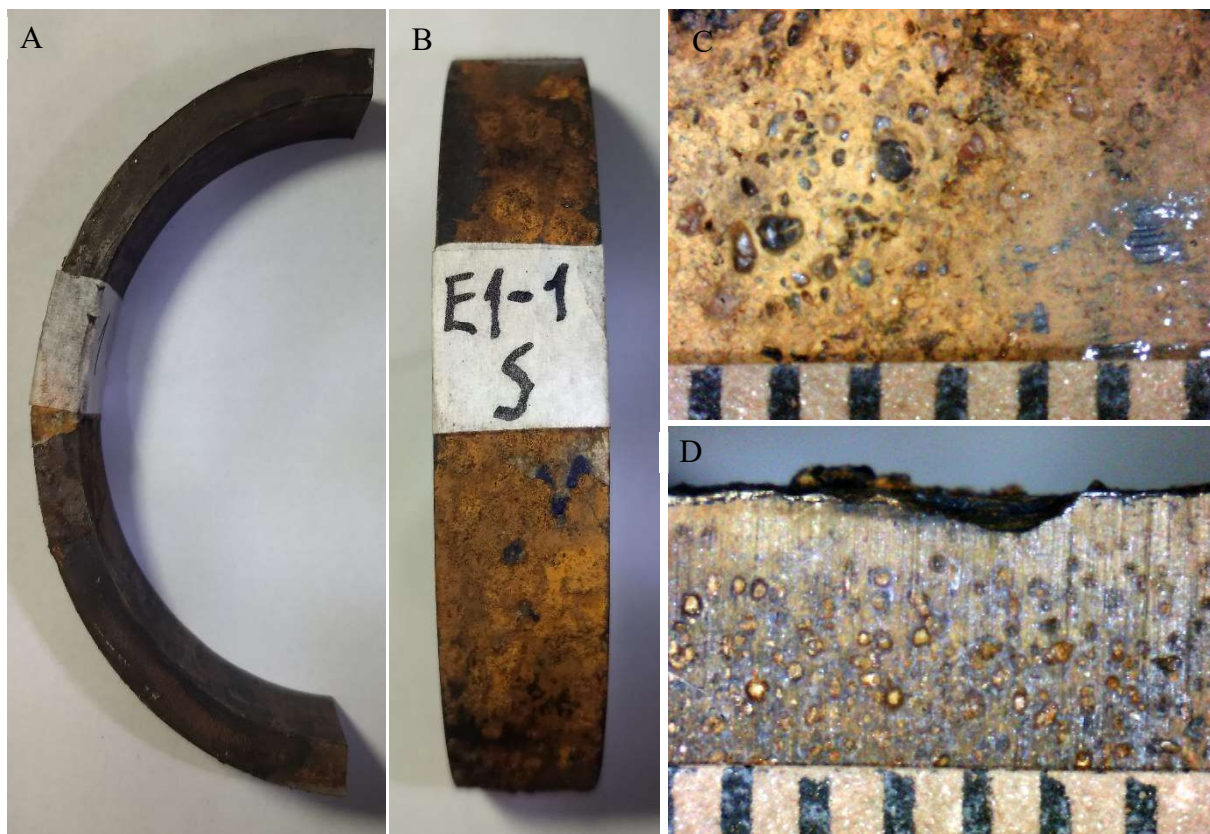


Figura 89 – Amostra E1-1-S-1 não decapada, A) Imagem de câmera(IC) vista superior; B) IC vista externa; C) Imagem de Microscópio(IM) vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

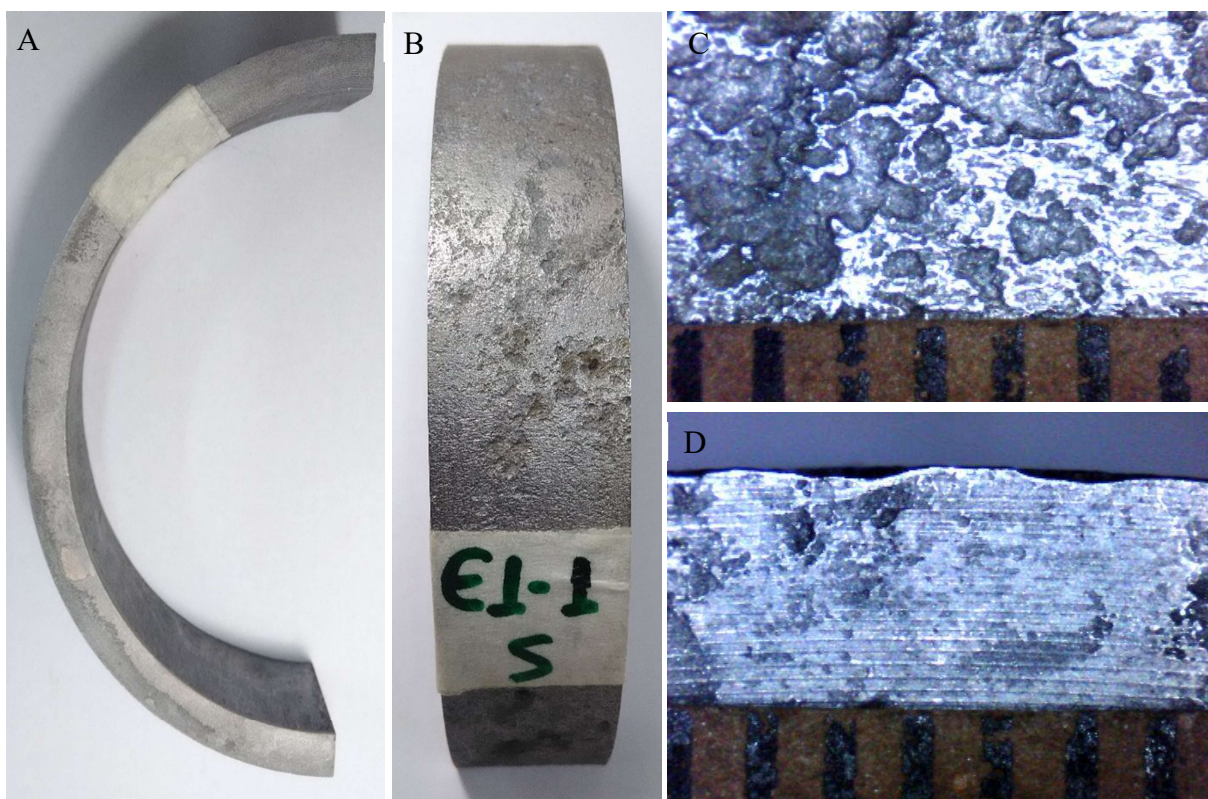


Figura 90 - Amostra E1-1-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E1-1-I-2

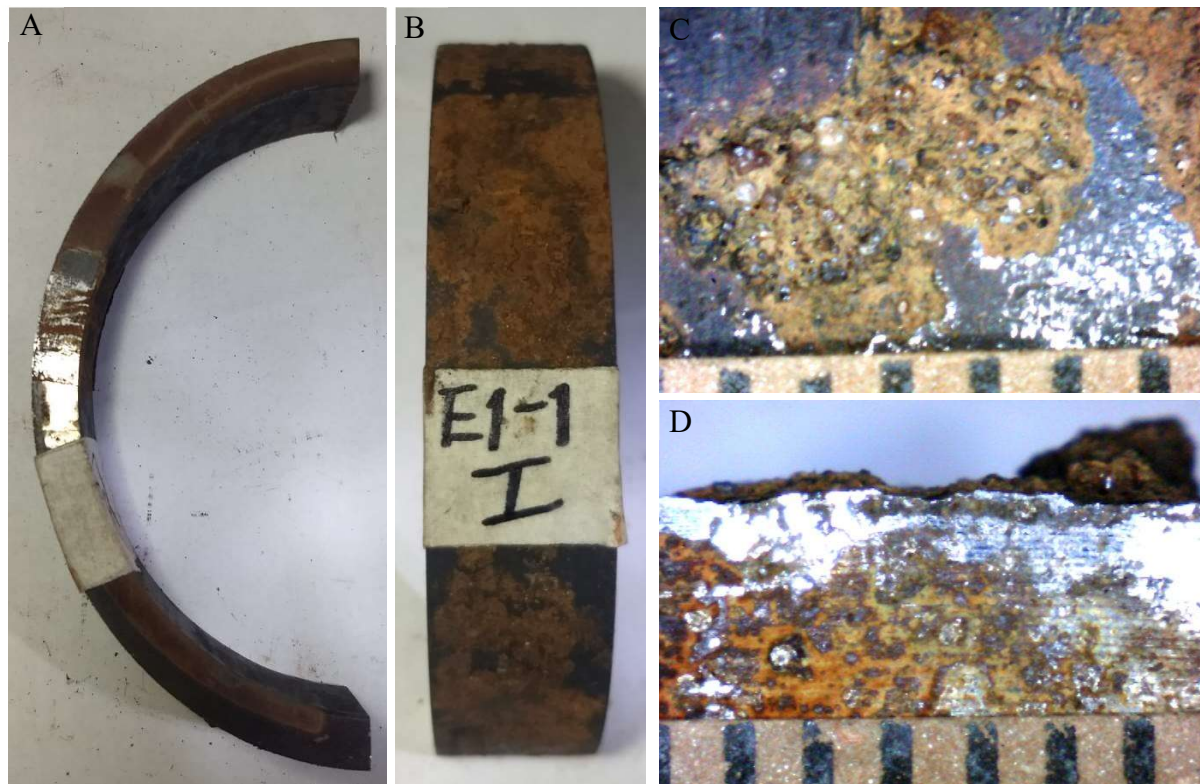


Figura 91 - Amostra E1-1-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

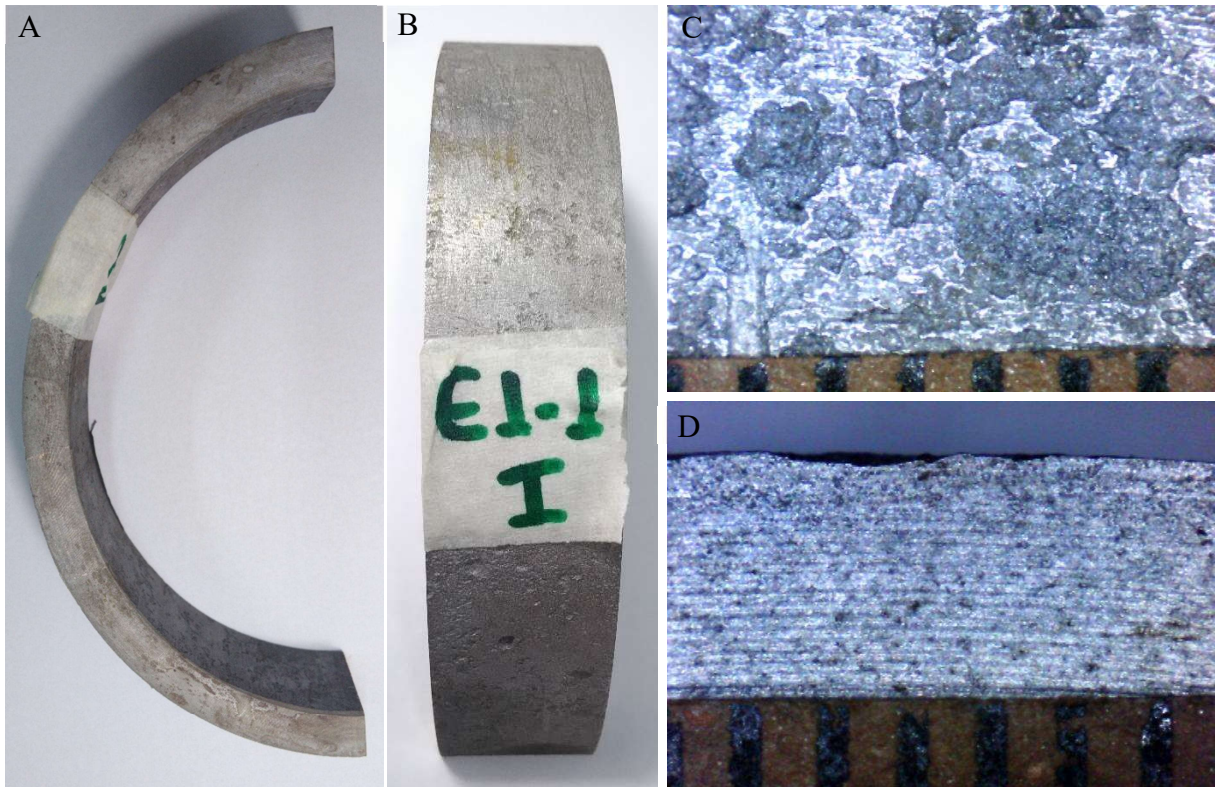


Figura 92 - Amostra E1-1-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E1-2-S-2

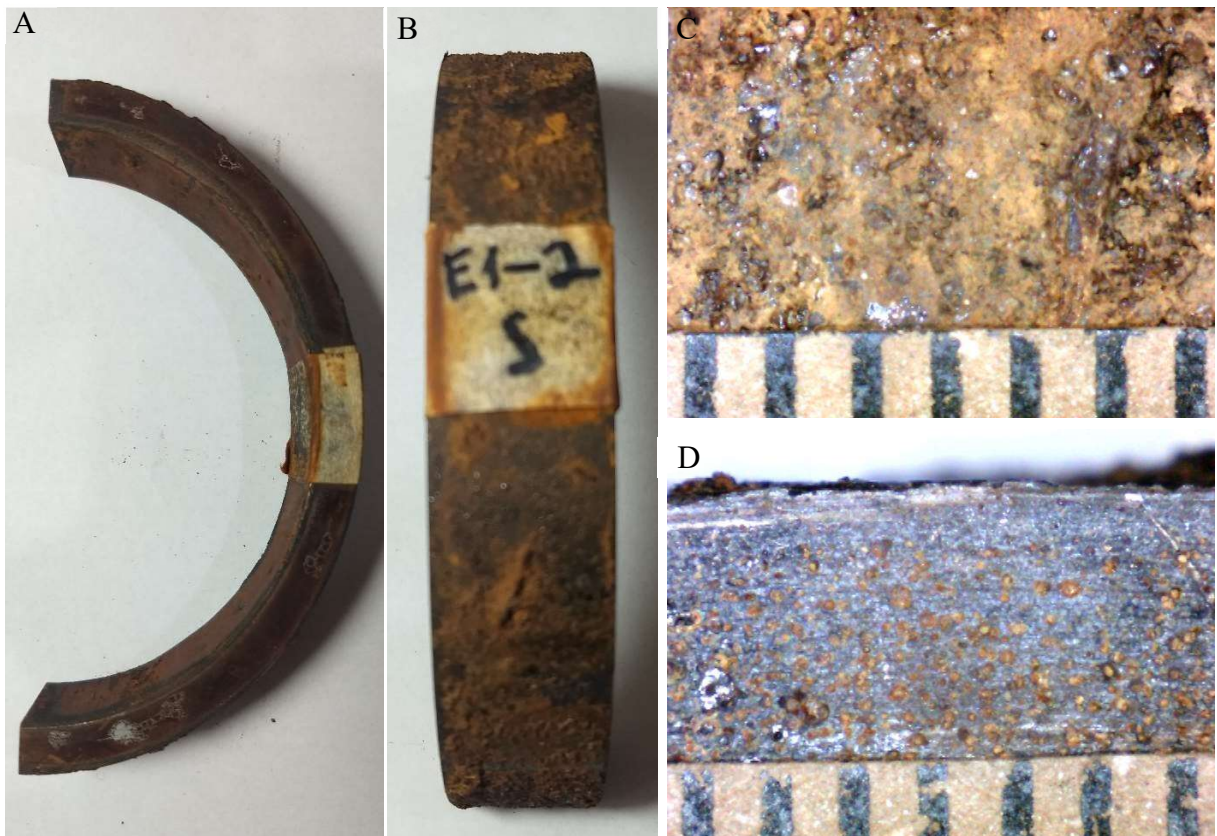


Figura 93 - Amostra E1-2-S Não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

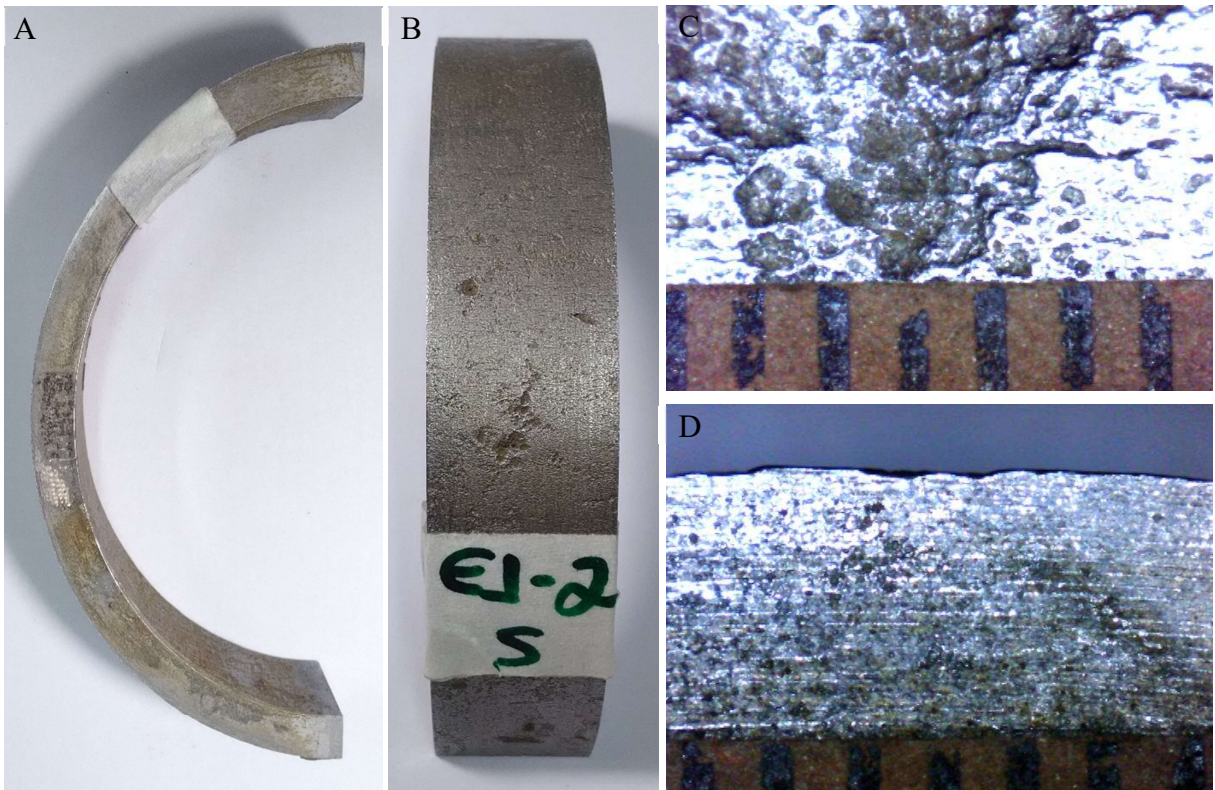


Figura 94 - Amostra E1-2-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E1-2-I-1

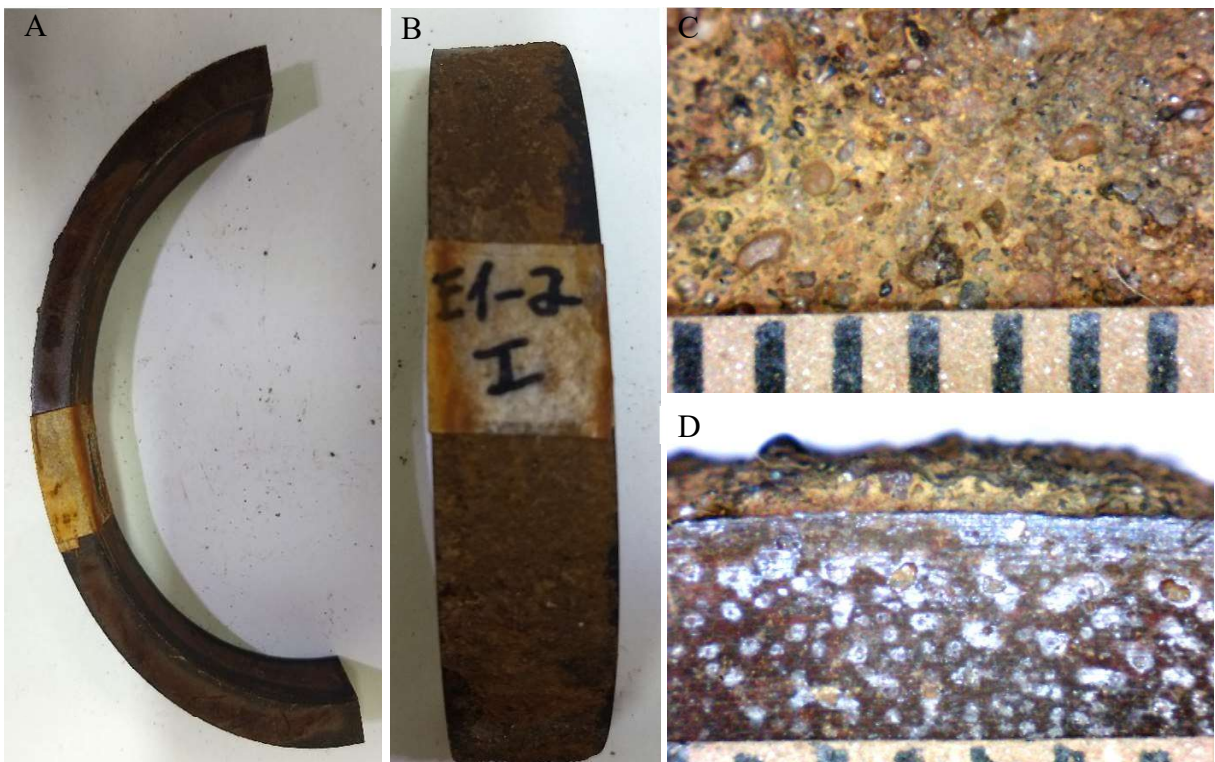


Figura 95 - Amostra E1-2-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

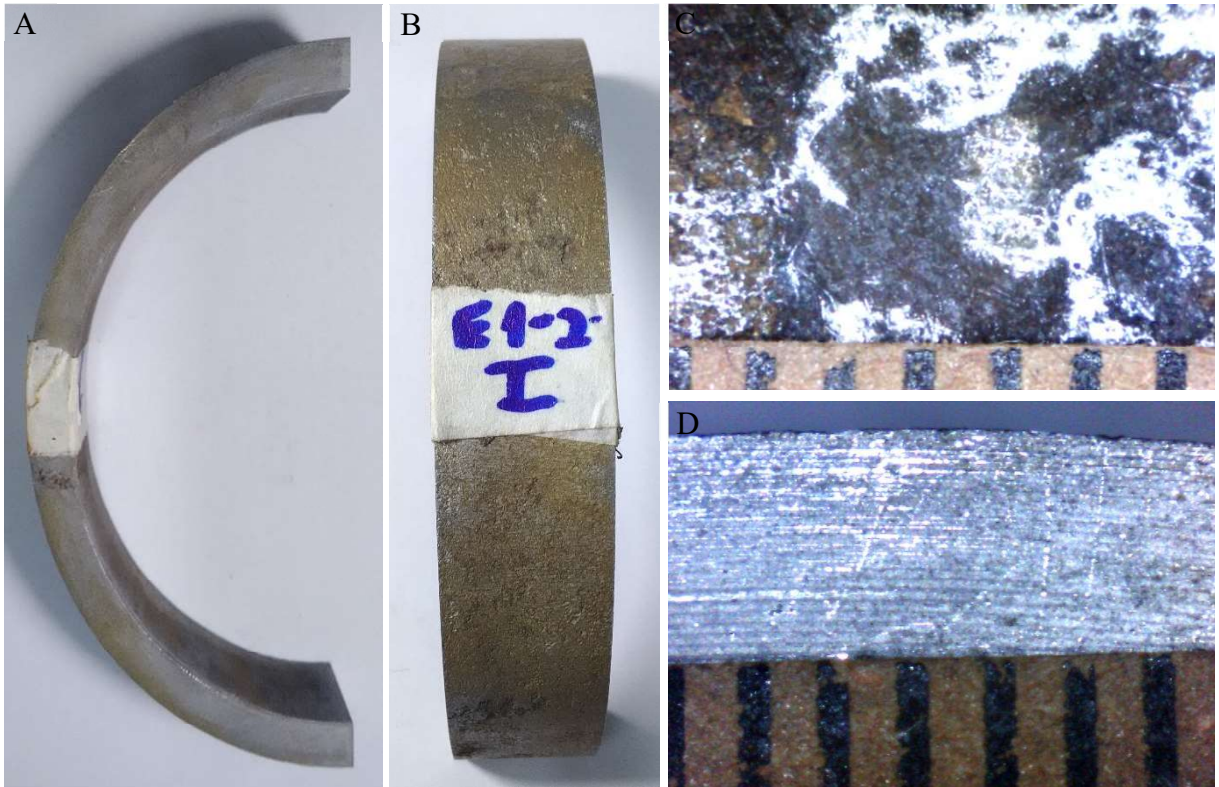


Figura 96 - Amostra E1-2-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E1-3-S-1

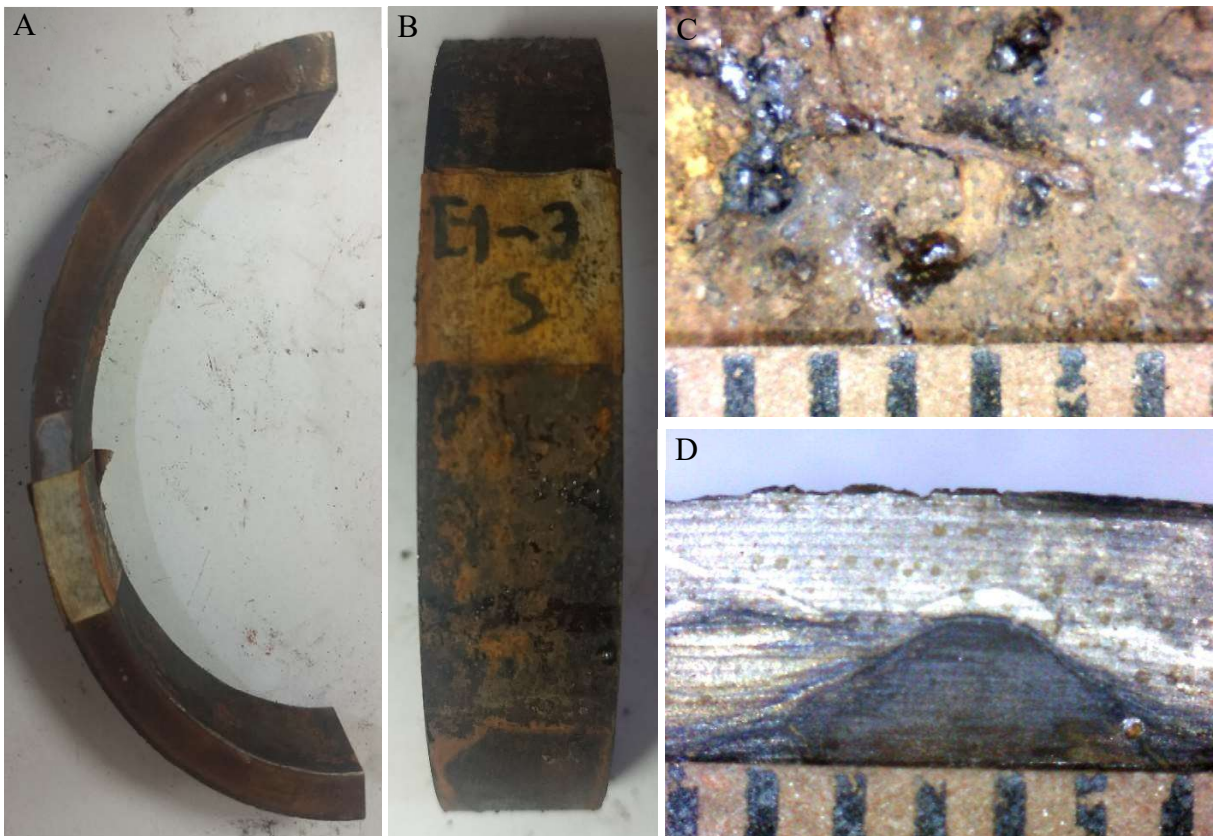


Figura 97 - Amostra E1-3-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

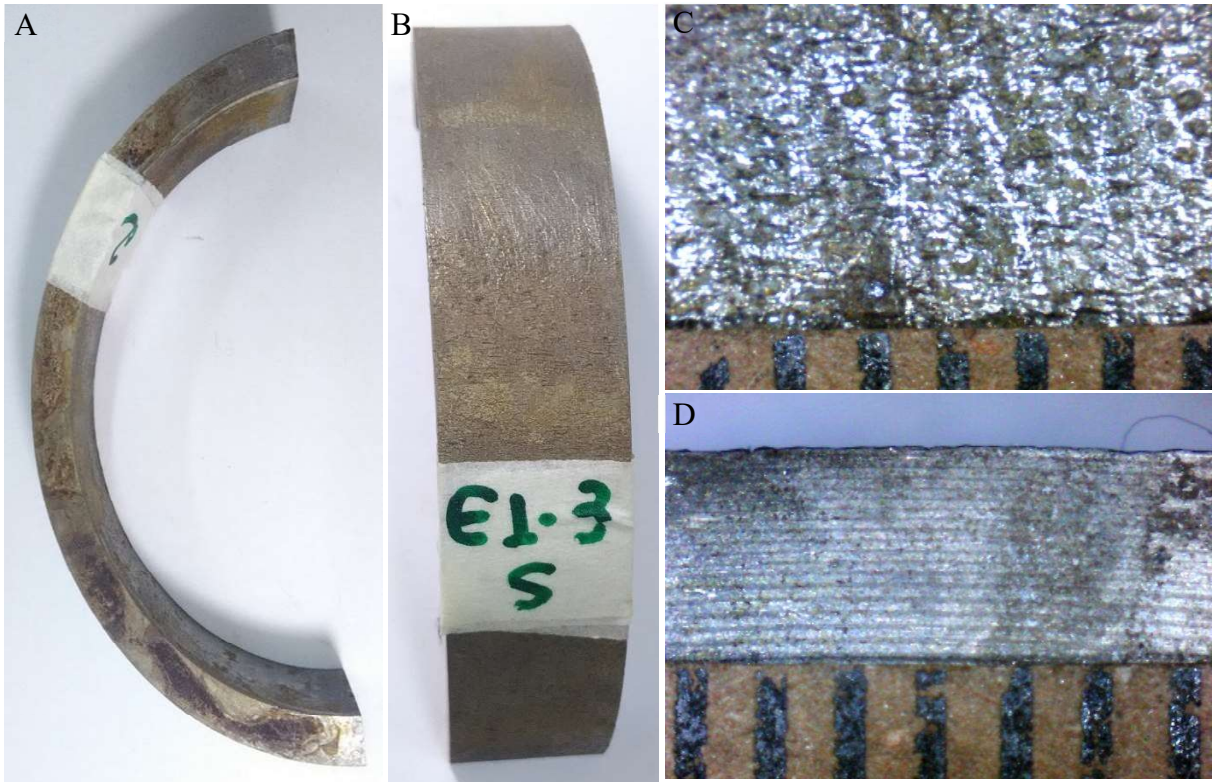


Figura 98 - Amostra E1-3-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E1-3-I-2

