



**INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA**

**CÂMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM ENGENHARIA CIVIL**

CHARLES AUGUSTO DALPRÁ

**ESTUDO DE CASO DE
CORROSÃO EM ESTACAS
HELICOIDAIS DE AÇO PATINÁVEL
EM TORRES DE TRANSMISSÃO
DE ENERGIA**

**Florianópolis - SC
2019**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
SANTA CATARINA – CAMPUS FLORIANÓPOLIS
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

CHARLES AUGUSTO DALPRÁ

**ESTUDO DE CASO DE CORROSÃO EM ESTACAS
HELICOIDAIS DE AÇO PATINÁVEL EM TORRES DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA**

**Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina como parte dos
requisitos de obtenção do título de
Engenheiro Civil.**

**Orientadora:
Prof.^a Msc. Márcia Maria Machado
Steil**

FLORIANÓPOLIS, 2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Dalprá, Charles Augusto

Estudo de caso de corrosão em estacas helicoidais
de aço patinável em torres de transmissão de energia / Charles
Augusto Dalprá ; orientação de Márcia Maria Machado
Steil. - Florianópolis, SC, 2019.

130 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado
em Engenharia Civil. Departamento Acadêmico
de Construção Civil.
Inclui Referências.

1. Aço patinável. 2. Corrosão. 3. Estaca helicoidal.
4. Fundação metálica. 5. Tirante helicoidal. I. Steil,
Márcia Maria Machado. II. Instituto Federal de Santa
Catarina. Departamento Acadêmico de Construção
Civil. III. Título.

**ESTUDO DE CASO DE CORROSÃO EM ESTACAS
HELICOIDAIS DE AÇO PATINÁVEL EM TORRES DE
TRANSMISSÃO DE ENERGIA**

CHARLES AUGUSTO DALPRÁ

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título de engenheiro civil e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do curso de Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 13 de Dezembro de 2019

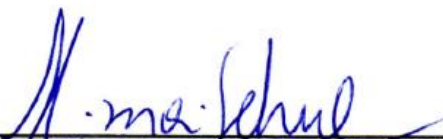
Banca examinadora:



Marcia Maria Machado Steil, Mestra



Luciana Maltez Calçada, Doutora



Fernanda Simoni Schuch, Doutora



Josélia Ednar Antunes Piluski, Mestra

Pela sua presença nos momentos mais difíceis e pela compreensão que sempre tiveram, dedico este trabalho à minha esposa Makely e meu filho Igor.

“A educação é a arma mais
poderosa para mudar o mundo”
(Nelson Mandela)

RESUMO

A corrosão em estruturas metálicas é uma patologia comum e responsável por muitos dos casos de danos em torres de transmissão de energia. As fundações destas estruturas, em função do contato com o solo, são pontos críticos para o desenvolvimento de corrosão. Um tipo eficiente e rápido de execução das fundações para suportar os esforços de tração de torres estaiadas é por meio de estacas helicoidais de aço. O aço patinável, devido as suas características de resistência à corrosão pode ser apontado como uma solução para a execução deste tipo de fundação. Neste contexto, o trabalho teve como objetivo avaliar o estado de conservação, no que diz respeito à corrosão, das fundações do tipo estacas helicoidais de aço patinável. Avaliou-se 12 torres de transmissão em serviço há mais de cinco anos, analisando-se o grau de acidez, resistividade, teor de cloreto e umidade do solo e sua possível relação com o desenvolvimento do processo de corrosão. Os resultados obtidos pela análise das características do solo sugerem que a aplicação das estacas de aço patinável deve ser analisada de forma criteriosa.

Palavras chave

Aço patinável. Corrosão. Estaca helicoidal. Fundação metálica. Tirante helicoidal

ABSTRACT

Corrosion in metal structures is common and is responsible for many cases of damage to power transmission towers. The foundation of these structures, due to contact with the ground, are critical points for the development of corrosion. An efficient and fast type of foundation execution to withstand the tensile stresses of cable-stayed towers is through iron screw-pile. The weathering steel, due to its corrosion resistance characteristics can be pointed as a solution for the execution of this type of foundation. In this context, the proposed work has the objective of evaluating the state of preservation, with regard to the corrosion of pile foundations type weathering steel screw. We evaluated twelve transmission towers in service for more than five years were evaluated, analyzing soil acidity, resistivity, chloride content and moisture content and the possibility to be related to development of corrosion process. The results obtained by the analysis of the soil characteristics suggest that the application of weathering steel piles must be carefully analyzed.

Key words

Weathering steel. Corrosion. Iron screw-pile. Metal foundation. Weathering screw-pile.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
2.1	Sistema elétrico brasileiro	17
2.2	Linhas de Transmissão	19
2.3	Utilização de estacas helicoidais	24
2.4	Procedimento técnico para instalação dos Tirantes helicoidal.	30
2.5	Aço patinável	32
2.6	Corrosão	39
2.6.1	Mecanismo de corrosão	39
2.6.2	Tipos de corrosão eletroquímica	41
2.6.3	Forma de corrosão	42
2.7	Características dos solos e sua influência na corrosão	43
2.7.1	Grau de acidez	43
2.7.2	Resistividade do solo	44
2.7.3	Propriedades físicas do solo	45
2.7.4	Teor de cloretos	45
2.7.5	Potencial de oxirredução	46
2.7.6	Umidade do solo	47
2.7.7	Caracterização do solo.....	49
2.8	Correlação	51
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	53
3.1	Características da linha de transmissão analisada	54
3.2	Caracterização da região geográfica de estudos.....	56
3.3	Medição de pH do solo	58
3.4	Medição de resistividade do solo	59
3.5	Medição de teor de cloretos.....	61

3.5.1	Titulação volumétrica do teor de cloreto.....	66
3.5.2	Titulação condutimétrica do teor de cloreto.....	67
3.6	Medição de umidade do solo	68
3.6.1	Método da frigideira.....	69
3.6.2	Método do infravermelho.....	70
3.7	Escavação para verificação de corrosão subterrânea	70
3.7.1	Caracterização do nível de corrosão.....	70
3.8	Coleta de amostras das estacas.....	71
4	INFRAESTRUTURA UTILIZADA.....	73
4.1	pHmetro	73
4.2	Terrômetro	73
4.3	Teor de cloretos.....	73
4.4	Teor de umidade.....	74
4.5	Escavação	75
4.6	Ensaio de caracterização do material das estacas	75
5	RESULTADOS	76
5.1	Fotografias e comentários dos pontos de análise.....	76
5.1.1	Ponto 1.....	76
5.1.2	Ponto 2.....	77
5.1.3	Ponto 3.....	78
5.1.4	Ponto 4.....	79
5.1.5	Ponto 5.....	80
5.1.6	Ponto 6.....	81
5.1.7	Ponto 7.....	82
5.1.8	Ponto 8.....	83
5.1.9	Ponto 9.....	84
5.1.10	Ponto 10.....	84

5.1.11	Ponto 11.....	85
5.1.12	Ponto 12.....	86
5.2	Análise dos parâmetros	89
5.2.1	pH e temperatura do solo versus corrosão.	89
5.2.2	Resistividade do solo versus corrosão.....	90
5.2.3	Teor de cloreto versus corrosão.....	92
5.2.4	Umidade versus corrosão	102
5.3	Consolidação dos valores coletados.....	104
5.4	Análise dos dados consolidados.....	106
5.5	Análise das amostras de estaca	107
5.5.1	Espectrometria de Emissão Ótica	108
5.5.2	Microscopia Eletrônica de Varredura	109
5.5.3	Difração por Raio-x	111
5.5.4	Espectrometria por energia dispersiva (EDS)	113
6	CONCLUSÃO.....	117
7	SUGESTÃO PARA OUTROS TRABALHOS.....	119
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120
	APENDICE A - Determinação de umidade residual para medição de teor de cloreto.....	127
	APENDICE B - Umidade residual média para medição de teor de cloreto	128
	APENDICE C – Peso de solo úmido equivalente para medição de teor de cloreto	129
	APENDICE D – Volume de água adicionada para medição de teor de cloreto	130

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A corrosão dos metais sempre foi um grande problema enfrentado pela indústria, isto porque a corrosão é uma forma natural de reciclagem, uma vez que os materiais tendem a retornar à sua forma primitiva, que são os óxidos. Nos Estados Unidos, por exemplo, estima-se que a corrosão dos metais em geral provocou um custo direto de cerca de U\$ 276 bilhões de dólares anuais em 2001 que correspondem somente aos custos de substituição de peças danificadas. (Schmitt et al, 2009).

Na busca por um aço com maior resistência mecânica, na década de 1930 a United States Steel (USS) encontrou um aço de baixa liga, que possuía a característica de melhor resistência à corrosão que os demais aços da época, ao qual deu o nome comercial de aço COR-TEN. Este nome é originário de duas características encontradas neste tipo de aço: resistência à corrosão (*corrosion resistance*) e alta resistência mecânica (*tensile strength*). Observou-se que a proteção contra corrosão deste aço se dava pela formação de uma película de óxidos protetores e aderentes, conhecida como pátina, passando-se a adotar, então, o nome de aço patinável (PANNONI, 2004).

Na construção de linhas de transmissão de energia elétrica são utilizados dois tipos de torres, sendo elas autoportantes ou estaiadas. Azevedo e Diniz (2007) indicam que o objetivo de um projeto de linha de transmissão é buscar pela maior incidência de torres estaiadas por serem mais leves e econômicas.

A redução de custos na utilização de torres estaiadas, quando comparadas ao uso de torres autoportantes é descrita por Aschcar (1999), uma vez que na LT 460kV Jupia-Taquaruçu, com extensão de 208km, onde foram instaladas 90% de torres estaiadas e 10% de torres autoportantes, quando comparada a construção hipotética da mesma linha de transmissão com todas as torres autoportantes, a redução do custo das fundações foi de 40%, cerca de US\$ 2.150.000,00. Já a redução global do custo da linha foi de 9,7%, cerca US\$4.150.000,00.

As estruturas estaiadas necessitam de um mastro central que suportará os esforços de flexo-compressão e quatro estais, que receberão

esforços de tração. Estes estais poderão ser realizados com vigas de seção em forma de “L” pré-moldadas, tubulões sem base alargada moldadas *in situ* ou ainda com estacas helicoidais cravadas no solo (AZEVEDO;DINIZ, 2007)

Para Santos Filho (2014), as principais vantagens da utilização de estacas helicoidais são a facilidade de transporte, de verificação de capacidade de carga com a leitura do torque de instalação, rapidez na instalação, eliminação da cura do concreto, além de não produzir material para bota-fora e descarte.

Segundo Carvalho (2007), as estacas helicoidais podem atender ou até superar as capacidades de projeto e podem ser instaladas em uma diversidade de tipos de solos, de maneira rápida e com o mínimo de distúrbio no local de aplicação. Outra vantagem é a possibilidade de aplicação de carga imediatamente após a instalação da mesma.

Para confecção das estacas helicoidais, o aço patinável parece ser uma alternativa de material mais resistente à corrosão, pois, segundo Santos Filho (2014), a principal característica deste material é a formação de uma camada de óxido aderente à superfície quando exposto aos agentes corrosivos. No entanto, por se tratar de uma técnica que expõe a estaca à região de transição solo-ar, corre-se o risco de desenvolvimento de corrosão nesta região, pois a formação da pátina depende de exposição ao ar atmosférico (SLATER, 1987).

Vendo as vantagens econômicas e técnicas na utilização das estacas helicoidais em aço patinável, no ano de 2013 esta tecnologia foi utilizada para suportar os esforços de tração de torres estaiadas na região litorânea do estado do Rio Grande do Sul. Estas estacas estão aplicadas no solo e possuem uma área exposta à atmosfera, havendo então uma área de transição solo-ar. Passados apenas cinco anos, identificou-se corrosão em algumas das fundações assim executadas, o que não era esperado.

Tendo em vista a hipótese de que o aço patinável tem alta resistência à corrosão, processos precoces deste fenômeno não deveriam ser observados, mesmo em situações em que sua durabilidade quanto a este processo de degradação seja reduzida. Sendo assim, surgem dois questionamentos: o primeiro diz respeito ao real ganho de vida útil das fundações executadas com este material em relação a outros materiais que

podem ser usados para o mesmo fim. O segundo questionamento refere-se à influência das condições de exposição às quais o material está submetido na deflagração precoce de corrosão, o que pode indicar que o aço patinável possui níveis diferentes de corrosão conforme as características do solo.

Assim sendo, o objetivo do trabalho ora proposto é contribuir com uma resposta para o segundo questionamento apresentado, e consiste em avaliar o comportamento de aço patinável em área de transição solo-ar, a chamada zona aerada, verificando se houve instauração de processos corrosivos e investigando algumas características do solo que possam ter contribuído para tal.

Os objetivos específicos do projeto são:

- a) verificar a existência de processo de corrosão para 12 estacas helicoidais de fundações de torres de transmissão de energia;
- b) verificar visualmente, nas fundações em que se encontrar corrosão, se o fenômeno se restringe à zona aerada ou se ocorre também na parte subterrânea da estaca;
- c) analisar o pH do solo em contato com as estacas estudadas e verificar sua relação com o processo corrosivo;
- d) analisar o teor de umidade do solo em contato com as estacas estudadas e verificar sua relação com o processo corrosivo;
- e) analisar a resistividade elétrica do solo em contato com as estacas estudadas e verificar sua relação com o processo corrosivo;
- f) analisar o teor de cloretos do solo em contato com as estacas estudadas e verificar sua relação com o processo corrosivo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O consumo de energia é considerado um item importante para avaliação de desenvolvimento de uma nação. Tanto é que em países onde o consumo de energia *per capita* é inferior a uma tonelada equivalente de petróleo (TEP), as taxas de analfabetismo, mortalidade infantil e fertilidade são altas (GOLDEMBERG, 1998).

Sendo assim, o consumo de energia elétrica está também associado ao nível de desenvolvimento social de uma nação. Atrelado a isto está a exigência da qualidade e continuidade do fornecimento de energia elétrica, sendo extremamente necessário avaliar os fatores ligados ao envelhecimento das linhas de transmissão de energia, provocados principalmente pela corrosão dos materiais que a compõem (DÍAZ MORA et al, 2007).

2.1 Sistema elétrico brasileiro

A energia elétrica é uma das formas de energia mais utilizadas no mundo. Isto se dá por diversos aspectos, seja pelo valor relativamente barato, facilidade de obtenção e transmissão e flexibilidade de utilização. Pode ser transformada em energia térmica, luminosa, mecânica, além de ser indispensável para os diversos equipamentos existentes, sejam eles de baixa complexidade tecnológica, como um ferro de passar roupas a um *smartphone* capaz de transmitir e receber dados, tirar fotografias, escrever textos e realizar ligações telefônicas. Segundo Saadat (1999, p.1) a “energia elétrica é a forma mais popular de energia, porque ela pode ser transportada facilmente com alta eficiência e custo razoável.”

Obtida de diversas maneiras, a energia elétrica pode advir da transformação de energia potencial, como a energia hidráulica ou da transformação de energia cinética, como em usinas eólicas e oceânicas. Juntamente com a energia solar, estas energias são chamadas de energias renováveis (TOMALSQUIM, 2016). A energia elétrica pode ser obtida também por transformação de energia térmica, como em usinas termelétricas movidas a óleo diesel, óleo combustível, carvão mineral, gás natural ou biomassa

(MAMEDI FILHO, 2010). No entanto, independente da forma de transformação pela qual é obtida a energia elétrica, é muito provável que esta forma de energia continuará sendo a principal forma de energia utilizada pelo homem, dada sua facilidade na conversão, utilização e controle (KOSOW, 1982).

A utilização da energia elétrica pode ser feita no local de transformação ou transmitida para grandes centros de consumo. Apesar de estar em discussão atualmente, o consumo no local de transformação, tecnicamente conhecida como geração distribuída, é ainda muito pequeno no Brasil, uma vez que a potência instalada neste tipo de geração é de 247,30MW (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018a), frente aos 160.751,76 MW de potência de geração total instalada no Brasil (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018b). As grandes usinas normalmente ficam longe dos centros de consumo, um exemplo disto é a região Sudeste no ano de 2016, onde a geração foi de 31,2% do total nacional, sendo que o consumo foi de 49,9%, ao passo que o consumo na região Norte foi de 7,4% com uma geração de 12,5% do total nacional no ano de 2016 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2017). Para Camargo (2009, p.16) “a rede de transmissão geralmente ocupa e se desenvolve por grandes extensões territoriais, integrando-se aos sistemas de distribuição”.

Mas para que a energia elétrica seja transmitida é necessário um sistema de transmissão, que no caso do Brasil, interliga 25 estados brasileiros além do Distrito Federal, fazendo com que haja uma transferência de energia elétrica entre as diversas regiões do país. Como exemplo, podemos citar a exportação de energia no mês de maio/2018 da região norte para a região Sudeste/centro-oeste/sul de 3.349MW médios e da região Norte para a Região Nordeste de 2.378MW médios. O Sistema Interligado Nacional (SIN), responsável pela interligação citada acima, depende de mais de 143 mil quilômetros de linhas de transmissão com tensão maior ou igual a 230kV (BRASIL, 2018).

Com a “finalidade regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal.” (Brasil, 1996, p.1) foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), uma autarquia federal e que

foi instituída pela lei 9.427, de 26 de Dezembro de 1996. Esta mesma lei permite que a ANEEL realize a contratação de concessionárias de serviço público de energia elétrica por meio de licitação, na modalidade Leilão, onde é vencedor o proponente que apresentar menor Receita Anual Permitida (RAP) para um determinado lote de empreendimentos, sendo que é dado um prazo de concessão de 30 anos para a concessionária que arrematar o lote.

2.2 Linhas de Transmissão

Para que uma linha de transmissão se mantenha de pé é necessária uma estrutura que garanta as distâncias elétricas entre cabos e entre os cabos e o solo, papel exercido por torres de linhas de transmissão. Estas estruturas são dimensionadas para suportar diversas cargas, que segundo Velozo (2010) são cargas dos componentes da linha de transmissão, tais como cabos condutores, cabos para-raios, cadeias de isoladores e peso próprio da estrutura, além da carga proveniente da incidência dos ventos sobre a torre e os cabos. Estes esforços são transferidos à fundação e conseqüentemente ao solo.

Para Camargo (2009), a estrutura fica sujeita a cargas verticais, oriundas do peso próprio da estrutura, dos cabos e peso dos acessórios. Está sujeita também a esforços horizontais, podendo ser transversais, oriundos da ação do vento sobre os cabos no sentido perpendicular a este. Podem ser esforços horizontais longitudinais, que surgem do tracionamento dos cabos pela ação do vento, mas no sentido paralelo aos cabos.

As torres de linha de transmissão podem ser construídas de diversos materiais, podendo ser aço galvanizado, madeira ou concreto. Seu formato também varia conforme as condições de contorno, como limitação física de espaço, nível de tensão elétrica e solicitações mecânicas (CAMARGO, 2009).

Existe ainda a variação de tipo de torre quanto à forma de transferência de esforços para o solo, onde são classificadas como estruturas autoportantes e estaiadas.

Para Camargo (2009) no caso de torres autoportantes a estrutura “transmite todos os esforços diretamente para suas fundações, o que não

acontece com as torres estaiadas. Neste tipo de estrutura, parte das solicitações é absorvida pelos estais (tirantes) e a outra pelas fundações”. Uma imagem de uma torre autoportante pode ser visualizada na Figura 1:

Figura 1 – Torre autoportante 230kV



Fonte: Autor (2019)

A torre do tipo estaiada possui um ponto de apoio que sofre somente esforços de compressão, onde a torre é apoiada, comumente chamada de mastro central. Possui também quatro pontos onde são ancorados os estais, sendo que nesses pontos existem somente esforços de tração. Uma imagem de uma torre estaiada pode ser visualizada na Figura 2:

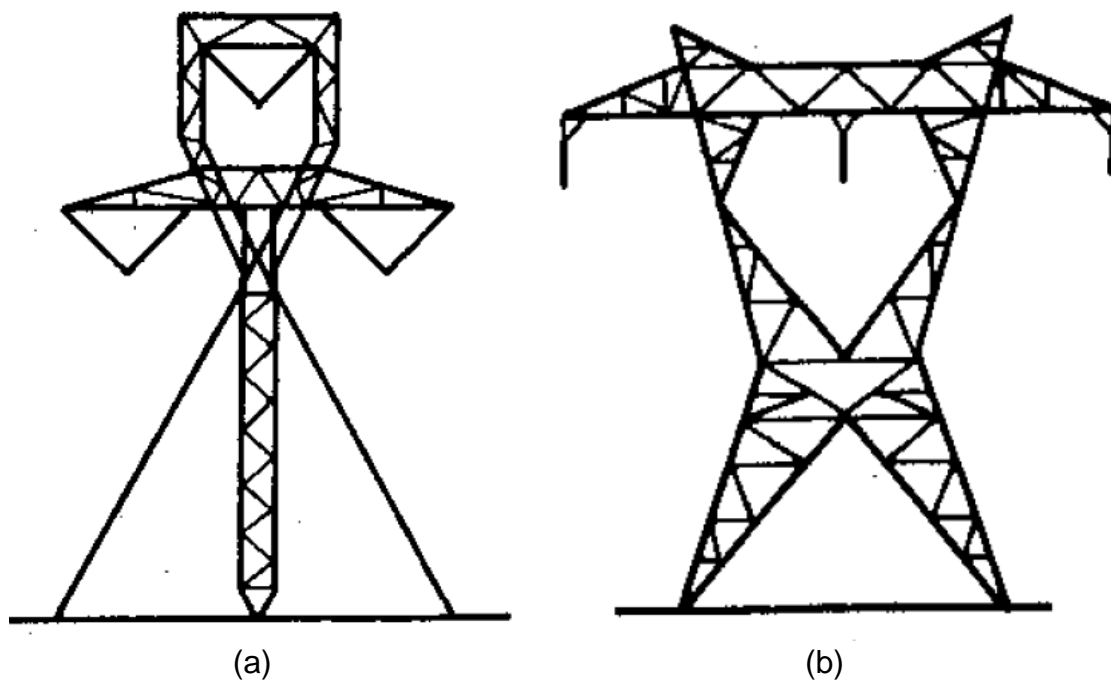
Figura 2 – Estrutura estaiada 230kV



Fonte: Autor (2018)

As silhuetas de uma torre estaiada e uma torre autoportante podem ser vistas nas Figura 3 (a) e (b), respectivamente:

Figura 3 – Silhueta de uma Torre estaiada (a) e autoportante (b)



Fonte: Fuchs e Almeida (1982)

A estrutura autoportante foi a tecnologia utilizada por muitos anos, mas foi perdendo espaço para as torres estaiadas, uma vez que estas possuem um peso muito menor, tornando-se economicamente mais atrativa. Por conta disto, os projetos foram cada vez mais direcionados para a aplicação deste tipo de torre, ao passo que a aplicação de torres autoportantes ficou restrita à utilização em linhas curtas ou estruturas de deflexão, conhecidas como torres de ancoragem. A título de comparação verifica-se que a linha de transmissão 230kV Assis – Londrina, de 155 km de extensão e construída no ano de 1979, possui todas as suas torres do tipo autoportante (ELETROSUL, 1978), ao passo que a linha de transmissão 230kV Camaquã-Quinta, de 167 km de extensão e construída em 2014 possui cerca de 10% de torres do tipo autoportante (ELETROSUL, 2013a).

Segundo Fuchs e Almeida (1982), as torres estaiadas eram muito pouco empregadas no Brasil até a década de 1970, sendo que a partir desta época foram introduzidas estruturas estaiadas para níveis de tensão de até 750kV.

Corroborando com a justificativa de utilização de torres estaiadas está o comparativo de peso, que para uma torre de altura de 45 metros em estrutura autoportante é de aproximadamente 8.000kg (ELETROSUL, 2013b), sendo que para uma torre estaiada com solicitações de esforços semelhantes o peso é de aproximadamente 4.000kg, ou seja, cerca de 50% do peso de uma torre autoportante (ELETROSUL, 2013c).

Outra vantagem da utilização de estruturas estaiadas é a possibilidade de aplicação de estruturas pré-moldadas tanto no mastro central como nas estruturas de ancoragem dos estais, sendo que para esta última existe a possibilidade de utilização de tirantes helicoidais cravados por torção, também conhecidos como estacas helicoidais (AZEVEDO; DINIZ, 2007).