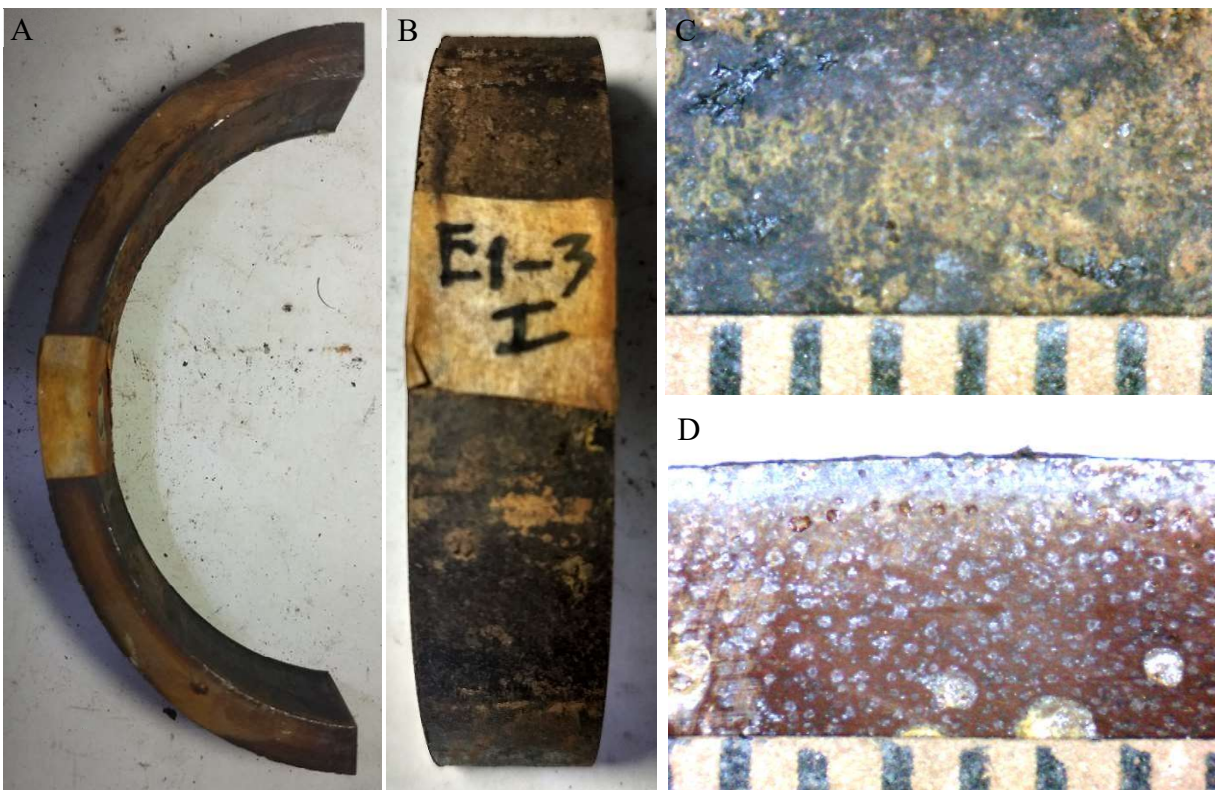


Figura 99 - Amostra E1-3-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

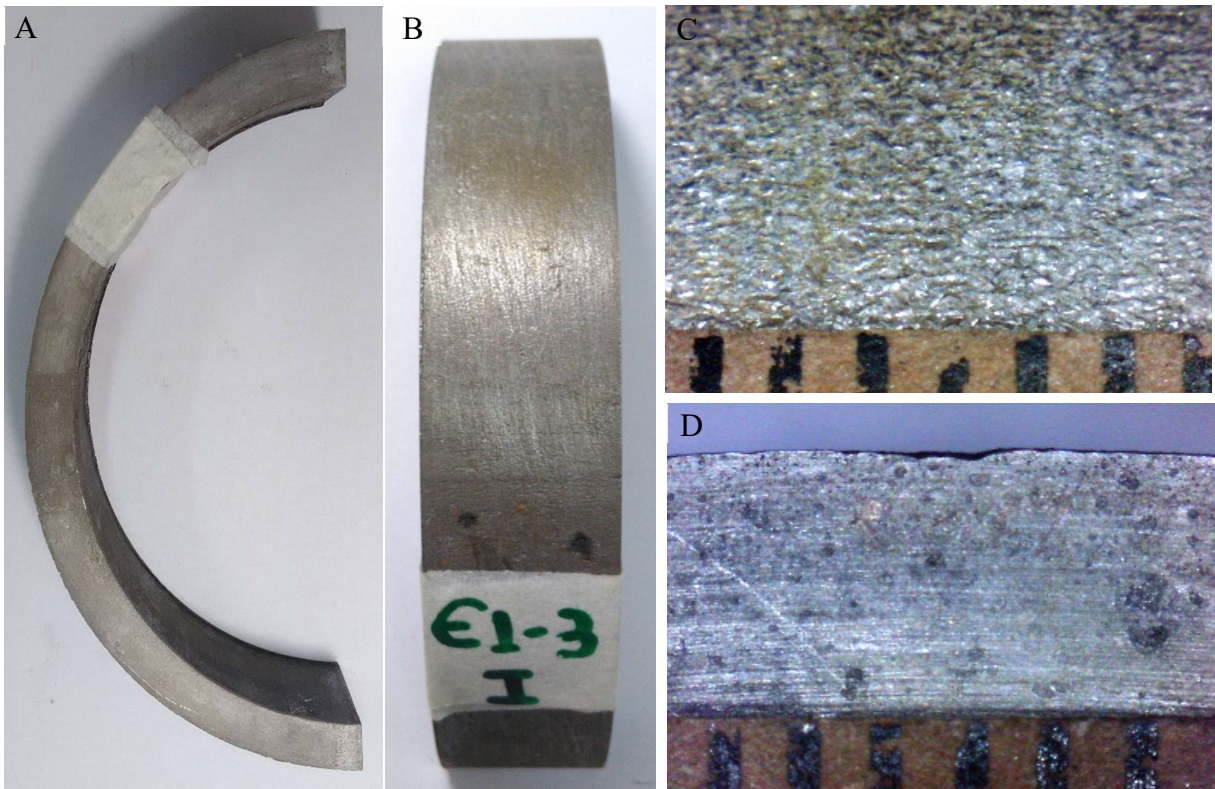


Figura 100 - Amostra E1-3-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E1-4-S-1

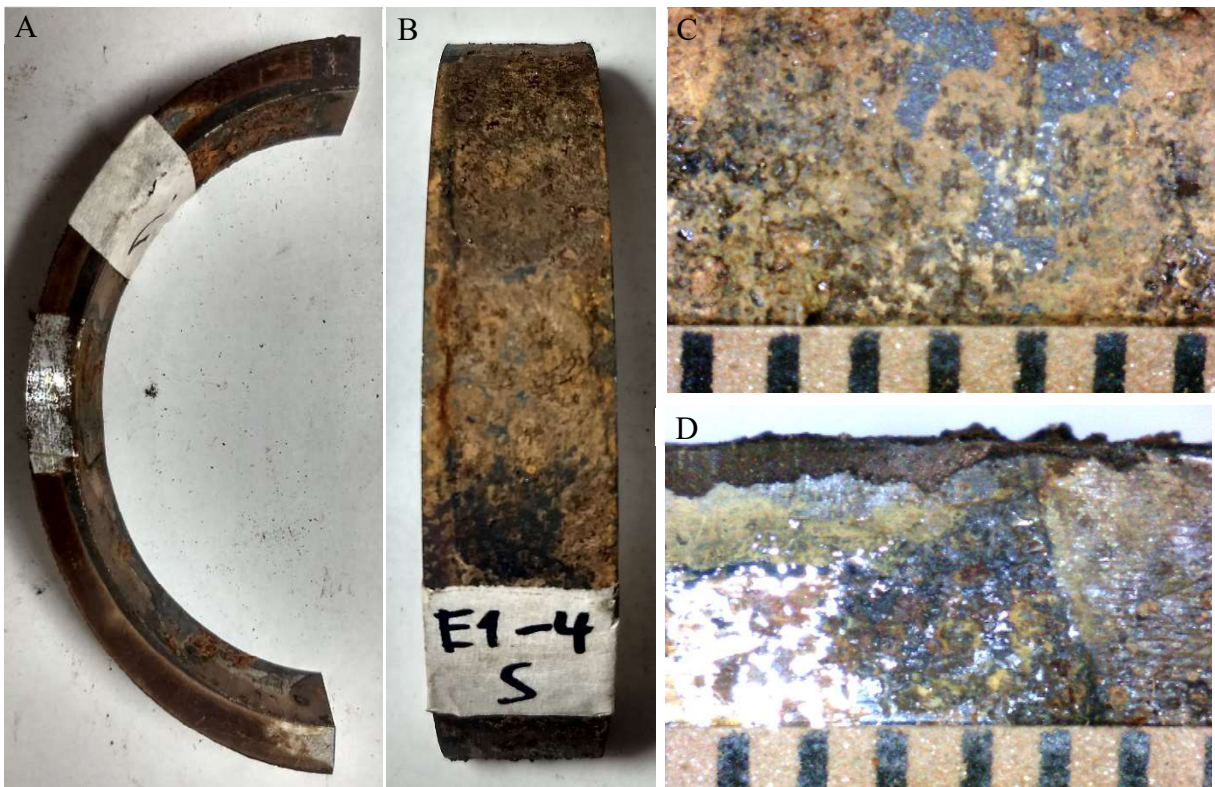


Figura 101 - Amostra E1-4-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

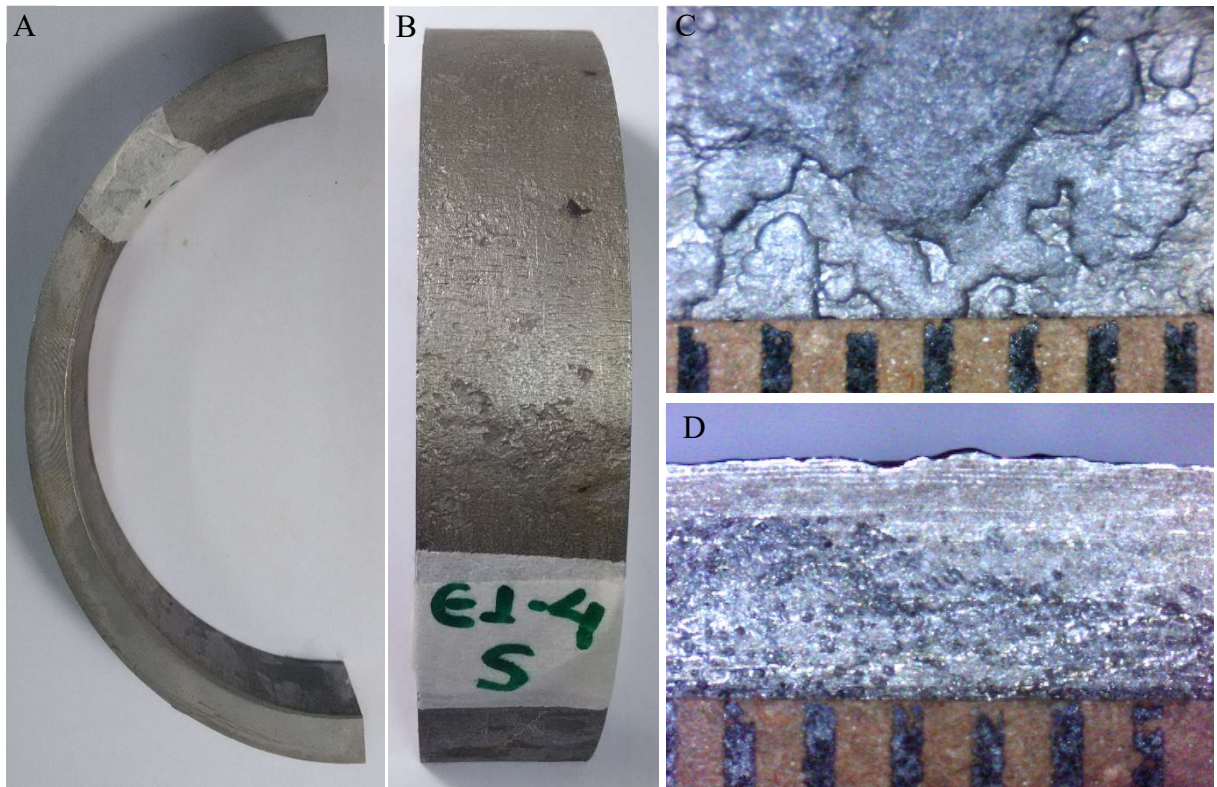


Figura 102 - Amostra E1-4-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E1-4-I-1

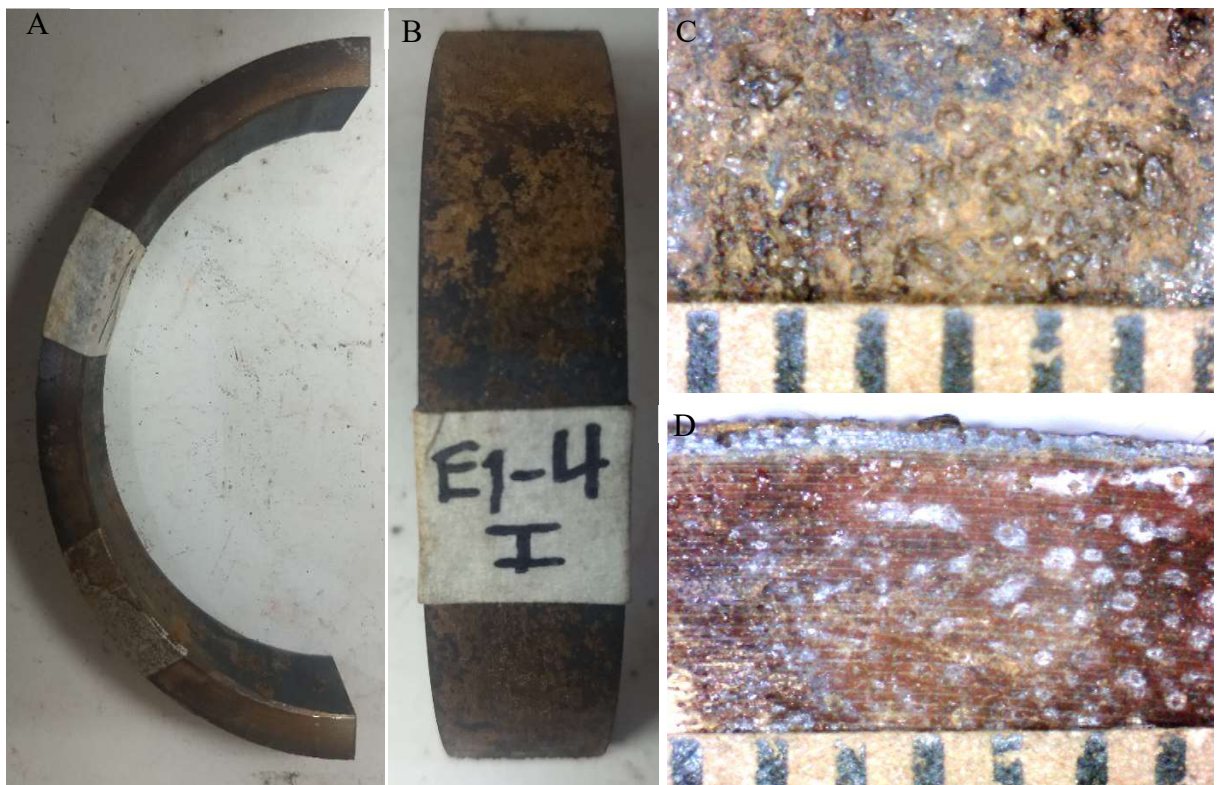


Figura 103 - Amostra E1-4-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

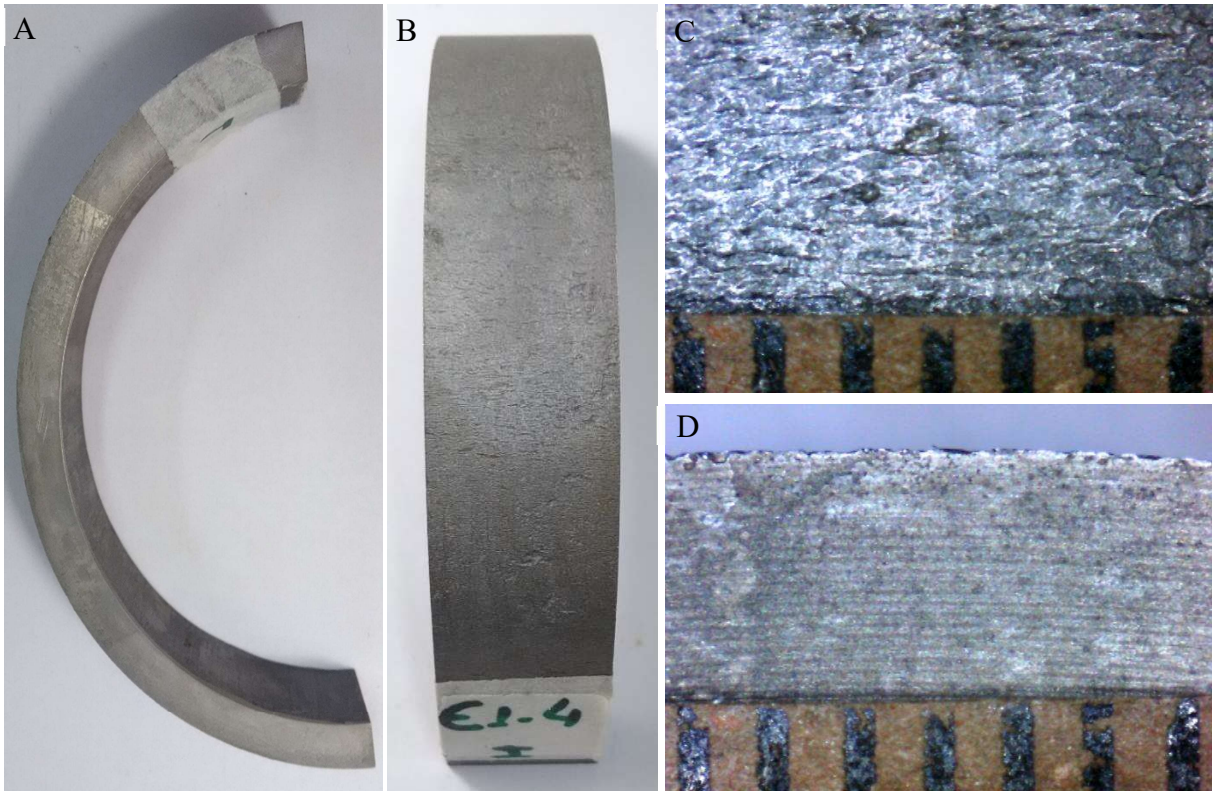


Figura 104 - Amostra E1-4-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E1-5-S-1

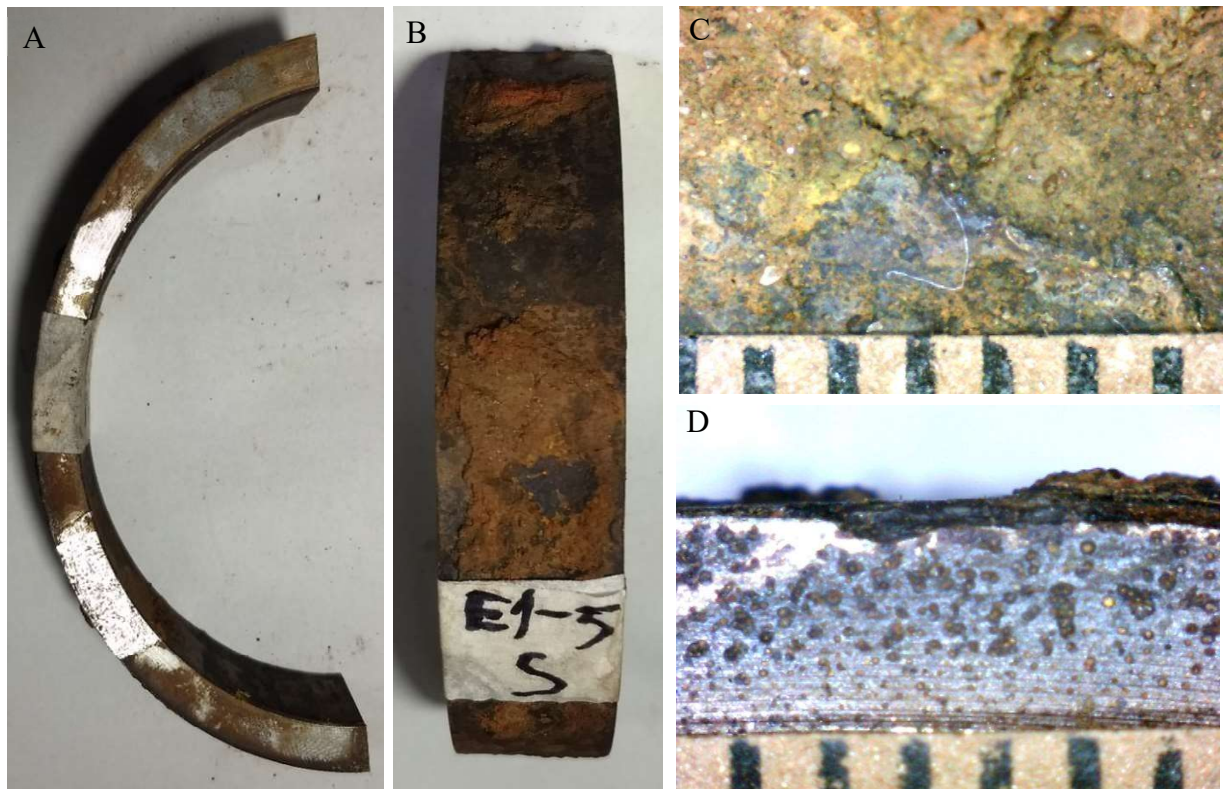


Figura 105 - Amostra E1-5-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

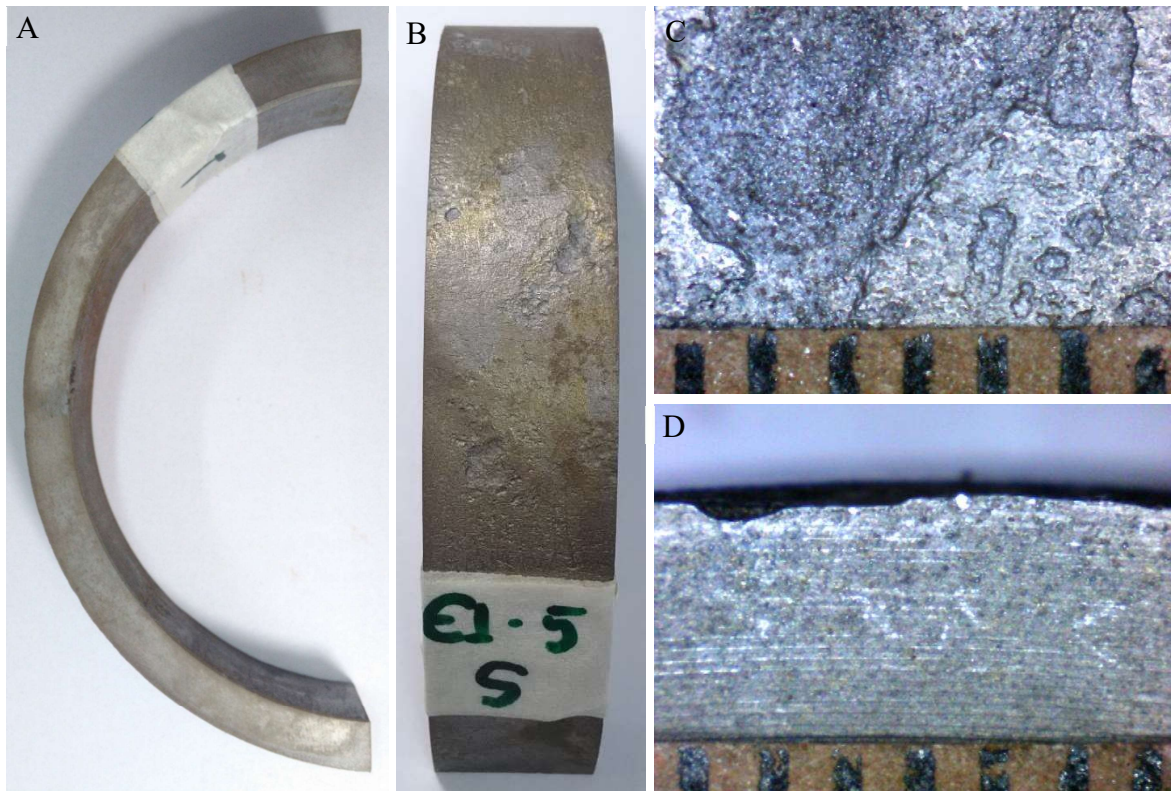


Figura 106 - Amostra E1-5-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm
E1-5-I-1

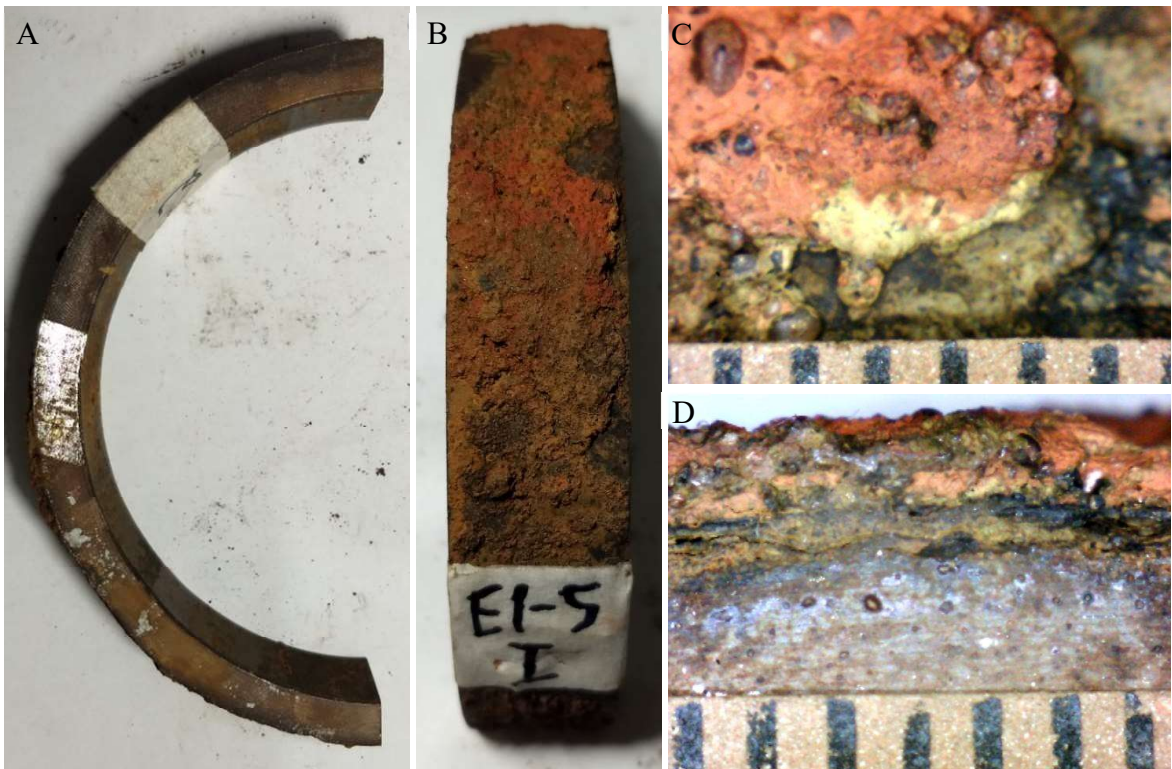


Figura 107 - Amostra E1-5-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

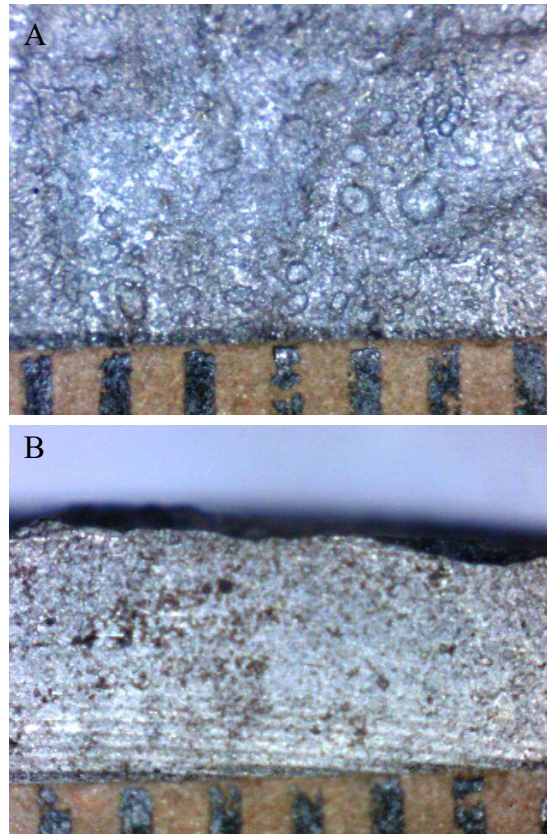


Figura 108 - Amostra E1-5-I decapada, A) IM vista externa, escala 1mm; B) IM vista superior, escala 1mm

E1-6-S-1



Figura 109 - Amostra E1-6-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

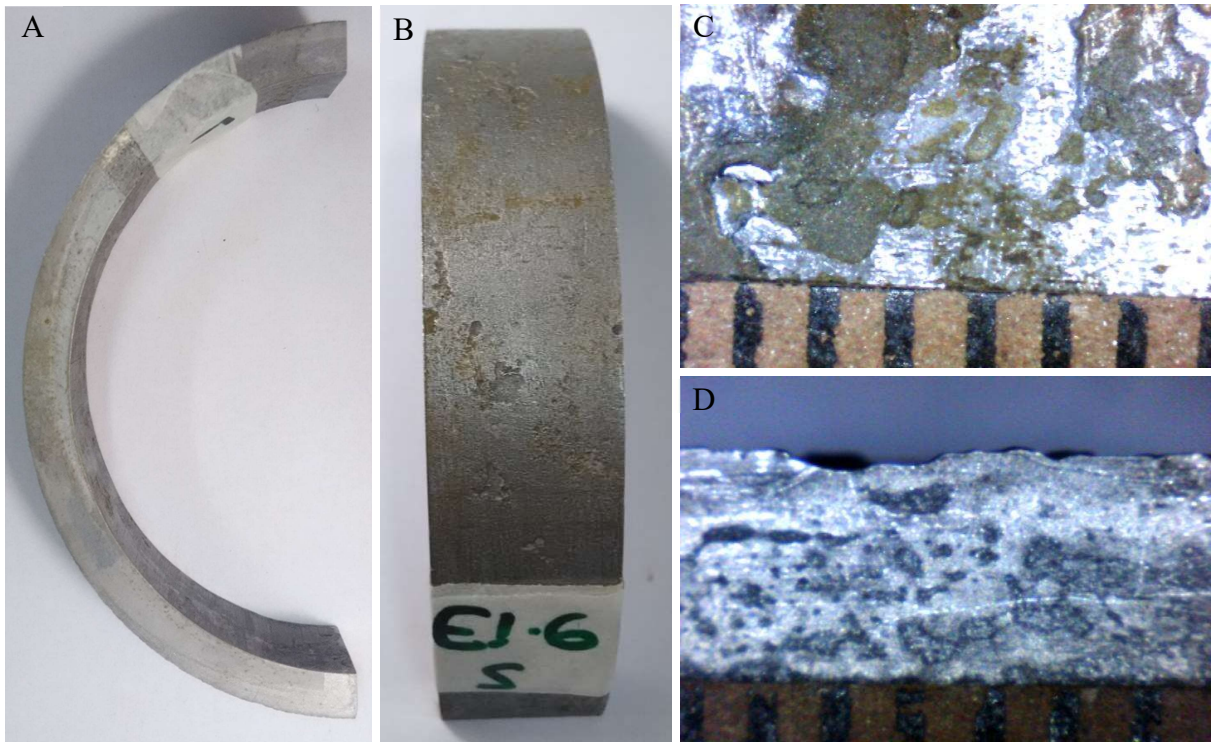


Figura 110 - Amostra E1-6-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E1-6-I-2

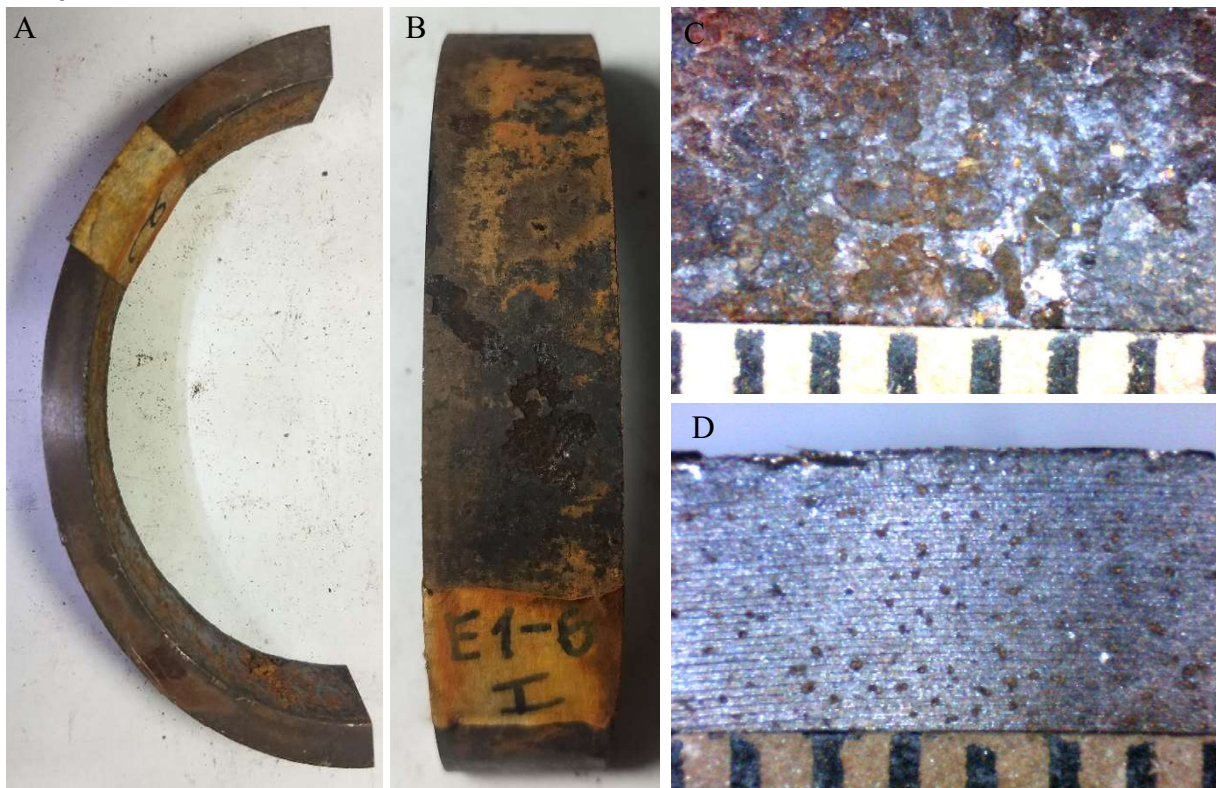


Figura 111 - Amostra E1-6-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

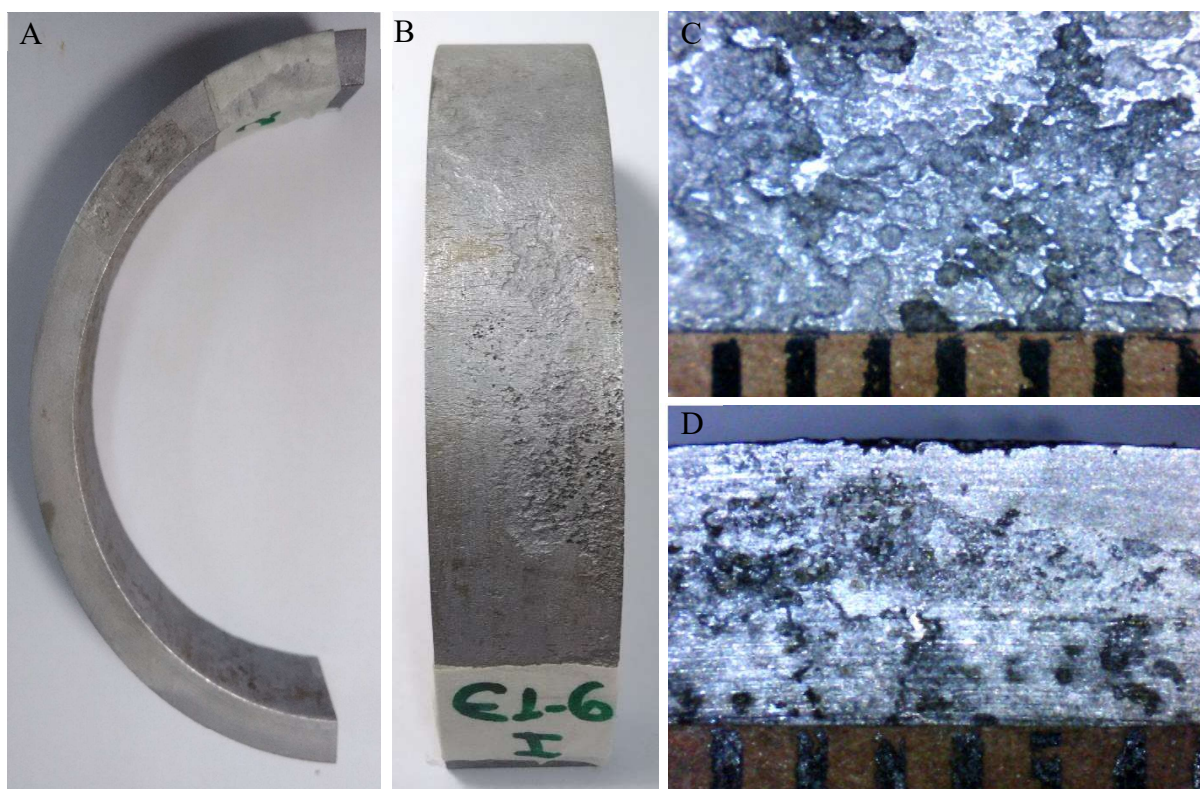


Figura 112 - Amostra E1-6-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E1-7-S-2

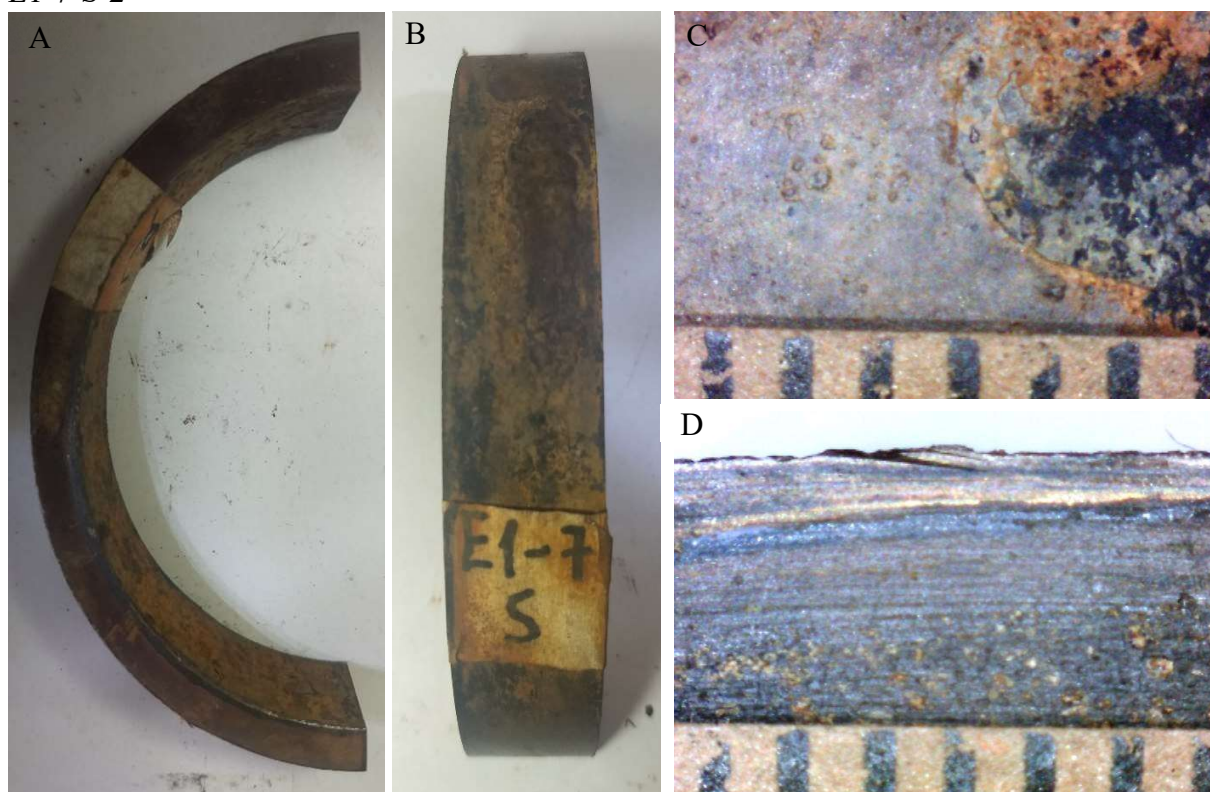


Figura 113 - Amostra E1-7-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

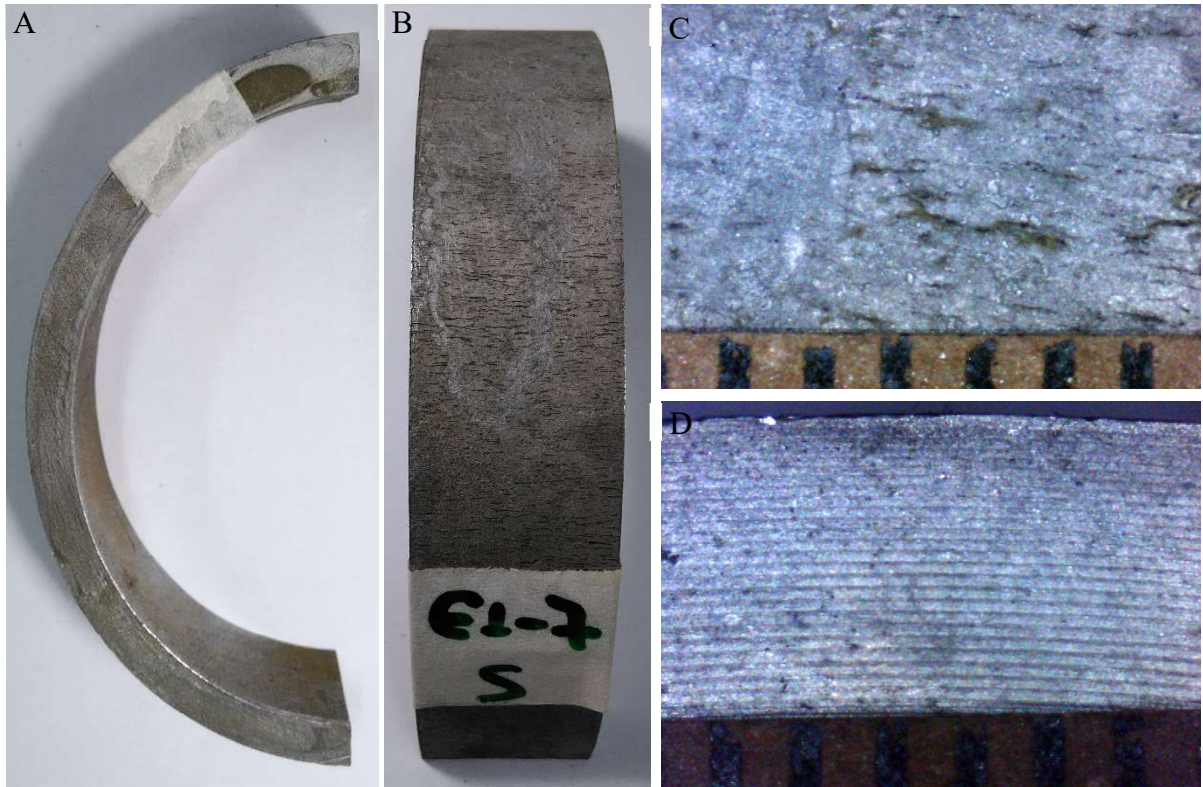


Figura 114 - Amostra E1-7-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E1- HELIX

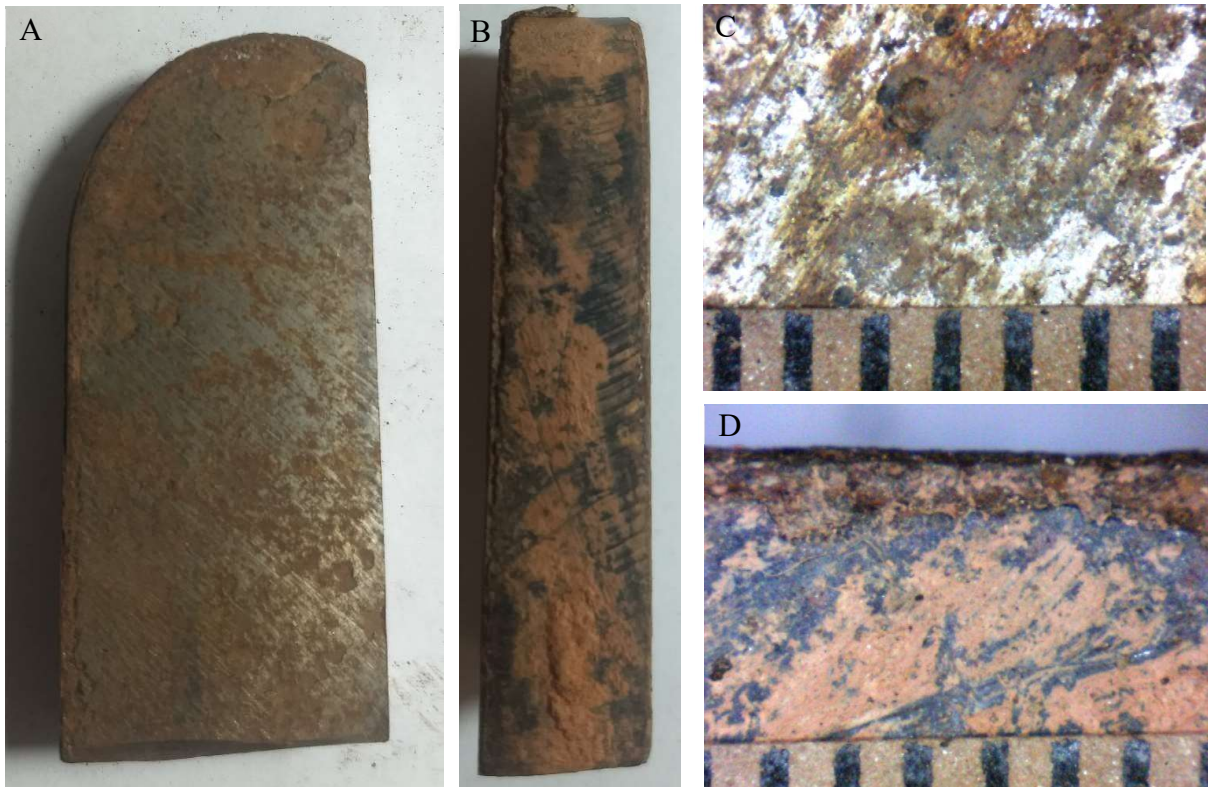


Figura 115 - Amostra E1-Hélice não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

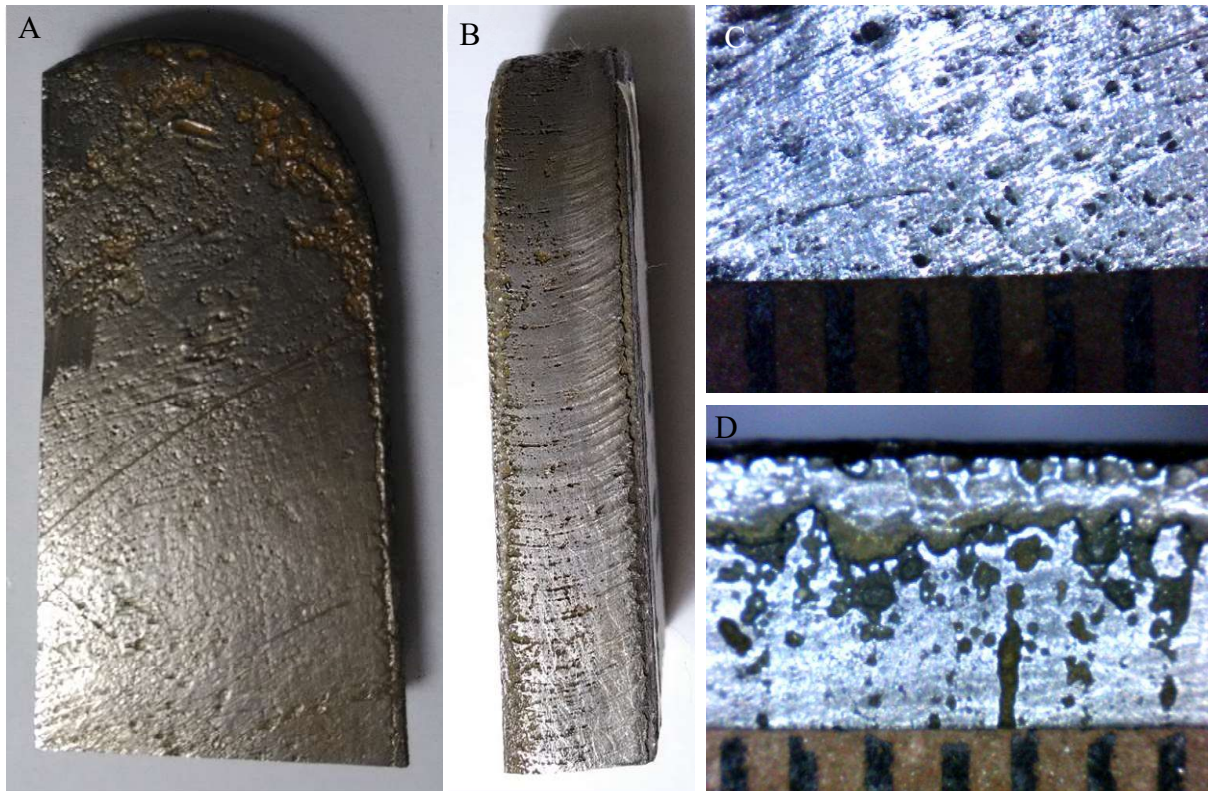


Figura 116 - E1-Hélice decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

Para as demais profundidades da estaca E1 foram obtidos resultados muito semelhantes ao da Hélice e da haste 7, por isso no presente será apresentado não será apresentado haste 8 e 9.

ESTACA 2

E2-1-S-2

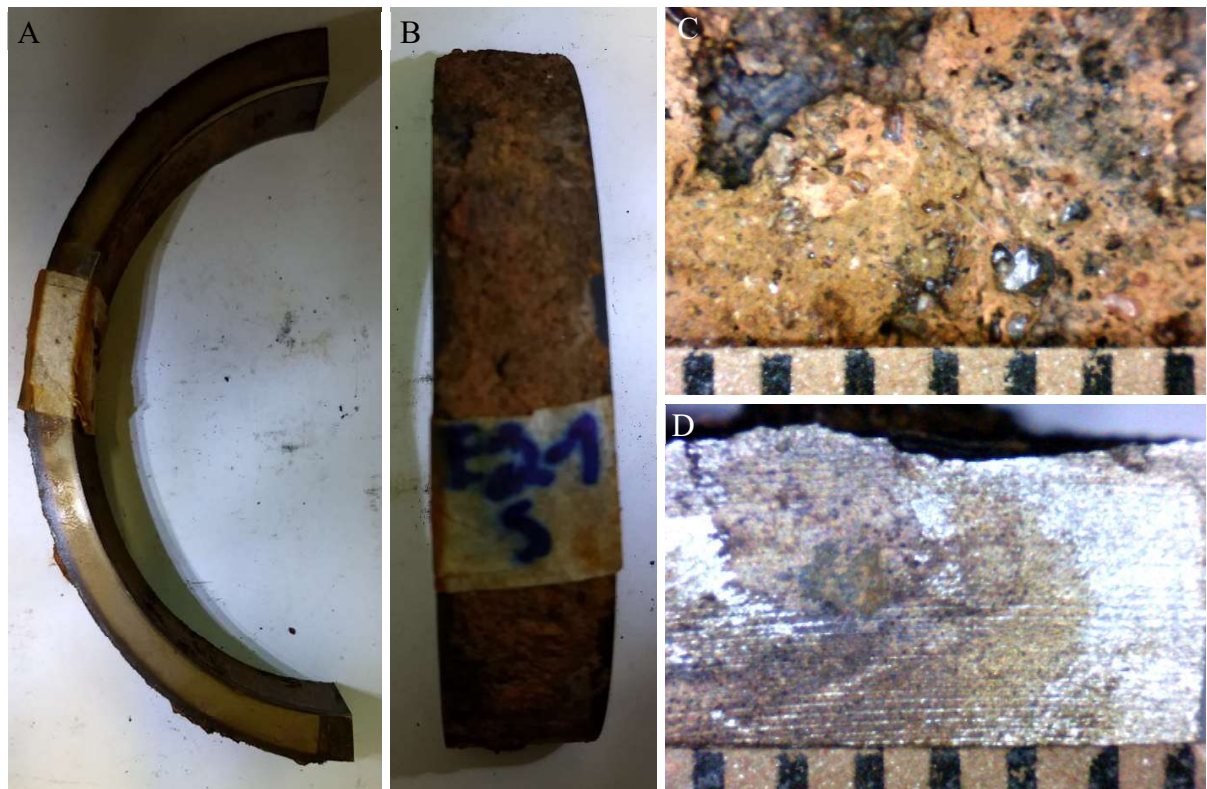


Figura 117 - Amostra E2-1-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

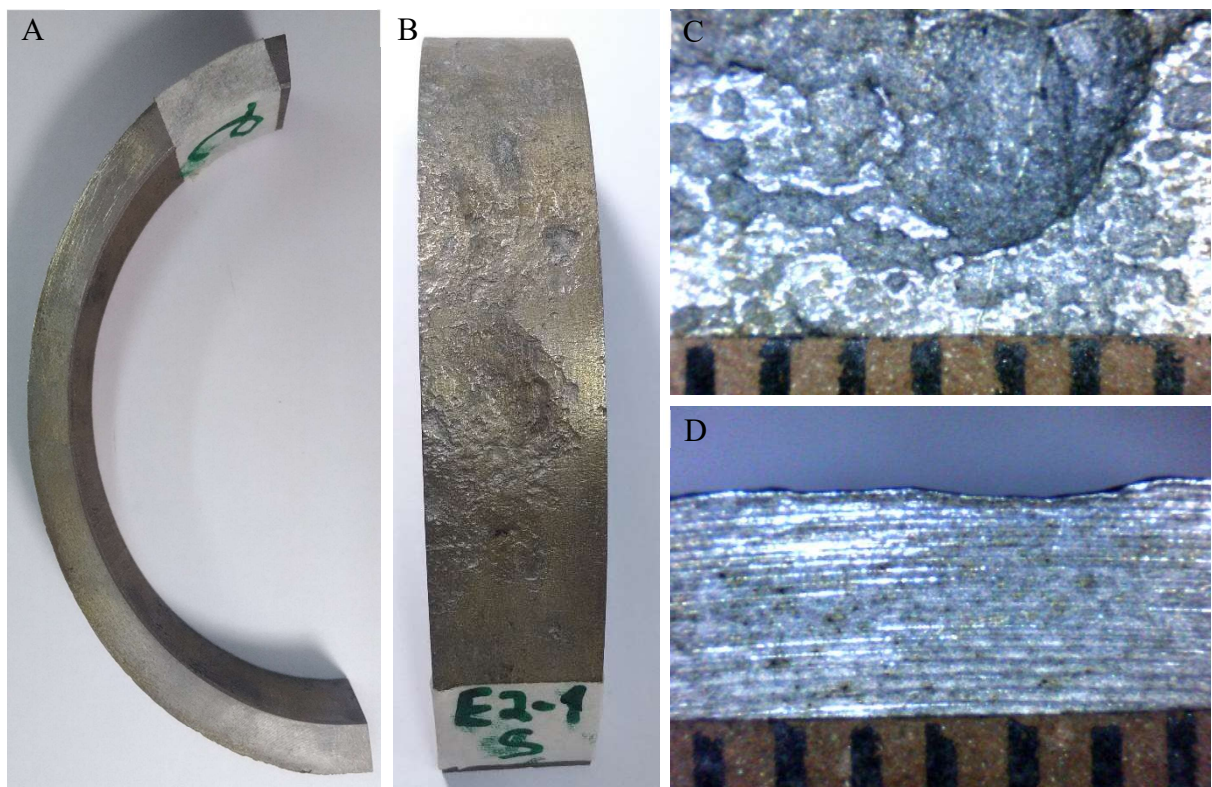


Figura 118 - Amostra E2-1-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-1-I-2