A escolha de um tipo de fundação, segundo Fuchs e Almeida (1982), depende do tipo de solo ao qual será aplicada a estrutura, que deve ser investigado através de sondagens, e do tipo de torre que estará sendo usada. São diversos os tipos de fundação para torres de linhas de transmissão, que segundo o mesmo autor, podem ser do tipo sapata, tubulão, estaca, ancorada em rocha, para torres do tipo autoportante. Para Velozo (2010), nas torres do tipo estaiada, são utilizadas, nos mastros centrais,

fundações do tipo sapata, podendo ser pré-moldada ou moldada *in loco*, tubulão, estaca, ou bloco ancorado em rocha. Para os estais são utilizadas estacas helicoidais em aço, tubulão, vigas ou placas de concreto pré-moldadas ou moldadas *in loco*. Nas Figura 4 (a) e (b) podem ser observadas a instalação do mastro central e viga “L” em concreto. Nas Figura 5 (a) e (b) podem ser observadas a instalação de estaca helicoidal em aço patinável:

Figura 4 – Instalação de sapata pré-moldada (a) e viga “L” (b) para torre estaiada



(a)



(b)

Fonte: Autor (2013)

Figura 5(a) e (b) instalação de estaca helicoidal de aço patinável



(a)



(b)

Fonte: Autor (2013)

2.3 Utilização de estacas helicoidais

A primeira utilização de uma estaca helicoidal é datada de 1843, na construção de um farol, em Black Rock Harbor no estado de Connecticut, Estados Unidos. Outras estruturas semelhantes foram executadas com este tipo de fundação, como cerca de 18 piers marítimos na Inglaterra, entre os anos de 1862 e 1872, além de pontes em outros continentes, durante a expansão do império britânico (PERKO, 2009). A Figura 6 demonstra a utilização de estacas helicoidais de aço na construção do farol de Maplin Sands:

Figura 6 – Farol de Maplin Sands

Fonte: Perko (2009)

Para MENDONÇA e BARROS (2018):

“a estaca helicoidal consiste numa estaca metálica de pequeno diâmetro com pratos helicoidais associados que ajudam a transmitir os esforços ao terreno. Estas estacas são usadas em solos onde as camadas superiores são fracas e solos mais resistentes aparecem a maior profundidade”

Para Silva (2018), existe uma série de benefícios que as estacas helicoidais apresentem em relação a outros tipos de fundações profundas, sendo elas a possibilidade de aplicação temporária, facilidade de transporte para locais remotos, instalação com equipamentos compactos, facilidade de constatação de capacidade de carga a partir do torque de instalação, aplicação em locais abaixo do nível de água, rapidez na instalação sem a produção de ruídos ou perturbações, eliminação de formas de concreto e procedimentos de cura, além de não produzir resíduos de perfuração.

Ainda elencadas como vantagens por Lutenegger (2011) são a possibilidade de aplicação de carga logo após a instalação da fundação e a flexibilidade quanto aos tamanhos existentes de estaca para se adequar às condições do solo.

No entanto, alguns cuidados devem ser tomados, pois, segundo Carvalho (2007), as estruturas metálicas helicoidais devem ser protegidas

contra corrosão, podendo ser, por exemplo, galvanizadas ou em aço patinável.

Entre os anos de 2001 e 2002 parte das 7780 fundações estaiadas que foram executadas eram estacas metálicas helicoidais, que serviram de suporte para as torres de 932km de linhas de transmissão construídas nos estados do Pará e Maranhão, resultando num investimento total de R\$ 1,2 bilhões. (AZEVEDO; DINIZ, 2007).

Como outro exemplo de aplicação, pode-se citar que na LT 230kV Camaquã-Quinta utilizou-se dois tipos de estrutura para ancoragem dos estais das torres estaiadas, sendo elas a viga de concreto pré-moldada tipo viga “L” e o tirante helicoidal em aço patinável. Durante a execução das fundações observou-se o aparato necessário para instalação dos dois tipos de fundação citados, listados na Tabela 1:

Tabela 1 – Comparativo do aparato necessário para instalação de fundações

Insumo	Quantidade	
	Viga “L”	Tirante helicoidal
Retroescavadeira	1	1
Caminhão	1	1
Escavadeira esteira	1	
Funcionários	8	5
Tempo de execução	4 a 5 horas	1 a 2 horas

Fonte: Autor (2019)

A descrição das atividades de cada tipo de fundação, apresentada na Tabela 2, também dá a dimensão da diferença entre o tempo de instalação das duas estruturas, conforme acompanhou-se em campo.

Tabela 2 – Descrição das atividades por tipo de fundação

Viga tipo “L”	Tirante helicoidal
<ul style="list-style-type: none"> ● Locação da posição de escavação ● Escavação com escavadeira de esteira ● Deslocamento da Viga “L” até o local da escavação ● instalação de barra incotep® na viga “L” ● Instalação da viga “L” ● instalação de tubo de PVC após a instalação da barra incotep® ● Compactação de camada de solo de 20cm de altura e retirada de amostra de solo compactado, até a completa cobertura da cava. ● O tubo de PVC deve ser preenchido com uma nata de cimento, protegendo a barra na área de transição solo-ar 	<ul style="list-style-type: none"> ● Posicionamento da retroescavadeira no local da instalação do tirante; ● rotação da seção guia no solo; ● instalação de extensões lisas até que seja atingido o torque e profundidade de projeto.
Observações	Observações
<p>Deve ser tomado cuidado quanto a profundidade de instalação da viga e o correto posicionamento da barra incotep® no local de afloramento da mesma, para que seja mantido o correto local de pega do estai, bem como o ângulo de projeto do mesmo.</p> <p>Cabe lembrar que esta viga “L” é de concreto pré-moldado, feito em obra. Portanto, é necessário que haja um espaço no canteiro de obras suficiente para armazenar as peças durante o tempo de cura, local para concretagem, formas, armação de ferragens, controle de concreto entre outras necessidades deste tipo de construção.</p>	<p>Deve ser tomado o cuidado com o ângulo de inclinação do tirante durante a instalação, para que seja mantido o correto local de pega do estai, bem como o ângulo de projeto do mesmo.</p>

Fonte: Autor (2019)

Segundo Perko (2009), uma simples estaca helicoidal pode suportar cerca de 25 toneladas de tração, equivalente a uma fundação de concreto armado de 5,5m de altura e uma seção quadrada com 1,5 m de lado.

Esta redução da utilização de concreto pode representar uma elevada economia, principalmente em locais remotos.

A utilização de estacas helicoidais pode também contribuir para a preservação do meio ambiente, uma vez que reduz a utilização de concreto e outros materiais em fundações subterrâneas (PERKO, 2009).

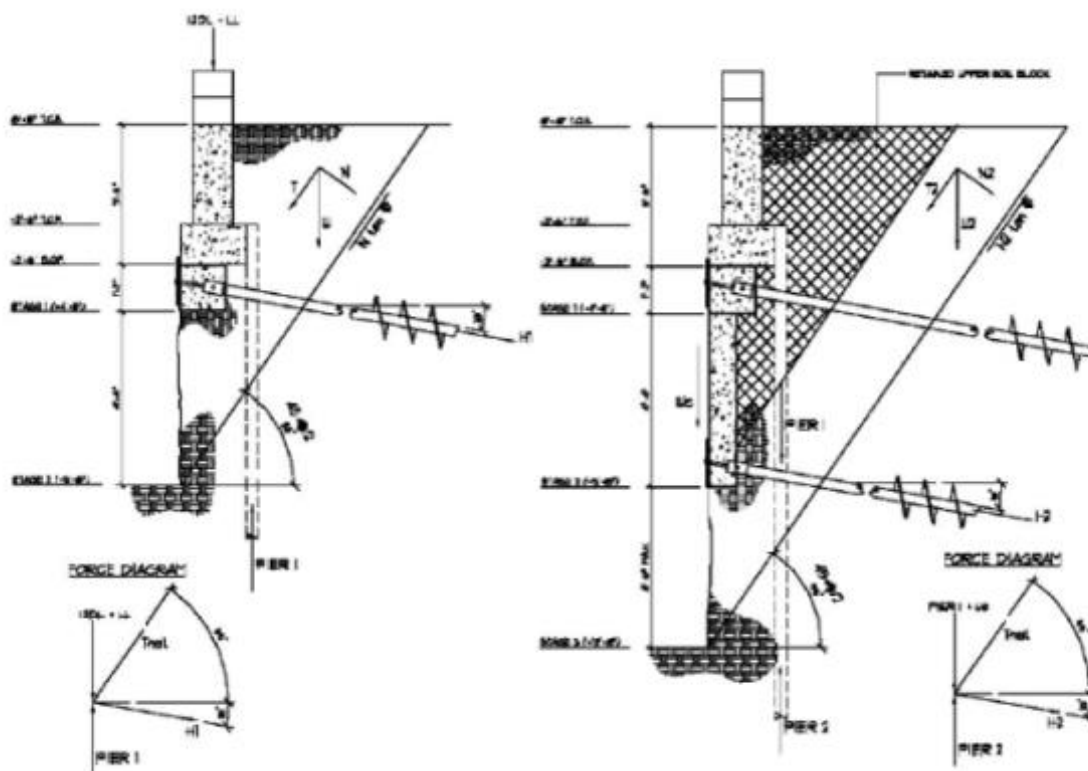
A utilização de estacas helicoidais não fica limitada somente a linhas de transmissão, sendo possível ver a aplicação destas fundações em construção de galpões, ampliações em locais com pouco espaço para realização de outro tipo de fundação ou até em muros de contenção. Exemplos de outras situações de aplicação de estacas helicoidais em fundações podem ser observados nas Figura 7, 8 e 9:

Figura 7 – Instalação de estaca helicoidal para fundação subterrânea



Fonte: Perko (2009)

Figura 8 - Estabilização de escavação com uso de estaca helicoidal (a) e (b)



(a)



(b)

Figura 9 – Muro de contenção após estabilização por uso de estaca helicoidal



Fonte: Perko (2009)

2.4 Procedimento técnico para instalação dos Tirantes helicoidal

Apesar de possuir menos etapas de execução quando comparada à instalação de vigas “L”, a instalação dos tirantes helicoidais possui alguns procedimentos que devem ser adotados e são realizados por empresa especializada.

Segundo Santos Filho (2014), a instalação das estacas é feita com a aplicação de um torque no topo do tirante, através de equipamentos dotados de sistemas hidráulicos como escavadeiras, onde é acoplado um motor hidráulico, sendo o torque de instalação acompanhado através de um torquímetro acoplado à composição de cravação. A rotação dos tirantes é controlada por torquímetros digitais devidamente aferidos, onde é verificado o torque de cravação exigido.

Silva (2018) afirma que as estacas helicoidais são instaladas pela aplicação de rotação, provocando um aparafusamento, que pode ser aplicado por um caminhão padronizado ou reboque equipados com sistema de instalação, com força paralela a haste central e sentido descendente, visando

substituir a ausência de sobrecarga, melhorar contato entre as placas helicoidais e o solo, além de garantir o ângulo de inclinação das ancoragens.

As emendas entre as extensões lisas é efetuada por sistema bolsa-ponta, utilizando parafusos fixados por porcas e arruelas. Na Figura 10 (a) e (b) é possível visualizar as seções guia e as extensões lisas, respectivamente.

Figura 10 – Seções guia (a) e extensões lisas (b)



(a)

Fonte: Autor (2013)



(b)

Para Carvalho (2007) as estacas helicoidais podem ser utilizadas para suportar tanto esforços de tração quanto de compressão. No entanto, solos que apresentam matacões ou pedregulho dificultam ou até inviabilizam a instalação das mesmas. Solos muito moles, com $NSPT^1$ menor que 5, podem fazer com que a estaca sofra flambagem em caso de aplicação de carga de compressão. O projetista também irá definir quais as características do solo que permitem a instalação de estacas helicoidais, como por exemplo ângulo de atrito, coesão e peso específico do solo.

Visando garantir a integridade dos funcionários nas atividades futuras, além de evitar perdas financeiras, são realizados ensaios de

¹ Índice de resistência à penetração do solo. Consiste no número de golpes na cravação dos últimos 30 cm do amostrador de sondagem à percussão.

convalidação dos tirantes instalados. Estes ensaios consistem na aplicação de carga de tração, conforme especificação de projeto.

Para a execução deste ensaio, apresentado na Figura 11, é necessário utilizar um dispositivo para aplicação de carga, constituído por um cilindro hidráulico alimentado por uma bomba manual, instalado em um tripé metálico. É necessário, também, um manômetro instalado no sistema de alimentação do cilindro hidráulico e uma célula de carga inserida em série, no topo do cilindro hidráulico.

Os deslocamentos provocados nestes ensaios são medidos no sentido axial do tirante, tendo especificado um valor admissível de deslocamento.

Figura 11 - Ensaio de convalidação



Fonte: Autor (2013)

2.5 Aço patinável

Segundo Coburn e Kim (1987) no início do século XX, D.M. Buck iniciou estudos sobre a eficácia da inserção de cobre para reduzir os efeitos da corrosão em ligas de aço carbono desprovidas de pintura. Na mesma época, a American Society for Testing And Materials (ASTM) iniciou um grande estudo para avaliar o desempenho atmosférico de uma variedade de materiais ferrosos.

No ano de 1929, a United Steel Corporation iniciou pesquisas para melhorar o desempenho das ligas de aço-cobre, com a adição de outros

elementos, encontrando em 1933 um material com baixa liga de alta resistência. Inicialmente utilizada na indústria ferroviária para vagões de carvão sem a necessidade de pintura. Foi identificado que a lixiviação do enxofre pertencente ao carvão não provocava corrosão nos vagões. (COBURN; KIM, 1987).

O aço patinável é assim chamado por formar uma película protetora ao seu redor, chamada pátina, que fornece uma proteção, capaz de reduzir a velocidade de corrosão (PANNONI, 2004). Para Travassos et al (2018), esta camada de pátina formada na superfície da peça possui uma espessura aproximada de 50 μ m.

Segundo Kenny et al (1995), os componentes do material formado sobre uma peça de aço carbono comum e sobre uma peça de aço patinável são os mesmos, o que diferencia o aço patinável é que a camada é mais densa, aderente e compacta, tornando-a altamente protetiva, pois impede que o oxigênio continue reagindo com a peça.

O aço patinável também é conhecido por aço de baixa liga, isto porque são aços de baixo teor de carbono, cerca de 0,2%, com adições de cobre, cromo, níquel, fósforo, silício e manganês, não ultrapassando o total de 3,5% (MURATA, 2000).

Segundo Leite (2007), o efeito benéfico do cobre nesta liga é devido à formação de uma cobertura superficial que age como proteção e promove uma passivação anódica. Outra explicação dada é que o cobre forma sulfatos básicos com baixa solubilidade e que precipitam nos poros da camada de óxido, provocando a diminuição da porosidade.

Para Kenny et al (1995), a predominância dos seguintes compostos sobre amostras de aços carbono e patináveis, em ordem decrescente de intensidade, conforme a atmosfera em que estão inseridos, são apresentados na Tabela 3:

Tabela 3 – Compostos formados sobre aço carbono e patinável

Atmosfera marinha	Lepidocrocita (γ -FeOOH), magnetita (Fe_3O_4), goetita (α -FeOOH), akaganeita (β -FeOOH)
Atmosfera industrial	Lepidocrocita (γ -FeOOH), magnetita (Fe_3O_4), goetita (α -FeOOH)
Atmosfera urbana	Lepidocrocita (γ -FeOOH), goetita (α -FeOOH)
Atmosfera rural	Lepidocrocita (γ -FeOOH), goetita (α -FeOOH)

Fonte: Kenny et al, 1995 (adaptado)

O aço patinável é utilizado nos casos que a estrutura necessita de longevidade e baixa manutenção. A proteção é feita pela formação de uma camada aderente de produtos de corrosão (LEITE,2007).

Apesar do desenvolvimento inicial desta liga ser para aplicações em vagões de trem, o uso de aço patinável não ficou somente no campo das ferrovias, extrapolando para obras de pontes, edifícios e esculturas. Exemplos disso são a ponte HØSE, que pode ser observada na Fotografia da Figura 12(a), e o Projeto Casa Corten, Figura 12 (b) onde o aspecto e a coloração de ferrugem chamam a atenção e atraem projetos de diversos arquitetos no mundo.

Figura 12 Ponte HØse (a) e Casa Corten (b)



(a)

Fonte: Dag Jensen

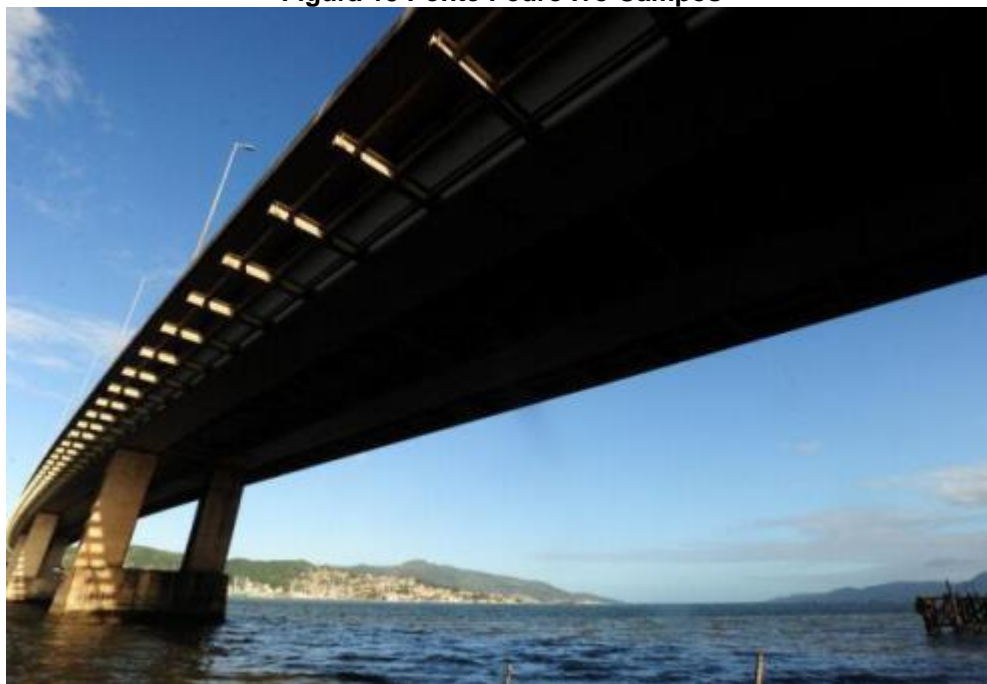


(b)

Fonte: Nelson Kon

Outro exemplo desta aplicação, segundo GUTIÉRREZ-KLINSKY (1999), foi a utilização de aço patinável na construção da ponte Pedro Ivo Campos (Figura 13), a terceira ponte que interliga a ilha de Santa Catarina ao continente, em Florianópolis. Nesta ponte foram utilizados perfis metálicos de aço patinável nos vãos de comprimento superiores a 75 metros.

Figura 13 Ponte Pedro Ivo Campos



fonte: Alan Pedro (2011). Disponível em <
<http://dc.clicrbs.com.br/sc/noticia/2011/03/ponte-pedro-ivo-campos-em-florianopolis-completa-20-anos-nesta-terca-feira-3230995.html>>

Segundo Mathay (1993):

“O aço patinável, não pintado, foi utilizado, pela primeira vez em uma grande edificação, em 1963. Era, então, o edifício-sede da John Deere and Co., em Moline, Illinois. Esta primeira obra estimulou o uso dos aços patináveis em outros edifícios, como o Chicago Civic Center, torres de transmissão de energia e pontes ferroviárias. O uso de aços patináveis se expandiu nos Estados Unidos da América; em 1993 havia cerca de 2.300 pontes sem pintura.”

O aço patinável foi utilizado em mais de 2000 pontes nos Estados Unidos, valendo-se da vantagem do material criar sua própria proteção e não requerer pintura, o que reduziria os custos de manutenção, principalmente em pontes sobre rodovias, ferrovias e corpos d’água (NCHRP REPORT 272, 1984).

Para que uma liga de aço seja chamada de patinável ou aço de baixa liga é necessário que sejam cumpridos alguns limites de composição química e propriedades mecânicas. Estas especificações podem ser encontradas nas normas norte-americanas ASTM A-242, ASTM A-588, ASTM A-606 e ASTM A-709 (PANNONI, 2004). No Brasil, os aços de baixa liga são regidos pelas Normas Brasileiras ABNT NBR 5008/2015, ABNT NBR 5920/2015, ABNT NBR 5921/2015 e ABNT NBR 7007/2016.

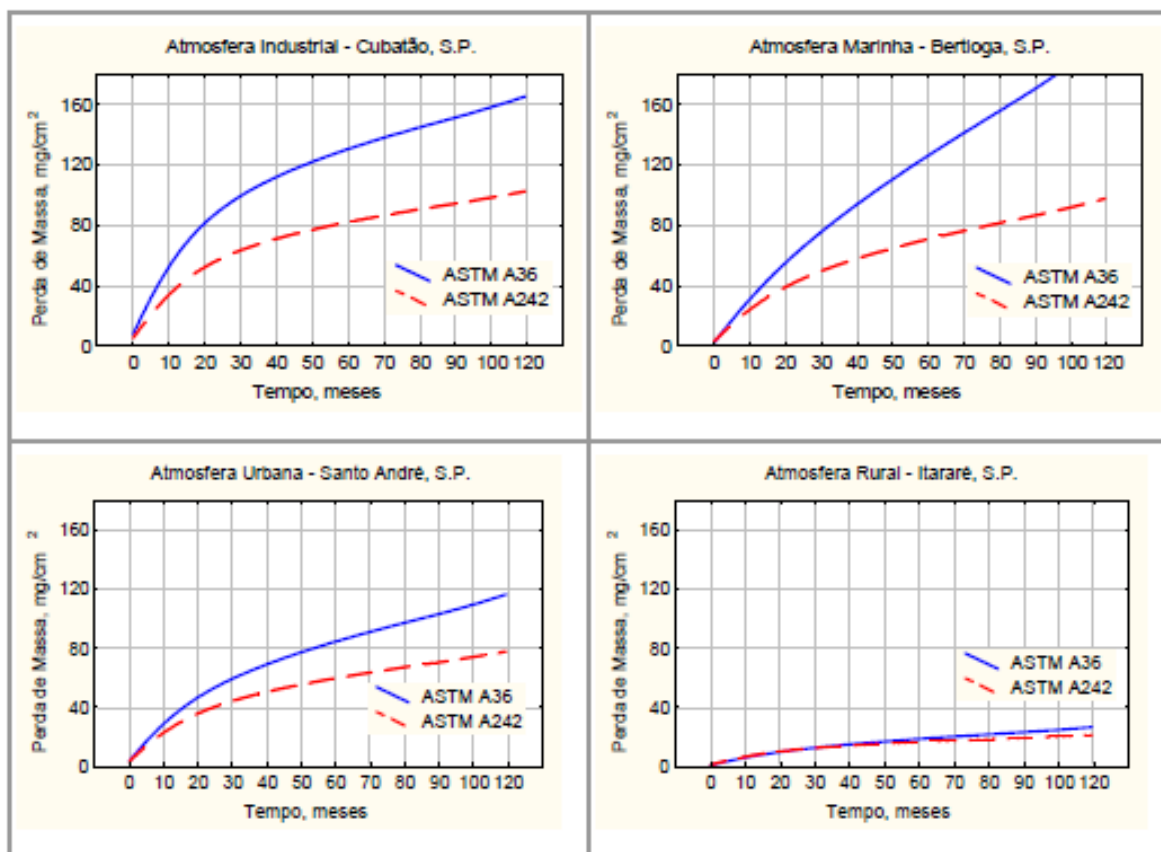
A literatura afirma que são necessários três fatores para que haja a formação de pátina. Primeiramente podemos citar a composição química do aço, sendo que os principais elementos de liga que contribuem para aumentar-lhe a resistência frente à corrosão atmosférica, são o cobre e o fósforo. O segundo item refere-se a fatores ambientais, principalmente a presença de dióxido de enxofre e de cloreto de sódio na atmosfera, a temperatura, o vento, os ciclos de umedecimento e secagem, entre outros. Por último, a geometria da peça também interfere na intensidade da corrosão, o que explica por que diferentes estruturas de aço construídas com o mesmo material são atacadas de maneira distinta, mesmo estando lado a lado (PANNONI, 2004).

Para Comineli (2009), a combinação de resistência à corrosão, resistência mecânica e tenacidade dos aços patináveis tem despertado interesse de pesquisadores no mundo inteiro, pela dispensa da necessidade de pintura das estruturas.

O aço patinável é um material utilizado largamente na confecção de peças que necessitam de proteção contra corrosão e que ficam expostas à atmosfera. Várias empresas no Brasil e no mundo desenvolvem perfis, tubos e chapas de diversas bitolas, com ligas variadas. (FERRAZ, 2003).

Muitos estudos vêm sendo desenvolvidos sobre a aplicação de aço patinável, principalmente no que se refere a resistência à corrosão, uma vez que esta é a sua principal característica. Na Figura 14, apresenta-se uma comparação da perda de massa por corrosão de um aço patinável e de uma liga de aço-carbono comum (PANNONI, 1993).

Figura 14 - Resistência à corrosão de um aço patinável (ASTM A242) e de um aço carbono comum (ASTM A36) expostos às atmosferas industrial (Cubatão, S.P.), marinha (Bertioga, S.P.), urbana (Santo André, S.P.) e rural (Itararé, S.P.)



Fonte: Pannoni et al. (1993).

A agressividade de corrosão varia muito, e depende do ambiente em que a peça está inserida. Em ambientes com níveis moderados de SO_2 a formação da pátina protetora ocorre no período de 3 a 4 anos de exposição. Onde os níveis de SO_2 são mais elevados, acima de $100\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{dia}$ a camada de óxido que se forma sobre a peça não apresenta função protetora (KENNY et al, 1995). Entre os ambientes mais agressivos encontra-se o ambiente marinho, devido a presença dos sais finos que se depositam nas superfícies, transportados pelo vento (FARIA, 2007).

Outros ambientes também podem provocar corrosão, o menos impactante deles é o ambiente rural, que não possui componentes industriais, mas existe a presença de matéria orgânica e inorgânica (KENNY et al 1995).

Um pouco mais agressivo que o ambiente rural está a atmosfera urbana, que antigamente era muito semelhante à primeira, mas com a grande

quantidade de veículos nas cidades surgiram, além dos óxidos de enxofre e de nitrogênio, derivados de hidrocarbonetos mais pesados (LEITE, 2007).

Corroborando com estes estudos, Leite (2007) afirma que a “atmosfera industrial pode conter dióxido de enxofre, cloretos, fosfatos, nitratos ou outras emissões industriais específicas. Essas emissões combinam-se com a precipitação da umidade para formar o eletrólito”.

Complementando esta abordagem, na Tabela 4 apresenta-se a taxa de corrosão anual dos aços de baixa liga para diferentes tipos de atmosfera, conforme registro de Griffin (1987):

Tabela 4 – Tipos de atmosferas e respectivas taxas de corrosão para aços de baixo carbono

Atmosfera	Local	Taxa de corrosão (mm/ano)
Marinha	Point Reyes, CA, EUA	0,5
Severa	25m distante Kure Beach, NC, EUA	0,53
Industrial	Brazos River, TX, EUA	0,093
Suave	250m distante, Kure Beach, NC, EUA	0,146
Rural	Esquimalt, BC, Canadá	0,013
Industrial	East Chicago, EUA	0,084
Marinha	Bayonne, NJ, EUA	0,077
Urbana	Pittsburgh, PA, EUA	0,03
Semi-industrial	Middletown, OH, EUA	0,029
Rural	State College, PA, EUA	0,023
Marinha	Equimalt, BC, Canadá	0,013
Deserto	Phoenix, AZ, EUA	0,0046

Fonte: adaptado de Griffin (1987)

Uma vez que a corrosão atmosférica é resultado da presença de um eletrólito, é necessário que haja umidade em associação com outros componentes atmosféricos para a formação deste eletrólito. Essa umidade é proveniente de chuvas ou umidade relativa do ambiente.

É sabido que o aço patinável apresenta uma boa resistência à corrosão quando submetido à exposição atmosférica, no entanto, sua aplicação em locais confinados e com baixo teor de ar atmosférico não é aconselhável tanto por Panonni (2004) quanto por Coburn; Kim, (1987). Como a formação do filme protetor depende de um ciclo alternado de umedecimento e secagem, a imersão deste material em água doce ou salgada apresenta a

mesma taxa de corrosão quando comparada ao aço carbono (COBURN; KIM, 1987).

Para Pohlman (1987) os aços patináveis não se comportam de maneira satisfatória quando enterrados ou semienterrados no solo. Isto se deve ao fato da necessidade de exposição do aço ao ar atmosférico para formação da camada protetora.

2.6 Corrosão

A literatura é bem clara quanto ao conceito e definição de corrosão, ao tratá-la como uma deterioração causada pela interação físico-química entre o material e o meio em que está inserido (GENTIL, 2011).

Praticamente todos os metais são encontrados na natureza sob a forma de compostos não metálicos, fazendo com que haja um consumo elevado de energia para a separação dos metais. Desta maneira, o metal é naturalmente instável, sendo espontaneamente levados a reagir com o meio ambiente e retornar a sua forma inicial. Para o aço, o processo de oxidação quando exposto à atmosfera nada mais é que o inverso do processo de extração dos metais de seus minérios. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, 1971). Com exceção dos metais nobres, encontrados na natureza em sua forma metálica, a condição mais estável dos metais é na forma composta, onde apresenta o mais baixo nível de energia interna (DUTRA; NUNES, 1987).

Para Serra (2006, p.20), corrosão é “a deterioração das propriedades de um metal pela reação química ou eletroquímica com o meio que o envolve”.

2.6.1 Mecanismo de corrosão

A corrosão química é muito menos abrangente que a corrosão eletroquímica, ficando restrita à oxidação em altas temperaturas. No entanto, não há óbice quanto à oxidação em temperatura ambiente, que é o caso da oxidação dos metais com a formação de uma película, podendo ser ela aderente ou não. Em certos casos, quando há uma forte adesão desta película, a mesma pode se tornar uma proteção contra a corrosão do metal,

bloqueando por completo as reações subsequentes do meio em que está inserido (DUTRA; NUNES, 1987).

O mesmo autor indica que a corrosão eletroquímica é caracterizada pela presença de um eletrólito, com a formação de duas reações parciais, chamadas de reação anódica e catódica. A primeira é uma reação de oxidação, onde os elétrons são liberados e migram para o ponto onde ocorre a segunda reação, uma reação de redução.

Gentil (2011, p.74) afirma que “a corrosão eletroquímica pode se verificar sempre que existir heterogeneidade no sistema material metálico-meio corrosivo, pois a diferença de potencial resultante habilita a formação de áreas anódicas e catódicas”. A heterogeneidade mais encontrada em fundações metálicas é a aeração diferencial. A pilha galvânica encontrada na aeração diferencial é caracterizada pelas equações 1 e 2:



A equação 1 ocorre na área anódica ou menos aerada e a equação 2 na área catódica ou mais aerada.

Verifica-se a formação do produto de corrosão $\text{Fe}(\text{OH})_3$ em uma camada intermediária.

É necessário lembrar que, em linhas de transmissão, pode existir um fator externo, que são as correntes de fuga ocasionadas pela indução magnética, pela fuga de corrente que atravessa os isoladores ou ainda por descargas atmosféricas. Para Gentil (2011), estas correntes entram nas estruturas metálicas, por serem um meio de condução, provocando corrosão no local de saída para a Terra, que por conta disto, acaba provocando corrosão em pontos específicos e de forma concentrada. Este tipo de corrosão é conhecido como corrosão eletrolítica, uma vez que existe a injeção de corrente externa na reação química.

Para Serra (2006), as correntes de fuga são originadas em sistemas de tração elétrica ou por sistemas de transmissão de energia elétrica, entre outros. A indução de corrente alternada em estruturas enterradas é provocada por indução magnética em linhas de alta tensão.

2.6.2 Tipos de corrosão eletroquímica

A corrosão eletroquímica pode sofrer denominações diferentes, que correspondem às condições que a mesma ocorre, meio em que se encontra, tipo dos metais ou aspecto de corrosão (DUTRA; NUNES, 1987).

2.6.2.1 Corrosão galvânica

O processo corrosivo resultante do contato elétrico de materiais diferentes, com a presença de um eletrólito, é chamado de corrosão galvânica. Importante ressaltar que tanto maior será a corrosão quanto maior for a diferença de potencial eletroquímico entre os dois materiais da reação química (DUTRA; NUNES, 1987).

2.6.2.2 Corrosão atmosférica

As corrosões ocorridas em estruturas aéreas recebem o nome de corrosão atmosférica. Sua intensidade depende da umidade relativa do ar, teor de sais em suspensão e do teor de gases poluentes. A lavagem provocada pelas chuvas pode reduzir o grau de corrosão, uma vez que retira os poluentes que estão depositados sobre as estruturas, fazendo com que o regime de chuvas interfira no nível de corrosão em locais com elevado grau de poluição. O nível de partículas em suspensão também influencia, uma vez que sua deposição sobre as peças pode provocar aeração diferencial e retenção de umidade. O regime de ventos é outro fator, uma vez que o mesmo pode dispersar os poluentes ou provocar a deposição, além do risco de erosão provocada pelo deslocamento de ar com partículas em suspensão (DUTRA; NUNES, 1987).

2.6.2.3 Corrosão dos metais no solo

A corrosão provocada pelo solo é observada em estruturas enterradas, podendo ser tubulações, estacas, cabos de transmissão de energia, tanques, entre outros. A intensidade da corrosão é dependente de vários fatores, sendo eles o teor de umidade do solo, a composição química e o pH do solo. É comum utilizar a resistividade elétrica do solo como índice de sua agressividade. Para Dutra e Nunes (1987). “um solo com baixa resistividade é mais agressivo, possui umidade permanente e sais minerais

dissolvidos, enquanto que um solo de resistividade elevada é menos agressivo e possui menos umidade e sais minerais dissolvidos.”

O mesmo autor indica que outros fatores podem influenciar na agressividade do solo, como permeabilidade e a presença de bactérias ou poluentes.

2.6.2.4 Corrosão microbiológica

Alguns tipos de bactérias podem desencadear ou acelerar o processo corrosivo. Tida como ocorrente em tubulações enterradas, principalmente em locais de alta umidade. A modificação do meio pelas bactérias torna-o agressivo ou intensifica esta característica (DUTRA; NUNES, 1987).

2.6.3 Forma de corrosão

A forma que a corrosão pode se manifestar é definida principalmente pela sua aparência, também conhecida como morfologia. Pode ser uniforme, quando ocorrem em taxa similar por uma grande extensão da superfície. Neste caso, a penetração da corrosão se dá de maneira semelhante em toda a parte da superfície atacada. Esta forma é muito comum em metais que não formam películas protetoras em seu processo de corrosão (DUTRA; NUNES, 1987).

A corrosão por placas ocorre quando os produtos da corrosão se formam em placas que se desprendem progressivamente, muito comum em metais que foram película protetora que ao se tornarem espessas acabam por se desprender (DUTRA, 1987).

Pode ser também de forma localizada, quando ocorre somente em pequenas áreas, tanto em extensão quanto em profundidade, também conhecidas como corrosão alveolar. Comum em metais que formam película semiprotetora ou por corrosão com aeração diferencial (DUTRA; NUNES, 1987).

A corrosão por pites ou *pitting* ocorre de forma muito localizada e de alta intensidade. Frequente em metais formadores de película protetora, muito comum em metais em contato com o solo e em meios com presença de cloretos, este tipo de corrosão pode provocar o adiantamento da falha do

serviço, uma vez que provoca pontos de início de trinca ou ainda podem penetrar completamente o metal, promovendo fuga de gases quando sua utilização for em tubulações (RAMANATHAN, 1989).

2.7 Características dos solos e sua influência na corrosão

A corrosão pelo solo é extremamente complexa e essencialmente eletroquímica, sendo que a agressividade do solo depende dos componentes de sua constituição. Os fatores que mais importam são acidez, teor de umidade, grau de aeração, permeabilidade à água e condutibilidade (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS, 1971).

Para Serra (2006), a agressividade do solo pode ser classificada como relativa ou específica. A agressão relativa está associada à formação de pilhas longas, de concentração, galvânicas ou às correntes de fuga. Já a agressividade específica está relacionada com as propriedades físico-químicas e biológicas do solo.

No entanto, as propriedades do solo não podem ser analisadas de maneira isolada. As características e propriedades dos solos atuam de forma conjunta, podendo até, em alguns casos, alguma dessas características o classificarem como agressivo e outras como não agressivo. (SERRA, 2006).

2.7.1 Grau de acidez

Uma das propriedades físico-químicas do solo é o grau de acidez. O pH do solo é o logaritmo inverso da concentração de hidrogênio, sendo que o valor de pH igual a 7 define a neutralidade, abaixo de 7 o pH é ácido e acima deste valor o pH é considerado alcalino.

A acidez do solo é resultado de um processo natural, influenciado pelas condições locais de precipitação pluvial, que definem a concentração de sais. Um elevado nível de precipitação provoca a remoção parcial dos íons básicos, provocando um aumento da acidez do solo (SERRA, 2006).

Para a Associação Brasileira de Metais (1971), a agressividade do solo aumenta com o aumento da acidez do solo, pois para valores de pH menores que 6,5 os solos passam a ser cada vez mais agressivos. Por outro

lado, em solos básicos, como os solos calcários, ocorre pouco ataque às estruturas.

O pH do solo exerce influência direta na corrosão do aço carbono. Segundo Gentil (2011), valores ácidos de pH, menores que 7 e acidez total elevada podem acelerar o processo corrosivo em tubulações de aço carbono.

O mesmo autor afirma que a solubilização de gases como o SO_2 e SO_3 pode ser provocada por água da chuva, provocando um intemperismo químico com a formação de chuva ácida, que ao penetrar no solo, provoca a diminuição do pH do solo.

Outro fator que pode intervir na acidez do solo, segundo o mesmo autor, é a utilização de fertilizantes, formados basicamente de fósforo, nitrogênio e potássio. Estes compostos são solúveis, e reduzem a resistividade do solo. Os corretivos de solo, como calcário também podem provocar este efeito.

2.7.2 Resistividade do solo

A resistividade do solo, ou condutividade, pode interferir na corrosão de fundações metálicas, sendo que depende de diversos fatores. Terrenos arenosos, por exemplo, tem elevada resistividade, enquanto os argilosos normalmente possuem característica oposta. As faixas de resistividade do solo e o grau de agressividade no que diz respeito à corrosão são apresentados na Tabela 5 (GENTIL; 2011).

Tabela 5 - Relação entre a resistividade do solo e seu grau de agressividade

Resistividade (Ω .cm)	Grau de agressividade
menos de 1.000	extremamente agressivo
entre 1.000 e 2.000	fortemente agressivo
entre 2.000 e 3.500	moderadamente agressivo
entre 3.500 e 5.000	pouco agressivo
entre 5.000 e 10.000	ligeiramente agressivo
Acima de 10.000	não agressivo

Fonte: Gentil (2011)

Para Serra (2006), a resistividade do solo indica a capacidade de condução de corrente elétrica. Quanto menor a resistividade do solo maior sua capacidade de condução e maior seu grau de agressividade.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7117 (2012a) indica que é possível fazer uma estratificação da resistividade do solo, desde que utilizado o método correto para isto.

Segundo Mamedi Filho (2010), a medição de resistividade do solo é de primordial importância em projetos elétricos, uma vez que é necessário conhecer as características do solo para que possa ser feito um projeto de sistema de aterramento. A mesma metodologia empregada em projetos de sistemas de aterramento deverá ser utilizada neste trabalho, uma vez que a grandeza a ser medida é a mesma.

2.7.3 Propriedades físicas do solo

As propriedades físicas do solo que podem interferir no processo de corrosão metálica são aquelas capazes de determinar a sua permeabilidade. (SERRA, 2006).

A granulometria do solo é o fator mais importante na definição do grau de aeração e no teor de umidade do solo. Solos arenosos permitem uma boa aeração e baixa retenção de água. Já os solos argilosos são pouco aerados e possuem alta retenção de umidade (SERRA, 2006).

Segundo Gentil (2011), a presença de solos com aeração diferenciada pode provocar a formação de pilhas galvânicas decorrentes de áreas com concentrações diferenciadas de oxigênio. Isto ocorre também em instalações parcialmente enterradas.

Para Serra (2006), a aeração pode afetar o processo de corrosão pelo solo, não somente pela ação do oxigênio, mas indiretamente, pois interfere na atuação dos micro-organismos, que provocam a corrosão microbológica.

2.7.4 Teor de cloretos

No estudo de corrosão em aços é importante que seja feita uma avaliação dos níveis de cloreto presentes no ambiente que o mesmo está inserido, seja ele o solo ou a atmosfera. Segundo Faria (2007), a quantidade

de íons de cloro depositadas sobre o material interfere no nível de corrosão do aço patinável, no entanto, ainda não existe uma correlação entre os níveis de cloreto que contribuem para formação da pátina e o nível crítico que a destrói. Mesmo assim, identificou-se que para taxas de 0,5mg/m².dia de íons de cloreto depositados sobre a peça metálica, a presença destes íons favorece a formação da pátina. Já para índices acima de 10mg/m².dia a concentração de sais de cloro provocam a destruição da camada protetora já formada.

No entanto, a presença de cloreto no solo também influencia o nível de corrosão. Para Serra (2006 apud Romanoff, 1957), a presença de valores acima 0,89mg de cloreto por 100mg de solo, associado a outras propriedades, já caracterizam o solo como meio mais corrosivo, conforme pode ser visto na Tabela 6:

Tabela 6 – Comparação entre propriedades físico-químicas e a corrosividade

N°	Solo	Composição do extrato aquoso, mg.eq/100g de solo (1)							Acidez		Resist. elétrica a 15,6 °C (Ω.cm)	Prof. Max. pile em aço após 12 anos
		Na+K como Na	Ca	Mg	CO ₃	HCO ₃	Cl	SO ₄	pH	Acidez total mg.eq/100 g		
MENOS CORROSIVO												
47	Unidentified silt loam	0,67	0,72	0,39	0,00	0,88	0,06	0,46	7,6	3,0	1770	29
17	Keyport loam	-	-	-	-	-	-	-	4,5	19,1	5.980	50
36	Ruston sandy loam	-	-	-	-	-	-	-	4,5	4,6	11.200	47
24	Memimac gravelly sandy loam	-	-	-	-	-	-	-	4,5	12,6	11.400	31
26	Miami silt loam	0,27	0,50	0,31	0,00	0,70	0,03	0,12	7,3	2,6	2.980	39
6	Everett gravelly sandy loam	-	-	-	-	-	-	-	6,9	12,8	45.000	40
31	Norfolk fine sand	-	-	-	-	-	-	-	4,7	1,8	20.500	45
MAIS CORROSIVO												
8	Fargo clay loam	1,42	1,72	2,55	0,00	0,71	0,01	4,43	7,6	(2)	350	119
45	Unidentified alkali soil	6,15	3,70	0,70	0,00	0,24	0,18	11,98	7,4	(2)	263	137
29	Muck	2,15	1,92	1,55	0,00	0,00	1,69	2,30	4,2	28,1	1.270	146
33	Peat	1,52	7,30	4,06	0,00	-	2,27	2,13	6,8	36,0	800	103
28	Montezuma clay adobe	1,50	0,06	0,18	0,00	0,12	0,99	0,89	6,8	(2)	408	153
23	Merced silt loam	8,38	0,38	0,22	0,02	1,87	1,12	5,57	9,4	(2)	278	173

Fonte: Serra (2006 apud Romanoff (1957))

2.7.5 Potencial de oxirredução

Para Gentil (2011), a presença de gases provenientes da atmosfera pode acelerar o processo corrosivo. Em superfícies subterrâneas, teoricamente não haveria a presença destes gases, o que garantiria um nível

de corrosão menor quando comparado à exposição à atmosfera, exceto se houver a presença de bactérias anaeróbicas. A presença destas bactérias pode ser identificada com a medição de potencial de oxirredução do solo, uma vez que a atividade das bactérias tem a capacidade de reduzir o sulfato, provocando a despolarização adônica do ferro e do aço.

Para Serra (2006 p.106), “o potencial redox corresponde ao potencial relativo de uma reação eletroquímica em condições de equilíbrio”. As estruturas enterradas estão sujeitas a corrosão por conta da presença de micro-organismos, que são capazes de consumir o hidrogênio dos sulfatos, liberando os sulfetos, que atacam os metais e ligas metálicas, inclusive os ferrosos.

O potencial redox é expresso em milivolts (mV), a medida é feita em campo e apresenta a relação com o processo de corrosão conforme a Tabela 7:

Tabela 7 - Relação entre potencial redox e intensidade da corrosão

Potencial redox (mV)	Intensidade da corrosão
Acima de 400	Ausente
Entre 200 e 400	Ligeira
Entre 100 e 200	Moderada
Abaixo de 100	Severa

Fonte: Gentil, (2011)

Segundo Serra (2006), a medição de potencial redox deve ser acompanhada da medição de pH, para fazer a correção do valor, referenciando ao pH. A medição desta grandeza já faz parte do objeto deste trabalho.

2.7.6 Umidade do solo

A medição do teor umidade consiste em encontrar a relação entre a massa de água e a massa seca de uma determinada amostra de solo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012b).

O teor de umidade do solo pode ser medido de diversas formas, tanto em campo, com métodos expeditos, como em laboratório, utilizando estufas ou somente o ar.

Para medição em campo existem equipamentos que fazem este tipo de medição, no entanto, a norma brasileira NBR 16097/2012 oferece duas formas expeditas para realização deste ensaio. Uma delas é através do umidímetro, também conhecido como *speedy*, ou método do *speedy-test*. O outro método é o método da frigideira, que consiste em pesar a amostra de solo antes e depois de aquecê-la em um recipiente metálico (frigideira) com o auxílio de um fogareiro (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012b).

Para a realização de ensaio em laboratório é necessário que a amostra seja transportada de maneira que não haja perda de umidade e material, para então realizar a secagem da amostra em estufa, fazendo a medição de massa antes e depois da secagem, conforme determina a norma NBR 6457/2016. A norma determina que as amostras sejam secas em estufa, por tempo e temperaturas limites. Tal norma também sugere que sejam feitas três medições para cada amostra e que a quantidade de massa seca a ser utilizada depende da dimensão dos grãos deve seguir a Tabela 8:

Tabela 8 - Quantidade de material em função da dimensão dos grãos maiores

Dimensão dos grãos maiores contidos na amostra, determinada visualmente mm	Quantidade de material(em massa seca) a tomar g	Balança a ser utilizada	
		Capacidade nominal g	Resolução g
< 2	30	200	0,01
2 a 20	30 a 300	1 500	0,1
20 a 76	300 a 3 000	5 000	0,5

Fonte: Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016)

Outra forma para determinação de umidade do solo é utilizando-se um analisador de umidade por infravermelho. O equipamento consiste em medir a massa de um material úmido e secar o mesmo por meio de raios infravermelho, medindo a massa do material a cada minuto. No caso de solo, normalmente a umidade é estabilizada no 5º ou 6º minuto de ensaio, no entanto, não é um método normatizado.

2.7.7 Caracterização do solo

Como já foi dito, a análise das características do solo não deve ser feita de maneira isolada. Serra (2006) apud Gotlieb e Vieira (1970) indica que o grau de agressividade do solo pode ser definido através da análise em conjunto da resistividade do solo, da quantidade de sais solúveis presentes, da acidez total e do coeficiente de despolarização e apresentada na Tabela 9.

Tabela 9 - Grau de agressividade, segundo Gotlieb e Vieira.

	Agressividade		
	Elevada	Moderada	Inofensiva
Resistividade	<1500Ω.cm	Valores intermediários	>2500Ω.cm
Sais solúveis	>5meq		<2meq
Acidez total	>25 meq		<15meq
Coef. De despolarização (N)	>0,7		<0,7

Fonte: Serra (2006) apud Gotlieb e Vieira (1970)

Para Gentil (2011), a melhor caracterização do solo pode ser feita ao determinar três parâmetros, sendo eles a resistividade do solo, o potencial redox e o seu teor de água, conforme apresentado na Tabela 10.

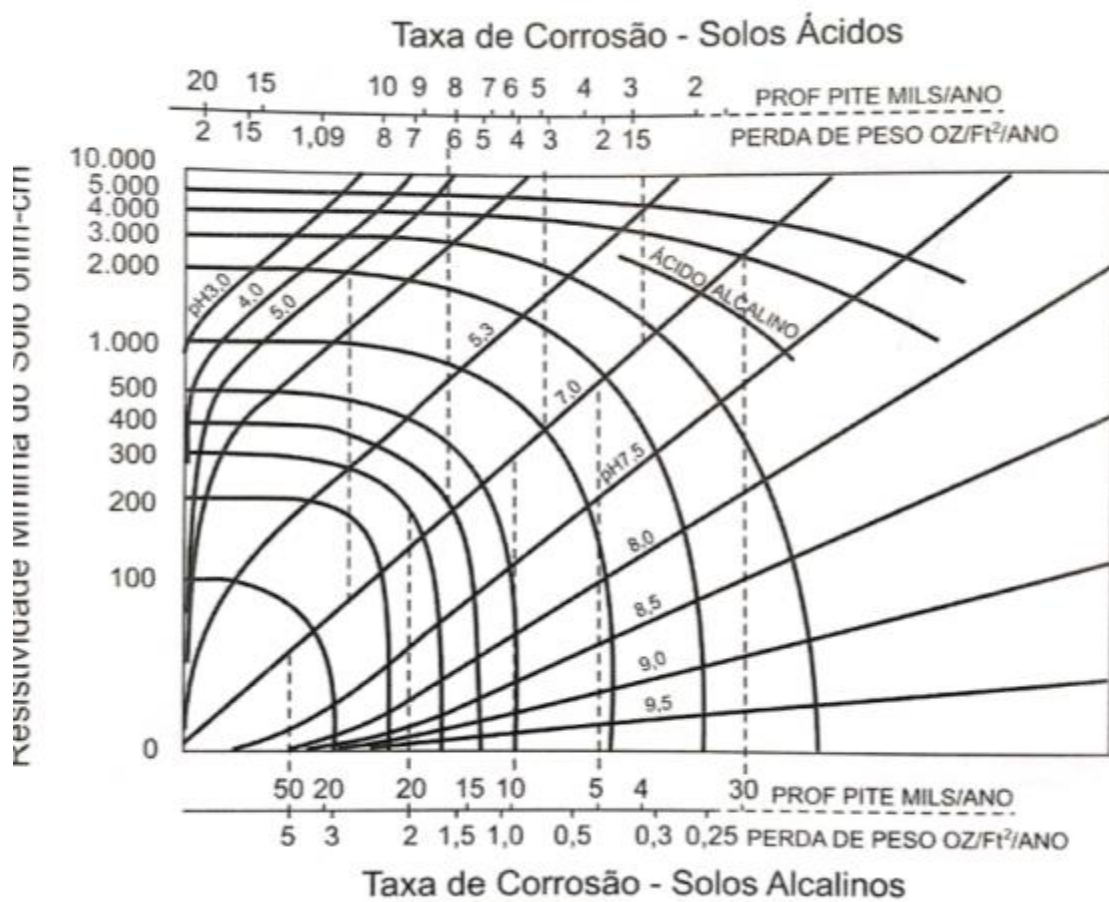
Tabela 10 - Agressividade do solo pelos parâmetros de resistividade, teor de água e potencial redox.