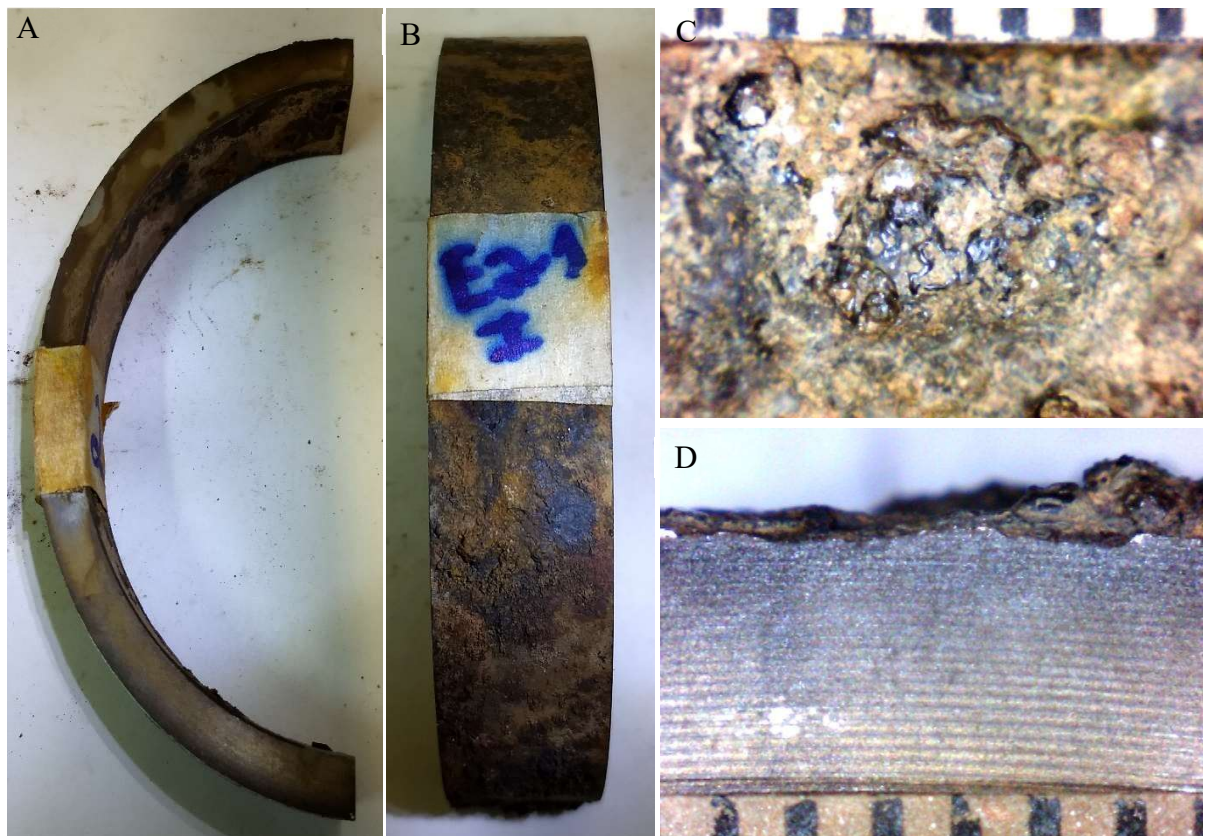


Figura 119 - Amostra E2-1-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

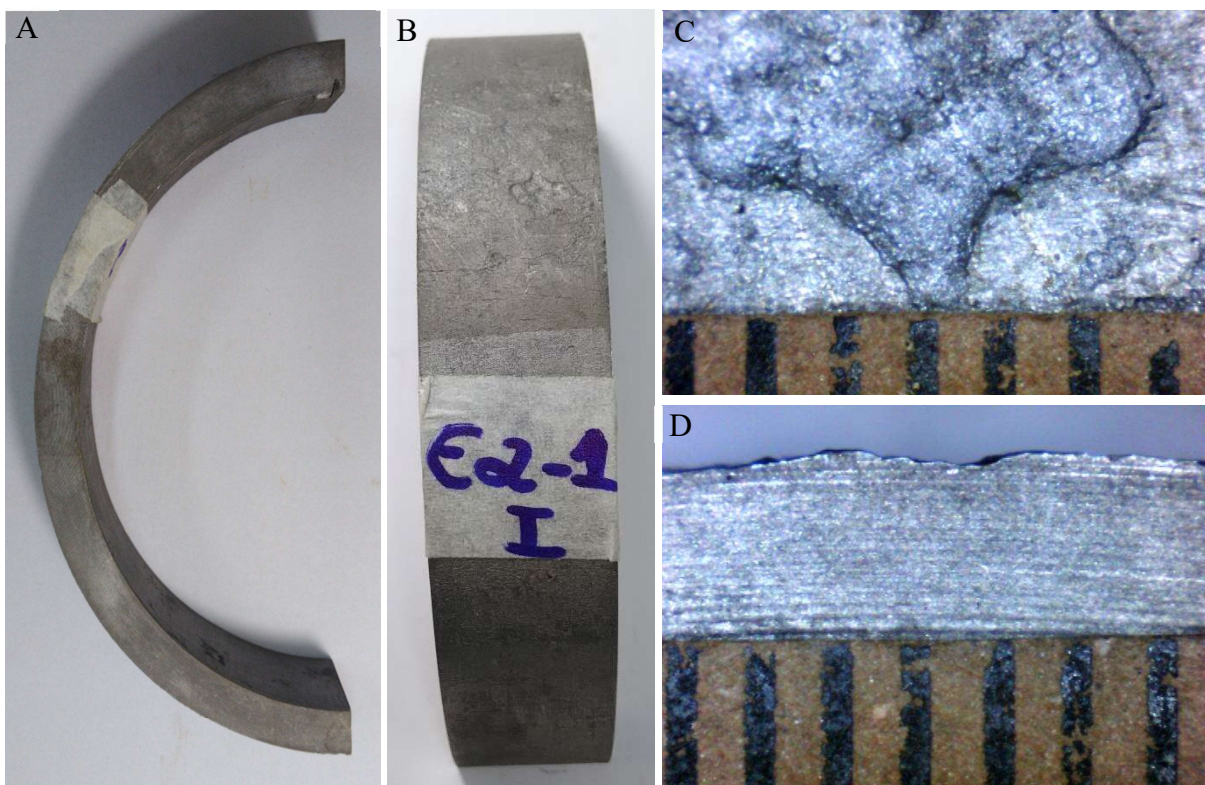


Figura 120 - Amostra E2-1-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-2-S-2

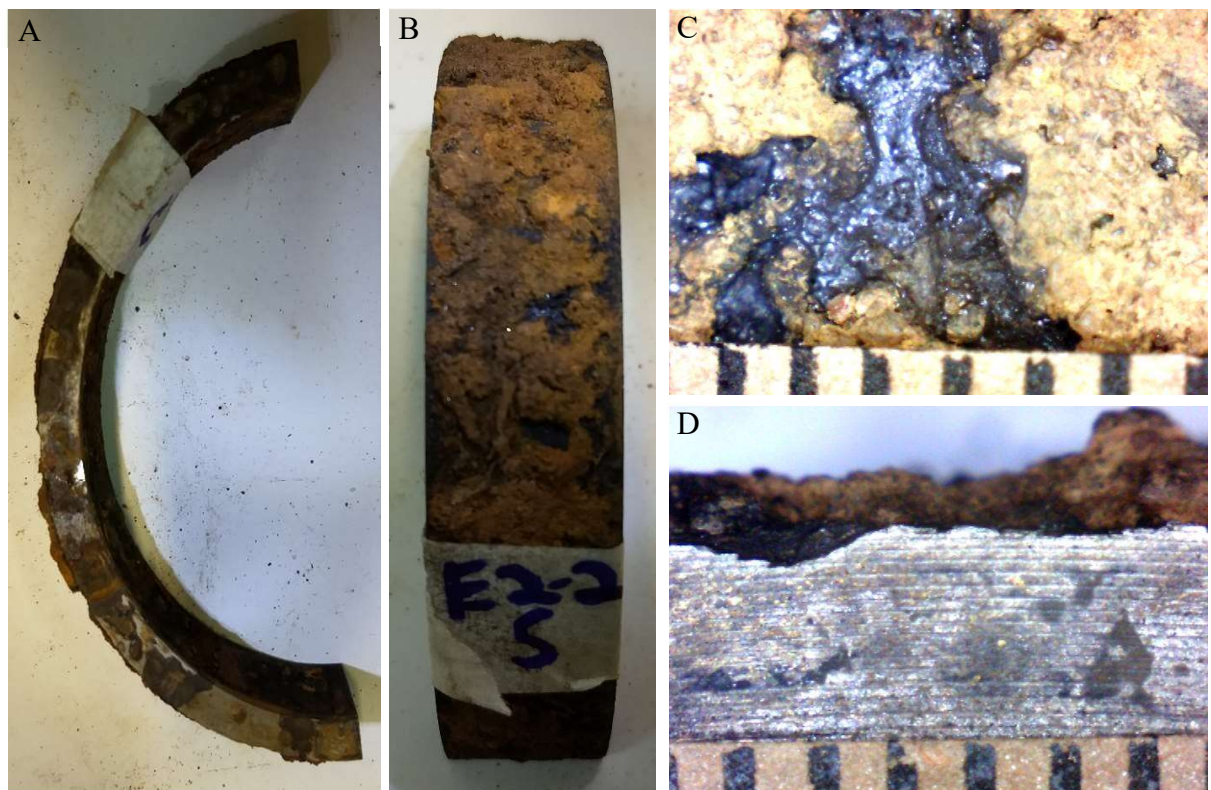


Figura 121 - Amostra E2-2-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

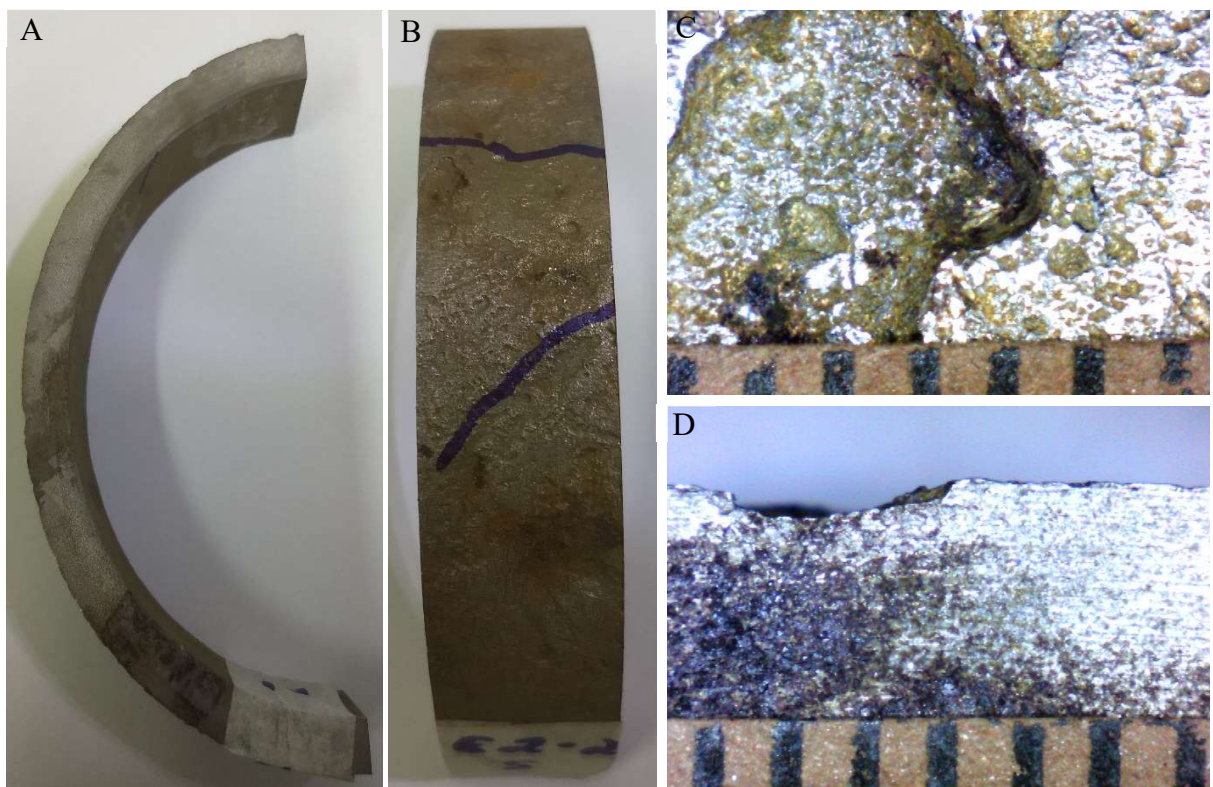


Figura 122 - Amostra E2-2-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-2-I-1

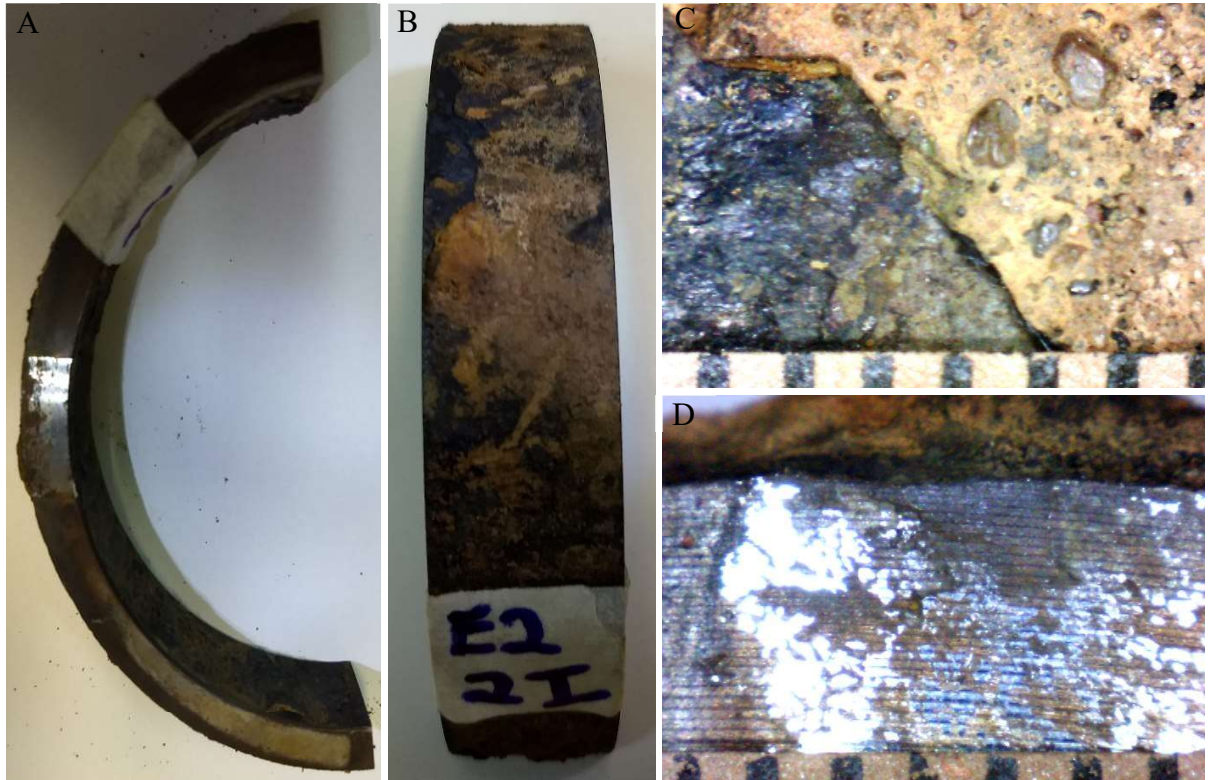


Figura 123 - Amostra E2-2-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

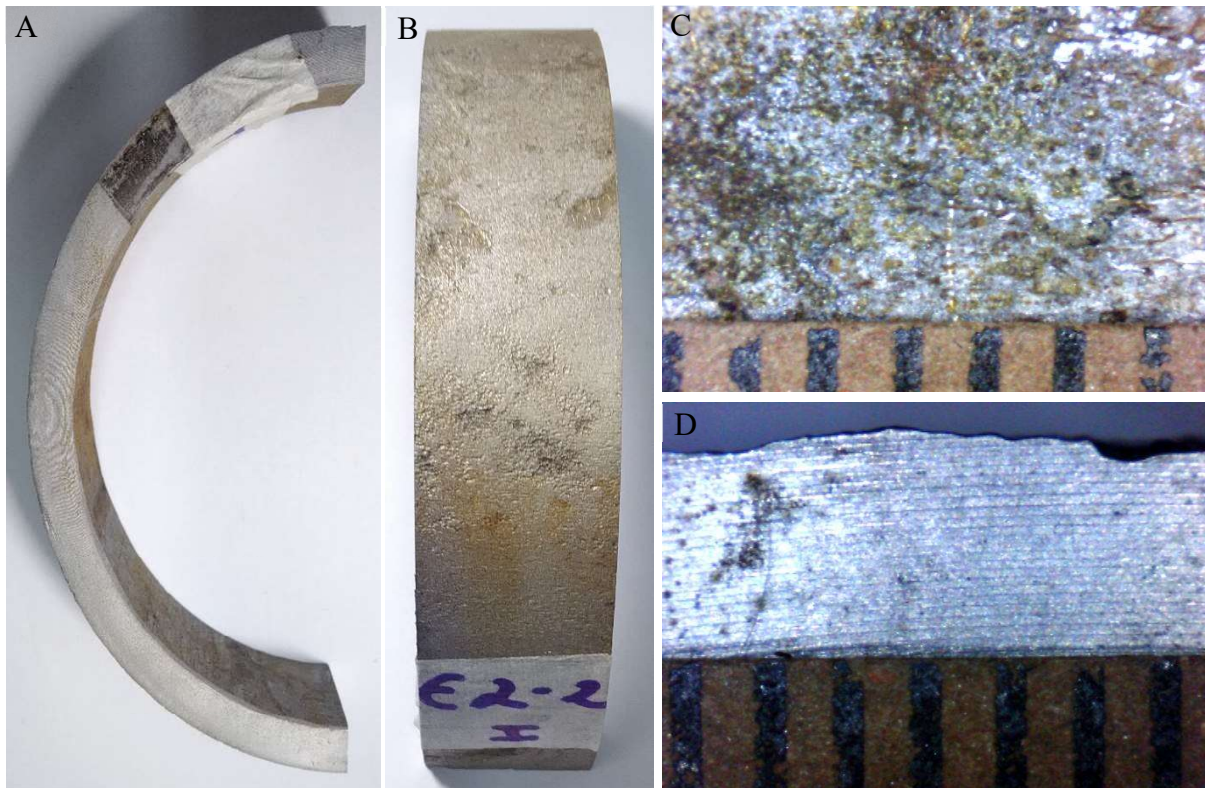


Figura 124 - Amostra E2-2-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-3-S-1

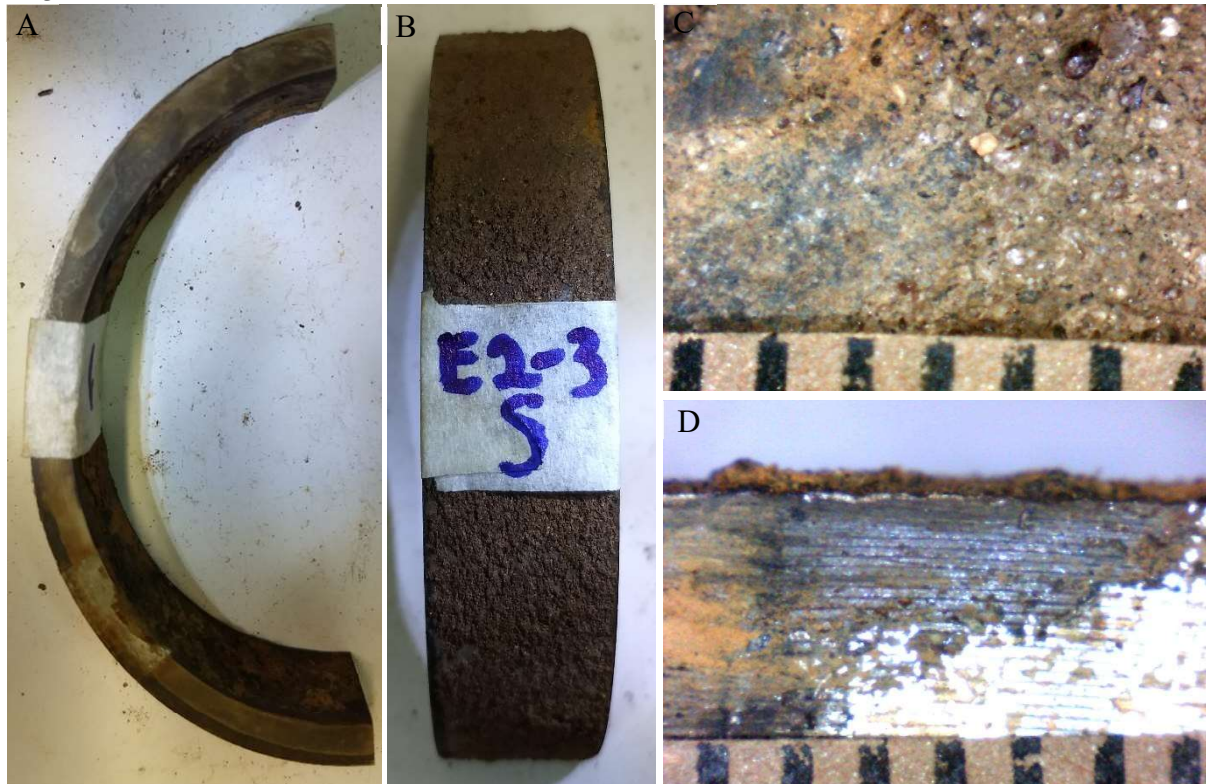


Figura 125 - Amostra E2-3-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

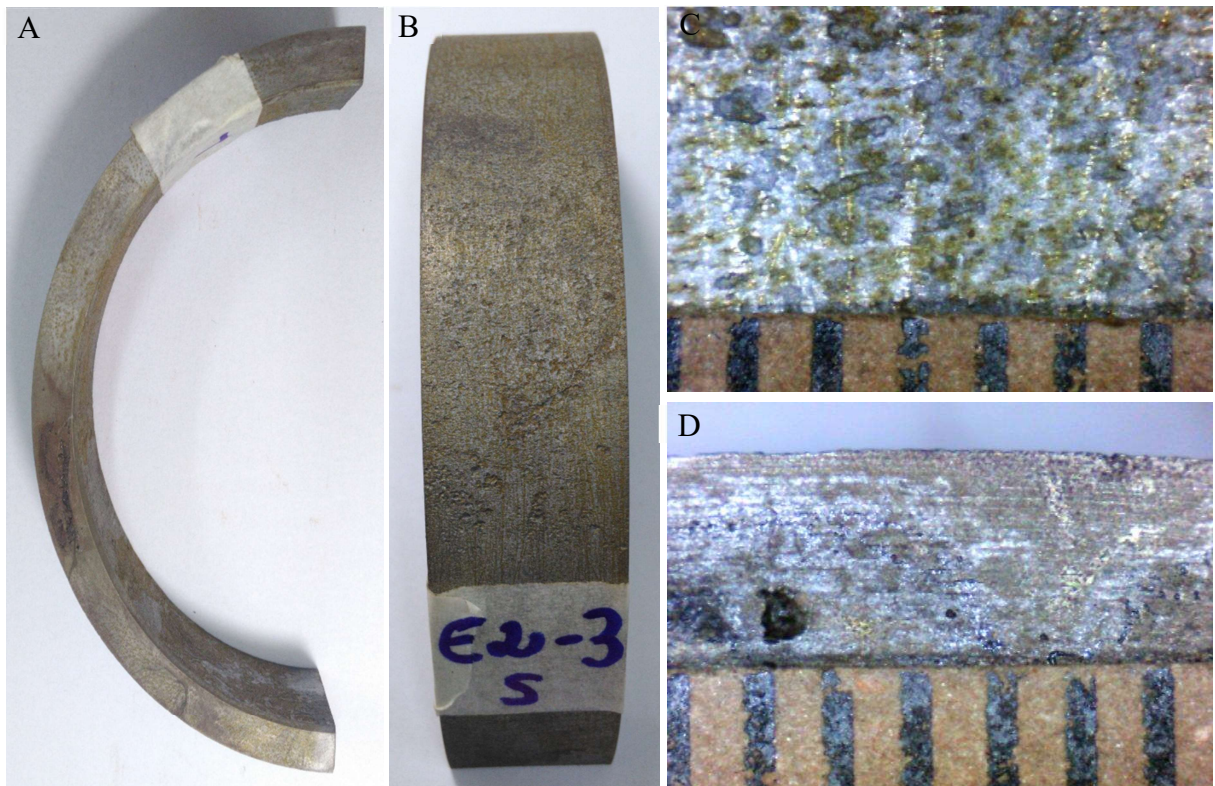


Figura 126 - Amostra E2-3-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-3-I-2

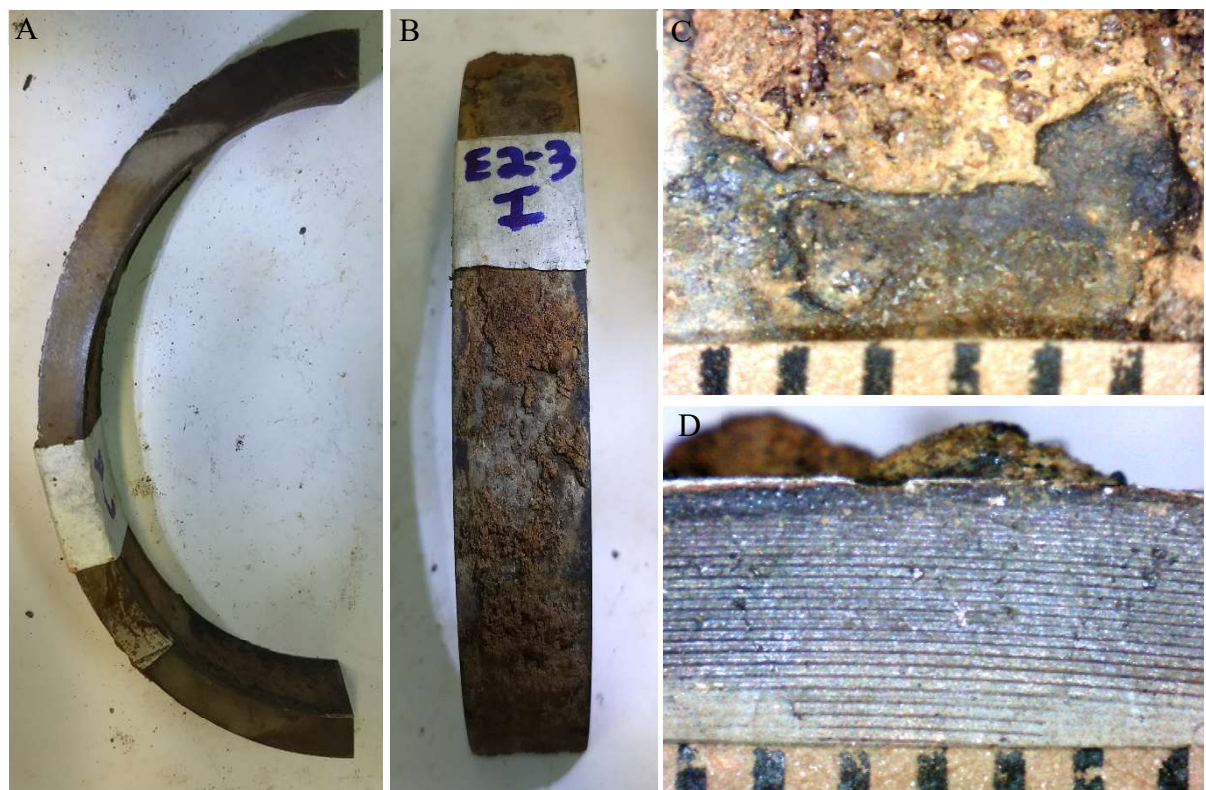


Figura 127 - Amostra E2-3-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

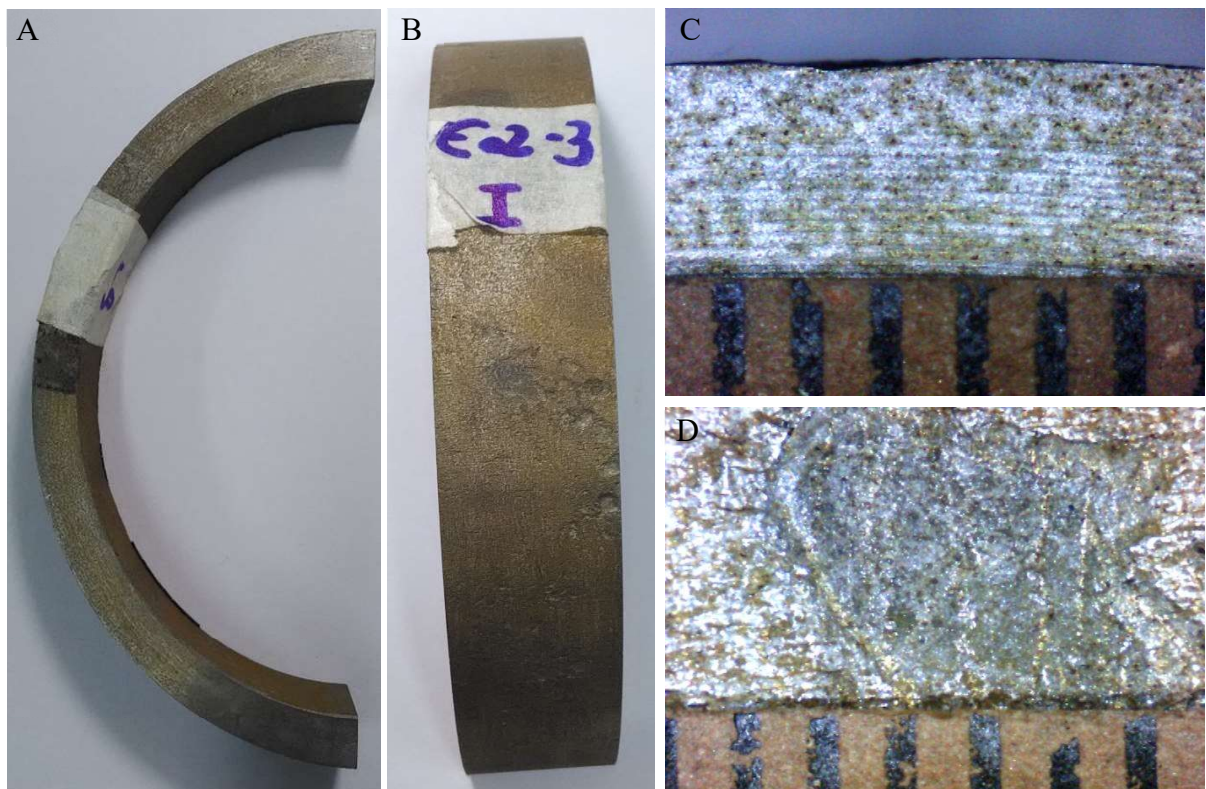


Figura 128 - Amostra E2-3-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-4-S-1