Parâmetros	Agressivo	Não-agressivo
Resistividade do solo (Ω.cm) e/ou	<2000	>2000
Potencial redox (pH = 7) (V)	<0,40 (ou <0,43 para solo argiloso)	>0,40 (ou >0,43 para solo argiloso)
Teor de água (% em peso) (para casos limites)	>20%	<20%

Fonte: Gentil (2011)

Serra (2006) também apresenta o grau de corrosão do metal para uma correlação entre resistividade do solo e nível de pH do solo por meio do gráfico apresentado na Figura 15:

Figura 15 - Taxa de corrosão em solos ácidos e alcalinos



Fonte: Serra (2006)

Existe ainda um método apresentado por Serra (2300) apud Trabanelli (1972), considerado um dos mais completos, onde são atribuídos índices parciais para cada propriedade do solo, indicados na Tabela 11:

Tabela 11 - Índices parciais de agressividade do solo

Parâmetros do solo	Faixa	Índice parcial
Resistividade (Ω .cm)	>12000	0
	12000 a 5000	-2
	5000 a 2000	-3
	<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
SO ₄ ⁻² (mg/kg)	<200	0
	200 a 300	-1
	>300	-2
S ⁻² (mg/kg)	ausente	0
	<0,5	-2
	>0,5	-4

Fonte: Serra (2006) apud TrabANELLI (1972)

Estes índices são somados, sendo que o valor encontrado indica o grau de agressividade do solo, conforme Tabela 12:

Tabela 12 – Critério de agressividade do solo

Classificação do solo	Índice total de agressividade
Não agressivo	0
Ligeiramente agressivo	-1 a -8
Medianamente agressivo	-8 a -10
Muito agressivo	<-10

Fonte: Serra (2006) apud TrabANELLI (1972)

2.8 Correlação

Em muitas pesquisas, as diversas variáveis são estudadas simultaneamente, buscando encontrar a uma inter-relação entre elas. Para este tipo de problema, damos o nome de correlação. Como parte desta investigação, representam-se graficamente os dados das duas variáveis, nos planos x e y. (HOEL, 1981).

A forma de encontrar o coeficiente de correlação entre duas variáveis é através da equação 7:

$$r = \frac{\sum(x-\bar{x}).(y-\bar{y})}{\sqrt{\sum(x-\bar{x})^2.(y-\bar{y})^2}} \quad (7)$$

Onde

r é o coeficiente de correlação;

x é a primeira variável

y é a segunda variável

Para Mukaka (2012), a interpretação do coeficiente de correlação encontrado pode ser feita seguindo a Tabela 13:

Tabela 13 – interpretação do coeficiente de correlação

Coeficiente de correlação	Interpretação
0,90 a 1,00 ou -0,90 a -1,00	Correlação positiva ou negativa muito forte
0,70 a 0,90 ou -0,70 a -0,90	Forte correlação positiva ou negativa
0,50 a 0,70 ou -0,50 a -0,70	Moderada correlação positiva ou negativa
0,30 a 0,50 ou -0,30 a -0,50	Baixa correlação positiva ou negativa
0,00 a 0,30 ou 0,00 a -0,30	Correlação inexistente

Fonte: Mukaka (2012)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O comportamento da aplicação do aço patinável pode ser visto na prática, uma vez que existem estruturas de fundações de torres de transmissão de energia executadas com este material, conforme visto no capítulo anterior.

Era sabido que algumas estacas helicoidais aplicadas na linha de transmissão em estudo apresentaram índices de corrosão que preocuparam a equipe que presta manutenção preventiva e corretiva nesta linha. Diante disto, selecionaram-se estacas helicoidais desta linha de transmissão com níveis distintos de corrosão, objetivando a obtenção de dados para análise neste trabalho. Definidos estes pontos, investigou-se o solo onde as estacas estão instaladas para então, buscar uma relação entre as características do solo e o nível de corrosão da estaca.

Desta forma, selecionaram-se 6 estacas com nível de corrosão baixo, ou seja, com pouco ou nenhum sinal de corrosão, classificando-as como estacas com baixo nível de corrosão. Outras 6 estacas foram selecionadas, estas com nível de corrosão elevado, preferencialmente com corrosão do tipo generalizada, classificando-as como estacas com alto nível de corrosão. Cada estaca desta correspondeu a um pé de uma determinada torre, às quais denominaram-se pontos de análise, numerados de 1 a 12. A escolha dos 12 pontos de análise baseou-se nos relatos da equipe de manutenção, que possui informações da condição de corrosão de cada estaca.

Todos os parâmetros citados no capítulo anterior são passíveis de medição, desde que adotados os métodos corretos para obter estas informações, sendo que estes métodos serão descritos a seguir e foram adotados durante a realização da etapa de coleta de informações em campo.

Entre os dias 30/07/2019 a 01/08/2019 efetuou-se a visita a campo, onde foram coletadas amostras, fotos e informações. Primeiramente foi feita a escavação ao redor da estaca que estava sendo analisada, na profundidade de aproximadamente 50cm, visando constatar se ocorreu corrosão de maneira diferenciada entre a parte subterrânea e a parte exposta.

Posteriormente, mediu-se o pH, a temperatura, a resistividade do solo e sua umidade. Além disso, foram coletadas amostras de solo para ensaios em laboratório.

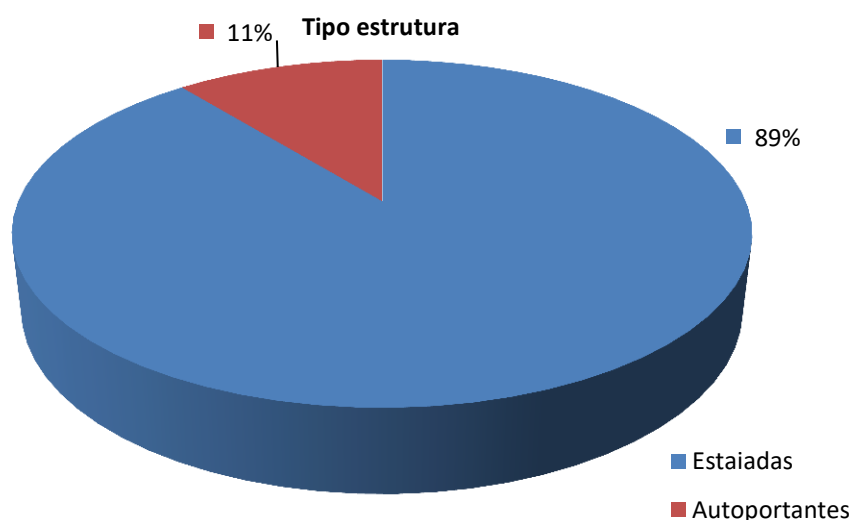
Anotou-se também a temperatura ambiente do momento da coleta de dados, além de serem registradas, também, as condições de chuva e temperatura dos dias que antecederam a coleta de dados, que foram obtidos de estações meteorológicas da região.

Apesar da importância da medição do potencial de oxirredução do solo, não foi possível coletar estes dados, uma vez que a obtenção destas informações demandam equipamentos que não estavam disponíveis ao autor.

3.1 Características da linha de transmissão analisada

A linha de transmissão que foi objeto de análise deste trabalho possui cerca de 167km de extensão, em nível de tensão de 230kV. Foram utilizadas 350 torres de transmissão, sendo que 38 delas eram do tipo autoportante e as demais 312 do tipo estaiada (ELETROSUL, 2013a) como pode ser visto no Gráfico 1:

Gráfico 1 - Tipos de estruturas utilizadas na Linha de Transmissão em estudo



Fonte: Autor (2019)

Quanto ao tipo de fundação, a fundação do tipo estaca helicoidal foi utilizada nos estais de 137 torres, já as fundações do tipo viga "L" foram utilizadas em 175 torres, conforme visto no Gráfico 2:

Gráfico 2 - Tipos de fundação utilizadas nas torres estaiadas



Fonte: Autor (2019)

Nas fundações do tipo estaca helicoidal, foram utilizados tubos de aço patinável sem costura, do tipo VMB 350 COR. A empresa fez os ensaios, indicando ter atendido os limites mínimos e máximos de cada elemento químico, conforme indicado na Tabela 14:

Tabela 14 – Parâmetros mínimo e máximo definidos no ensaio

Elemento	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Cu (%)	Nb (%)
Lote										
Mínimo		0,50			0,15		0,40		0,25	
Máximo	0,18	1,3	0,03	0,03	0,40	0,40	0,65	0,10	0,50	0,06

Fonte: Vercon (2012)

O diâmetro externo do tubo utilizado era de 101,6mm, sendo que a parede do tubo possui a espessura de 8,08mm.

A composição química das estacas, cuja determinação foi realizada por seu fornecedor, é apresentada na Tabela 15:

Tabela 15 - Resultado de análise metalográfica

Elemento	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Ni (%)	Cr (%)	Mo (%)	Cu (%)	Nb (%)
Lote										
191	0,15	0,95	0,021	0,002	0,30	0,12	0,55	0,03	0,29	0,031
025	0,13	0,98	0,021	0,002	0,28	0,12	0,55	0,03	0,300	0,031
195	0,13	0,94	0,022	0,004	0,28	0,11	0,54	0,00	0,310	0,034
024	0,12	0,95	0,017	0,003	0,28	0,13	0,54	0,02	0,29	0,03

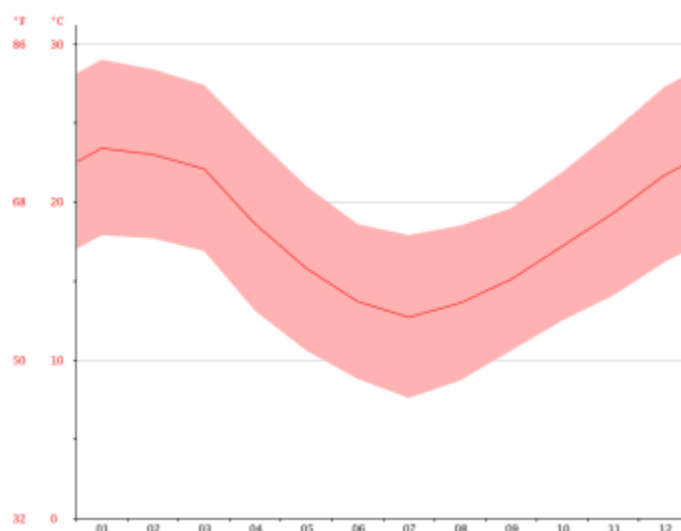
Fonte: Vercon (2012)

Desta maneira, as estacas foram aceitas, pois atendiam aos quantitativos de elementos químicos em sua composição.

3.2 Caracterização da região geográfica de estudos

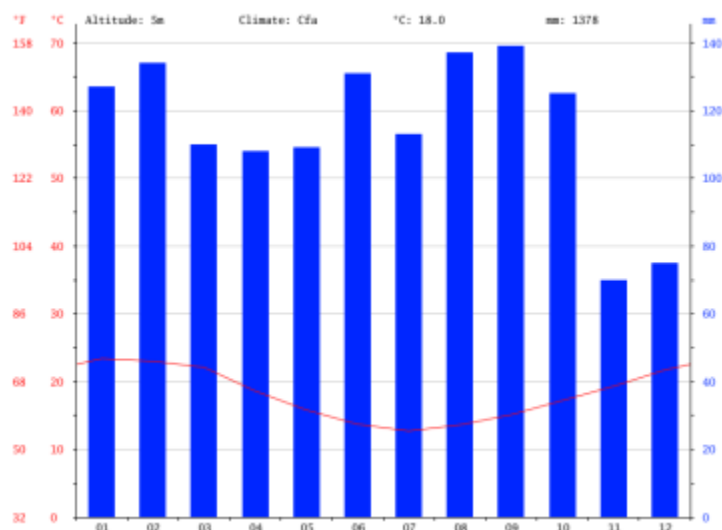
Os pontos analisados ficam dentro de uma circunferência de raio aproximado de 35km, sendo o centro desta circunferência a cidade de Pelotas, no litoral sul do estado do Rio Grande Do Sul. A região é próxima à Lagoa dos Patos e ao Canal São Gonçalo, que liga a Lagoa dos Patos à Lagoa Mirim. O clima corresponde à classificação CFa de Köppen e Geiger, caracterizado por ser um clima subtropical, com verão quente (MORENO, 1961). Os Gráfico 3 e Gráfico 4 indicam as temperaturas e precipitação média na região.

Gráfico 3 – Gráfico de temperatura na região de Pelotas-RS



Fonte: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/pelotas-2118/#climate-graph>, acesso em: 17 de junho 2019.

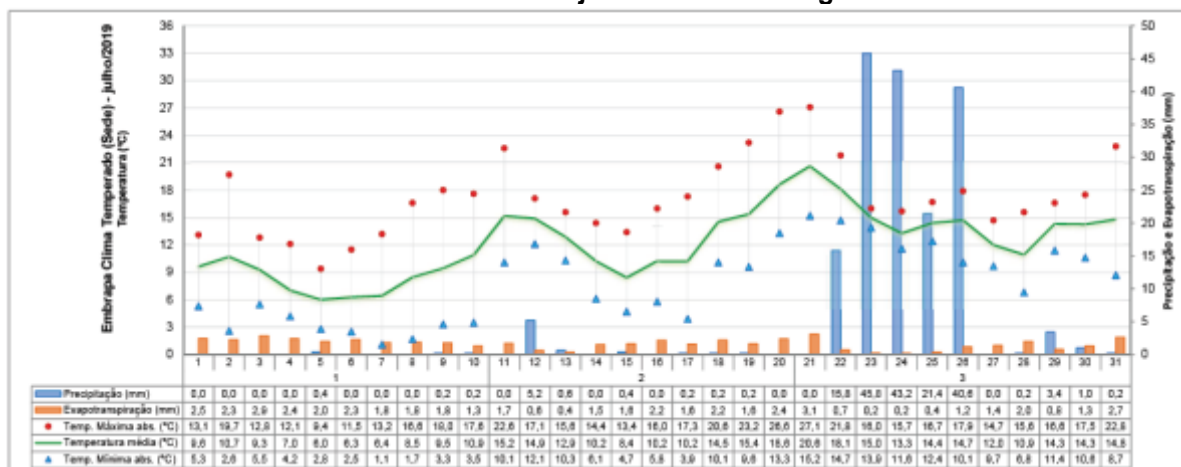
Gráfico 4 - Temperatura e precipitação médias em Pelotas-RS



Fonte: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/rio-grande-do-sul/pelotas-2118/#climate-graph>, acesso em: 17 de junho 2019.

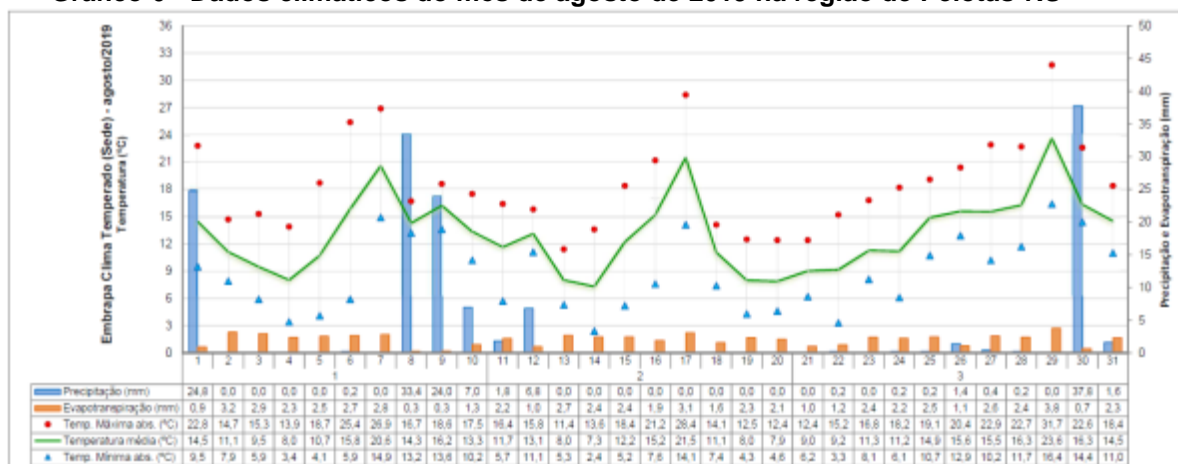
A coleta de amostra ocorreu nos meses de julho e agosto de 2019. No primeiro mês, a temperatura média foi de 12,2°C, a mínima foi de 1,1°C e a máxima de 27,1°C. A precipitação total para o mês de julho de 2019 foi de 179,2mm. As chuvas mais significativas para o referido mês ocorreram entre os dias 22 e 26. Para o mês de agosto é importante analisar somente o primeiro dia, uma vez que foi quando foi realizada a última coleta. Neste dia, a temperatura máxima foi de 22,8°C, a mínima de 9,5°C. Já a precipitação foi de 24,8mm. (EMBRAPA, 2019). O Gráfico 5 e Gráfico 6 indicam os dados climáticos do período de coleta de amostras.

Gráfico 5 - Dados climáticos dos meses de julho de 2019 na região de Pelotas-RS



Fonte: EMBRAPA (2019)

Gráfico 6 - Dados climáticos do mês de agosto de 2019 na região de Pelotas-RS



Fonte: EMBRAPA (2019)

No que tange à análise geomorfológica da região, considera-se como sendo uma planície costeira recente, sendo que os sedimentos arenosos encontrados são essencialmente siliciclásticos, provenientes da erosão das rochas do escudo Sul-Riograndense. Apresenta ainda camadas de sedimentos de silte e argila (MARTH et al, 2008)

Para UFSM (2019), o solo da região de Pelotas é considerado um planossolo, mal drenados, relativamente novos e provenientes do desgaste das serras cristalinas próximas, com ampla extensão na região litorânea. A característica marcante é a transição abrupta de um horizonte lixiviado para um horizonte argílico, com sensíveis variações de cor, textura e consistência. Considerando-se que o horizonte B é impermeável, o solo mal drenado é susceptível à inundações.

3.3 Medição de pH do solo

Para medir o pH do solo utilizou-se um phmetro digital. O instrumento foi inserido no solo próximo de onde a estaca está instalada. Efetuou-se também a medida da temperatura do solo no momento da medição da pH, uma vez que o equipamento utilizado realiza a medição das duas grandezas. A Figura 16 apresenta a medição de pH do solo.

Figura 16 – Medição de pH do solo



Fonte: autor (2019)

3.4 Medição de resistividade do solo

Para encontrar o valor da resistividade do solo utilizou-se o método de Wenner, também conhecido como método dos quatro pontos, apresentado por Serra (2006) como sendo o método mais utilizado para medição de resistividade do solo. Este método é regulamentado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7117/2012 (2012a) e consiste inicialmente na cravação de 4 eletrodos no solo, separados entre si igualmente por uma distância “a” e a uma profundidade “b” no solo. Nos eletrodos das extremidades, chamados de C1 e C2, injetou-se uma corrente elétrica “I”, e nos eletrodos intermediários, chamadas de “P1” e “P2” foi medida a diferença de potencial elétrico “V”. com isto, encontrou-se um valor de resistência elétrica do solo, em ohms, que foi utilizado para calcular a resistividade do solo, com a equação 3:

$$\rho = \pi \cdot 2 \cdot R \cdot a \quad (3)$$

Onde:

ρ é a resistividade do solo na profundidade de “a”, em $\Omega \cdot m$

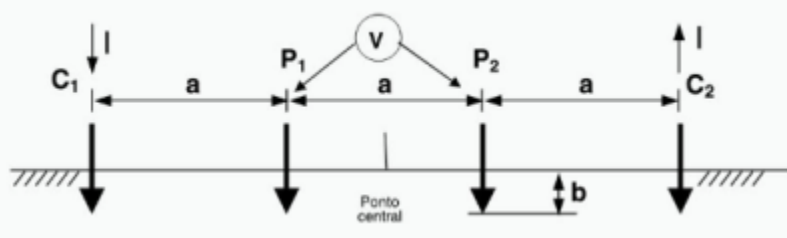
R é a resistência elétrica encontrada pelo terrômetro, em Ω

a é a distância entre os eletrodos, em metros

O aparelho responsável pela injeção de corrente elétrica e medição de diferença de potencial é o terrômetro ou *Megger*. Adotou-se a cravação da estaca de 10cm, visando padronizar os valores.

A forma de cravação dos eletrodos seguiu a Figura 17:

Figura 17 - Ligação do terrômetro seguindo a disposição de Wenner



Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012a)

Cabe lembrar que, segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012a), o método de Wenner é uma forma de medição da resistividade do solo estratificada, sendo que o valor de resistividade do solo obtido na distância “a” corresponde à resistividade do solo na profundidade de igual dimensão.

Sendo assim, para obter a resistividade do solo na profundidade de até 1 metro, realizaram-se as medidas com a distância “a” entre as hastes de 1 metro, seguindo as orientações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (2012a). O ponto central da medição de resistência do solo foi o mais próximo possível do ponto de análise. Na Figura 18 observa-se as hastes cravadas para medição da resistividade do solo em um dos pontos de análise:

Figura 18 – Cravação das hastes para medição da resistividade do solo



Fonte: Autor(2019)

3.5 Medição de teor de cloretos

Apesar da importância de se conhecer o teor de cloretos na atmosfera, o mesmo não foi possível neste trabalho. Isto porque a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2001) determina, entre outros requisitos, que a “vela úmida”, equipamento utilizado para este fim, deveria permanecer no local de amostra por um tempo de aproximadamente 30 dias. Como as torres de linhas de transmissão ficam normalmente em ambientes abertos, como pastagens, plantações de arroz, soja, milho, entre outros, tornou-se inviável manter em campo este tipo de experimento por um período tão longo, tendo em vista o risco do mesmo ser danificado por implementos agrícolas ou animais de criação extensiva.

No entanto, efetuaram-se ensaios para determinação do teor de íons cloreto no solo através de dois métodos. Um dos métodos foi o ensaio para determinação do teor de cloretos a partir de titulação volumétrica de nitrato de prata (AgNO_3), mediante uma solução indicadora de Cromato de potássio (K_2CrO_4). Outro método foi a titulação condutimétrica do cloreto, onde foi utilizando o AgNO_3 como solução estoque, identificando o ponto de

equivalência, também conhecido como ponto final, obtida pela medição de condutividade através de um condutímetro.

Independente do método para determinação do teor de cloreto, necessitou-se preparar uma amostra de solo, chamada extrato de aquoso. O procedimento utilizado para preparação deste extrato é descrito por Serra (2006), sofrendo algumas alterações, que são descritas a seguir.

O método consiste em separar aproximadamente 500g de solo úmido e espalhar em uma bandeja, deixando secar no ambiente de laboratório durante 48 horas. Neste experimento, pôs-se o solo para secar na data de 23/08/2019. Esta foi a primeira alteração feita no método, pois, por dificuldade de horário entre os envolvidos, a amostra ficou secando ao ar por cerca de 80 horas. Acredita-se que isto não influenciou nos resultados, pois o cloro não é volátil, sendo que o maior tempo de secagem fez com que a amostra possui-se menos umidade.