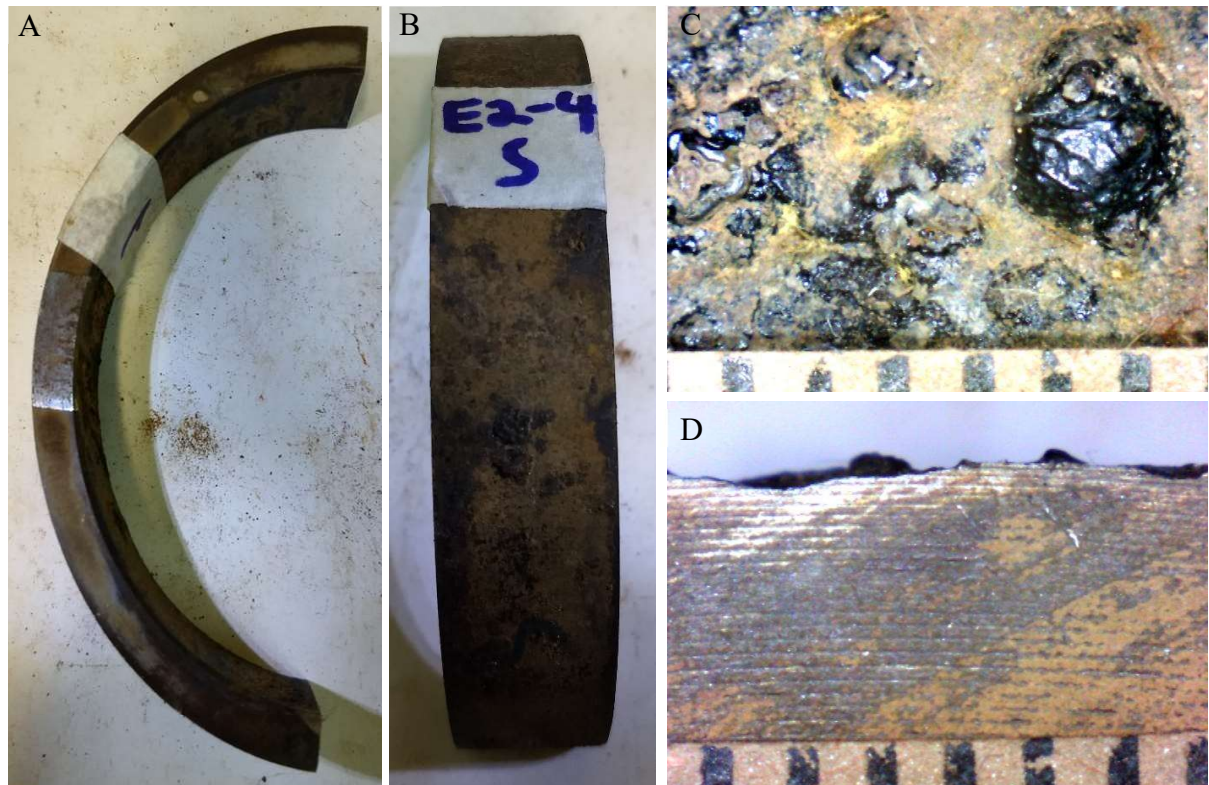


Figura 129 - Amostra E2-4-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

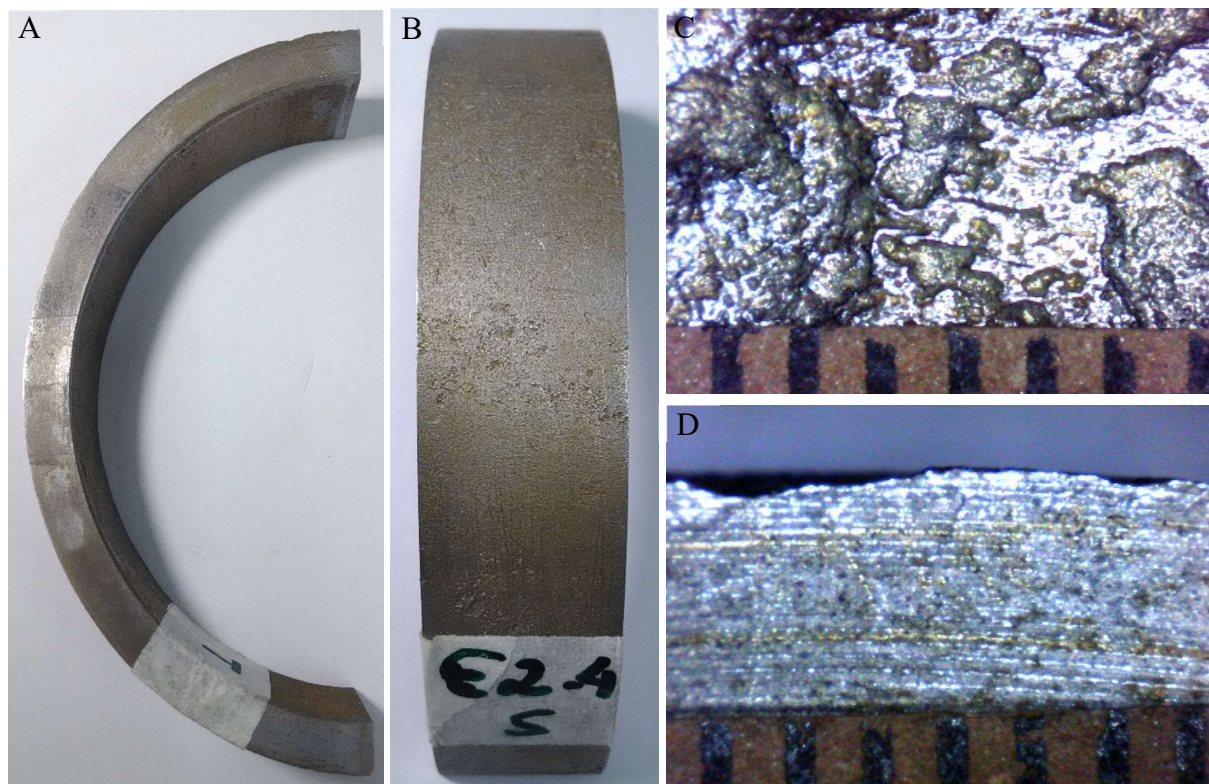


Figura 130 - Amostra E2-4-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-4-I-2

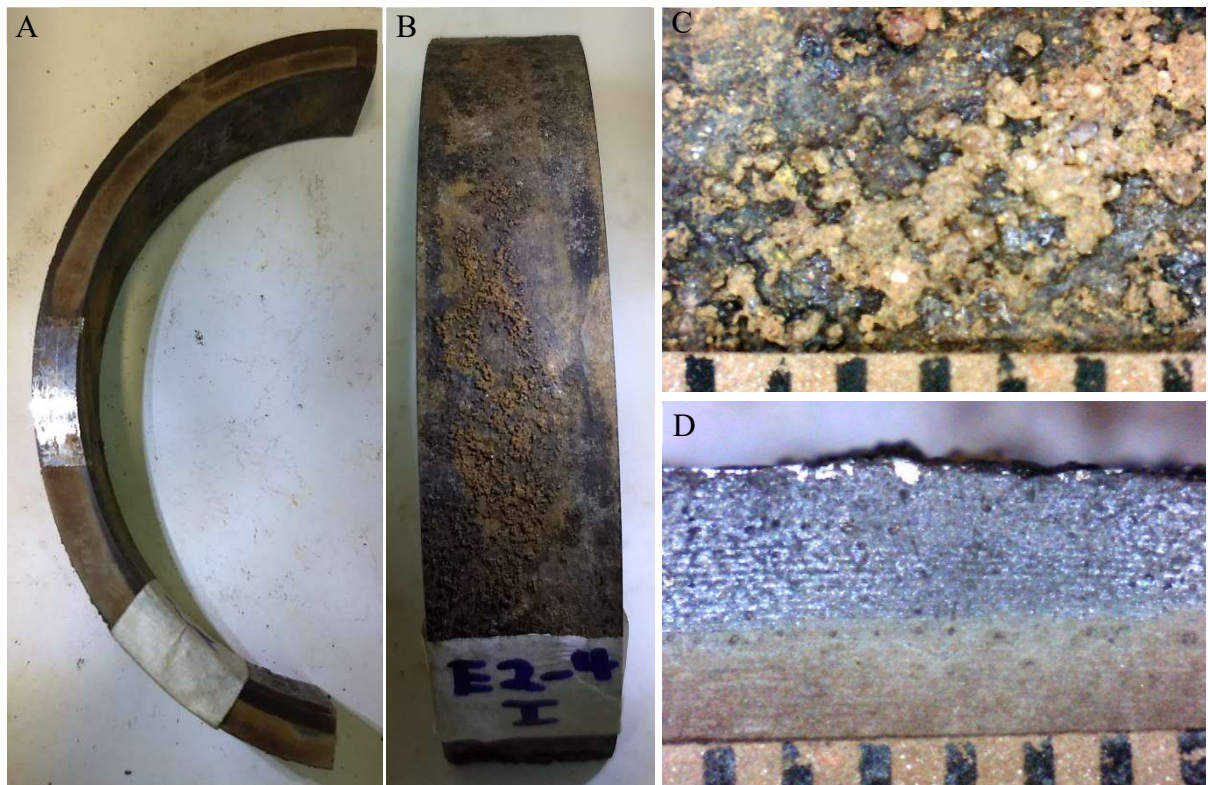


Figura 131 - Amostra E2-4-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

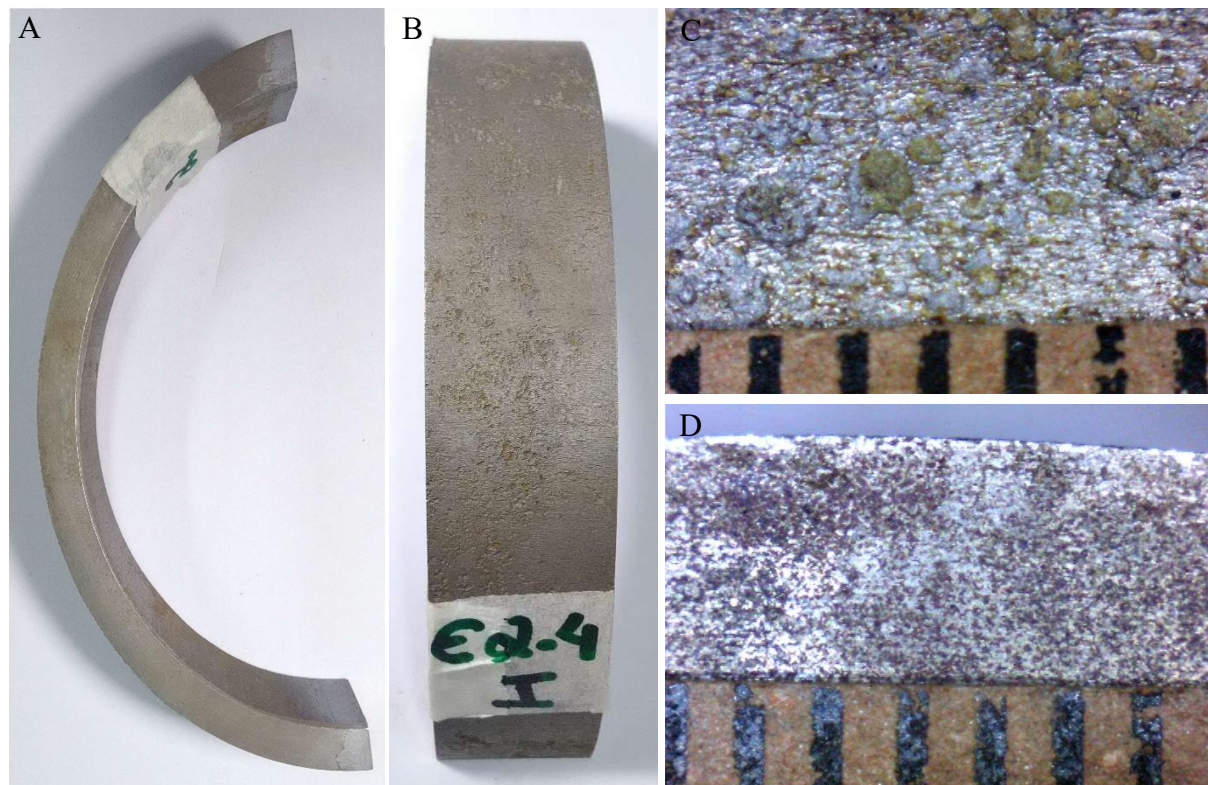


Figura 132 - Amostra E2-4-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-5-S-2

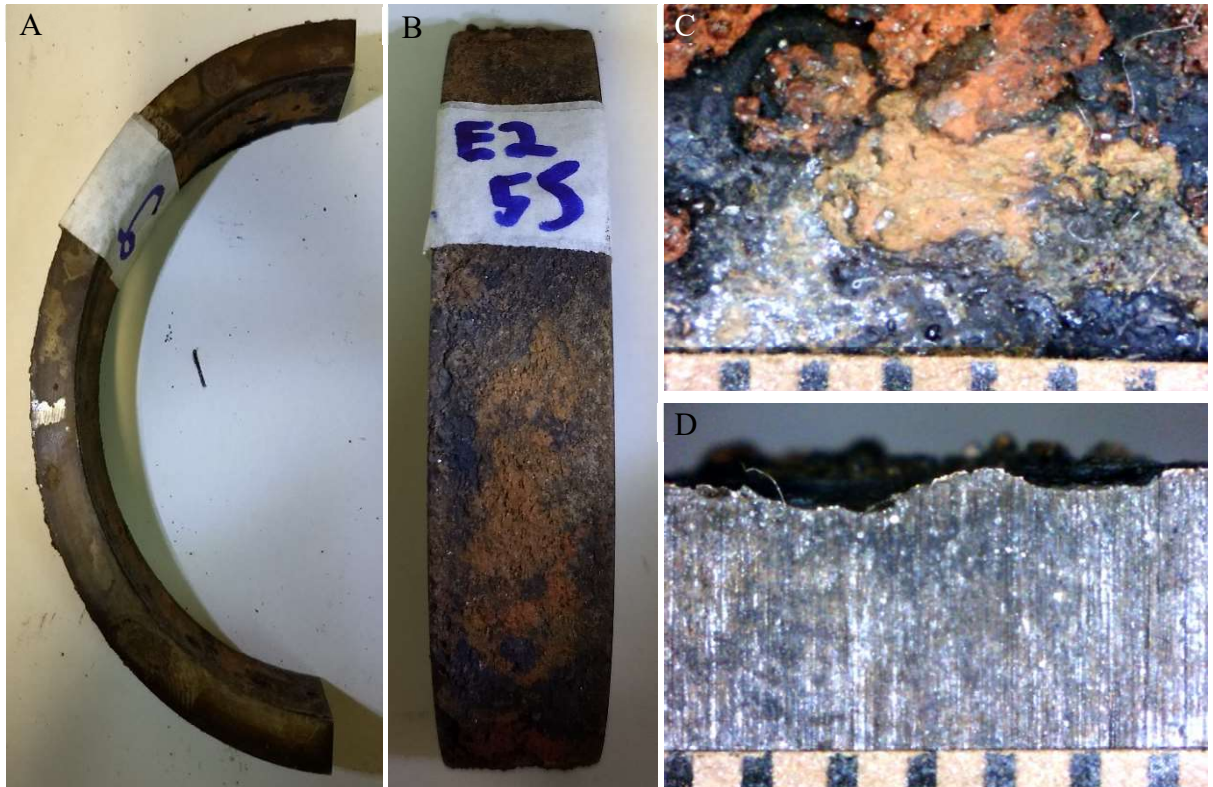


Figura 133 - Amostra E2-5-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

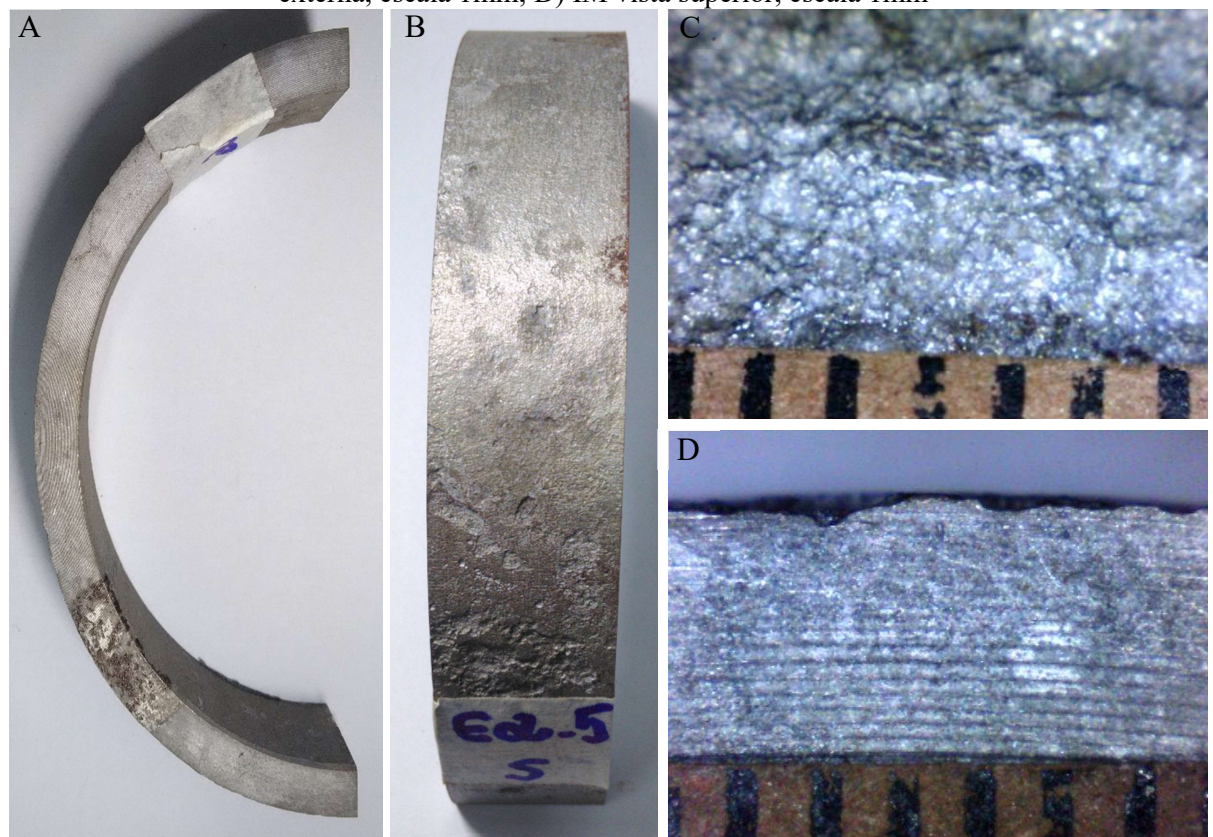


Figura 134 - Amostra E2-5-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-5-M-1



Figura 135 - Amostra E2-5-M não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

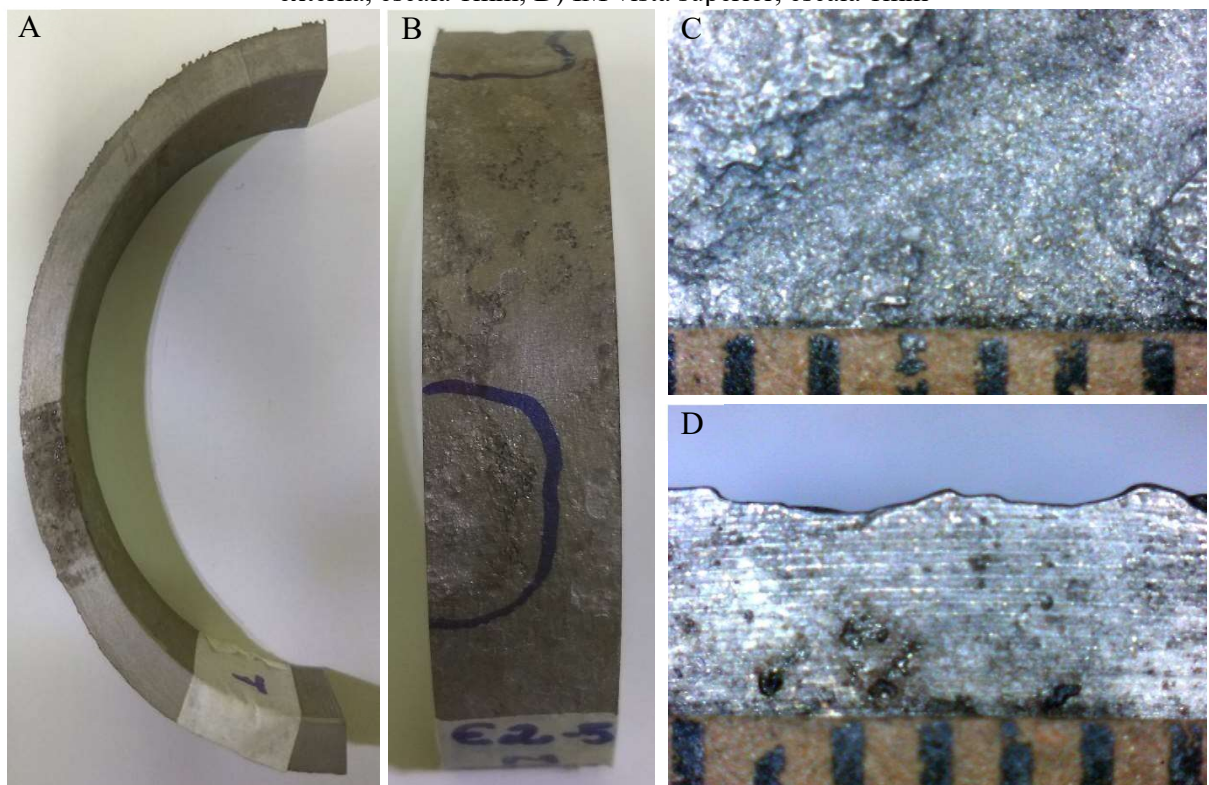


Figura 136 - Amostra E2-5-M decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-5-I-2

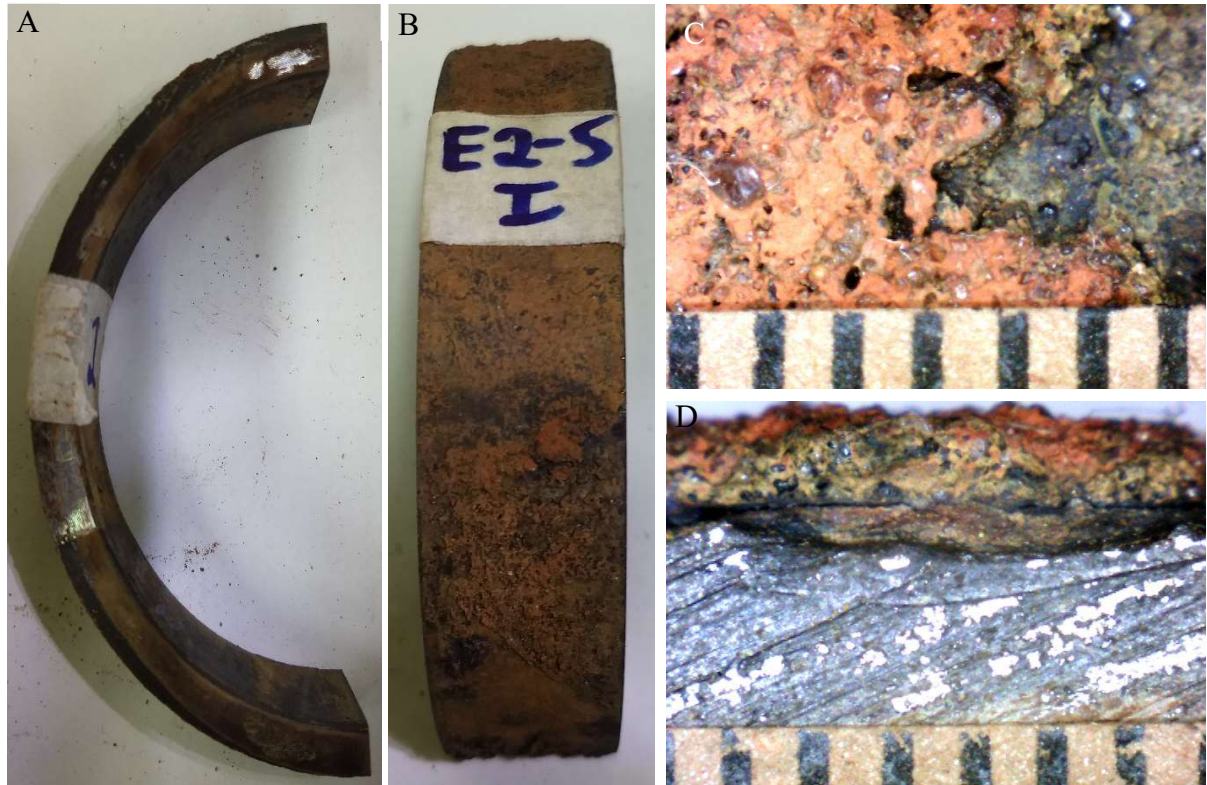


Figura 137 - Amostra E2-5-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

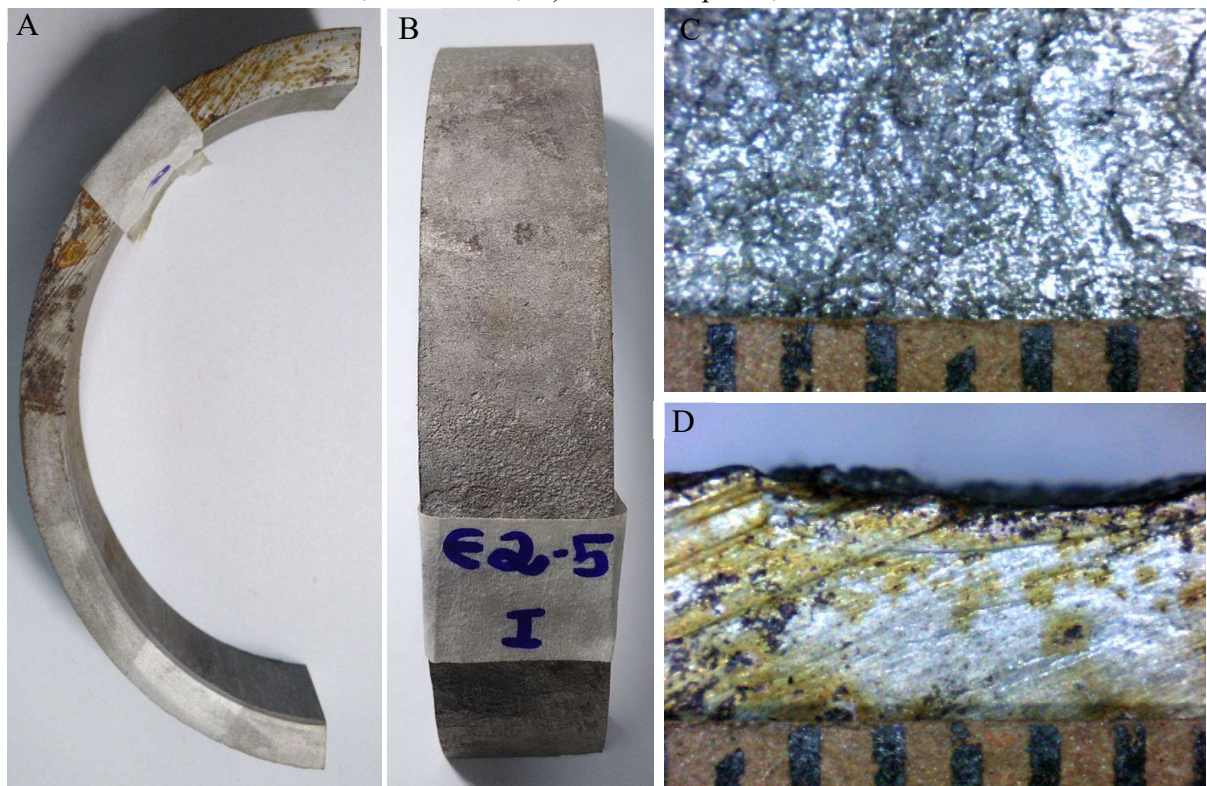


Figura 138 - Amostra E2-5-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-6-S-1



Figura 139 - Amostra E2-6-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

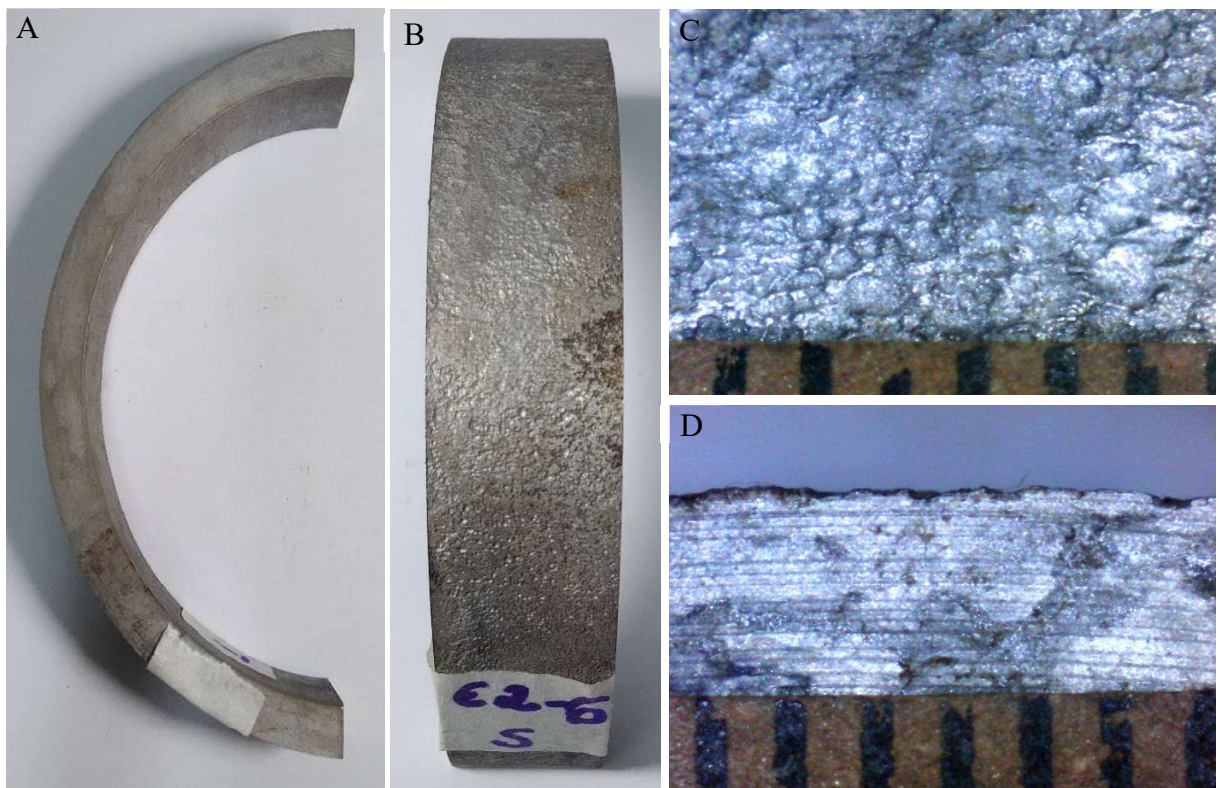


Figura 140 - Amostra E2-6-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-6-I-2

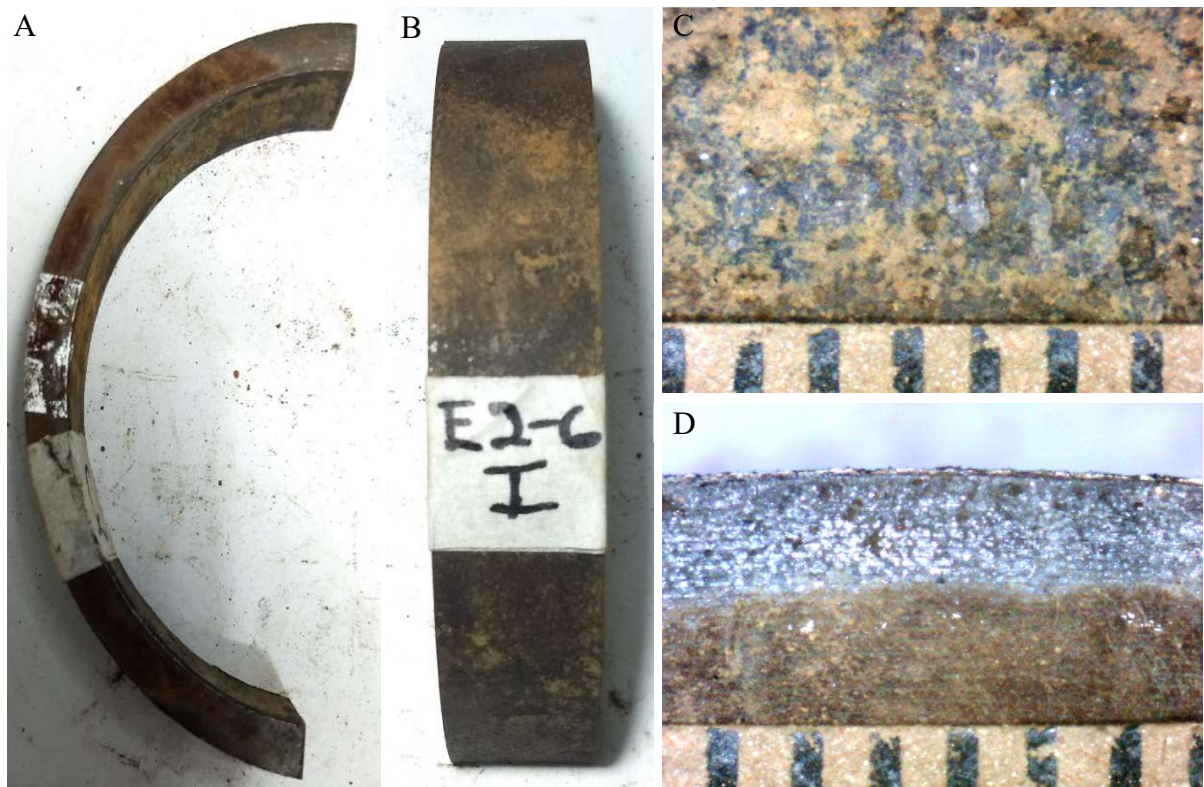


Figura 141 - Amostra E2-6-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

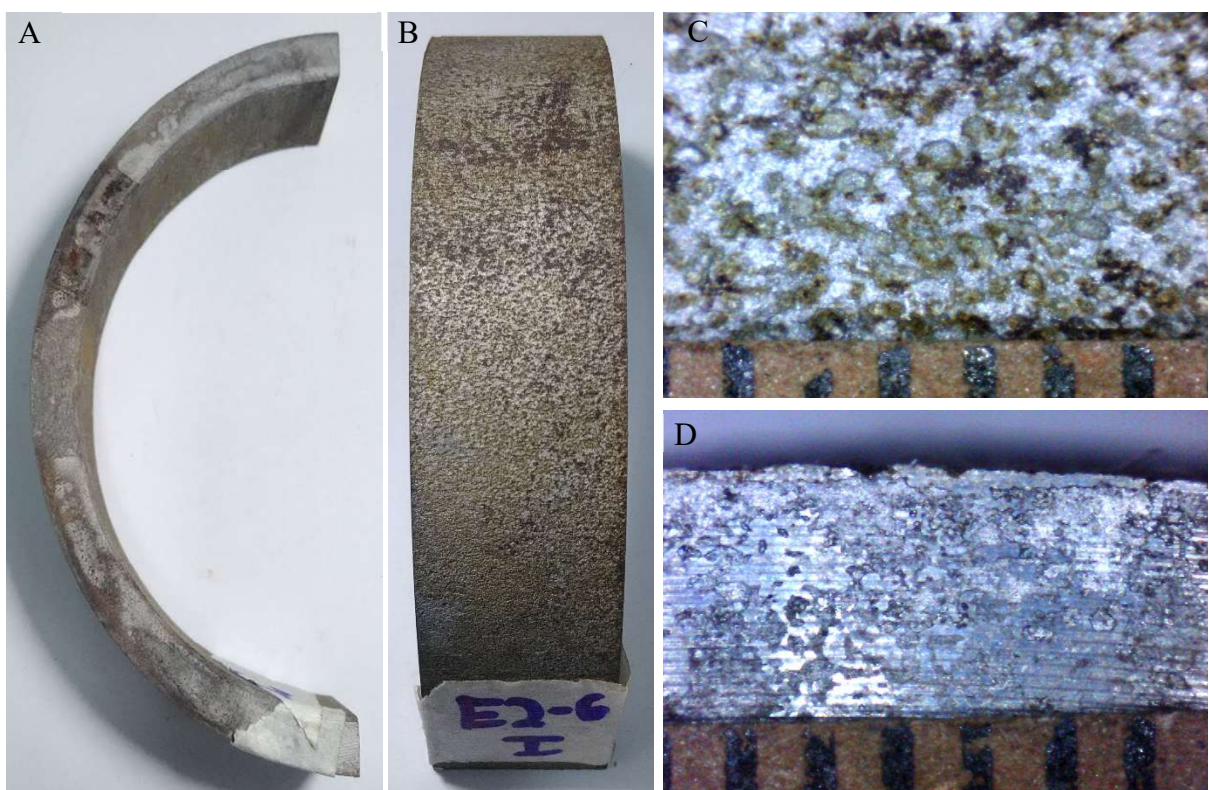


Figura 142 - Amostra E2-6-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-9-S-2

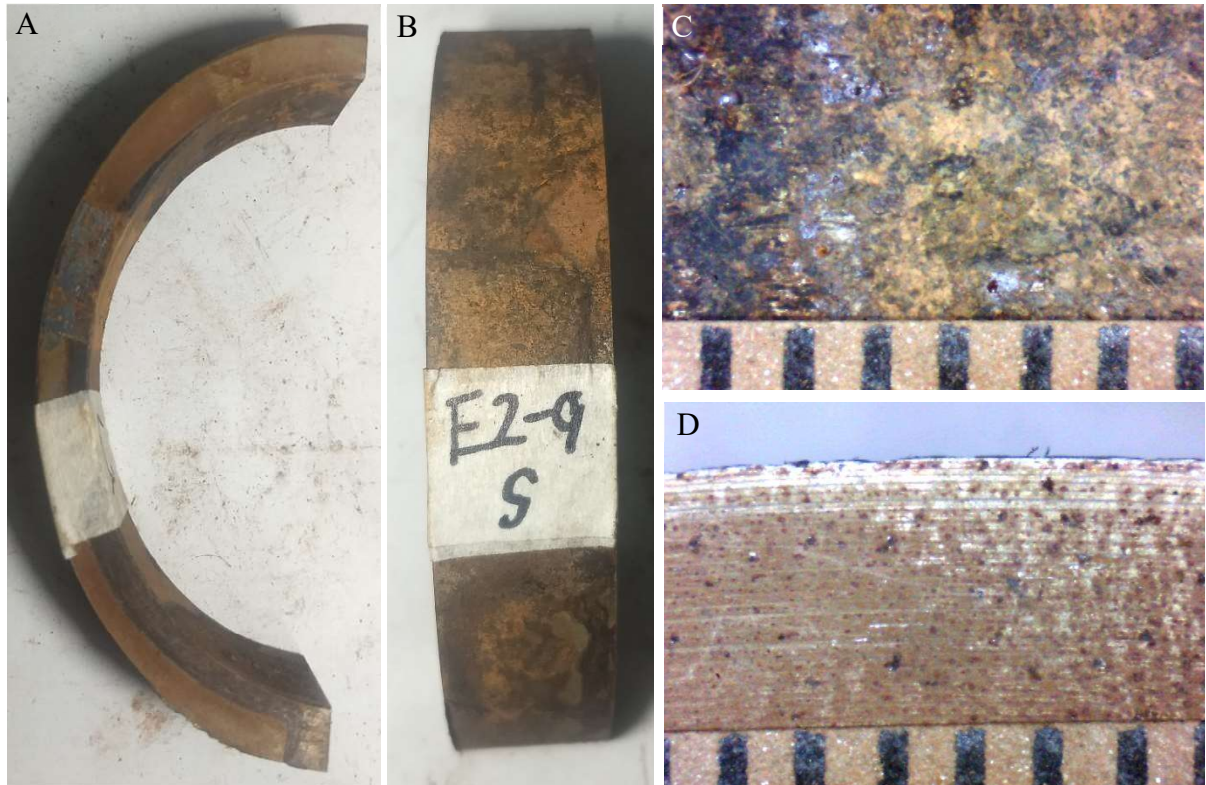


Figura 143 - Amostra E2-9-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

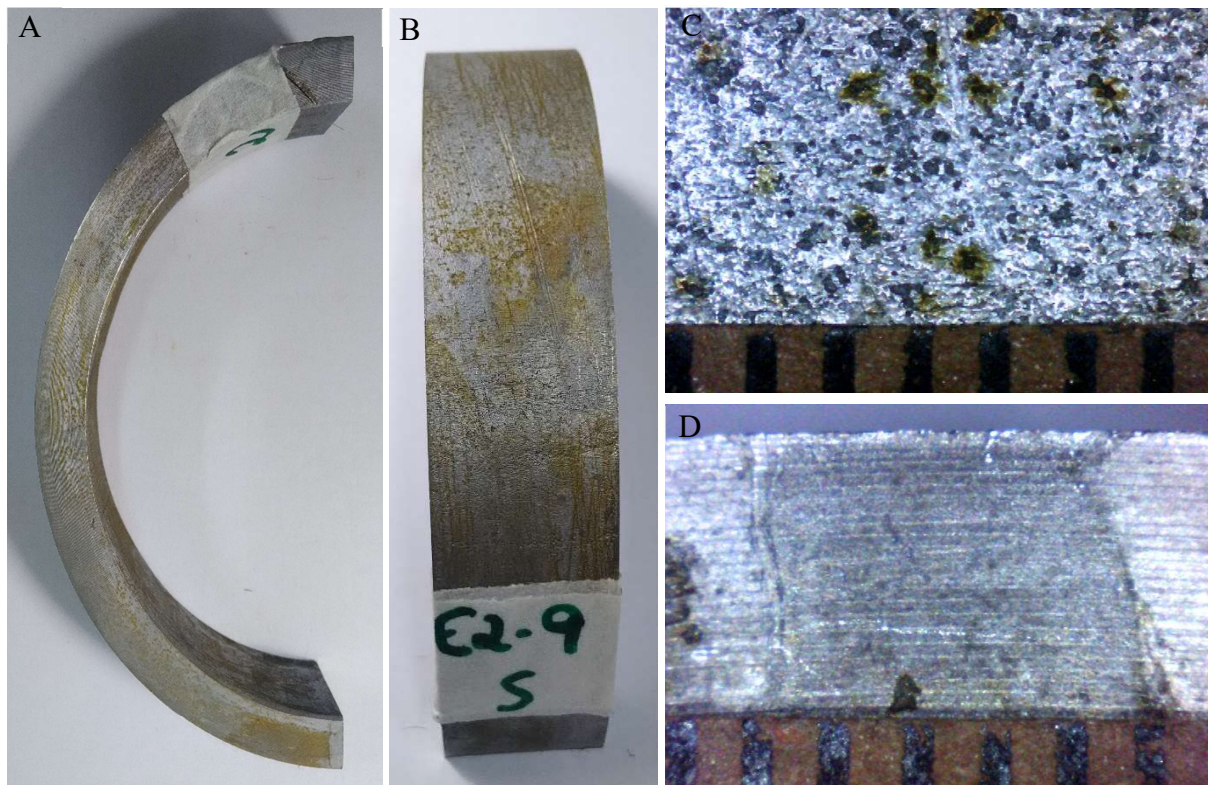


Figura 144 - Amostra E2-9-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E2-Helix



Figura 145 - Amostra E2-Hélice não decapada, A) IM vista superior, escala 1mm; B) IM vista superior frontal, escala 1mm



Figura 146 - Amostra E2-Hélice decapada, A) IC vista superior; B) IC vista superior 2; C) IC vista superior 3

Estaca 3

E3-S-2

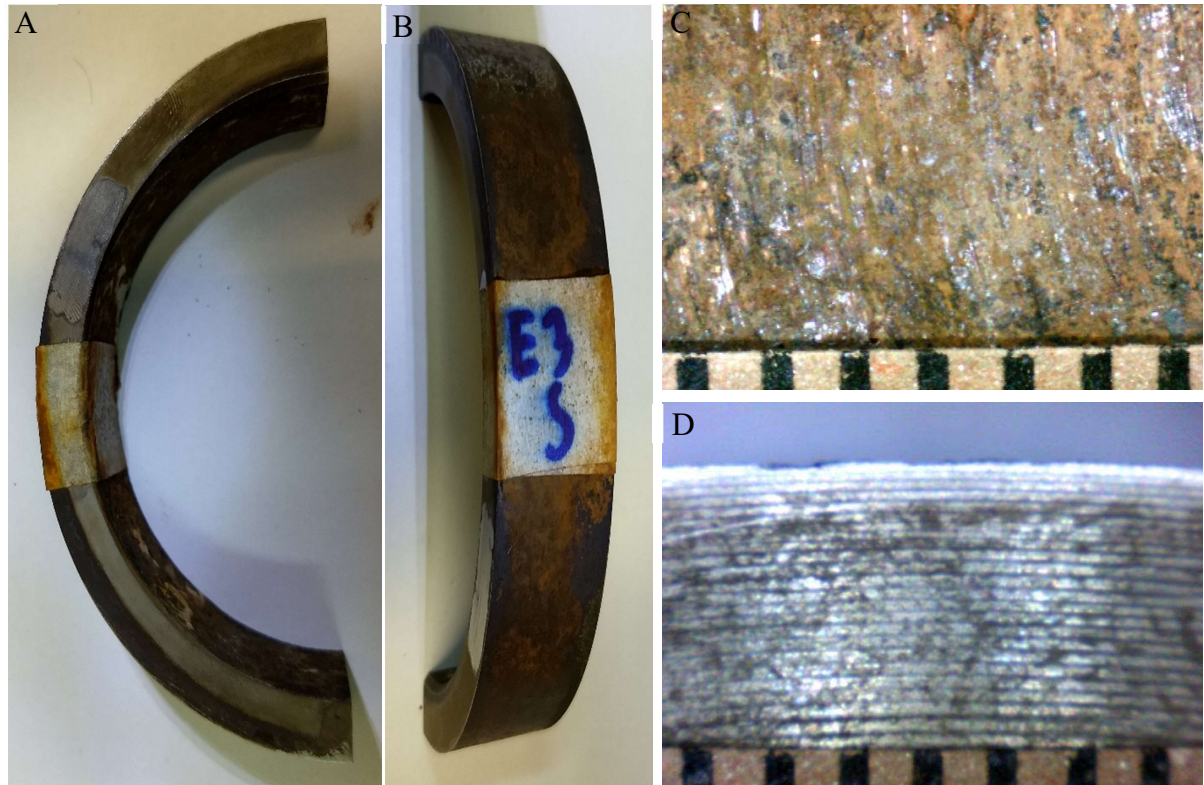


Figura 147 - Amostra E3-S não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

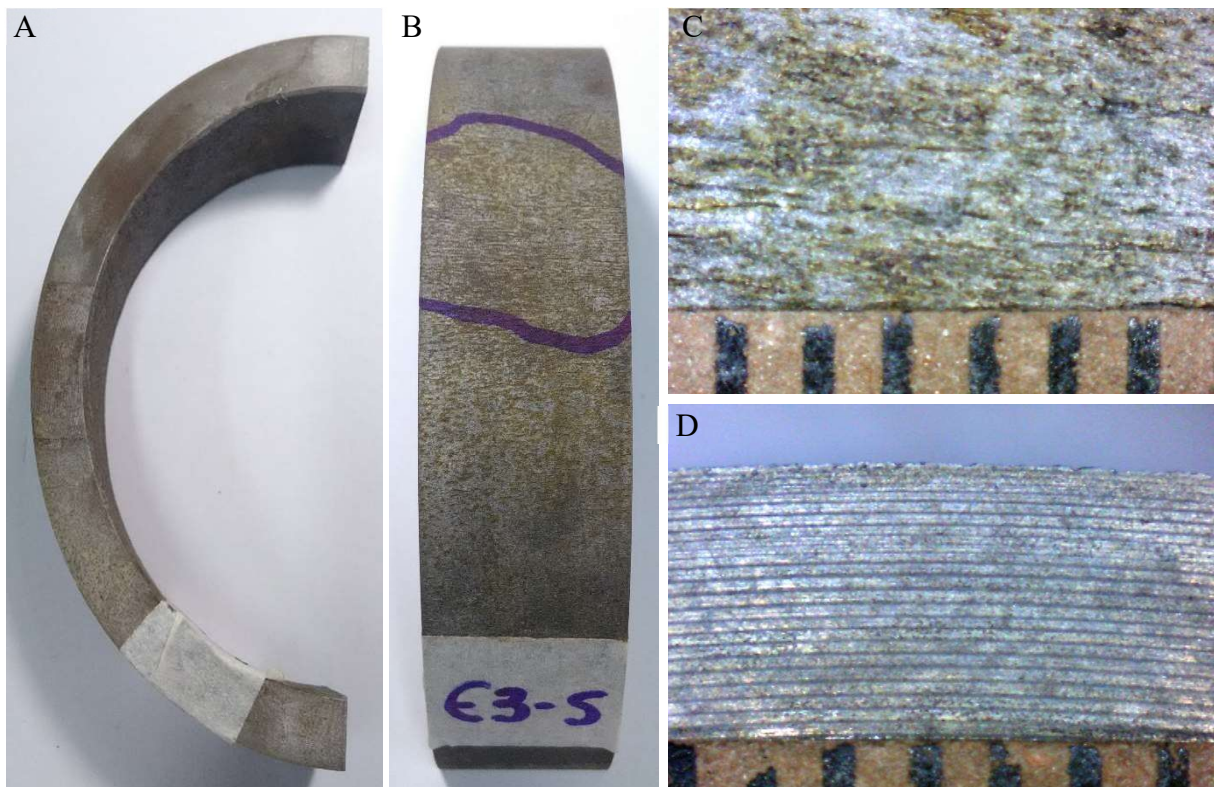


Figura 148 - Amostra E3-S decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

E3-I-1

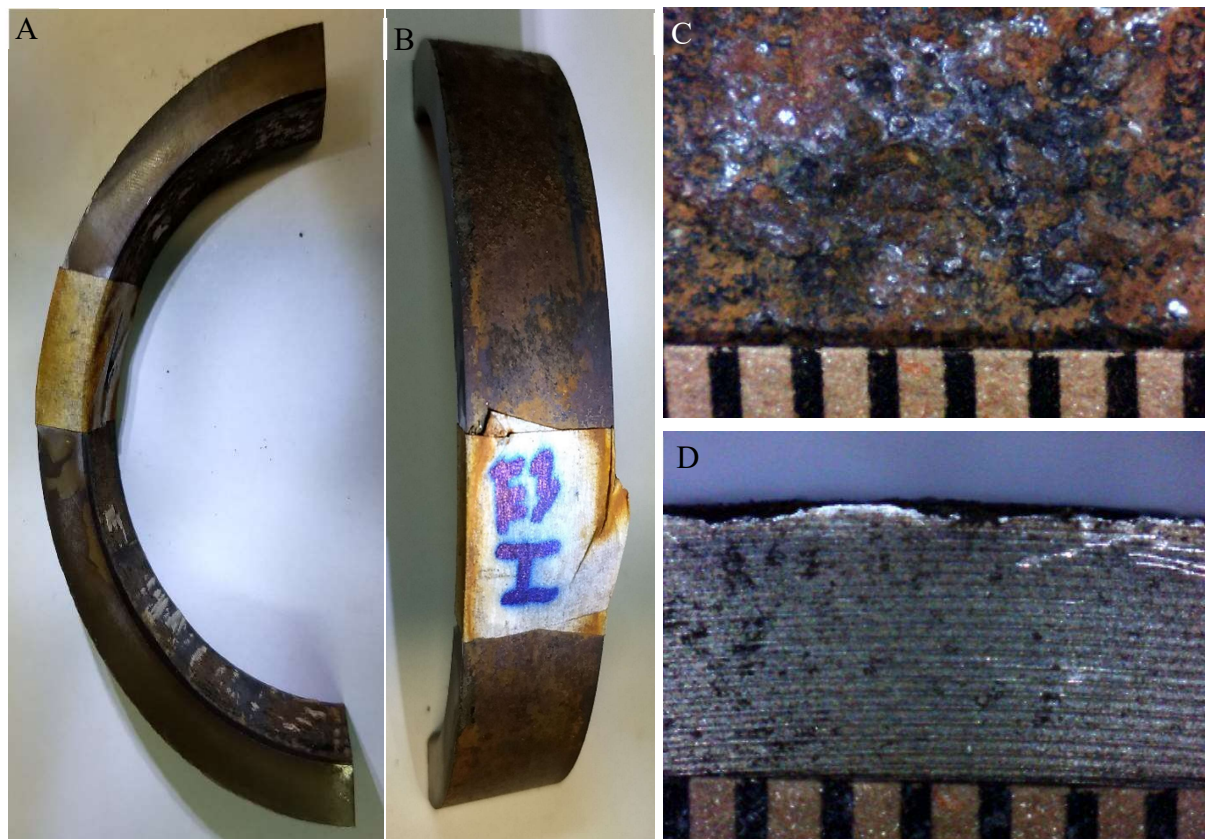


Figura 149 - Amostra E3-I não decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

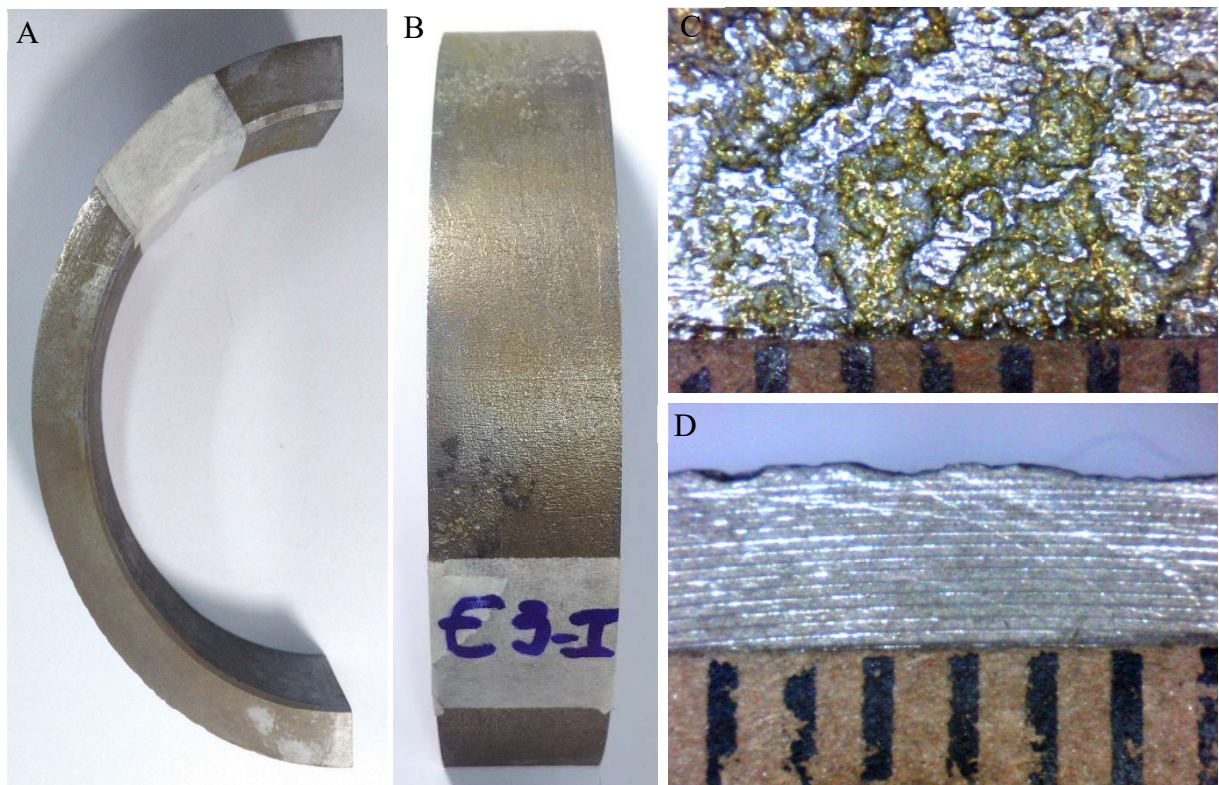


Figura 150 - Amostra E3-I decapada, A) IC vista superior; B) IC vista externa; C) IM vista externa, escala 1mm; D) IM vista superior, escala 1mm