Após este período, mais precisamente na data de 27/08/2019, efetuou-se o destorroamento do solo, tornando-o mais homogêneo tanto em umidade quanto em granulometria. Utilizou-se um almofariz e um pistilo para este procedimento, conforme pode ser visualizado na **Figura 19**:

Figura 19 - Destorroamento



Fonte: Autor (2019)

Após o destorroamento, as amostras foram acomodadas em bacias de alumínio, conforme pode ser visto na Figura 20:

Figura 20 – Amostras após destorroamento

Fonte: Autor (2019)

Determinou-se então a umidade residual conforme procedimento de determinação de umidade de solos descrito em 2.7.6 e na NBR 6457/2016. Executaram-se três medidas de umidade para cada amostra, sendo que a umidade residual considerada foi a média das três medidas. Os valores de umidade residual encontrados podem ser vistos no Apêndice A, sendo que a umidade média pode ser vista no Apêndice B :

O método determina que seja feita a dispersão dos grãos de dureza mais elevada com moedor de aço, peneirar com uma peneira de abertura 2,5mm e retirar, utilizando uma pinça, eventuais pedaços de folhas, raízes e gravetos. Efetuou-se somente a retirada de eventuais pedaços de matéria orgânica. O material em sua grande maioria era composto de material fino, não sendo necessária a moagem.

Em um béquer de 2000ml, adicionou-se uma quantidade de solo equivalente a 200g de solo seco. Para isto, utilizou-se o valor de umidade residual de cada amostra e corrigindo o peso de solo até satisfazer a quantidade equivalente de solo seco. O peso de solo para cada amostra está no Apêndice C.

Acrescentou-se então água deionizada em quantidade tal para que o béquer contivesse 200g de solo seco e 1000ml de água. Os volumes de água adicionados em cada amostra estão Apêndice D.

A orientação do método é que a amostra deveria ser homogeneizada por 6 a 8 horas, misturando a cada 30 minutos, utilizando um bastão de vidro. Efetuou-se o procedimento por 6,5 horas, conforme as demais orientações.

A mistura deveria ficar em repouso por 48 horas. Os béqueres foram cobertos com filme de PVC para evitar evaporação, conforme pode ser visto na Figura 21:

Figura 21 - Amostras em repouso após homogeneização



Fonte: autor (2019)

O método informava que após o repouso o solo teria decantado e as espécies teriam passado para a fase líquida. Afirmava também que em solos com alta concentração de argila a decantação dos sólidos não seria total, o que poderia dificultar a determinação da concentração de algumas espécies solúveis. Nestes casos seria possível utilizar centrifuga para separar as fases líquida e sólida. Ocorreu que mesmo com um tempo maior de decantação, mais precisamente na data de 30/08/2019, as amostras permaneciam turvas, em sua maioria, dificultando a verificação da equivalência por precipitação. A Figura 22 apresenta a retirada do extrato aquoso de uma das amostras, quando verificou-se que não houve decantação completa.

Figura 22 - Retirada do extrato aquoso



Fonte: autor (2019)

Cabe lembrar que a titulação é uma forma indireta de encontrar o teor de cloreto de uma solução. Para encontrar esta grandeza é necessário que seja feita a equivalência entre o volume de AgNO_3 e o peso de NaCl presente na amostra. A razão estequiométrica da reação é igual a 1 e a concentração molar corrigida no AgNO_3 é $0,0135\text{mol/L}$.

Para encontrar o peso molar de cloreto na solução utilizou-se a equação 4:

$$Cl^- = \frac{V_a \cdot 0,0135}{1000} \quad (4)$$

Onde

Cl^- é a concentração molar de cloro na solução;

V_a é o volume de AgNO_3 utilizado para titular a solução.

Utilizou-se 200g de solo para formar um volume de 1000ml de extrato aquoso. Deste volume, utilizou-se 100ml para realização da solução em cada amostra. Considerando também que o peso molar do cloreto de sódio é 35,5g, encontrou-se a concentração de cloretos no solo de cada amostra com a equação 5:

$$Cl_{solo} = \frac{Cl^- \cdot 35,5 \cdot V_{sol} \cdot P_a}{V_e} \quad (5)$$

Onde

Cl_{solo} é o peso de cloreto presente no solo

Cl^- é a concentração molar de cloro da solução

V_{sol} é o volume da solução retirado extrato aquoso, neste caso, 100ml;

P_a é o peso de solo utilizado para preparar o extrato aquoso, neste caso, 200g;

V_e é o volume de extrato aquoso elaborado para cada amostra, neste caso, 1000ml.

3.5.1 Titulação volumétrica do teor de cloreto

Primeiramente, adicionou-se 100ml do extrato aquoso de cada amostra em um Erlenmeyer com capacidade para 250ml. Após, adicionou-se o indicador cromato de potássio (DONAGEMA et al, 2011), na data de 30/08/2019, conforme visto na Figura 23:

Figura 23 – Adição cromato de potássio no extrato aquoso



Fonte: Autor (2019)

Utilizando uma bureta graduada, adicionou-se o $AgNO_3$ até que houvesse a presença de um precipitado vermelho persistente.

3.5.2 Titulação condutimétrica do teor de cloreto

Conforme já mencionado, realizou-se o ensaio através da determinação condutimétrica do cloreto. Neste método, não é necessário adicionar uma solução indicadora, uma vez que o ponto de equivalência é encontrado através da mudança de condutância do extrato aquoso, variando a concentração de AgNO_3 neste extrato. Este ponto de equivalência pode ser encontrado graficamente, uma vez que enquanto não há excesso de íons de Sódio (Na^+) a condutividade permanece inalterada. Após todos os íons de Cloro (Cl^-) terem reagido com os íons Prata (Ag^+), a condutividade aumenta consideravelmente pela presença de excesso de Na^+ , ou seja, uma mudança de inclinação na curva do gráfico. O volume do ponto final foi encontrado através da intersecção de duas retas extrapoladas no gráfico condutividade versus volume de AgNO_3 (GOES Jr et al, 2007).

Na data de 01/10/2019, deu-se início à titulação condutimétrica, calibrando-se o condutivímetro com um uma solução padronizada de Cloreto de Sódio (NaCl), conforme indicado na Figura 24:

Figura 24 - Calibração do condutivímetro

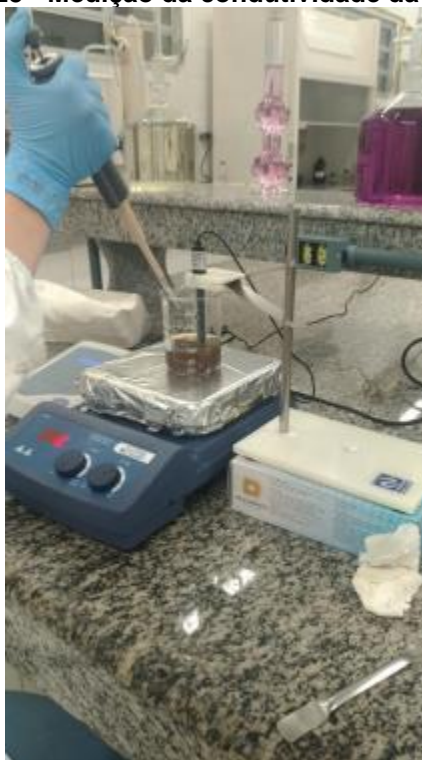


Fonte: Autor (2019)

Após a calibração, inseriu-se o eletrodo do condutivímetro no extrato aquoso, necessitando-se esperar estabilizar o valor de condutividade

medido pelo equipamento. Após, adicionou-se, com uma bureta automática, 0,05ml de AgNO_3 , sendo anotada a condutividade após a estabilização do valor no equipamento. Este processo foi repetido até que cerca de 2 a 3ml de AgNO_3 estivessem presente na amostra. Os valores de condutividade versus volume de AgNO_3 foram plotados em um gráfico, a partir do qual obteve-se o ponto de equivalência da solução. A medição da condutividade da amostra pode ser vista na Figura 25:

Figura 25 - Medição da condutividade da amostra



Fonte: Autor (2019)

Visando delimitar o volume de adição de AgNO_3 , adicionou-se os valores medidos de condutividades em uma planilha eletrônica no momento do ensaio, gerando o gráfico instantaneamente, sendo possível verificar se o ponto de equivalência já havia sido encontrado.

3.6 Medição de umidade do solo

Para medição de umidade do solo utilizou-se duas metodologias, o método da frigideira e o analisador de umidade por infravermelho.

3.6.1 Método da frigideira

Utilizou-se o método da frigideira para determinar o teor de umidade do solo em cada ponto de análise. Este método consiste em pesar uma amostra com cerca de 200g de solo úmido, aquecer em um recipiente metálico até que não haja presença de umidade e pesar novamente a amostra seca. Foi utilizado em campo, no momento da coleta da amostra de solo.

O teor de umidade h é determinado pela equação 6:

$$h = \frac{m_{bh} - m_{bs}}{m_{bs} - T} \cdot 100 \quad (6)$$

Onde:

h é o teor de umidade, expresso em percentual, resolução de 0,1%

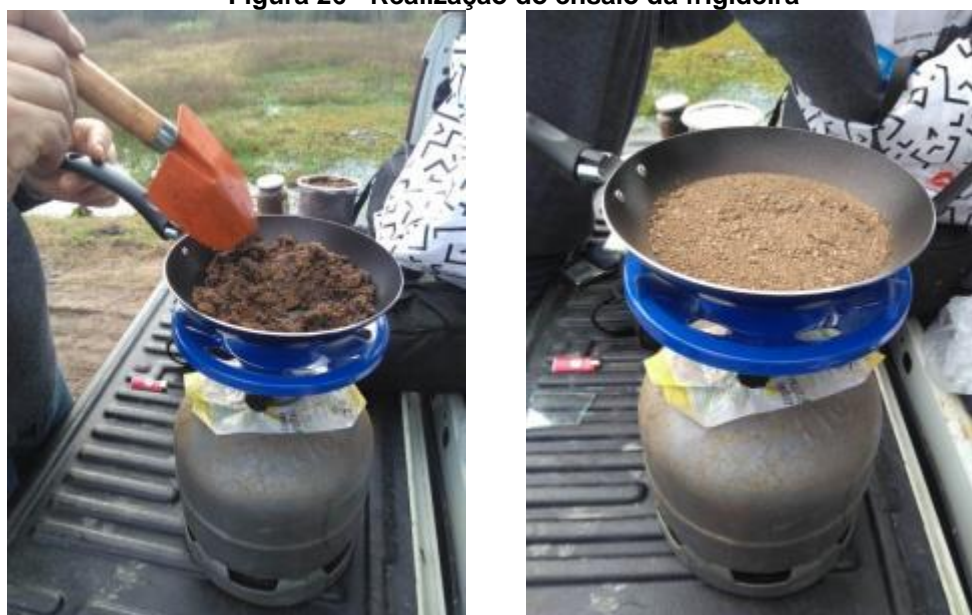
m_{bh} é a massa do conjunto solo úmido mais cápsula, expressa em gramas (g)

m_{bs} é a massa do conjunto solo seco mais cápsula, expressa em gramas (g)

T é a massa da cápsula, expressa em gramas (g).

Nos locais em que as estacas encontravam-se submersas não verificou-se o teor de umidade do solo, tendo em vista a imprecisão contida na coleta da amostra. O ensaio pode ser visto na Figura 26:

Figura 26 - Realização do ensaio da frigideira



(a)

(b)

Fonte: Autor(2019)

3.6.2 Método do infravermelho

Foi possível fazer a medição da umidade do solo com um analisador de umidade por infravermelho, conforme visto na Figura 27. Este ensaio foi realizado no laboratório físico-químico da Eletrosul.

Figura 27 - Realização do ensaio de umidade por infravermelho



Fonte: Autor (2019)

3.7 Escavação para verificação de corrosão subterrânea

Durante o levantamento de dados e coleta de amostras efetuou-se a escavação ao redor da estaca que faz parte do ponto de análise. Isto porque é importante verificar se houve intensidade de corrosão diferente entre a parte subterrânea e a parte exposta à atmosfera. Fez-se esta escavação de forma manual, com aproximadamente 50cm de profundidade.

3.7.1 Caracterização do nível de corrosão

Criou-se uma forma de caracterizar a corrosão de cada estaca para determinar se a mesma estava em estágio de baixo ou alto nível de corrosão. Para isto, alguns critérios foram adotados, definidos Tabela 16:

Tabela 16 - Caracterização do nível de corrosão

Corrosão apresentada	Nível de corrosão
Formação de placas com desprendimento das mesmas	Alto
Formação de corrosão alveolar em mais de 50% da área avaliada	Alto
Formação de pites	Alto
Formação de pátina	baixo

Fonte: Autor (2019)

A presença de um critério de nível de corrosão alto, independente da região apresentada, sendo aérea ou subterrânea, caracteriza a peça como nível de corrosão elevado.

A justificativa para escolha deste critério é subjetiva, mas baseia-se na afirmação de que a perda de massa é algo grave, bem como a formação de alvéolos de forma generalizada, que poderá vir a provocar também a perda de massa.

A formação de pites pode ser considerada algo grave, por conta da fragilidade que a mesma pode provocar à peça, em função da descontinuidade provocada pela sucessão de orifícios profundos.

Como a análise do nível de corrosão foi somente visual, adotaram-se somente dois níveis de corrosão. Isto porque, a determinação de critérios intermediários dependeriam da análise de outras grandezas, como a medição de área de corrosão ou quantidade de massa perdida, por exemplo, que pudessem auferir valores objetivos e claros à análise.

3.8 Coleta de amostras das estacas

Durante a realização das escavações e coletas de amostras e dados, efetuou-se a extração de amostras da estaca, visando fazer análises metalográficas. Estas amostras foram retiradas da parte exposta à atmosfera, mais precisamente da extremidade superior da estaca. A retirada das amostras pode ser vista na Figura 28:

Figura 28 - Coleta de amostras das estacas



Fonte: Autor (2019)

A amostra encaminhada para laboratório foi embalada e identificada, como pode ser visto na Figura 29:

Figura 29 - Amostra encaminhada ao laboratório



Fonte: Metalab (2019)

Enviaram-se 3 amostras para o laboratório Metalab Análise de Materiais Ltda EPP, visando caracterizar o material das estacas e verificar se de fato o material instalado em campo é o mesmo aço patinável proposto pelo fornecedor. Verificou-se também qual a composição da camada superficial de cada amostra, buscando identificar se os componentes formados são aqueles característicos do aço patinável.

4 INFRAESTRUTURA UTILIZADA

Para realização da retirada de amostras e levantamento de dados em campo, realizou-se uma viagem para o estado do Rio Grande do Sul. A empresa Eletrosul Centrais Elétricas cedeu a infraestrutura necessária para executar as atividades, tais como veículo, hospedagem e funcionários.

4.1 pHmetro

Para realização da medição do pH do solo, utilizou-se um phmetro digital, adquirido pelo autor, marca Amtast, modelo AMT-300. Este pHmetro possui escala de medição de pH que varia entre 3,5 e 9. Optou-se pela medição com este equipamento devido à praticidade de utilização e baixo custo, que pode ser visto na Figura 30:

Figura 30 - phmetro digital



Fonte: Autor (2019)

4.2 Terrômetro

Em campo, foram realizados os ensaios de medição de resistividade do solo com um terrômetro digital e eletrodos que foram cedidos pela Eletrosul Centrais Elétricas. Este terrômetro estava calibrado e os 4 eletrodos e respectivos cabos em bom estado de conservação, sendo o modelo MTD 20KWe, fabricante Megabras.

4.3 Teor de cloretos

Para realização, pelo autor, do ensaio para obtenção no teor de cloretos no solo foram utilizadas as instalações do Laboratório de Físico –

Química do Curso de Saneamento, e o Laboratório de Solos e Tecnologia dos Materiais, ambos do Departamento Acadêmico de Construção Civil, do IFSC, Campus Florianópolis.

Nestes laboratórios utilizaram-se bequeres, bacias, balões volumétricos, balanças, estufas, Erlenmeyer, almofariz e pistilo, além de outras vidrarias. Utilizou-se também um condutivímetro, marca Tecnocon, modelo MCA-150 e um agitador magnético marca Nova Blue Light. O condutivímetro utilizado pode ser visto na Figura 31:

Figura 31 – Condutivímetro de bancada MCA-150 Tecnocon



Fonte: Tecnocon (2019)

4.4 Teor de umidade

Para realização do ensaio de umidade do solo coletou-se amostras em campo e transportou-se para o Laboratório físico-químico da Eletrosul Centrais Elétricas, em São José, Santa Catarina. Neste laboratório utilizou-se o analisador de umidade por infravermelho da marca Gehaka, modelo IV2000.

Realizou-se também a medição de umidade através do método da frigideira. Para este, foram levados a campo um fogareiro, uma frigideira, uma pá de jardim. Utilizou-se também uma balança com capacidade de 500g e resolução de 0,1g, marca Diamond.

4.5 Escavação

Para realização das escavações nas estacas helicoidais foram necessários 1 pá de cavar, 1 pá de juntar, 1 enxada e 1 picareta, todos fornecidos pelo autor.

4.6 Ensaios de caracterização do material das estacas

A Metalab Ensaios de Materiais Ltda EPP foi o laboratório responsável por analisar as amostras de estacas retiradas em campo.

Para caracterizar o material de fabricação das estacas, realizou-se uma análise química via espectrometria de emissão ótica, utilizando um espectrômetro de emissão ótica da marca GNR, modelo MetaLAB 75-80J.

Para identificação da espessura da camada passivadora do material, realizou-se ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com um Microscópio Eletrônico de Varredura da marca Hitachi, modelo TM 3000. O modo de Formação da Imagem foi por elétrons retroespehados (BSE) e a tensão de Aceleração de 15 kV.

Outro ensaio realizado foi a Microanálise Química, através da espectrometria por energia dispersiva (EDS), buscando caracterizar os componentes químicos da camada passivadora das amostras. Utilizou-se para este ensaio o Microscópio óptico da marca Zeiss, modelo Axio Scope A1.

Por fim, realizou-se a difração por raio-x (DRX), buscando identificar a estrutura cristalina formada na camada passivadora, utilizando-se um Espectrômetro de raio-X da marca GE, modelo Seifert Charon XRD M – Research Edition.

5 RESULTADOS

Após a realização das coletas de amostras e realização dos ensaios, efetuou-se a análise dos resultados. No caso das escavações, efetuaram-se as análises concomitantemente à realização da atividade, uma vez que tratava-se de inspeção visual das condições das estacas. Trabalhou-se as demais grandezas com tabelas, gráficos ou até mesmo ensaios de laboratório.

5.1 Fotografias e comentários dos pontos de análise

Entre os dias 30 de julho e 1º de agosto de 2019 efetuaram-se as coletas de informações e amostras de solo de 12 torres de linha de transmissão, além de amostras metálicas de 3 estacas distintas. Realizaram-se nestas 12 amostras os ensaios de teor de umidade, resistividade, temperatura do solo e potencial de hidrogênio (pH). É importante ressaltar que observou-se o teor de corrosão das estacas e o local de instalação. Além disso, coletaram-se amostras para ensaio de teor de cloreto. Nas amostras de estacas, foram realizados ensaios em um laboratório especializado em ensaios metalográficos, onde foram realizados espectrométrica de emissão óptica, microscopia eletrônica de varredura, difração por raio-X e espectrometria por energia dispersiva. A seguir, será apresentada a descrição de cada ponto de análise seguida de um registro fotográfico da estaca em análise.

5.1.1 Ponto 1

O primeiro ponto de análise situava-se em uma jazida de areia, com forte presença de água sendo que o ponto não estava alagado, diferentemente dos outros 3 estais da mesma torre. Havia presença de vegetação rasteira, tipo pastagem. A parte da estaca exposta à atmosfera não possuía sinais de corrosão além da formação da pátina usual deste material. A parte subterrânea possuía presença de corrosão alveolar, principalmente nos primeiros centímetros de transição entre o ar e o solo. Foi considerada uma estaca com baixo grau de corrosão por não possuir corrosão em forma

de placas nem possuir corrosão alveolar generalizada. As demais estacas desta torre possuíam corrosão em forma de placas, com identificação tátil e visual.

Durante a fase de projeto não foi realizada sondagem para esta torre, sendo que a sondagem mais próxima fica a cerca de 200m de distância e indicou ser composta por areia fina e areia fina argilosa até o primeiro metro de profundidade. Na Figura 32 apresenta-se uma fotografia da estaca relativa ao ponto 1.

Figura 32 – Ponto 1



Fonte: Autor (2019)

5.1.2 Ponto 2

O ponto 2 também estava próximo à área alagada, sobre um dique de uma antiga extração de areia. Na parte exposta à atmosfera da estaca havia a formação da pátina passivadora, além da formação de pites. O ponto foi considerado de alto nível de corrosão devido ao fato de haver também elevada formação de corrosão alveolar, não chegando a ser generalizada, na parte subterrânea. No entanto, não havia formação de placas de corrosão. As demais estacas desta torre estavam submersas, sendo possível notar corrosão por placas e de forma generalizada. Havia inclusive corrosão no cabo de aterramento da torre, que é galvanizado.

Durante a fase de projeto não foi realizada sondagem para esta torre, sendo que as sondagens mais próximas ficam a cerca de 600m ré e 1200m vante do ponto e indicaram uma composição por areia fina e areia fina argilosa até o primeiro metro de profundidade, respectivamente. O registro da estaca relativa ao ponto 2 pode ser visto na Figura 33:

Figura 33 - Ponto 2



Fonte: Autor (2019)

5.1.3 Ponto 3

A estaca do ponto 3 encontrava-se alagada. Foi considerada com elevado grau de corrosão pelo fato possuir corrosão por placa de forma generalizada na parte subterrânea e também na parte exposta à atmosfera. A região próxima a estaca é uma área de pastagem, porém alagadiça. O solo retirado do local é arenoso.

Não foi realizada sondagem para esta torre, sendo que as sondagens mais próximas ficam a cerca de 1000m ré e 500m vante do ponto e indicaram uma composição por areia fina e argila pouco arenosa na primeira sondagem (ré) e areia fina pouco argilosa até o primeiro metro de profundidade na segunda sondagem (vante). Na Figura 34 pode ser visto um registro da estaca do ponto 3:

Figura 34 - Ponto 3

Fonte: Autor(2019)

5.1.4 Ponto 4

O ponto de análise 4 foi considerado com elevado grau de corrosão por apresentar formação de placas no ponto de contato com o solo, sendo que na parte subterrânea houve a formação de corrosão alveolar generalizada com perda de massa da estrutura. A parte exposta à atmosfera apresentava somente a formação de pátina. A região onde se encontra a torre é uma plantação de eucalipto. Havia presença de água em alguns pontos, mas a estaca não estava submersa.

Não foi realizada sondagem para esta torre, sendo que a sondagem mais próxima fica a cerca de 500m vante do ponto e indica uma composição por areia fina pouco argilosa até o primeiro metro de profundidade. O registro fotográfico da estaca do ponto 4 pode ser visto na Figura 35:

Figura 35 - Ponto 4

Fonte: Autor (2019)

5.1.5 Ponto 5

O ponto 5 foi considerado de baixo nível de corrosão, uma vez que a parte exposta à atmosfera possuía somente a formação da pátina passivadora e na parte subterrânea, apesar de haver formação de alvéolos, a área afetada era pequena e pouco intensa. Não havia formação de placas de corrosão. O solo possuía bastante matéria orgânica na superfície, sendo a região da torre uma área de pastagem, próxima à área urbana e rodovia, sem sinais de alagamento.

Não foi realizada sondagem para esta torre, sendo que as sondagens mais próximas ficam a cerca de 80m vante do ponto e indica uma composição por areia fina argilosa até o primeiro metro de profundidade. A Figura 36 apresenta o registro fotográfico do ponto 5:

Figura 36 - Ponto 5

Fonte: Autor (2019)

5.1.6 Ponto 6

O ponto 6, foi considerado com alto nível de corrosão pelo fato de possuir elevada corrosão alveolar na parte subterrânea e formação de placas na área de transição entre o solo e o ar. Na parte exposta à atmosfera houve somente a formação da pátina. A estaca não estava alagada, apesar de haver presença de água nas proximidades, sendo o local uma região de pastagem.

Não foi realizada sondagem para esta torre, sendo que as sondagens mais próximas ficam a cerca de 500m ré do ponto e indica uma composição por areia fina cinza escura até o primeiro metro de profundidade. Na Figura 37 pode ser visto um registro fotográfico da estaca do ponto 6:

Figura 37 - Ponto 6

Fonte: Autor (2019)

5.1.7 Ponto 7

O ponto foi considerado de alto nível de corrosão pelo fato de apresentar corrosão alveolar generalizada na parte subterrânea e formação de placas na área de transição solo – ar. A parte exposta à atmosfera apresenta somente a formação da pátina. Trata-se de uma região de pastagem, com presença de água nas proximidades. O solo é uma areia fina, tendendo a silte.

Não foi realizada sondagem para esta torre, sendo que as sondagens mais próximas ficam a cerca de 500m ré do ponto e indica uma composição por areia fina e areia fina argilosa até o primeiro metro de profundidade. Na Figura 38 pode ser visto um registro da estaca referente ao ponto de análise 7:

Figura 38 - Ponto 7

Fonte: Autor (2019)

5.1.8 Ponto 8

O ponto 8, apesar de se encontrar alagado, apresentou baixo índice de corrosão, uma vez que não havia formação de placas e, por verificação tátil, foi possível perceber que a formação de alvéolos era de baixa intensidade na parte subterrânea. A área é utilizada para pastagem.

Não foi realizada sondagem para esta torre, sendo que as sondagens mais próximas ficam a cerca de 300m vante do ponto e indica uma composição por areia fina pouco argilosa até o primeiro metro de profundidade. A Figura 39 apresenta um registro do ponto de análise 8:

Figura 39 – Ponto 8

Fonte: Autor (2019)

5.1.9 Ponto 9

O ponto 9, apesar de estar submerso em água, apresentou pouca corrosão alveolar na parte subterrânea, identificado de forma tátil. Na parte exposta à atmosfera não havia presença de corrosão além da formação da pátina. Desta maneira, foi considerada uma torre com baixo nível de corrosão. O ponto encontra-se em cultivo de arroz, normalmente alagadiço. O solo aparenta ser argilo-siltoso.

Não houve realização de sondagem no ponto em questão, sendo que as sondagens realizadas ficam a mais de 1km deste ponto. A estaca referente ao ponto de análise 9 pode ser vista na Figura 40:

Figura 40 - Ponto 9



Fonte: Autor (2019)

5.1.10 Ponto 10

O ponto 10 foi considerado de baixo nível de corrosão pelo fato de não apresentar formação de placas, não haver corrosão na parte exposta à atmosfera da peça e haver pouca corrosão, na forma alveolar, na parte subterrânea. O ponto não estava submerso, mas a região é uma plantação de arroz que já havia sido colhido, com diversas áreas alagadas. O solo é argilo-siltoso.

Não foi realizada sondagem para esta torre, sendo que as sondagens mais próximas ficam a cerca de 600m ré do ponto e indica uma composição por areia fina pouco argilosa até o primeiro metro de

profundidade. A Figura 41 apresenta um registro fotográfico do ponto de análise 10:

Figura 41 - ponto 10



Fonte: Autor (2019)

5.1.11 Ponto 11

O ponto 11 foi considerado como sendo de baixo nível de corrosão, uma vez que não havia formação de placas, a parte exposta à atmosfera possuía apenas a formação da pátina e a parte subterrânea apresentou corrosão alveolar em pouco menos de 50% da área escavada. A região é de cultivo, aparentemente de milho, não havendo alagamentos ou presença de água na superfície. O solo é argiloso.

Não foi realizada sondagem para esta torre, sendo que as sondagens mais próximas ficam a cerca de 1000m ré do ponto e indica uma composição por areia média pouco argilosa até o primeiro metro de profundidade. Na Figura 42 pode ser visto um registro da estaca referente ao ponto 11:

Figura 42 - ponto 11

Fonte: Autor (2019)

5.1.12 Ponto 12

O derradeiro ponto a ser analisado apresentou alto índice de corrosão, pois, apesar de não apresentar formação de placas de corrosão, na parte subterrânea foi detectada uma corrosão generalizada do tipo alveolar. A parte exposta à atmosfera não apresentou corrosão além da formação da pátina. O solo é cultivável, com presença de poças de água, porém não alagado, aparentando ser argilo-siltoso.

Não houve realização de sondagem no ponto em questão, sendo que as sondagens realizadas ficam a mais de 1km deste ponto. A estaca referente ao ponto 12 pode ser vista no registro da Figura 43:

Figura 43 - Ponto 12



Fonte: Autor (2019)

Diante das análises feitas em campo e descritas acima, foi elaborada a Tabela 17, contendo um resumo das informações.

Tabela 17- Nível de corrosão encontrado em campo

Ponto de análise	Nível de corrosão na parte exposta à atmosfera (alto ou baixo)	Nível de corrosão na parte subterrânea (alto ou baixo)	Observações
1	Baixo	Baixo	Formação de pátina na parte exposta à atmosfera. Corrosão alveolar na parte Subterrânea.
2	Baixo	Alto	Corrosão por pite na parte exposta à atmosfera. Corrosão alveolar elevada na parte subterrânea.
3	Alto	Alto	Corrosão generalizada na parte exposta à atmosfera. Corrosão alveolar generalizada na parte subterrânea.
4	Baixo	Alto	Corrosão por pite na parte exposta à atmosfera. Subterrâneo, corrosão alveolar generalizada.
5	Baixo	Baixo	Formação da pátina de maneira satisfatória.
6	Alto	Alto	Formação de pátina na parte exposta à atmosfera, de placas na área de transição e de alvéolos, forma generalizada, na parte subterrânea.
7	Baixo	Alto	Formação de pátina na parte exposta à atmosfera. Formação de alvéolos, forma generalizada, na parte subterrânea.
8	Baixo	Baixo	Formação de pátina na parte exposta à atmosfera. Formação de poucos alvéolos na parte subterrânea.
9	Baixo	Baixo	Formação de pátina na parte exposta à atmosfera. Formação de poucos alvéolos na parte subterrânea.
10	Baixo	Baixo	Formação de pátina na parte exposta à atmosfera. Formação de poucos alvéolos na parte interna.
11	Baixo	Baixo	Formação de pátina na área exposta à atmosfera. Formação de alvéolos em cerca de 50% da área analisada, na parte subterrânea.
12	Baixo	Alto	Formação de alvéolos de forma generalizada, na parte subterrânea.

Fonte: Autor (2019)

5.2 Análise dos parâmetros

Primeiramente, analisou-se individualmente os valores medidos em campo ou laboratório de cada característica do solo e sua possível interferência no grau de corrosão das estacas.

5.2.1 pH e temperatura do solo versus corrosão.

As medições de pH em campo foram feitas em conjunto com a temperatura do solo, uma vez que o instrumento proporciona a medição desta grandeza. Os valores coletados foram transcritos para a Tabela 18.

Tabela 18 – Medidas de temperatura e pH do solo feitas em campo

Ponto de análise	Temperatura do solo (°C)	pH do solo
1	16	6,5
2	18	7,0
3	18	5,5
4	17	7,0
5	16	6,5
6	15	6,5
7	15	6,0
8	17	6,5
9	18	5,0
10	16	6,0
11	17	6,0
12	16	5,0

Fonte: Autor (2019)

Colocou-se então os valores de pH medidos em ordem crescente, para então verificar se o nível de corrosão se concentrava sobre algum valor de pH. A estes valores podem ser vistos na Tabela 19:

Tabela 19 – Medidas de pH em ordem crescente

Ponto de análise	Temperatura do solo (°C)	pH do solo	Nível de corrosão
9	18	5	Baixo
12	16	5	Alto
3	18	5,5	Alto
7	15	6	Alto
10	16	6	Baixo
11	17	6	Baixo
1	16	6,5	Alto
5	16	6,5	Baixo
6	15	6,5	Alto
8	17	6,5	Baixo
2	18	7	Baixo
4	17	7	Alto

Fonte: Autor (2019)

Analisando a ordem crescente do pH encontrado, não foi possível observar se o pH do solo exerce influência na corrosão das estacas, uma vez que para valores idênticos de pH foram encontradas estacas com níveis distintos de corrosão, como por exemplo os pontos de análise 9 e 12, cujo solo apresentou pH 5, mas suas estacas possuem nível de corrosão baixo e alto, respectivamente.

Outro fato interessante é que o pH 7 é considerado neutro, no entanto, a estaca ponto de análise 4 possui alto nível de corrosão, mesmo com o solo possuindo um pH neutro.

5.2.2 Resistividade do solo versus corrosão

A medição de resistividade do solo foi feita conforme prescrito no item 3.4 deste trabalho. Os valores obtidos em campo foram transcritos para a Tabela 20:

Tabela 20 – Resistividade do solo

Ponto de análise	Resistência medida (Ω)	Resistividade calculada ($\Omega.cm$)	Nível de corrosão
1	19,36	12.164,25	Baixo
2	490	307.876,08	Alto
3	6,85	4.303,98	Alto
4	130,6	82.058,40	Alto
5	24,9	15.645,13	Baixo
6	82,3	51.710,62	Alto
7	54	33.929,20	Alto
8	13,53	8.501,15	Baixo
9	3,81	2.393,89	Baixo
10	7,37	4.630,71	Baixo
11	8,43	5.296,73	Baixo
12	8,74	5.491,50	Alto

Fonte: Autor (2019)

Segundo a Tabela 5, valores entre 2000 e 3500 $\Omega.cm$ indicam um solo moderadamente agressivo, sendo que valores maiores que 3500 $\Omega.cm$ indicam um solo pouco agressivo, diminuindo a agressividade conforme o aumento da resistividade. Esta teoria não foi observada para o caso em questão, pois alguns pontos apresentam corrosão elevada sendo que a resistividade do solo está acima de 33000 $\Omega.cm$, por exemplo, sendo que pontos com baixo nível de corrosão apresentaram até 2400 $\Omega.cm$ de resistividade do solo. Resumindo, todos os solos apresentaram resistividade acima de 2000 $\Omega.cm$, mesmo assim foram encontrados pontos com elevada corrosão.

Semelhante ao que foi feito com o pH, colocaram-se os valores de resistividade do solo encontrado em cada ponto em ordem crescente, como pode ser visto na Tabela 21.

Tabela 21 – Resistividade do solo em ordem crescente

Ponto de análise	Resistência medida (Ω)	Resistividade calculada ($\Omega.cm$)	Nível de corrosão
9	3,81	2.393,89	Baixo
3	6,85	4.303,98	Alto
10	7,37	4.630,71	Baixo
11	8,43	5.296,73	Baixo
12	8,74	5.491,50	Alto
8	13,53	8.501,15	Baixo
1	19,36	12.164,25	Alto
5	24,9	15.645,13	Baixo
7	54	33.929,20	Alto
6	82,3	51.710,62	Alto
4	130,6	82.058,40	Alto
2	490	307.876,08	Baixo

Fonte: Autor (2019)

Fazendo a análise da resistividade em ordem crescente, não foi possível encontrar um valor de resistividade do solo que pudesse caracterizá-lo como agressivo ou não agressivo, uma vez que os níveis de corrosão distintos aparecem em valores semelhantes de resistividade.

5.2.3 Teor de cloreto versus corrosão

Conforme indicado no capítulo 3, foram utilizados dois métodos para determinação do teor de cloreto no solo.

Primeiramente foi feita a tentativa de determinação de teor de cloreto por titulação volumétrica de $AgNO_3$ com solução indicadora de $KCrO_3$. Estes ensaios foram realizados na data de 30/08/2019.

Como a identificação do ponto em que ocorre a equivalência da titulação é feita por mudança de cor, mencionado em 3.3.1, os valores encontrados não foram considerados confiáveis, uma vez que muitas das amostras apresentavam-se muito turvas. Sendo assim, buscou-se outro método para determinação da concentração de íons de cloreto no extrato aquoso.

Figura 44 - Amostras 3(a) e 8 (b)



(a)

(b)

Fonte: Autor (2019)

A titulação por condutivímetro, mencionado em 3.3.2, foi o método considerado confiável para a situação encontrada, uma vez que não depende de verificação visual da amostra, somente análise de dados coletados de forma gráfica. Assim sendo, utilizaram-se os valores encontrados neste método para análise.

Com os valores de volume de AgNO_3 e sua respectiva condutividade, fez-se uma correção da condutividade e plotou-se um gráfico para cada amostra de extrato aquoso, utilizando a equação 8:

$$L_{\text{cor}} = L_{\text{exp}} \cdot \left(\frac{V_i + V_a}{V_i} \right) \quad (8)$$

Onde:

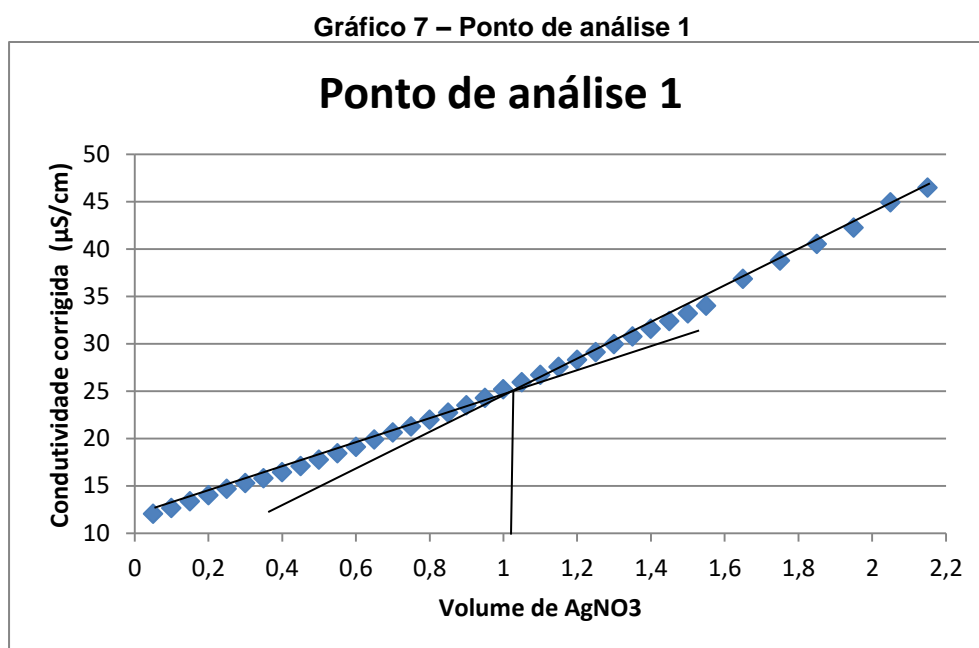
L_{cor} é a condutância corrigida

L_{exp} é a condutância experimental, lida no condutivímetro

V_i é o volume inicial da amostra, 100ml

V_a é o volume adicionado de AgNO_3

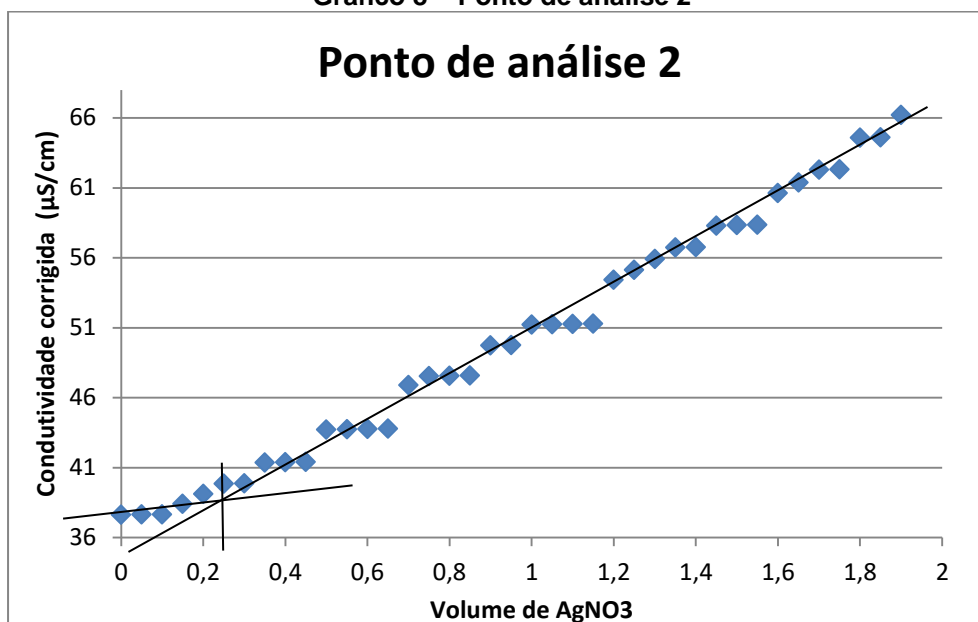
Traçaram-se duas retas, obtidas das regiões onde houve variação da condutividade do extrato aquoso. O ponto de encontro entre estas duas retas é considerado como sendo o volume em que ocorre a equivalência, sendo que após esta equivalência ocorre um aumento significativo da condutividade, conforme indicado em 3.3.2. Os gráficos a seguir buscam identificar o ponto de equivalência de cada amostra.



Fonte: Autor (2019)

Apesar da tentativa de encontrar um ponto de equivalência, a diferença de inclinação das retas não é suficiente para determinar o volume de nitrato de prata consumido para que ocorresse a equivalência. Possivelmente o teor de cloreto desta amostra seja muito baixo para que possa ser identificado com as concentrações de extrato aquoso e AgNO_3 utilizados. Desta maneira, considerou-se que o volume de AgNO_3 é inferior a 0,05ml para o ponto de análise 1.

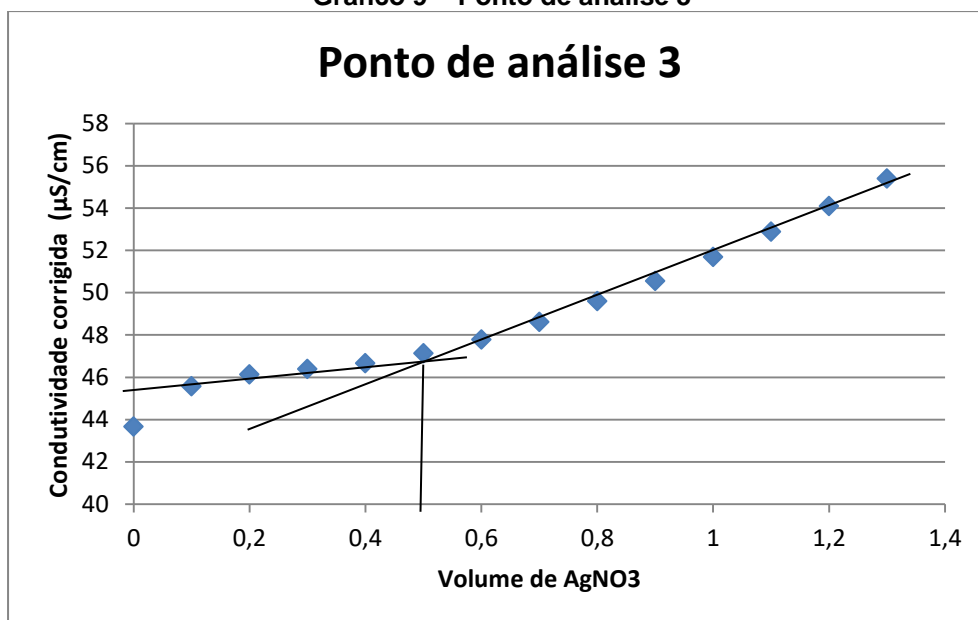
Gráfico 8 – Ponto de análise 2



Fonte: Autor (2019)

Ao traçar as duas retas, considerou-se como ponto de equivalência o volume de 0,25ml de nitrato de prata para o ponto de análise 2.

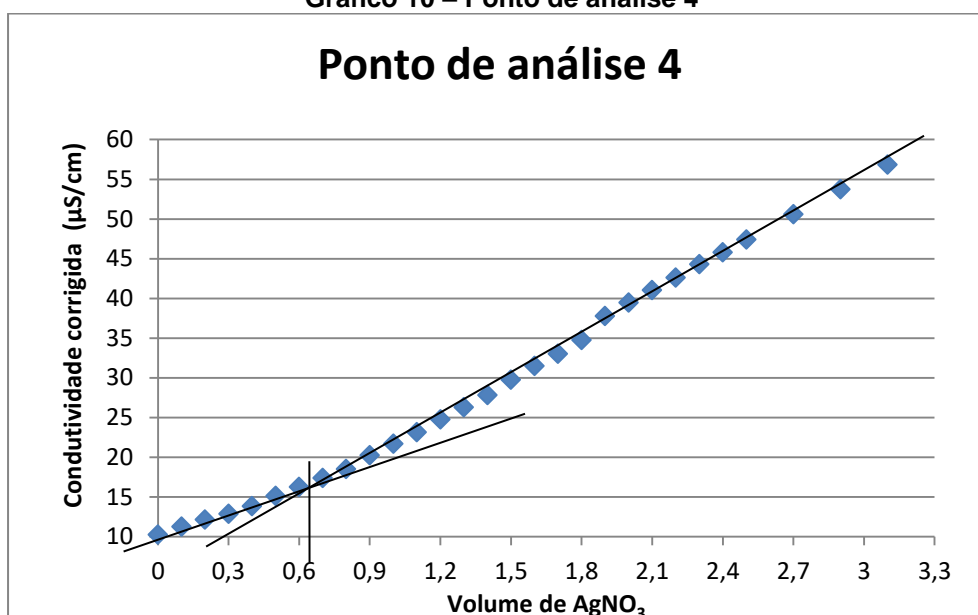
Gráfico 9 – Ponto de análise 3



Fonte: Autor (2019)

Ao traçar as duas retas, considerou-se como ponto de equivalência o volume de 0,50ml de nitrato de prata para o ponto de análise 3.

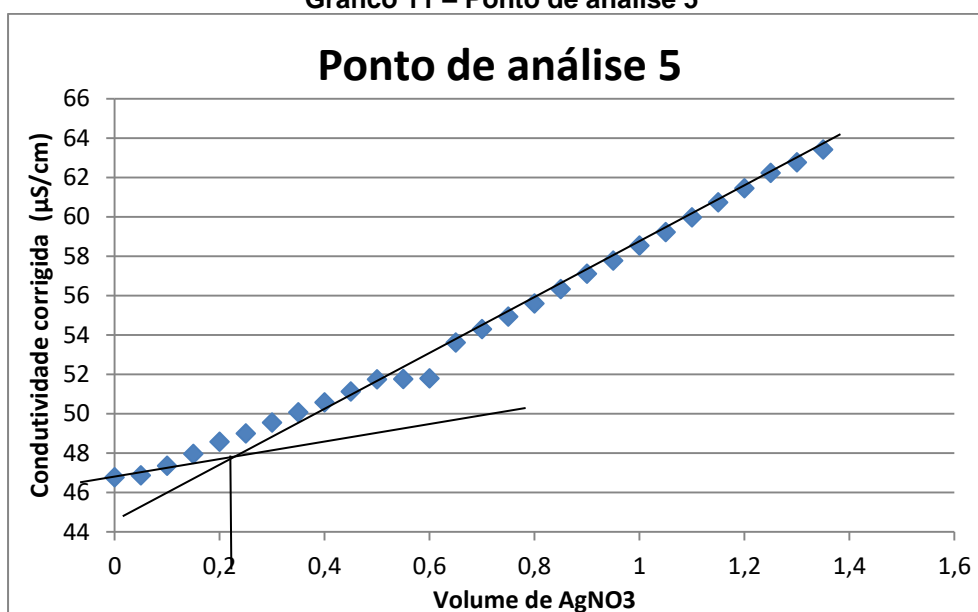
Gráfico 10 – Ponto de análise 4



Fonte: Autor (2019)

Semelhante a amostra 1, a diferença de inclinação entre as duas retas não nos permite encontrar o volume de equivalência. Desta maneira, considerou-se que o volume de nitrato de prata é inferior a 0,05ml para o ponto de análise 4.

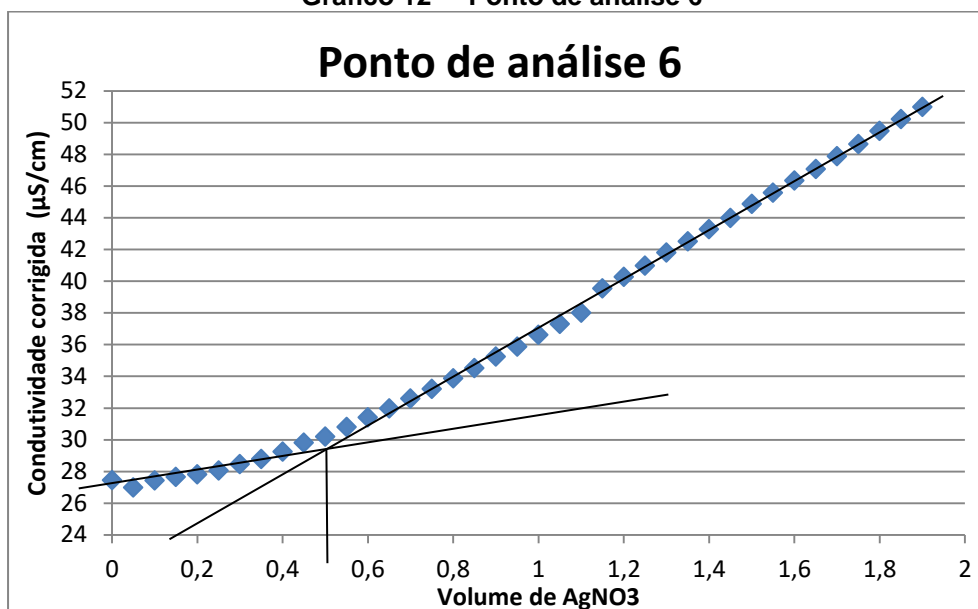
Gráfico 11 – Ponto de análise 5



Fonte: Autor (2019)

Ao traçar as duas retas, considerou-se como ponto de equivalência o volume de 0,20ml de nitrato de prata para o ponto de análise 5.