ANEXO C

RESULTADO DOS ENSAIOS RCPT-U

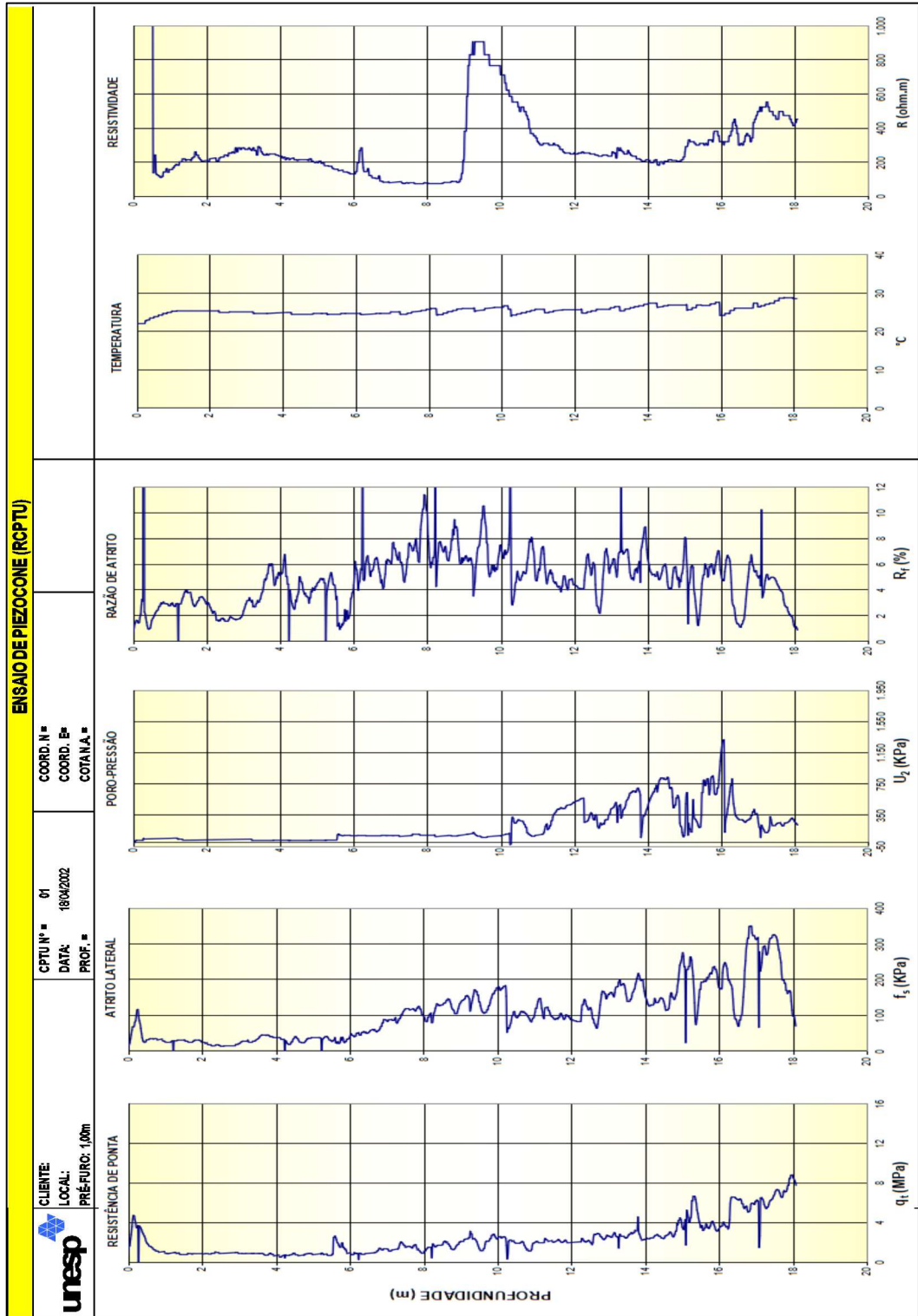


Figura 151 – Ensaio RCPT-U 1

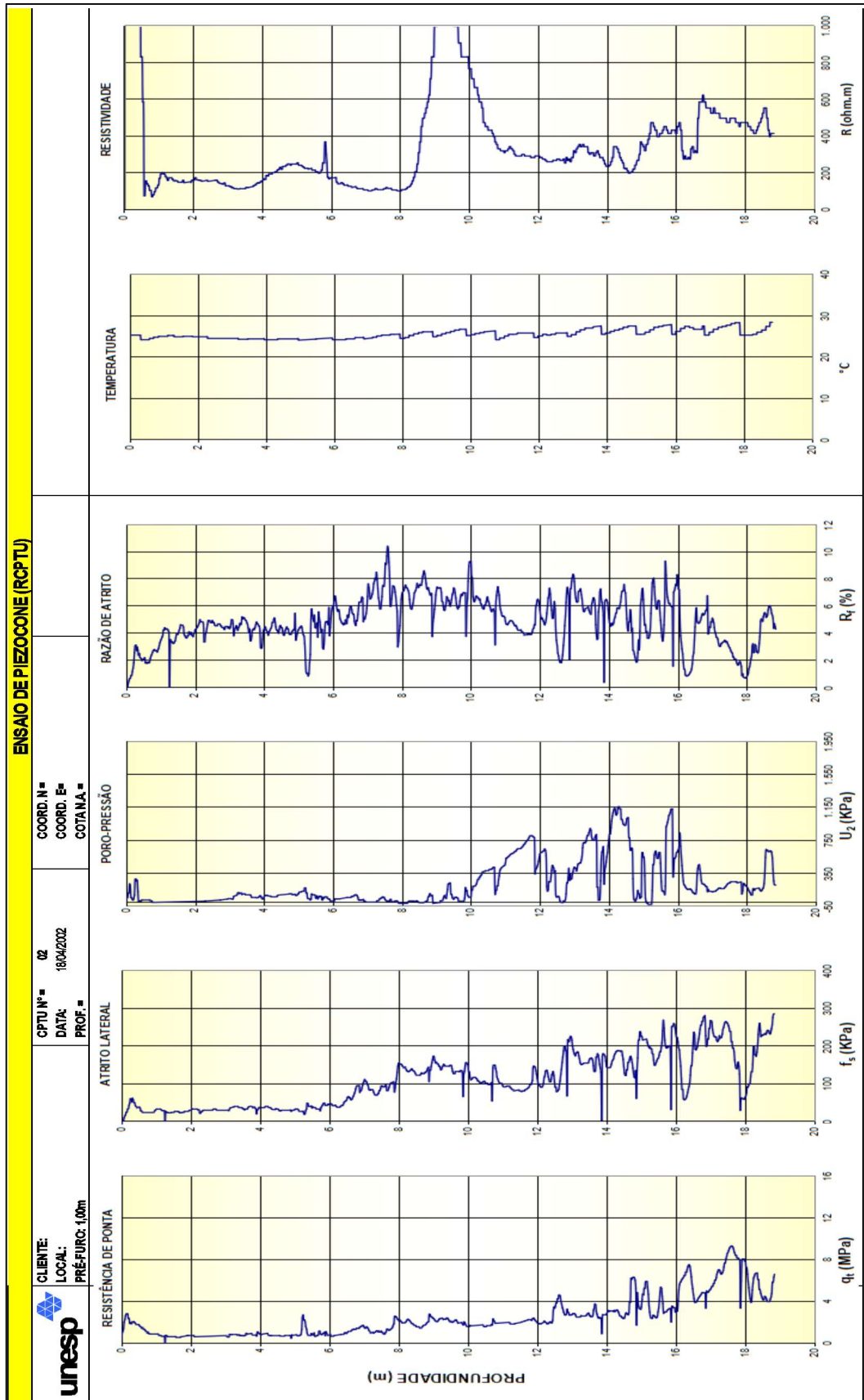


Figura 152 – Ensaio RCPT 2

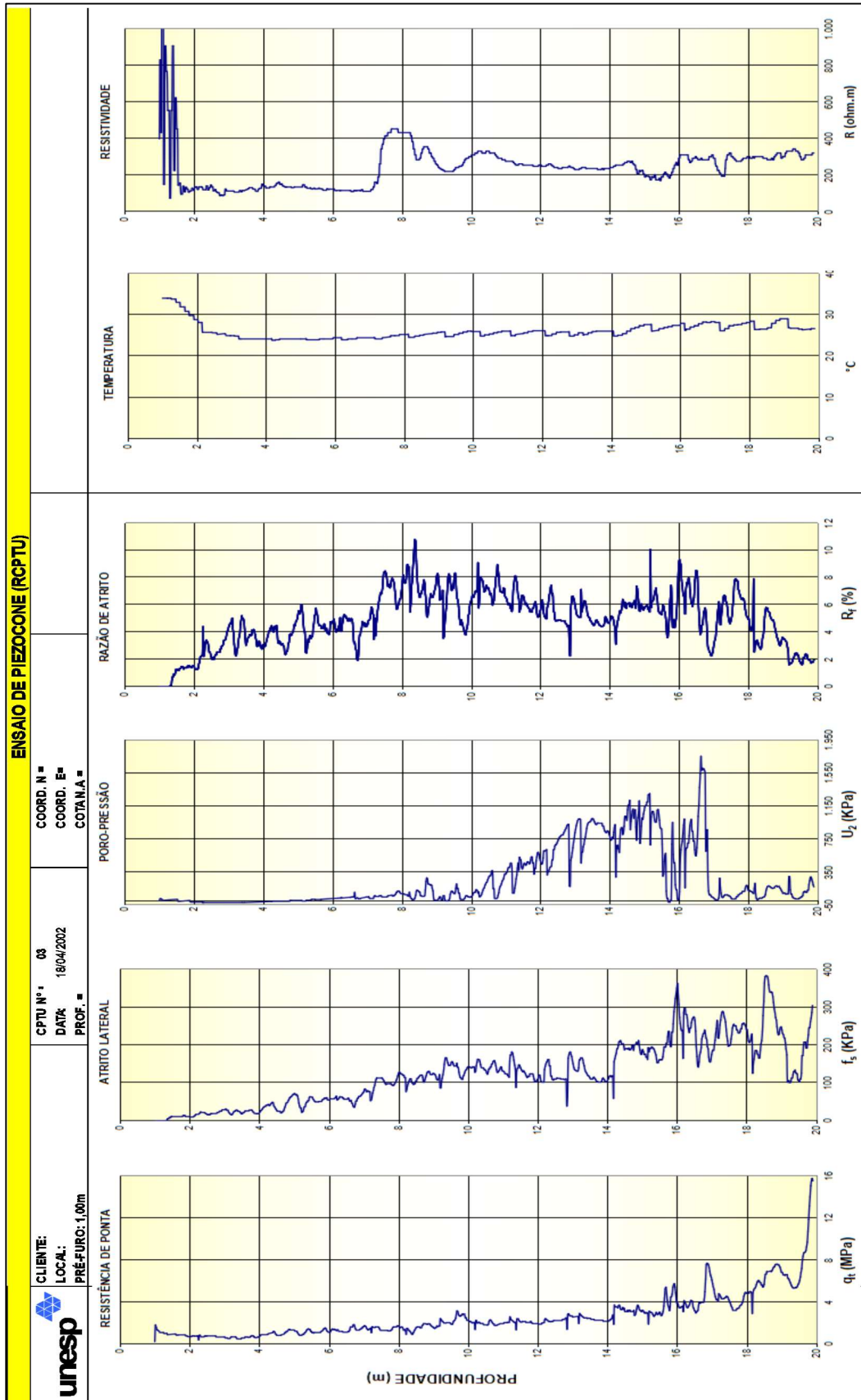


Figura 153 – Ensaio RCPT-U 3

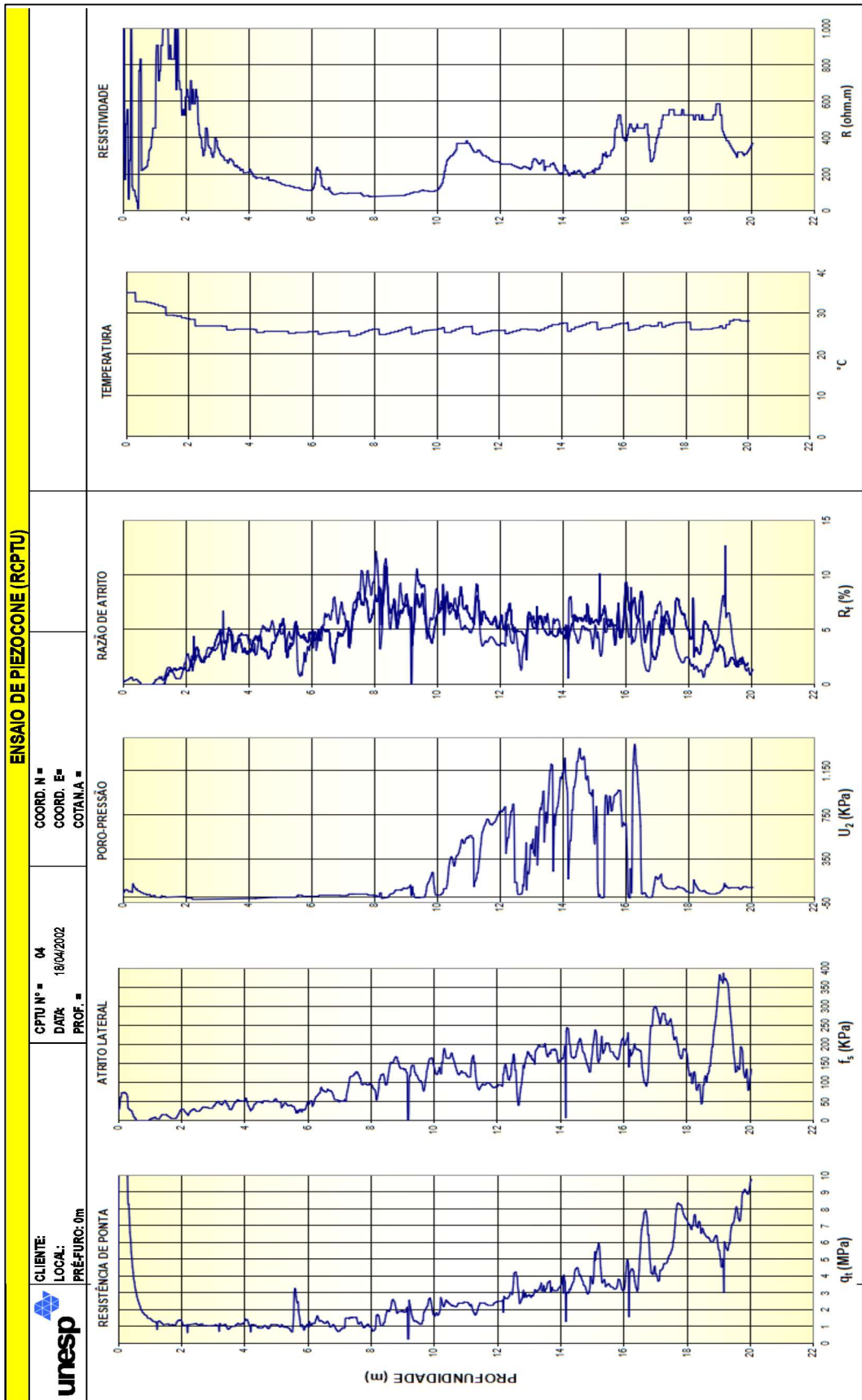


Figura 154 – Ensaio RCPT-U 4

ANEXO D

Resultado dos Ensaio de Composição Mineralógica

Data da Análise:	22.03.2016		Relatório:		AQ0187-16		REQ:		0190-16		3		4		5		6	
	Amostras:	Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM	Porcentagem
MgO	0,060	600	0,062	620	0,060	600	0,077	770	0,067	670	0,088	880						
Al ₂ O ₃	19,900	199000	16,600	166000	20,700	207000	24,400	244000	20,500	205000	22,500	225000						
SiO ₂	62,300	623000	67,200	672000	60,900	609000	56,200	562000	62,100	621000	58,600	586000						
P ₂ O ₅	0,074	740	0,061	610	0,052	520	0,067	670	0,057	570	0,071	710						
SO ₃	0,029	290	0,024	240	0,045	450	0,068	680	0,021	210	0,001	10						
Cl	0,012	120	0,001	10	0,014	140	0,001	10	0,001	10	0,022	220						
K ₂ O	0,038	380	0,029	290	0,023	230	0,045	450	0,032	320	0,046	460						
CaO	0,117	1170	0,106	1060	0,083	830	0,082	820	0,020	200	0,022	220						
TiO ₂	2,090	20900	1,850	18500	2,130	21300	2,410	24100	2,100	21000	2,300	23000						
V ₂ O ₅	0,039	390	0,033	330	0,045	450	0,045	450	0,040	400	0,038	380						
Cr ₂ O ₃	0,052	520	0,056	560	0,055	550	0,046	460	0,047	470	0,049	490						
MnO	0,025	250	0,023	230	0,026	260	0,088	880	0,026	260	0,037	370						
Fe ₂ O ₃	8,090	80900	7,300	73000	8,330	83300	9,260	92600	8,010	80100	8,900	89000						
NiO	0,006	60	0,005	50	0,007	70	0,066	660	0,007	70	0,006	60						
CuO	0,001	10	0,005	50	0,005	50	0,001	10	0,005	50	0,006	60						
ZnO	0,005	50	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,004	40	0,004	40						
Ga ₂ O ₃	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,003	30						
SrO	0,002	20	0,002	20	0,001	10	0,002	20	0,003	30	0,002	20						
Y ₂ O ₃	0,001	10	0,002	20	0,002	20	0,001	10	0,002	20	0,001	10						
ZrO ₂	0,074	740	0,066	660	0,076	760	0,085	850	0,072	720	0,079	790						
Nb ₂ O ₅	0,011	110	0,009	90	0,011	110	0,013	130	0,010	100	0,012	120						
BaO	0,001	10	0,001	10	0,002	20	0,001	10	0,001	10	0,001	10						
CeO ₂	0,001	10	0,027	270	0,022	220	0,001	10	0,001	10	0,026	260						
PbO	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,006	60	0,001	10	0,001	10						
PF	7,140	71400	6,540	65400	7,340	73400	7,120	71200	6,950	69500	7,220	72200						

Data da Análise:	22.03.2016		Relatório:		AQ0187-16		REQ:		0190-16		10		11		12	
	Amostras:		Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM	Porcentagem	PPM
Químico																
MgO	0,106	1060	0,162	1620	0,033	330	0,110	1100	0,137	1370	0,174	1740				
Al ₂ O ₃	19,900	199000	14,500	145000	10,900	109000	11,500	115000	11,300	113000	13,400	134000				
SiO ₂	63,300	633000	74,000	740000	76,700	767000	78,900	789000	79,600	796000	76,800	768000				
P ₂ O ₅	0,062	620	0,001	10	0,037	370	0,039	390	0,028	280	0,001	10				
SO ₃	0,017	170	0,017	170	0,015	150	0,015	150	0,001	10	0,001	10				
Cl	0,020	200	0,013	130	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,011	110				
K ₂ O	0,061	610	0,066	660	0,057	570	0,067	670	0,055	550	0,071	710				
CaO	0,015	150	0,021	210	0,001	10	0,001	10	0,009	90	0,001	10				
TiO ₂	2,150	21500	1,610	16100	1,380	13800	1,410	14100	1,260	12600	1,520	15200				
V ₂ O ₅	0,036	360	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10				
Cr ₂ O ₃	0,052	520	0,053	530	0,057	570	0,061	610	0,067	670	0,058	580				
MnO	0,030	300	0,057	570	0,035	350	0,026	260	0,024	240	0,023	230				
Fe ₂ O ₃	7,920	79200	5,220	52200	7,130	71300	4,370	43700	3,870	38700	4,120	41200				
NiO	0,006	60	0,006	60	0,005	50	0,007	70	0,005	50	0,004	40				
CuO	0,001	10	0,005	50	0,003	30	0,004	40	0,003	30	0,003	30				
ZnO	0,004	40	0,003	30	0,004	40	0,003	30	0,003	30	0,003	30				
Ga ₂ O ₃	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10				
SrO	0,003	30	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,002	20				
Y ₂ O ₃	0,001	10	0,002	20	0,002	20	0,002	20	0,003	30	0,003	30				
ZrO ₂	0,070	700	0,047	470	0,038	380	0,040	400	0,034	340	0,035	350				
Nb ₂ O ₅	0,012	120	0,007	70	0,006	60	0,006	60	0,005	50	0,006	60				
BaO	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10				
CeO ₂	0,033	330	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10				
PbO	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10	0,001	10				
PF	6,200	62000	4,200	42000	3,240	32400	3,420	34200	3,620	36200	3,750	37500				

ANEXO E

Tabela 31 – Avaliação do critério de Trabanelli por profundidade

Profundidade (m)	pH	Média pH	Análise Critério	Eh (+mV)	Média Eh (+mV)	Análise Critério	Resistividade (ohm.cm)	Média Resistividade (ohm.cm)	Análise Critério	Sulfato (mg/kg)	Análise Critério	Sulfeto (mg/kg)	Análise Critério	Cloreto (mg/kg)	Análise Critério	Soma dos Índices Parciais	Classificação do Solo
1	7,78	7,75	0	267	264	0	210,08	600,12	-4	3,340	0	0,1522	-2	0,62	0	-6	Ligeiramente Agressivo
	7,72	7,75	0	246	264	0	902,53	600,12	-4	3,340	0	0,1522	-2	0,62	0	-6	Ligeiramente Agressivo
	7,75	7,75	0	280	264	0	687,76	600,12	-4	3,340	0	0,1522	-2	0,62	0	-6	Ligeiramente Agressivo
2	7,84	7,86	0	24	135	-2	429,18	1405,60	-4	0	0	0	-2	0	0	-8	Medianamente Agressivo
	7,88	7,86	0	193	135	-2	2197,80	1405,60	-4	0	0	0	-2	0	0	-8	Medianamente Agressivo
	7,86	7,86	0	187	135	-2	1589,83	1405,60	-4	0	0	0	-2	0	0	-8	Medianamente Agressivo
3	8,30	8,27	0	426	291	0	12987,01	13023,01	0	0	0	0	-2	0	0	-2	Ligeiramente Agressivo
	8,30	8,27	0	209	291	0	13245,03	13023,01	0	0	0	0	-2	0	0	-2	Ligeiramente Agressivo
	8,20	8,27	0	238	291	0	12836,97	13023,01	0	0	0	0	-2	0	0	-2	Ligeiramente Agressivo
4	7,80	7,87	0	222	229	0	6578,95	9396,16	-1	3,210	0	0,2330	-2	0,68	0	-3	Ligeiramente Agressivo
	7,90	7,87	0	234	229	0	11363,64	9396,16	-1	3,210	0	0,2330	-2	0,68	0	-3	Ligeiramente Agressivo
	7,90	7,87	0	230	229	0	10245,90	9396,16	-1	3,210	0	0,2330	-2	0,68	0	-3	Ligeiramente Agressivo
5	7,50	7,57	0	242	235	0	10881,39	11000,77	-1	0	0	0	-2	0	0	-3	Ligeiramente Agressivo
	7,60	7,57	0	233	235	0	11286,68	11000,77	-1	0	0	0	-2	0	0	-3	Ligeiramente Agressivo
	7,60	7,57	0	231	235	0	10834,24	11000,77	-1	0	0	0	-2	0	0	-3	Ligeiramente Agressivo
6	7,50	7,37	0	239	244	0	29154,52	28658,94	0	0	0	0	-2	0	0	-2	Ligeiramente Agressivo
	7,30	7,37	0	247	244	0	28653,30	28658,94	0	0	0	0	-2	0	0	-2	Ligeiramente Agressivo
	7,30	7,37	0	246	244	0	28169,01	28658,94	0	0	0	0	-2	0	0	-2	Ligeiramente Agressivo
7	7,80	7,70	0	236	245	0	21367,52	23148,24	0	0	0	0	-2	0	0	-2	Ligeiramente Agressivo
	7,70	7,70	0	253	245	0	23980,82	23148,24	0	0	0	0	-2	0	0	-2	Ligeiramente Agressivo
	7,60	7,70	0	247	245	0	24096,39	23148,24	0	0	0	0	-2	0	0	-2	Ligeiramente Agressivo
8	4,75	4,99	-1	311	314	0	714,80	1033,62	-4	0,157	0	0,1557	-2	2,80	0	-7	Ligeiramente Agressivo
	5,58	4,99	-1	314	314	0	1061,57	1033,62	-4	0,157	0	0,1557	-2	2,80	0	-7	Ligeiramente Agressivo
	4,64	4,99	-1	317	314	0	1324,50	1033,62	-4	0,157	0	0,1557	-2	2,80	0	-7	Ligeiramente Agressivo
9	4,33	4,47	-1	327	322	0	37037,04	34951,04	0	0,000	0	0,2260	-2	1,77	0	-3	Ligeiramente Agressivo
	4,82	4,47	-1	309	322	0	34482,76	34951,04	0	0,000	0	0,2260	-2	1,77	0	-3	Ligeiramente Agressivo
	4,27	4,47	-1	329	322	0	33333,33	34951,04	0	0,000	0	0,2260	-2	1,77	0	-3	Ligeiramente Agressivo
10	4,00	3,93	-1	351	350	0	25000,00	25000,00	0	0	0	0	-2	0	0	-3	Ligeiramente Agressivo
	3,90	3,93	-1	355	350	0	25000,00	25000,00	0	0	0	0	-2	0	0	-3	Ligeiramente Agressivo
	3,88	3,93	-1	345	350	0	25000,00	25000,00	0	0	0	0	-2	0	0	-3	Ligeiramente Agressivo
11	4,41	4,05	-1	345	353	0	1508,30	8415,81	-1	0	0	0	-3	0	0	-5	Ligeiramente Agressivo
	3,86	4,05	-1	364	353	0	2000,00	8415,81	-1	0	0	0	-3	0	0	-5	Ligeiramente Agressivo
	3,88	4,05	-1	349	353	0	21739,13	8415,81	-1	0	0	0	-3	0	0	-5	Ligeiramente Agressivo
12	3,96	4,38	-1	356	353	0	2688,17	4235,85	-2	0,000	0	0,3103	-2	1,39	0	-5	Ligeiramente Agressivo
	4,59	4,38	-1	351	353	0	5494,51	4235,85	-2	0,000	0	0,3103	-2	1,39	0	-5	Ligeiramente Agressivo
	4,59	4,38	-1	351	353	0	4524,89	4235,85	-2	0,000	0	0,3103	-2	1,39	0	-5	Ligeiramente Agressivo
Água	7,43	7,47	0	277	263	0	2040,82	3467,11	-2	0	0	0	-2	0	0	-4	Ligeiramente Agressivo
	7,41	7,47	0	261	263	0	2512,56	3467,11	-2	0	0	0	-2	0	0	-4	Ligeiramente Agressivo
	7,58	7,47	0	252	263	0	5847,95	3467,11	-2	0	0	0	-2	0	0	-4	Ligeiramente Agressivo

ANEXO F

Relatórios da Keller Ambiental



Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre/Inmetro
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0400



Relatório de Ensaio N°: 1901091

Cod/Cliente: 2104007352-Malcom Barbosa Bispo
Endereço: Rua Dr Orlando Damiano, 2789 Jd Macarengo, São Carlos/SP
Telefone: 16 3371 0162

Revisão: 4

Identificação da Amostra

Relatório de Ensaio Definitivo

Descrição da amostra: Solo
Ponto de Coleta: D1m
Coordenadas Geográficas: ;
Responsável pela Coleta: Coleta realizada pelo cliente
ID. Relatório Coleta: 1900402
ID. Coleta: 1902215

Data/Hora Coleta: 31/01/2019 10:30
Data/Hora Recepção: 01/02/2019 16:50
Data Inic. Análise: 01/02/2019
Data Fim Análise: 27/02/2019
Data de Emissão: 04/12/2019

Dados de Amostragem

SMWW 1060 22ª edição 2012
SMWW 9060 22ª edição 2012
ABNT NBR 15847:2010
ABNT NBR 10007:2004
CETESB 6300:1994

Parâmetro Método	Data Análise	Unidade	Solo (Sem Comparativo)	LQ	Resultado
---------------------	--------------	---------	---------------------------	----	-----------

Parâmetros Físico-químicos

Sulfato Total ME 45, revisão 10	27/02/2019	mg/kg	—	12,1	< 12,1
Cloreto ME 45, revisão 10	27/02/2019	mg/kg	—	6,3	< 6,3
% de sólidos seco POP 25, revisão 02	05/02/2019	%	—	1,0	82,90

Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP.