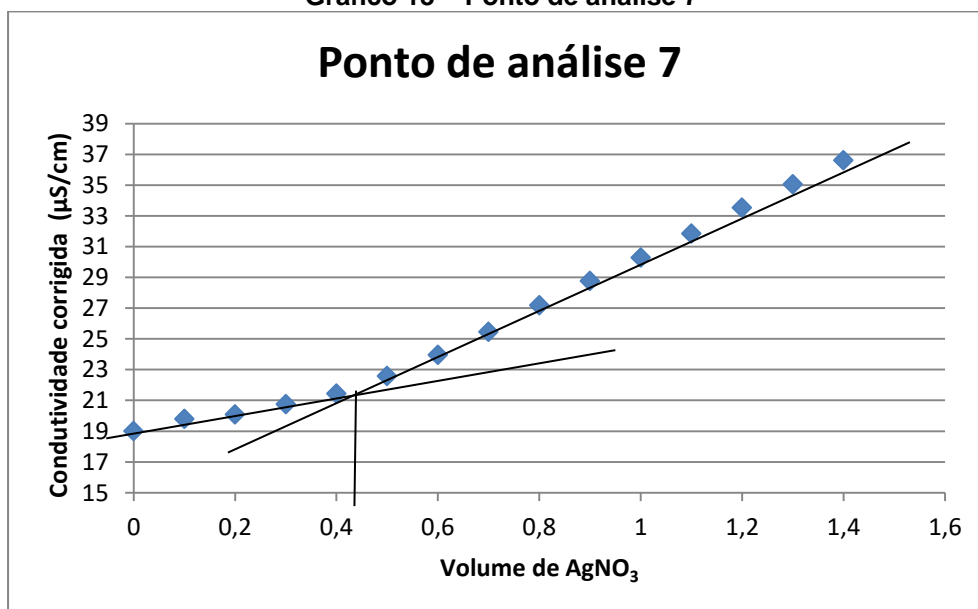
Gráfico 12 – Ponto de análise 6



Fonte: Autor (2019)

Ao traçar as duas retas, considerou-se como ponto de equivalência o volume de 0,50ml de nitrato de prata para o ponto de análise 6.

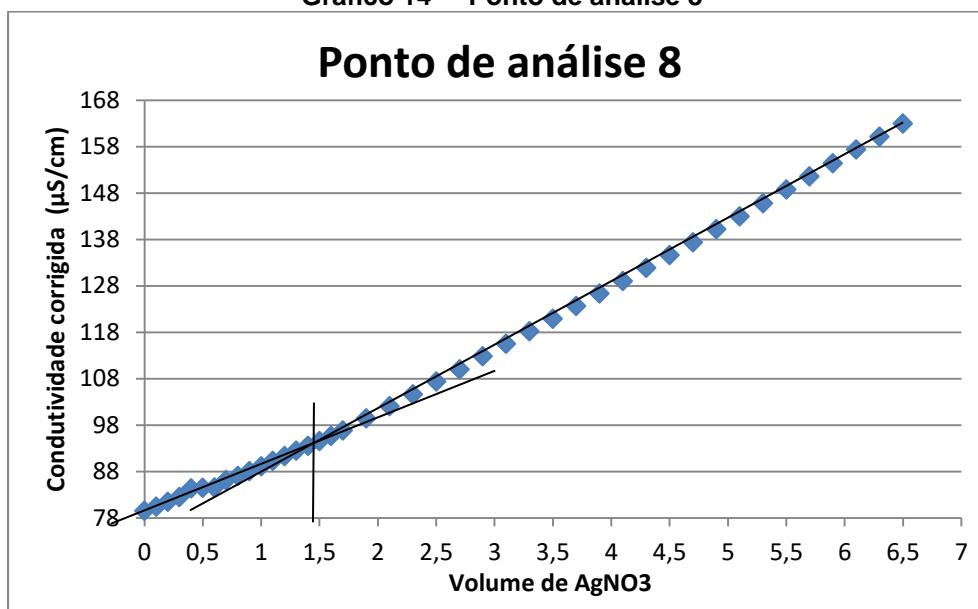
Gráfico 13 – Ponto de análise 7



Fonte: Autor (2019)

Ao traçar as duas retas, considerou-se como ponto de equivalência o volume de 0,40ml de nitrato de prata para o ponto de análise 7.

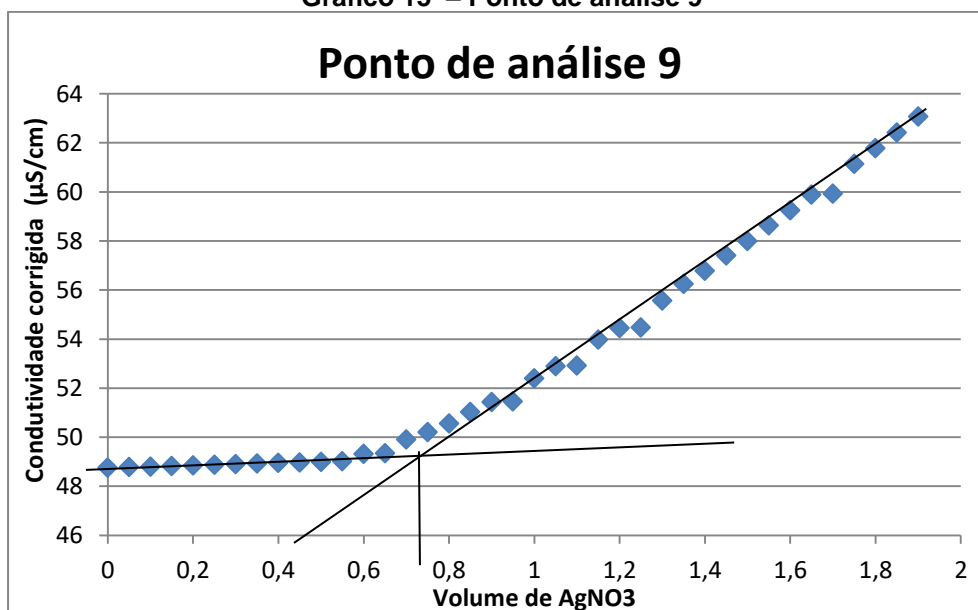
Gráfico 14 – Ponto de análise 8



Fonte: Autor (2019)

Semelhante as amostras 1 e 4, a diferença de inclinação entre as duas retas não nos permite encontrar o volume de equivalência. Desta maneira, considerou-se que o volume de nitrato de prata é inferior a 0,05ml para o ponto de análise 8.

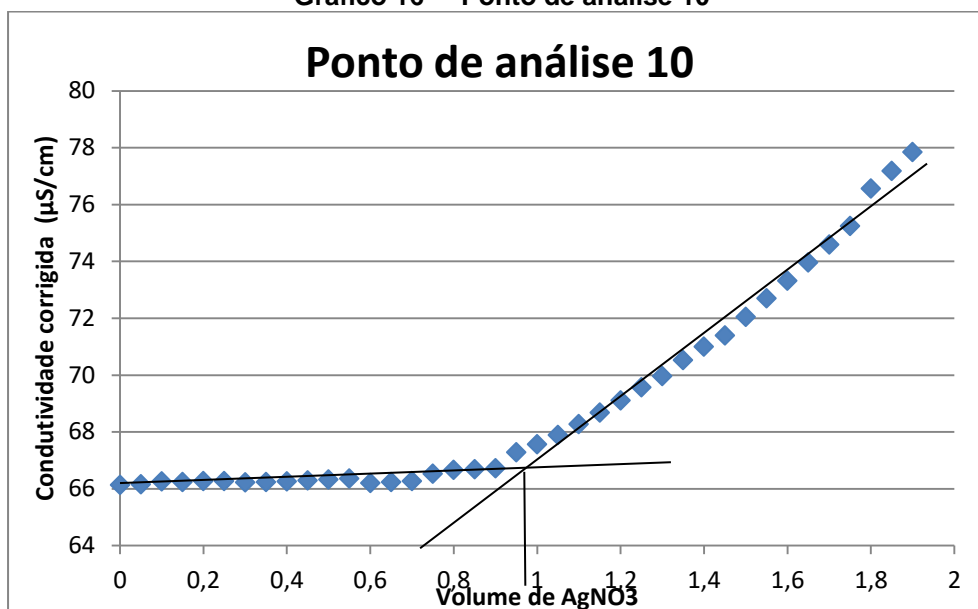
Gráfico 15 – Ponto de análise 9



Fonte: Autor (2019)

Ao traçar as duas retas, considerou-se como ponto de equivalência o volume de 0,72ml de nitrato de prata para o ponto de análise 9.

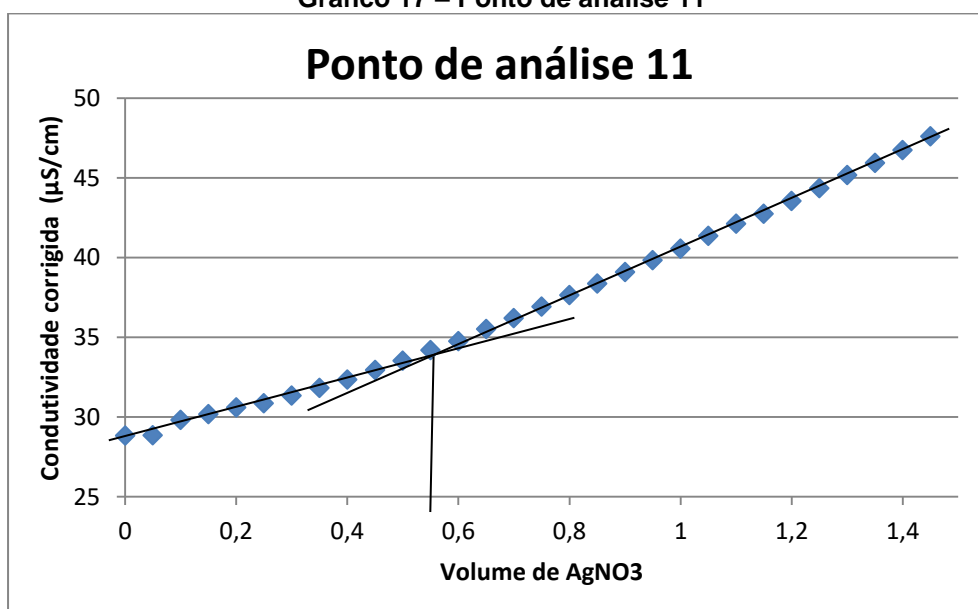
Gráfico 16 – Ponto de análise 10



Fonte: Autor (2019)

Ao traçar as duas retas, considerou-se como ponto de equivalência o volume de 0,98ml de nitrato de prata para o ponto de análise 10.

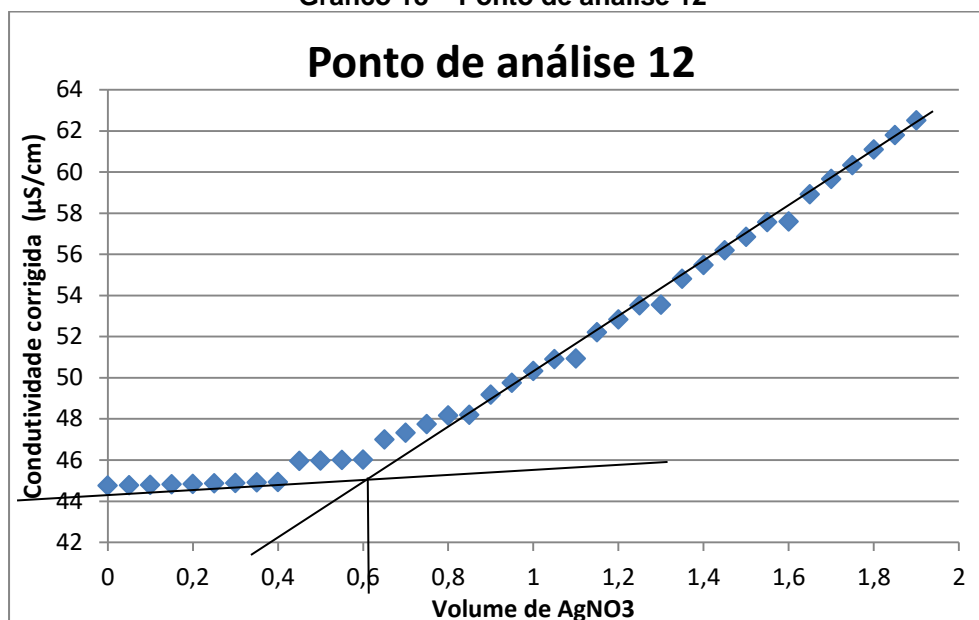
Gráfico 17 – Ponto de análise 11



Fonte: Autor (2019)

Semelhante as amostras 1, 4 e 8, a diferença de inclinação entre as duas retas não permitiu encontrar o volume de equivalência. Desta maneira, considerou-se que o volume de nitrato de prata é inferior a 0,05ml para o ponto de análise 11.

Gráfico 18 – Ponto de análise 12



Fonte: Autor (2019)

Ao traçar as duas retas, considerou-se como ponto de equivalência o volume de 0,60ml de nitrato de prata para o ponto de análise 12.

Para os pontos 1, 4, 8 e 11 a diferença de inclinação das duas retas não foi suficiente para determinar o volume de nitrato de prata consumido. Possivelmente o teor de cloreto destas amostras seja muito baixo.

Utilizando-se as equações 4 e 5, do capítulo 3, obteve-se a massa de cloreto de cada amostra de solo. Nos casos em que não foi possível identificar o volume de AgNO₃, entendeu-se que este é menor que 0,05ml, correspondendo a uma massa de cloreto menor que 1,15mg/kg, ou seja, 1,15mg de cloreto por quilograma de solo. Consolidaram-se os valores encontrados nos gráficos vistos nesta seção, além dos teores de cloreto calculados, como pode ser visto na Tabela 22:

Tabela 22 - Volume de nitrato de prata da titulação das amostras

Ponto de análise	Nitrato de prata (ml)	Teor de cloreto (mg/kg)
1	<0,05	<1,15
2	0,25	5,75
3	0,50	11,50
4	<0,05	<1,15
5	0,20	4,60
6	0,50	11,50
7	0,40	9,20
8	<0,05	<1,15
9	0,72	16,56
10	0,98	22,54
11	<0,05	<1,15
12	0,60	13,80

Fonte: Autor (2019)

Como forma de analisar a influência do teor de cloreto na corrosão das estacas helicoidais, transcreveram-se os valores de teor de cloreto em ordem crescente e comparando com o nível de corrosão das estacas, conforme visto na Tabela 23:

Tabela 23 – Teor de cloreto em ordem crescente

Ponto de análise	Teor de cloreto (mg/kg)	Nível de corrosão
1	<1,15	Baixo
4	<1,15	Alto
8	<1,15	Baixo
11	<1,15	Baixo
5	4,6	Baixo
2	5,75	Alto
7	9,2	Alto
3	11,5	Alto
6	11,5	Alto
12	13,8	Alto
9	16,56	Baixo
10	22,54	Baixo

Fonte: Autor (2019)

Com os dados dispostos desta maneira, verificou-se que há teores de cloreto entre 5,75mg/kg e 13,8mg/kg nas estacas com alto nível de

corrosão. Fora desta faixa, não é possível verificar um padrão entre a corrosão das estacas e o teor de cloreto presente no solo.

5.2.4 Umidade versus corrosão

Como em alguns pontos a umidade não foi medida por conta de a região estar alagada, não foi possível calcular umidade do solo nestes pontos, considerando apenas como “Alagado”. Os valores encontrados no método da frigideira estão transcritos na Tabela 24:

Tabela 24 – Dados da medição de umidade do solo obtidos em campo

Ponto de análise	m_{bh} (g)	m_{bs} (g)	T (g)	$h = \frac{m_{bh} - m_{bs}}{m_{bs} - T} \cdot 100$
1	472,8	438,7	213,4	15,1
2	470,8	446,3	213,4	10,5
3				Alagado
4	470,0	430,0	213,4	18,5
5	478,2	450,1	213,4	11,9
6	470,3	433,6	213,4	16,7
7	478,6	435,0	213,4	19,7
8				Alagado
9				Alagado
10				Alagado
11	494,2	452,1	213,4	17,6
12	495,8	453,2	213,4	17,8

Fonte: Autor (2019)

Para análise dos valores de umidade dos pontos e o grau de corrosão das estacas, utilizou-se os valores obtidos no ensaio da frigideira, colocando-se estes valores em ordem crescente, considerando-se os locais alagados como umidade superior a 20%, conforme visto na Tabela 25

Tabela 25 – teor de umidade em ordem crescente

Ponto de amostra	Umidade	Nível de corrosão
2	10,52%	Alto
5	11,87%	Baixo
1	15,14%	Baixo
6	16,67%	Alto
11	17,60%	Baixo
12	17,76%	Alto
4	18,47%	Alto
7	19,68%	Alto
3	Alagado	Alto
8	Alagado	Baixo
9	Alagado	Baixo
10	Alagado	Baixo

Fonte: Autor (2019)

Com os dados dispostos desta maneira, identificou-se que as áreas alagadas apresentaram, em sua maioria, baixos níveis de corrosão. Isto pode ser explicado pelo fato de que áreas alagadas reduz-se a presença de oxigênio, principal causador da corrosão. Percebeu-se também que valores acima de 16%, em sua maioria, apresentaram alto nível de corrosão

Conforme mencionando anteriormente, utilizou-se um analisador de umidade por infravermelho, cujos valores podem ser vistos na Tabela 26:

Tabela 26 – Valores de umidade obtidos no analisador infravermelho

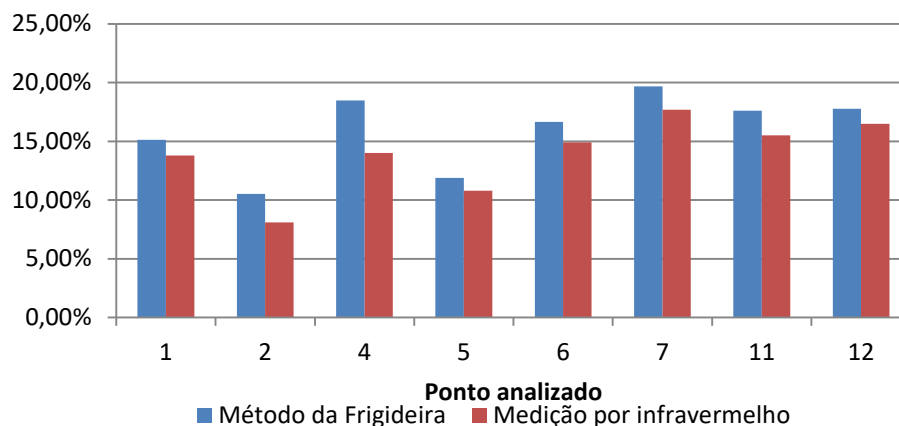
Ponto de análise	Valor de umidade (%)
1	13,8
2	8,1
3	Alagado
4	14,0
5	10,8
6	14,9
7	14,7
8	Alagado
9	Alagado
10	Alagado
11	15,5
12	16,5

Fonte: Autor (2019)

Apesar de não ser o objetivo do trabalho, analisaram-se os resultados obtidos de teor de umidade do solo nos dois métodos distintos,

identificando-se uma forte correlação entre o método da frigideira e o método do infravermelho. Os valores medidos encontram-se no Gráfico 19:

Gráfico 19 - Comparativo entre os métodos da frigideira e infravermelho
Umidade do solo



Fonte: Autor (2019)

Verificou-se que existe um coeficiente de correlação linear entre as medidas dos dois métodos de 0,9431, ou seja, muito forte. Não obstante, há de se levar em consideração alguns fatores, tais como:

- Durante o ensaio da frigideira é possível que parte da matéria orgânica possa ter sido queimada, interferindo no valor de umidade encontrado.
- Realização do ensaio com infravermelho cerca de 10 dias após a realização do ensaio da frigideira, em laboratório, com amostras armazenadas em recipientes de vidros hermeticamente fechados.
- Durante o transporte e armazenagem das amostras utilizadas no ensaio de infravermelho é possível que parte da umidade tenha sido perdida, ocasionando a diferença entre os valores dos dois métodos.

5.3 Consolidação dos valores coletados

Com todos os valores obtidos, tanto em campo como em laboratório, foi gerada a Tabela 27, a seguir:

Tabela 27 – Dados obtidos em campo e laboratório

Ponto de análise	Nível de corrosão (baixa ou alta)	Condições climáticas		Temperatura do solo (°C)	Resistividade de média do Solo (Ω .cm)	pH do Solo	Umidade do solo (%)	Teor de cloreto no solo (mg/kg)	Data de coleta das amostras	Tipo de solo
		Dias sem chuva	Temperatura do ar (°C)							
1	Baixo	1	18	16	12.164,25	6,5	15,1	0,00	30/07/19	Areia
2	Alto	1	19	18	307.876,08	7,0	10,5	5,75	30/07/19	Areia argilosa
3	Alto	1	20	18	4.303,98	5,5	Alagado	11,50	30/07/19	Areia argilosa
4	Alto	1	19	17	82.058,40	7,0	18,5	0,00	30/07/19	Areia argilosa
5	Baixo	1	18	16	15.645,13	6,5	11,9	4,60	30/07/19	Areia
6	Alto	2	13	15	51.710,62	6,0	16,7	11,50	31/07/19	Areia fina
7	Alto	2	17	15	33.929,20	6,0	19,7	9,20	31/07/19	Areia siltosa
8	Baixo	2	18	17	8.501,15	6,5	Alagado	0,00	31/07/19	Areia argilosa
9	Baixo	2	17	18	2.393,89	5,0	Alagado	16,56	31/07/19	Argilo-siltosa
10	Baixo	2	16	16	4.630,71	6,0	Alagado	22,54	31/07/19	Argilo-siltoso
11	Baixo	3	18	17	5.296,73	6,0	17,6	0,00	01/08/19	Argila
12	Alto	3	18	16	5.491,50	5,0	17,8	13,80	01/08/19	Argilo-siltoso

Fonte: Autor (2019)

5.4 Análise dos dados consolidados

Para fazer a análise dos dados consolidados, utilizaram-se os índices parciais de agressividade contidos na Tabela 11 para cada grandeza medida e montou-se a Tabela 28:

Tabela 28 – Índice total de agressividade

Ponto de análise	Umidade	pH	Teor de cloreto	Resistividade do solo	Soma dos índices	Corrosão
1	0	0	0	0	0	Baixo
2	0	0	0	0	0	Alto
3	-1	0	0	-3	-4	Alto
4	0	0	0	0	0	Alto
5	0	0	0	0	0	Baixo
6	0	0	0	0	0	Alto
7	0	0	0	0	0	Alto
8	-1	0	0	-2	-3	Baixo
9	-1	1	0	-3	-3	Baixo
10	-1	0	0	-3	-4	Baixo
11	0	0	0	-2	-2	Baixo
12	0	1	0	-2	-1	Alto

Fonte: Autor (2019)

Importante lembrar que nem todas as grandezas foram medidas, inviabilizando a utilização direta da Tabela 12 para determinação do grau de agressividade do solo, ressaltando-se que as grandezas não medidas geram cerca de metade do índice total proposto por Serra apud Trabaneli (2006) Portanto, necessitou-se adaptar estes índices às grandezas medidas, para então buscar a determinação do grau de agressividade do solo.

Utilizando-se os índices parciais propostos pelo autor citado acima, somente para as grandezas medidas, sugere-se neste trabalho a classificação do grau de agressividade descrita na Tabela 29:

Tabela 29 – Índice para classificação de grau de agressividade adaptado para as grandezas coletadas

Grau de agressividade	Índice adaptado
Não agressivo	0
Ligeiramente agressivo	- 1 a -3
Moderadamente agressivo	-4 a -5
Altamente agressivo	<-5

Fonte: Autor (2019)

Fez-se então um comparativo entre o grau de agressividade proposto e o nível de corrosão encontrado em campo para as 12 estacas, agrupando-se pelo nível de corrosão, conforme visto na Tabela 30:

Tabela 30 – Comparativo entre nível de corrosão e grau de agressividade do solo proposto

Ponto de análise	Soma dos índices	Grau de agressividade proposto	Nível de corrosão
2	0	Não agressivo	Alto
3	-4	Moderadamente agressivo	Alto
4	0	Não agressivo	Alto
6	0	Não agressivo	Alto
7	0	Não agressivo	Alto
12	-1	Ligeiramente agressivo	Alto
1	0	Não agressivo	Baixo
5	0	Não agressivo	Baixo
8	-3	Ligeiramente agressivo	Baixo
9	-3	Ligeiramente agressivo	Baixo
10	-4	Moderadamente agressivo	Baixo
11	-2	Ligeiramente agressivo	Baixo

Fonte: Autor (2019)

Fazendo-se uma análise minuciosa do nível de corrosão e o grau de agressividade do solo proposto neste trabalho, não é possível afirmar a influência destas grandezas, mesmo quando analisadas de forma consolidada. Isto porque encontrou-se nível alto de corrosão em solos classificados como não agressivos ou ligeiramente agressivos. No outro extremo, encontrou-se estacas com nível baixo de corrosão mesmo em solos classificados como ligeiramente ou moderadamente agressivos.