Av. Pe. José de Anchieta, 287 - Parque Alvorada - CEP: 14807-150 - Araraquara/SP
Fone:(16) 3333-6562 - Cel:(16) 99786-3264
e-mail:contato@kellerambiental.com.br
www.kellerambiental.com.br

Form_I_PSGQ_22 Relatório de ensaio_Rev12/ Data de emissão: 28/11/2018



Pag 1 de 2

Powered By Ambidata (c)



Relatório de Ensaio N°: 1901091

Parâmetro Método	Data Análise	Unidade	Solo (Sem Comparativo)	LQ	Resultado
Parâmetros Físico-químicos					
Sulfeto *** ME 50, revisão 05	13/02/2019	mg/kg	—	10	0,152228

Observações:

Proposta Comercial n° 4.282 19 Revisão 01.

O laboratório Keller não se responsabiliza pela amostragem, apenas pelos resultados dos ensaios a partir da entrada das amostras.

Este relatório altera e substitui a versão anterior emitida em 02/12/2019 devido a solicitação do cliente para alteração do parâmetro sulfeto que estava como acreditado para não acreditado, e seu resultado que estava como < 10 para o valor bruto obtido.

Notas:

As opiniões e interpretações expressas acima não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

A conclusão do relatório de ensaio não leva em consideração a estimativa de incerteza de medição do método, portanto, a incerteza poderá afetar a conformidade e conclusão final.

Todos os ensaios deste relatório possuem uma incerteza estimada de medição, e serão prontamente disponíveis quando solicitado pelo cliente.

Este relatório só poderá ser reproduzido na sua íntegra e sem nenhuma modificação mediante autorização por escrito da Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP. Os resultados apresentados referem-se única e exclusivamente a amostra coletada, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

As unidades do relatório de ensaio podem ser convertidos de acordo com a legislação solicitada. Os valores de referência de LQ e Unidade constam no escopo de acreditação CRL0400.

Este laudo foi conferido e assinado eletronicamente por:



Eduardo Henrique Keller
Diretor Geral
CRBio: 3178/01-D



Este documento tem fé pública, segundo o Art. 10, § 1° da MP No 2.200-2;

Instruções para a verificação de autenticidade de documentos:

- 1) Acesse o site: <http://alweb.keller.ambidata.pt/digital/1iq3e3HkaB>
- 2) Acesse o painel de assinatura do leitor PDF;
- 3) Clique com o botão direito do mouse no item do certificado digital.

Esta versão substitui a versão anterior de 27/02/2019

LQ = Limite de Quantificação; UFC = Unidades Formadoras de Colônias; Hz = Unidade Hazen (mg/L PVC); NTU = Unidade Nefelométrica de Turbidez; VMP = Valor Máximo Permitido; SM = Standard Methods of Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition; EPA = Environmental Protection Agency.

Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP.

Av. Pe. José de Anchieta, 287 - Parque Alvorada - CEP: 14807-150 - Araraquara/SP
Fone: (16) 3333-6562 - Cel: (16) 99786-3264
e-mail: contato@kellerambiental.com.br
www.kellerambiental.com.br

Form_I_PSGQ_22 Relatório de ensaio_Rev12/ Data de emissão: 28/11/2018



Pág 2 de 2
Powered By Ambidata (c)



Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre/Inmetro
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0400



Relatório de Ensaio N°: 1901092

Cod/Cliente: 2104007352-Malcom Barbosa Bispo
Endereço: Rua Dr Orlando Damiano, 2789 Jd Macarengo, São Carlos/SP
Telefone: 16 3371 0162

Revisão: 4

Identificação da Amostra

Relatório de Ensaio Definitivo

Descrição da amostra: Solo

Ponto de Coleta: 04m

Coordenadas Geográficas :

Responsável pela Coleta: Coleta realizada pelo cliente

ID. Relatório Coleta: 1900402

ID. Coleta: 1902216

Data/Hora Coleta: 31/01/2019 11:10
Data/Hora Recepção: 01/02/2019 16:50
Data Inic. Análise: 01/02/2019
Data Fim Análise: 27/02/2019
Data de Emissão: 04/12/2019

Dados de Amostragem

SMWW 1060 22ª edição 2012

SMWW 9060 22ª edição 2012

ABNT NBR 15847:2010

ABNT NBR 10007:2004

CETESB 6300:1994

Parâmetro Método	Data Análise	Unidade	Solo (Sem Comparativo)	LQ	Resultado
Parâmetros Físico-químicos					
Sulfato Total ME 46, revisão 10	27/02/2019	mg/kg	—	12,1	< 12,1
Cloreto ME 46, revisão 10	27/02/2019	mg/kg	—	6,3	< 6,3
% de sólidos seco POP 26, revisão 02	05/02/2019	%	—	1,0	88,10

Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP.

Av. Pe. José de Anchieta, 287 - Parque Alvorada - CEP: 14807-150 - Araraquara/SP

Fone:(16) 3333-6562 - Cel:(16) 99786-3264

e-mail:contato@kellerambiental.com.br

www.kellerambiental.com.br

Form_I_POGQ_22 Relatório de ensaio_Rev12/ Data de emissão: 26/11/2018



Pág 1 de 2

Powered By Ambidata (c)

Relatório de Ensaio N°: 1901092

Parâmetro Método	Data Análise	Unidade	Solo (Sem Comparativo)	LQ	Resultado
Parâmetros Físico-químicos					
Sulfeto *** ME 50; revisão 05	13/02/2019	mg/kg	—	10	0,233026

Observações:

Proposta Comercial n° 4.282 19 Revisão 01.

O laboratório Keller não se responsabiliza pela amostragem, apenas pelos resultados dos ensaios a partir da entrada das amostras.

Este relatório altera e substitui a versão anterior emitida em 02/12/2019 devido a solicitação do cliente para alteração do parâmetro sulfeto que estava como acreditado para não acreditado, e seu resultado que estava como < 10 para o valor bruto obtido.

Notas:

As opiniões e interpretações expressas acima não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

A conclusão do relatório de ensaio não leva em consideração a estimativa de incerteza de medição do método, portanto, a incerteza poderá afetar a conformidade e conclusão final.

Todos os ensaios deste relatório possuem uma incerteza estimada de medição, e serão prontamente disponíveis quando solicitado pelo cliente.

Este relatório só poderá ser reproduzido na sua íntegra e sem nenhuma modificação mediante autorização por escrito da Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP. Os resultados apresentados referem-se única e exclusivamente a amostra coletada, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

As unidades do relatório de ensaio podem ser convertidos de acordo com a legislação solicitada. Os valores de referência de LQ e Unidade constam no escopo de acreditação CRL0400.

Este laudo foi conferido e assinado eletronicamente por:



Eduardo Henrique Keller
Diretor Geral
CRBio: 3178/01-D



Este documento tem fé pública, segundo o Art. 10, § 1º da MP No 2.200-2;

Instruções para a verificação de autenticidade de documentos:

- 1) Acesse o site: <http://alweb.keller.ambidata.pt/digital/rf4nDWJTEq>
- 2) Acesse o painel de assinatura do leitor PDF;
- 3) Clique com o botão direito do mouse no item do certificado digital.

Esta versão substitui a versão anterior de 27/02/2019

LQ = Limite de Quantificação; UFC = Unidades Formadoras de Colônias; Hz = Unidade Hazen (mg/L Pt/Co); NTU = Unidade Nefelométrica de Turbidez; VMP = Valor Máximo Permitido; SM = Standard Methods of Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition; EPA - Environmental Protection Agency.

Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP.

Av. Pe. José de Anchieta, 287 - Parque Alvorada - CEP: 14807-150 - Araraquara/SP
Fone: (16) 3333-6562 - Cel: (16) 99786-3264
e-mail: contato@kellerambiental.com.br
www.kellerambiental.com.br

Form_I_PSGQ_22 Relatório de ensaio_Rev12/ Data de emissão: 28/11/2018



Pág 2 de 2
Powered By Ambidata (c)



Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre/Inmetro
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0400



Relatório de Ensaio Nº: 1901093

Cod/Cliente: 2104007352-Malcom Barbosa Bispo
Endereço: Rua Dr Orlando Damiano, 2769 Jd Macarengo, São Carlos/SP
Telefone: 16 3371 0162

Revisão: 4

Identificação da Amostra

Relatório de Ensaio Definitivo

Descrição da amostra: Solo
Ponto de Coleta: 08m
Coordenadas Geográficas: ;
Responsável pela Coleta: Coleta realizada pelo cliente
ID. Relatório Coleta: 1900402
ID. Coleta: 1902217

Data/Hora Coleta: 31/01/2019 15:00
Data/Hora Recepção: 01/02/2019 16:50
Data Inic. Análise: 01/02/2019
Data Fim Análise: 27/02/2019
Data de Emissão: 04/12/2019

Dados de Amostragem

SMWW 1080 22ª edição 2012
SMWW 9080 22ª edição 2012
ABNT NBR 15847:2010
ABNT NBR 10007:2004
CETESB 6300:1994

Parâmetro Método	Data Análise	Unidade	Solo (Sem Comparativo)	LQ	Resultado
Parâmetros Físico-químicos					
Sulfato Total ME 46, revisão 10	27/02/2019	mg/kg	—	12,1	< 12,1
Cloreto ME 46, revisão 10	27/02/2019	mg/kg	—	6,3	< 6,3
% de sólidos seco POP 26 revisão 02	05/02/2019	%	—	1,0	67,60

Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP.

Av. Pe. José de Anchieta, 287 - Parque Alvorada - CEP: 14807-150 - Araraquara/SP
Fone: (16) 3333-6562 - Cel: (16) 99786-3264
e-mail: contato@kellerambiental.com.br
www.kellerambiental.com.br

Form_I_PSGQ_22 Relatório de ensaio_Rev12/ Data de emissão: 26/11/2018



Pág 1 de 2

Powered By Ambidata (c)



Relatório de Ensaio N°: 1901093

Parâmetro Método	Data Análise	Unidade	Solo (Sem Comparativo)	LQ	Resultado
Parâmetros Físico-químicos					
Sulfeto *** ME 90, revisão 05	13/02/2019	mg/kg	—	10	0,155741

Observações:

Proposta Comercial n° 4.282 19 Revisão 01.

O laboratório Keller não se responsabiliza pela amostragem, apenas pelos resultados dos ensaios a partir da entrada das amostras.

Este relatório altera e substitui a versão anterior emitida em 02/12/2019 devido a solicitação do cliente para alteração do parâmetro sulfeto que estava como acreditado para não acreditado, e seu resultado que estava como < 10 para o valor bruto obtido.

Notas:

As opiniões e interpretações expressas acima não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório. A conclusão do relatório de ensaio não leva em consideração a estimativa de incerteza de medição do método, portanto, a incerteza poderá afetar a conformidade e conclusão final.

Todos os ensaios deste relatório possuem uma incerteza estimada de medição, e serão prontamente disponíveis quando solicitado pelo cliente.

Este relatório só poderá ser reproduzido na sua íntegra e sem nenhuma modificação mediante autorização por escrito da Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP. Os resultados apresentados referem-se única e exclusivamente a amostra coletada, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

As unidades do relatório de ensaio podem ser convertidos de acordo com a legislação solicitada. Os valores de referência de LQ e Unidade constam no escopo de acreditação CRL0400.

Este laudo foi conferido e assinado eletronicamente por:



Eduardo Henrique Keller
Diretor Geral
CREBio: 3178/01-D



Este documento tem fé pública, segundo o Art. 10. § 1° da MP No 2.200-2;

Instruções para a verificação de autenticidade de documentos:

- 1) Acesse o site: <http://aiweb.keller.ambidata.pt/digital/hisjiiXCZ>
- 2) Acesse o painel de assinatura do leitor PDF;
- 3) Clique com o botão direito do mouse no item do certificado digital.

Esta versão substitui a versão anterior de 27/02/2019

LQ = Limite de Quantificação; UFC = Unidades Formadoras de Colônias; Hz = Unidade Hazen (mg/L Pb/Co); NTU = Unidade Nefelométrica de Turbidez; VMP = Valor Máximo Permitido; SM = Standard Methods of Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition; EPA - Environmental Protection Agency.

Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP.

Av. Pe. José de Anchieta, 287 - Parque Alvorada - CEP: 14807-150 - Araraquara/SP
Fone: (16) 3333-6662 - Cel: (16) 99786-3264
e-mail: contato@kellerambiental.com.br
www.kellerambiental.com.br

Form_1_PSGQ_22 Relatório de ensaio_Rev12/ Data de emissão: 28/11/2018



Pág 2 de 2
Powered By Ambidata (c)



Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre/Inmetro
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0400



Relatório de Ensaio N°: 1901094

Cod/Ciente: 2104007352-Malcom Barbosa Bispo
Endereço: Rua Dr Orlando Damiano, 2789 Jd Macarengo, São Carlos/SP
Telefone: 16 3371 0162

Revisão: 4

Identificação da Amostra

Relatório de Ensaio Definitivo

Descrição da amostra: Solo
Ponto de Coleta: Dm
Coordenadas Geográficas: ;
Responsável pela Coleta: Coleta realizada pelo cliente
ID. Relatório Coleta: 1900402
ID. Coleta: 1902218

Data/Hora Coleta: 31/01/2019 16:00
Data/Hora Recepção: 01/02/2019 16:50
Data Inic. Análise: 01/02/2019
Data Fim Análise: 27/02/2019
Data de Emissão: 04/12/2019

Dados de Amostragem

SMWW 1060 22ª edição 2012
SMWW 9060 22ª edição 2012
ABNT NBR 15847:2010
ABNT NBR 10007:2004
CETESB 6300:1994

Parâmetro Método	Data Análise	Unidade	Solo (Sem Comparativo)	LQ	Resultado
Parâmetros Físico-químicos					
Sulfato Total ME 45, revisão 10	27/02/2019	mg/kg	—	12,1	< 12,1
Cloreto ME 45, revisão 10	27/02/2019	mg/kg	—	6,3	< 6,3
% de sólidos seco POP 26 revisão 02	05/02/2019	%	—	1,0	90,90

Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP.

Av. Pe. José de Anchieta, 287 - Parque Alvorada - CEP: 14907-150 - Araraquara/SP
Fone: (16) 3333-6562 - Cel: (16) 99786-3264
e-mail: contato@kellerambiental.com.br
www.kellerambiental.com.br

Form_L_PSGQ_22 Relatório de ensaio_Rev12/ Data de emissão: 28/11/2018



Pág 1 de 2

Powered By Ambidata (c)

Relatório de Ensaio N°: 1901094

Parâmetro Método	Data Análise	Unidade	Solo (Sem Comparativo)	LQ	Resultado
Parâmetros Físico-químicos					
Sulfeto *** ME: 90, revisão: 05	13/02/2019	mg/kg	—	10	0,226

Observações:

Proposta Comercial n° 4.282.19 Revisão 01.

O laboratório Keller não se responsabiliza pela amostragem, apenas pelos resultados dos ensaios a partir da entrada das amostras.

Este relatório altera e substitui a versão anterior emitida em 02/12/2019 devido a solicitação do cliente para alteração do parâmetro sulfeto que estava como acreditado para não acreditado, e seu resultado que estava como < 10 para o valor bruto obtido.

Notas:

As opiniões e interpretações expressas acima não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

A conclusão do relatório de ensaio não leva em consideração a estimativa de incerteza de medição do método, portanto, a incerteza poderá afetar a conformidade e conclusão final.

Todos os ensaios deste relatório possuem uma incerteza estimada de medição, e serão prontamente disponíveis quando solicitado pelo cliente.

Este relatório só poderá ser reproduzido na sua íntegra e sem nenhuma modificação mediante autorização por escrito da Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP. Os resultados apresentados referem-se única e exclusivamente a amostra coletada, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

As unidades do relatório de ensaio podem ser convertidos de acordo com a legislação solicitada. Os valores de referência de LQ e Unidade constam no escopo de acreditação CRL0400.

Este laudo foi conferido e assinado eletronicamente por:



Eduardo Henrique Keller
Diretor Geral
CRBio: 3178/01-D



Este documento tem fé pública, segundo o Art. 10. § 1° da MP No 2.200-2;

Instruções para a verificação de autenticidade de documentos:

- 1) Acesse o site: <http://alweb.keller.ambidata.pt/digital/WE162hkDf1>
- 2) Acesse o painel de assinatura do leitor PDF;
- 3) Clique com o botão direito do mouse no item do certificado digital.

Esta versão substitui a versão anterior de 27/02/2019

LQ = Limite de Quantificação; UFC = Unidades Formadoras de Colônias; Hz = Unidade Hazen (mg/L Pt/Co); NTU = Unidade Nefelométrica de Turbidez; VMP = Valor Máximo Permitido; SM = Standard Methods of Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition; EPA - Environmental Protection Agency.

Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP.

Av. Pe. José de Anchieta, 287 - Parque Alvorada - CEP: 14807-150 - Araraquara/SP
Fone: (16) 3333-6562 - Cel: (16) 99786-3264
e-mail: contato@kellerambiental.com.br
www.kellerambiental.com.br

Form_1_PSGQ_22 Relatório de ensaio_Rev12/ Data de emissão: 28/11/2018



Pág 2 de 2
Powered By Ambidata (c)



Laboratório de Ensaio acreditado pela Cgcre/Inmetro
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CRL 0400



Relatório de Ensaio N°: 1901095

Cod/Cliente: 2104007352-Malcom Barbosa Bispo
Endereço: Rua Dr Orlando Damiano, 2769 Jd Macarengo, São Carlos/SP
Telefone: 16 3371 0162

Revisão: 4

Identificação da Amostra

Relatório de Ensaio Definitivo

Descrição da amostra: Solo

Ponto de Coleta: 12m

Coordenadas Geográficas: ;

Responsável pela Coleta: Coleta realizada pelo cliente

ID. Relatório Coleta: 1900402

ID. Coleta: 1902219

Data/Hora Coleta: 31/01/2019 19:00
Data/Hora Recepção: 01/02/2019 16:50
Data Inic. Análise: 01/02/2019
Data Fim Análise: 27/02/2019
Data de Emissão: 04/12/2019

Dados de Amostragem

SMWW 1060 22ª edição 2012

SMWW 9080 22ª edição 2012

ABNT NBR 15847:2010

ABNT NBR 10007:2004

CETESB 6300:1994

Parâmetro Método	Data Análise	Unidade	Solo (Sem Comparativo)	LQ	Resultado
Parâmetros Físico-químicos					
Sulfato Total ME 46, revisão 10	27/02/2019	mg/kg	—	12,1	< 12,1
Cloreto ME 46, revisão 10	27/02/2019	mg/kg	—	6,3	< 6,3
% de sólidos seco POP 26, revisão 02	05/02/2019	%	—	1,0	86,70

Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP.

Av. Pe. José de Anchieta, 287 - Parque Alvorada - CEP: 14807-150 - Araraquara/SP

Fone:(16) 3333-6562 - Cel:(16) 99786-3264

e-mail:contato@kellerambiental.com.br

www.kellerambiental.com.br

Form_1_PSGQ_22 Relatório de ensaio_Rev12/ Data de emissão: 26/11/2018



Pag 1 de 2

Powered By Ambidata (c)

Relatório de Ensaio N°: 1901095

Parâmetro Método	Data Análise	Unidade	Solo (Sem Comparativo)	LQ	Resultado
Parâmetros Físico-químicos					
Sulfeto *** Mét. 50, revisão 05	13/02/2019	mg/kg	—	10	0,31031

Observações:

Proposta Comercial n° 4.282 19 Revisão 01.

O laboratório Keller não se responsabiliza pela amostragem, apenas pelos resultados dos ensaios a partir da entrada das amostras.

Este relatório altera e substitui a versão anterior emitida em 02/12/2019 devido a solicitação do cliente para alteração do parâmetro sulfeto que estava como acreditado para não acreditado, e seu resultado que estava como < 10 para o valor bruto obtido.

Notas:

As opiniões e interpretações expressas acima não fazem parte do escopo de acreditação deste laboratório.

A conclusão do relatório de ensaio não leva em consideração a estimativa de incerteza de medição do método, portanto, a incerteza poderá afetar a conformidade e conclusão final.

Todos os ensaios deste relatório possuem uma incerteza estimada de medição, e serão prontamente disponíveis quando solicitado pelo cliente.

Este relatório só poderá ser reproduzido na sua íntegra e sem nenhuma modificação mediante autorização por escrito da Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP. Os resultados apresentados referem-se única e exclusivamente a amostra coletada, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

As unidades do relatório de ensaio podem ser convertidos de acordo com a legislação solicitada. Os valores de referência de LQ e Unidade constam no escopo de acreditação CRL0400.

Este laudo foi conferido e assinado eletronicamente por:



Eduardo Henrique Keller
Diretor Geral
CRBio: 3178/01-D



Este documento tem fé pública, segundo o Art. 10. § 1° da MP No 2.200-2;
Instruções para a verificação de autenticidade de documentos:

- 1) Acesse o site: <http://alweb.keller.ambidata.pt/digital/XNv5I9sP32>
- 2) Acesse o painel de assinatura do leitor PDF;
- 3) Clique com o botão direito do mouse no item do certificado digital.

Esta versão substitui a versão anterior de 27/02/2019

LQ = Limite de Quantificação; UFC = Unidades Formadoras de Colônias; Hz = Unidade Hazen (mg/L PVC); NTU = Unidade Nefelométrica de Turbidez; VMP = Valor Máximo Permitido; SM = Standard Methods of Examination of Water and Wastewater, 22nd Edition; EPA = Environmental Protection Agency.


Keller Empresa de Saneamento e Ecologia EIRELI EPP.

Av. Pe. José de Anchieta, 287 - Parque Alvorada - CEP: 14807-150 - Araraquara/SP
Fone: (16) 3333-6562 - Cel: (16) 99786-3264
e-mail: contato@kellerambiental.com.br
www.kellerambiental.com.br

Form_j_PGQ_22 Relatório de ensaio_Rev12/ Data de emissão: 28/11/2018



Pág 2 de 2
Powered By Ambidata (c)

	Método de Ensaio	ME - 60
		Revisão 06
	Determinação de Sulfeto por Colorimetria	Emissão: 14/02/2019
		Página 2 de 5

1. OBJETIVO

Esse procedimento é utilizado para quantificar Sulfeto utilizando o método SMEWW 23ª edição 4500 S²⁻ D.

2. APLICAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO

Este procedimento é aplicável à água bruta, água tratada, água para consumo humano, água residual, solo e resíduo; e é distribuído à área técnica.

3. DOCUMENTOS COMPLEMENTARES

IT 50 - Manuseio do Espectrofotômetro Genesys 10S;

PSGQ 20 Garantia da Qualidade;

POP 14 – Segurança.

4. AUTORIDADE E RESPONSABILIDADE

A autoridade deste procedimento cabe ao Gerente Técnico.

A responsabilidade deste procedimento cabe ao analista.

5. APARATOS

5.1. Equipamentos

- Espectrofotômetro;
- Pipetas;
- Balança analítica;

5.2. Materiais


- Béquer;
- Balão volumétrico;
- Tubo de ensaio.

6. INDICAÇÃO DO USO DE EPI

O uso dos EPIs estão definidos no POP 14 – Segurança

7. REAGENTES

- Sulfeto de Sódio (Na₂S);
- Padrão de Sulfeto 1000mg/L;
- Ácido amino-sulfúrico;
- Oxalato de N,N-dimetil-p-fenilenodiamina;

	Método de Ensaio	ME - 60
		Revisão 06
	Determinação de Sulfeto por Colorimetria	Emissão: 14/02/2019
		Página 3 de 5

- Ácido Sulfúrico (H_2SO_4);
- Cloreto Férrico Hexahidratado ($FeCl_3$);
- Diamônio hidrogeno fosfato $(NH_4)_2HPO_4$;

8. PROCEDIMENTOS

8.1. Preparo de Soluções

As soluções preparadas devem ser registradas no software LabWay LIMS e etiquetadas de acordo com o POP 34_Gestão de Estoques.

8.1.1. Solução padrão estoque

As soluções padrões utilizadas para construção de curva de calibração deverão ser preparadas a partir de um padrão comercial de referência ISO GUIDE 34.

Pipetar 1,0 mL da Solução Padrão comercial de 1000 mg/L e avolumar para 10 mL com água destilada, obtendo assim uma Solução Padrão Estoque de 10 mg/L. A partir da solução padrão estoque, proceder diluições de acordo com a Tabela 1.

8.1.2. Soluções padrões trabalho calibração ou verificação


Para preparo de soluções padrões de trabalho para construção de curva de calibração, seguir Tabela 1.

Tabela 1: Pontos da Curva.

Concentração Inicial (mg/L)	Volume de Padrão (μ L)	Volume Final (mL)	Concentração Final (mg/L)
10	10 μ L	100	0,001
10	100 μ L	100	0,01
10	500 μ L	100	0,05
10	1 mL	100	0,10
10	1,5 mL	100	0,15
10	2,0 mL	100	0,20
10	3,0 mL	100	0,30
10	4,0 mL	100	0,40
10	5,0 mL	100	0,50

8.1.3. Preparo de soluções

- **Solução estoque de ácido amino-sulfúrico:** dissolver 2,7g oxalato de N,N-dimetil-p-fenilenodiamina em uma mistura de 5,0mL de ácido sulfúrico concentrado e 2,0mL de água destilada. Resfriar e diluir para 10mL com água destilada. Estocar em frasco de vidro âmbar por 6 meses;
- **Reagente ácido amino-sulfúrico:** diluir 10,0 mL da Solução estoque de ácido amino-sulfúrico e avolumar para 390 mL com solução de H_2SO_4 1:1. Estocar em frasco de vidro âmbar por 6 meses;
- **Solução de cloreto férrico:** dissolver 100 g de cloreto férrico hexahidratado em 40mL de água destilada. Estocar em frasco de vidro âmbar por 6 meses;

	Método de Ensaio	ME - 60
		Revisão 06
	Determinação de Sulfeto por Colorimetria	Emissão: 14/02/2019
		Página 4 de 5

- **Solução de ácido sulfúrico H₂SO₄-1:1:** Adicionar 500mL de H₂SO₄ em aproximadamente 400mL de água deionizada, esperar esfriar e avolumar para 1000mL com água deionizada;
- **Solução de Diamônio hidrogeno fosfato:** dissolver 100 g em 200 mL de água destilada. Estocar em frasco de vidro âmbar por 6 meses.

8.2. Controle de Qualidade

Para cada batelada de 1 a 20 amostras realizar os seguintes controles da qualidade de acordo com PSGQ 20 Controle da qualidade – Anexo 1.

8.3. Procedimento de análise

O procedimento de análise deve ser registrado durante a realização do ensaio no Form_I_ME 60_Planilha de Bancada Sulfeto e Form_II_ME 60_Planilha de Bancada Sulfeto solo, e após a finalização "Salvo como" na "Rede Keller" de acordo com o PSGQ_16_Control de Dados.

8.3.1. Preparo de amostra sólida/resíduo

Preparar um suspensão de 1:10 (m/m), para isso, tomar uma quantidade de amostra representativa de 10 g de solo úmido e transferir para um frasco plástico com tampa, adicionar dez vezes a sua massa em água destilada (por exemplo: 10g/100mL) e agitar vigorosamente a suspensão. Aguardar por 24 h para sedimentação do solo e utilizar o sobrenadante para análise.

8.3.2. Procedimento de análise


- A amostra deve vir preservada de campo com Solução de Acetato de Zinco (4 gotas);
- Transfira 7,5mL de amostra para uma cubeta;
- Adicionar 0,5mL do Reagente ácido amino-sulfúrico e 0,15mL da solução de cloreto férrico;
- Misturar imediatamente por inversão lentamente (agitação excessiva causa baixos resultados por perda de H₂S como um gás antes que ele teve tempo para reagir);
- A presença de S²⁻ será indicado pelo aparecimento de cor azul no tubo. O desenvolvimento da cor é geralmente se completa em cerca de 1 minuto;
- Após 5 minutos e adicione 1,0 mL da solução de (NH₄)₂HPO₄;
- Homogeneizar e aguardar de 3 a 5 minutos para efetuar a leitura. Em espectrofotômetro em 660nm.

8.4. Cálculo amostra sólida

$$\text{Concentração, mg/kg (base peso úmido)} = \frac{A \times B}{\text{g amostra}}$$

Onde:

A = concentração, mg / L,

	Método de Ensaio	ME - 60
		Revisão 06
	Determinação de Sulfeto por Colorimetria	Emissão: 14/02/2019
		Página 5 de 5

B = volume final filtrado, mL.

9. REGISTROS

Form_I_ME 60_Planilha de Bancada Sulfeto

Form_II_ME 60_Planilha de Bancada Sulfeto solo




10. HISTÓRICO DA REVISÃO

Revisão	Data	Histórico
06	14/02/2019	Revisão item 8.1; 8.2 e 8.3.2

11. ANEXO

Não Aplicável.

12. APROVAÇÃO

 Elaborado por Fabíola Cruz Gerente Técnico 14/02/2019	 Revisado por Maria Augusta N. Bordignon Gerente da Qualidade 14/02/2019	 Aprovado por Eduardo Henrique Keller Diretor Geral 14/02/2019
---	---	---