5.5 Análise das amostras de estaca

Com as amostras retiradas em campo, realizou-se ensaios em laboratório de 3 estacas instaladas em campo, na parte totalmente exposta à atmosfera. A identificação das amostras coletadas pelo autor e a sua respectiva nomenclatura dada pelo laboratório segue indicada na Tabela 31.

Tabela 31 – identificação das amostras ensaiadas em laboratório

Amostra Autor	Amostra Laboratório
6	1
11	2
8	3

Fonte: Autor(2019)

Os ensaios realizados pelo laboratório seguem discriminados.

5.5.1 Espectrometria de Emissão Ótica

O ensaio de espectrométrica de emissão ótica indicou que o material das estacas corresponde ao aço patinável, resultando em teores de elementos químicos semelhantes aos indicados pela empresa fornecedora das estacas.

O ensaio químico por espectrometria de emissão ótica gerou a Tabela 32:

Tabela 32 – ensaio químico por espectrometria ótica

Teor (% massa)	AMOSTRA 1 (%)	AMOSTRA 2 (%)	AMOSTRA 3 (%)	ESPECIFICAÇÃO* ASTM A 325 Tipo 3F
C	(0,165)	(0,170)	(0,167)	0,19 – 0,26
Si	0,263	0,248	0,295	0,13 – 0,37
Mn	0,965	0,958	0,979	0,86 – 1,24
P	0,032	0,037	0,032	0,040 máx.
S	0,014	0,022	0,020	0,045 máx.
Cr	0,554	0,541	0,587	0,42 – 0,68
Mo	(0,034)	(0,005)	(0,046)	--
Ni	(0,159)	(0,144)	(0,158)	0,17 – 0,43
Al	0,016	(0,013)	0,018	--
Co	(0,035)	(0,036)	(0,042)	--
Cu	(0,276)	(0,250)	(0,277)	0,17 – 0,43
V	(ND)	(ND)	(0,001)	--
Ti	(0,001)	(0,001)	(0,002)	--
B	0,0012	0,0027	0,0031	--

*Fe: restante ND: Elemento não detectado na composição da liga.
Nota 1: Os elementos representados entre parênteses "()" são reportados apenas a caráter informativo.*

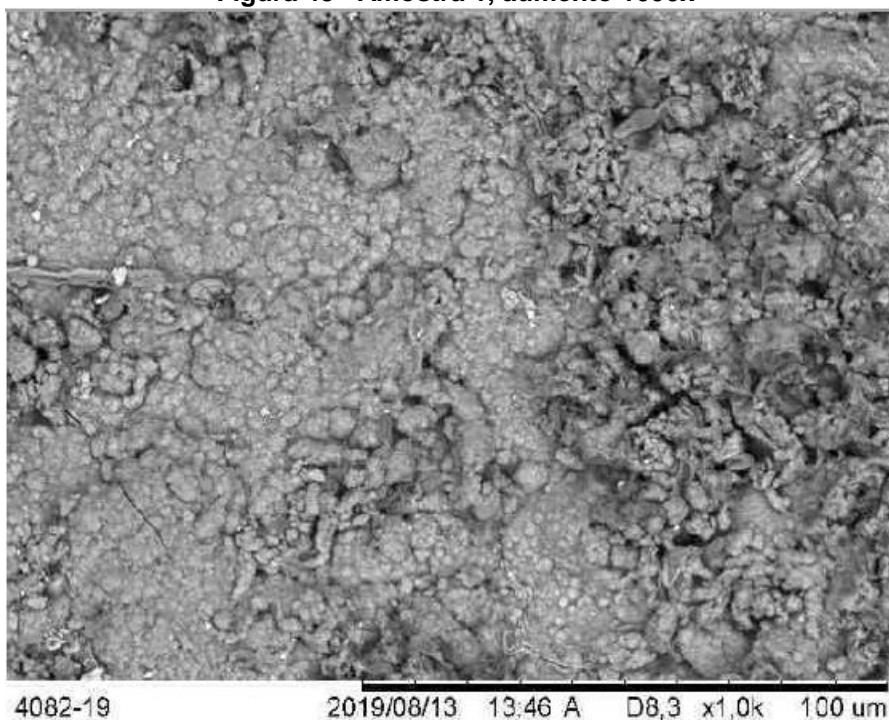
Fonte: Metalab (2019)

Importante afirmar que o material coletado é de fato o aço patinável, pois atende os valores mínimos e máximos de cada elemento químico em sua composição, principalmente o cobre, maior responsável pela formação da pátina protetora.

5.5.2 Microscopia Eletrônica de Varredura

Outro ensaio realizado com as amostras de estacas coletadas em campo foi a microscopia eletrônica de varredura (MEV), onde foi possível identificar a espessura média da camada, bem como uma imagem da formação da pátina na peça. As Figura 45, 46 e 47 são imagens obtidas com o MEV das amostras referentes aos pontos de análise 6, 11 e 8, respectivamente.

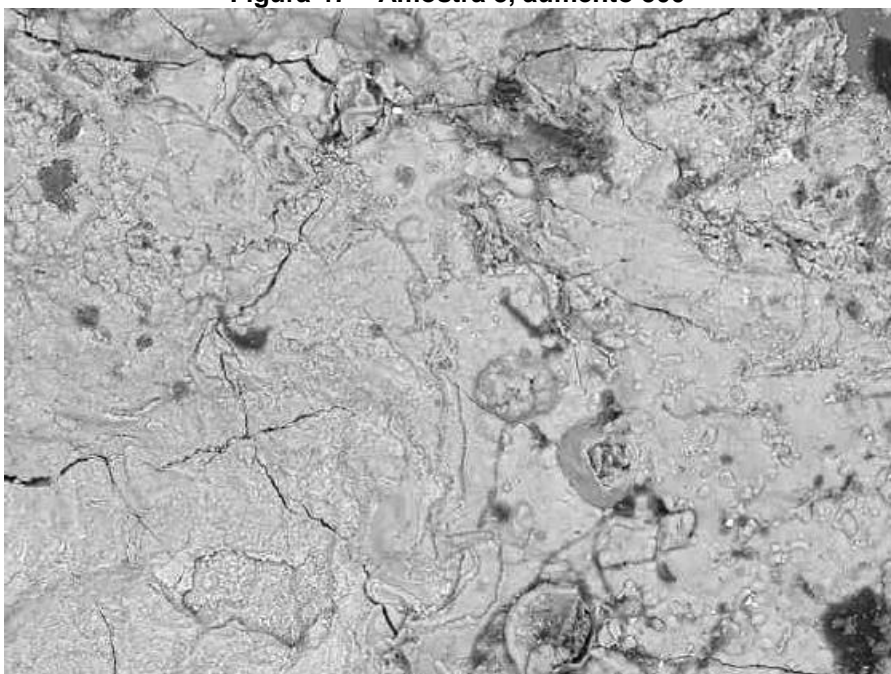
Figura 45– Amostra 1, aumento 1000x



Fonte: Metalab, 2019(b)

Figura 46 – Amostra 2, aumento 500x

4082-19 2019/08/13 13:56 A D8,9 x500 200 um
Fonte: Metalab, 2019(b)

Figura 47 – Amostra 3, aumento 500

4082-19 2019/08/13 14:07 A D9,9 x500 200 um
Fonte: Metalab, 2019(b)

Nota-se que as amostras 2 e 3 (Figura 46 e 47) apresentam fissuras, demonstrando uma fragilidade na formação da pátina, que pode

provocar o início da corrosão com perda de massa por falha na camada passivadora.

Quanto à espessura média das camadas formadas, encontrou-se o resultado da Tabela 33:

Tabela 33 – Espessura das camadas encontradas com MEV

Amostra	Espessura (μm)
1	122
2	86
3	86

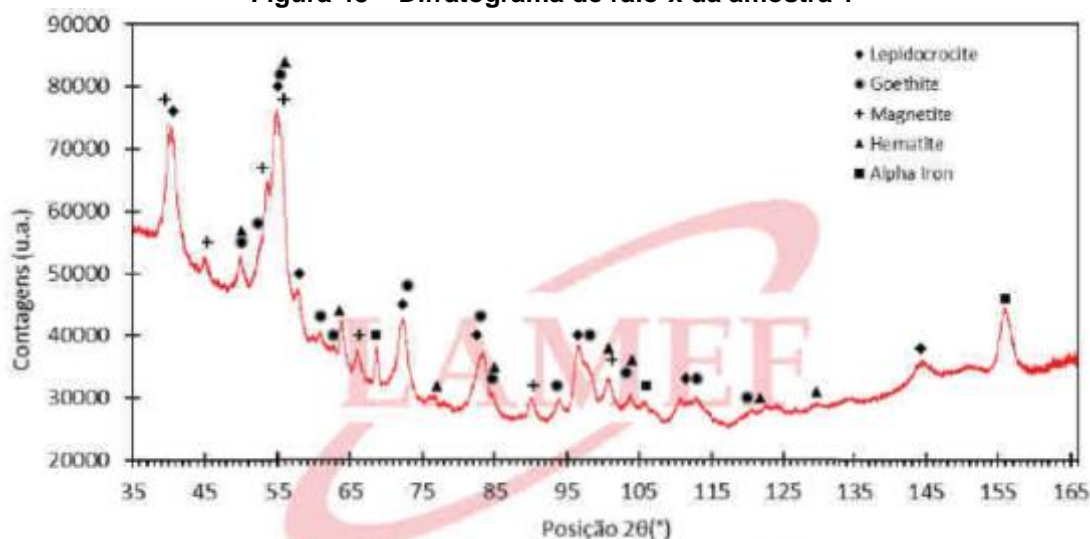
Fonte: Metalab (2019)

Conforme já mencionado, a espessura média de pátina formada na superfície do aço patinável de aproximadamente $50\mu\text{m}$. Encontrou-se, portanto, valores maiores do que o usual. Isto indica que a formação da pátina ocorreu de forma satisfatória na parte onde havia exposição ao ar atmosférico, confirmando que o material instalado é de fato aço patinável.

5.5.3 Difração por Raio-x

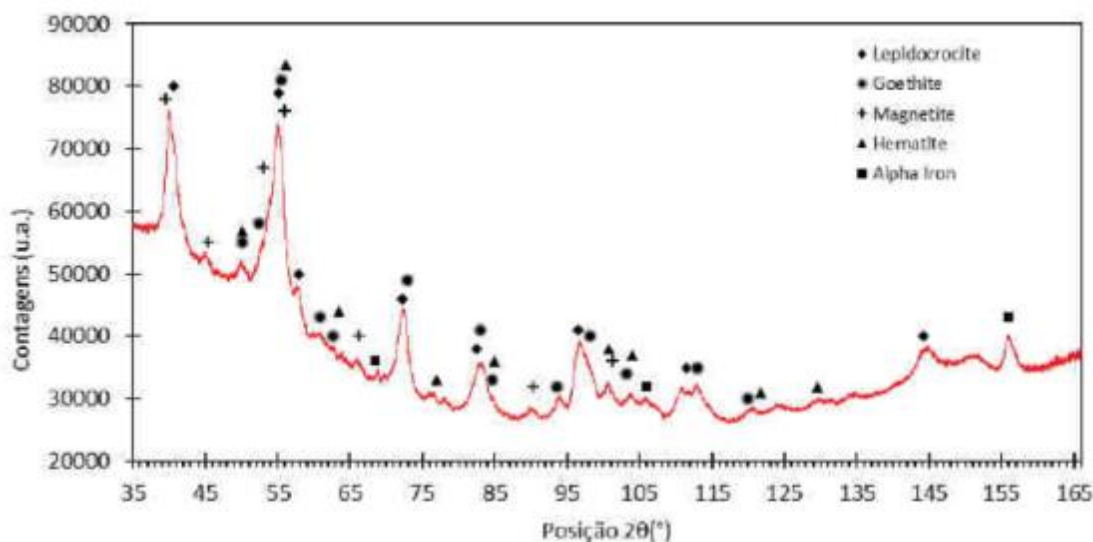
Realizou-se também um ensaio de difração de raio-x (DRX), buscando verificar quais elementos compõem a camada de óxido, responsável pela proteção da camada passivadora do metal, apresentando os resultados nas Figura 48, 49 e 50.

Figura 48 – Difratoograma de raio-x da amostra 1



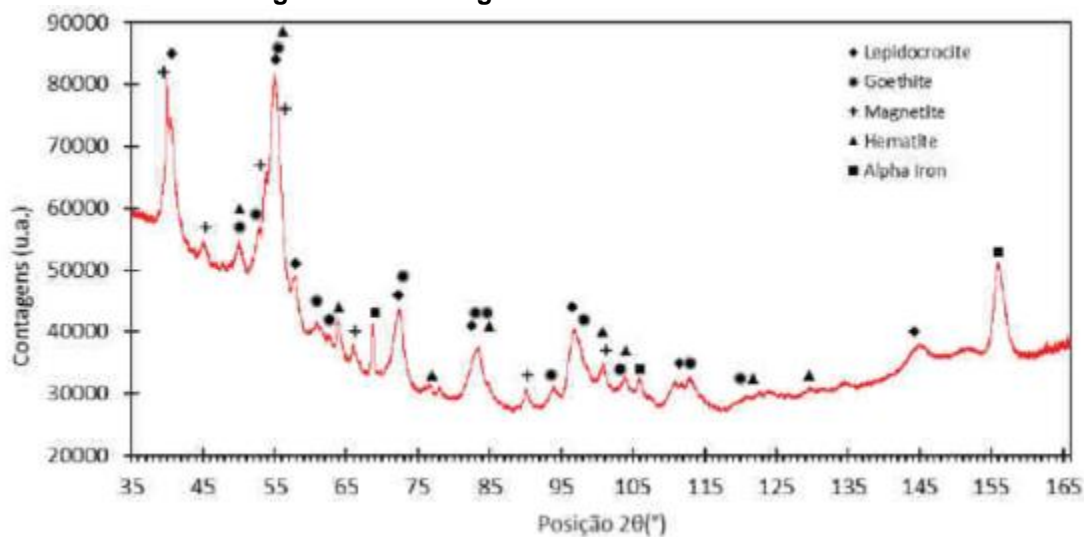
Fonte: Metalab, 2019(b)

Figura 49 - Difratoograma de raio-x da amostra 2



Fonte: Metalab, 2019(b)

Figura 50 - Difratoograma de raio-x da amostra 3



Fonte: Metalab, 2019(b)

A identificação das fases cristalinas das amostras 1, 2 e 3 podem ser vistas na Tabela 34:

Tabela 34 – Identificação das fases cristalinas das 3 amostras

	Nome do composto	Fórmula química
Amostras 1, 2 e 3	Lepidocrocita	$\gamma\text{-FeO(OH)}$
	Goethita	$\alpha\text{-FeO(OH)}$
	Magnetita	Fe_3O_4
	Hematita	Fe_2O_3
	Substrato	$\alpha\text{-Fe}$

Fonte: Metalab (2019)

Comparando com as informações da Tabela 34 com os compostos formados sobre o aço patinável constantes na Tabela 3, verificou-se

similaridade com os componentes formados em atmosfera industrial, apenas invertendo a preponderância entre Magnetita e Goethita. A formação de Akaganeita, que não foi identificada nas amostras, ocorre em locais de alta concentração de cloretos, típico de atmosferas marinhas (Kenny et al, 1995). Cabe lembrar que nenhuma das estacas estava exposta à atmosfera industrial

5.5.4 Espectrometria por energia dispersiva (EDS)

Realizou-se a espectrometria por energia dispersiva (EDS) em 3 pontos de cada amostra, visando caracterizar o revestimento destas. Os gráficos e valores obtidos seguem abaixo.

Figura 51 - Dados obtidos no EDS da região de microanálise 1 da amostra 1

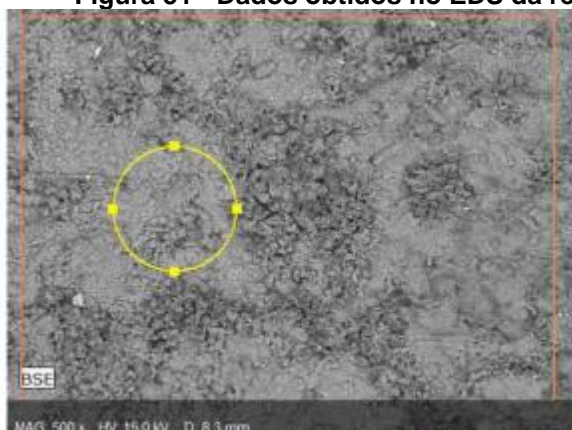


Figura 8a – Região de microanálise química semiquantitativa. Aumento 500x.

Fonte: Metalab (2019)

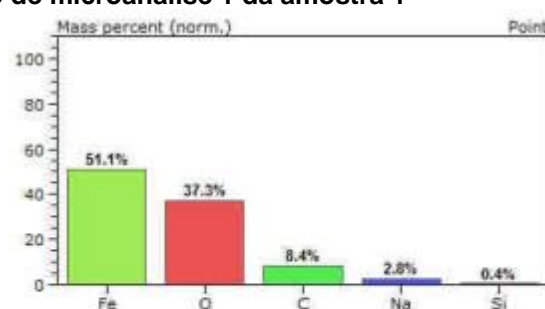


Figura 8b – Composição química semiquantitativa obtida.

Figura 52 - Dados obtidos no EDS da região de microanálise 2 da amostra 1

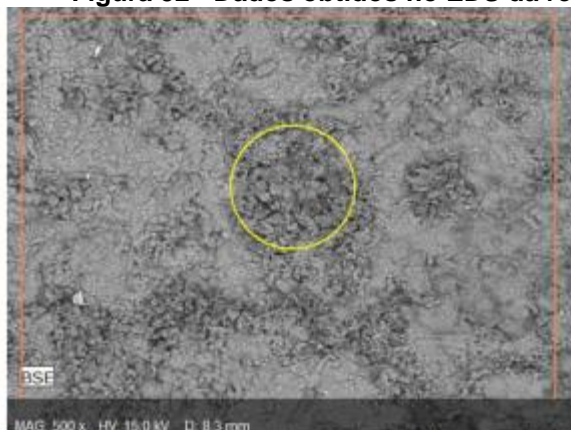


Figura 9a – Região de microanálise química semiquantitativa. Aumento 500x.

Fonte: Metalab (2019)

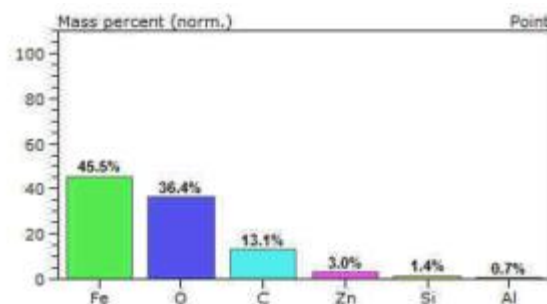


Figura 9b – Composição química semiquantitativa obtida.

Figura 53 - Dados obtidos no EDS da região de microanálise 3 da amostra 1



Figura 10a – Região de microanálise química semiquantitativa. Aumento 500x.

Fonte: Metalab (2019)

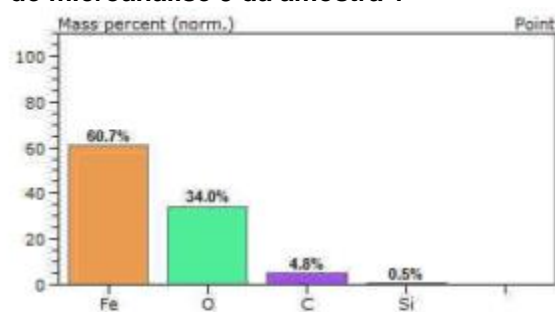


Figura 10b – Composição química semiquantitativa obtida.

Figura 54 - Dados obtidos no EDS da região de microanálise 1 da amostra 2

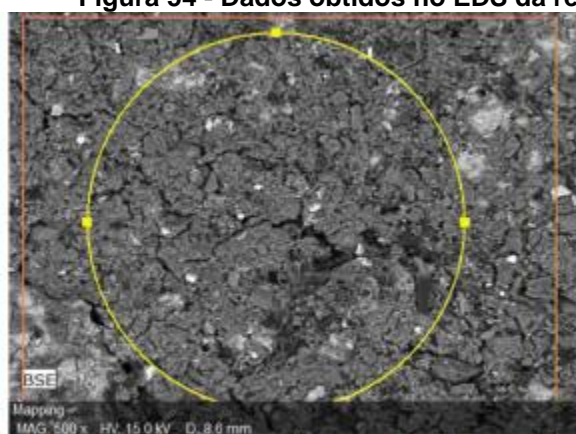


Figura 11a – Região de microanálise química semiquantitativa. Aumento 500x.

Fonte: Metalab (2019)

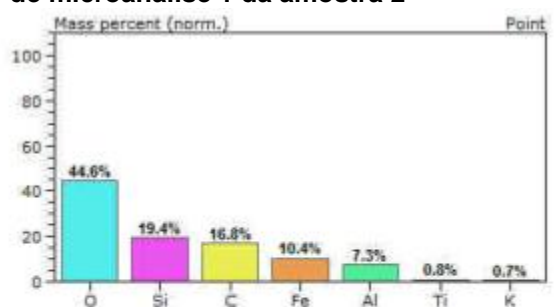


Figura 11b – Composição química semiquantitativa obtida.

Figura 55 - Dados obtidos no EDS da região de microanálise 2 da amostra 2

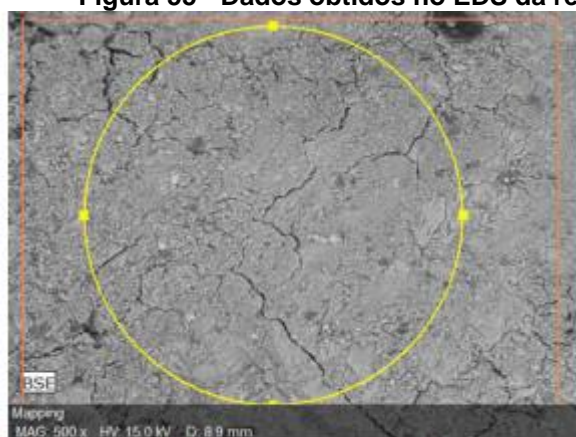


Figura 12a – Região de microanálise química semiquantitativa. Aumento 500x.

Fonte: Metalab (2019)

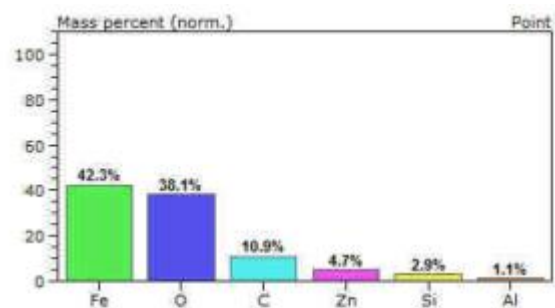


Figura 12b – Composição química semiquantitativa obtida.

Figura 56 - Dados obtidos no EDS da região de microanálise 3 da amostra 2

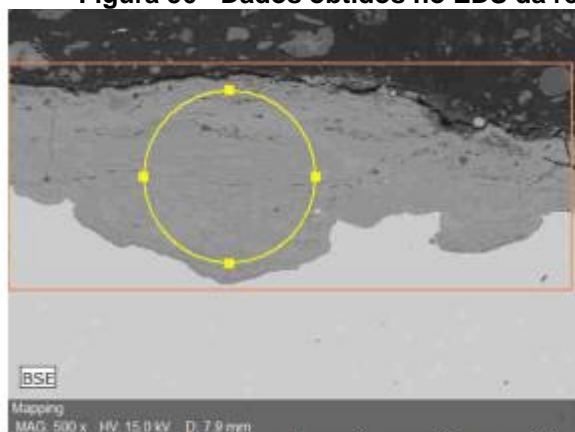


Figura 13a - Região de microanálise química semiquantitativa. Aumento 500x.

Fonte: Metalab (2019)

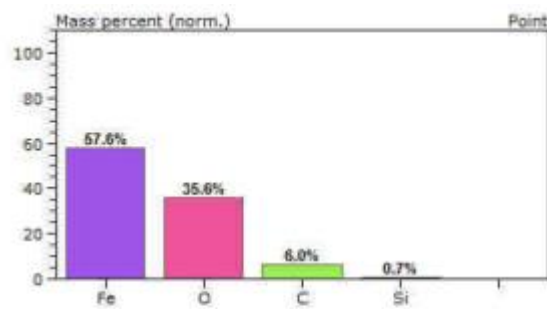


Figura 13b - Composição química semiquantitativa obtida.

Figura 57 - Dados obtidos no EDS da região de microanálise 1 da amostra 3

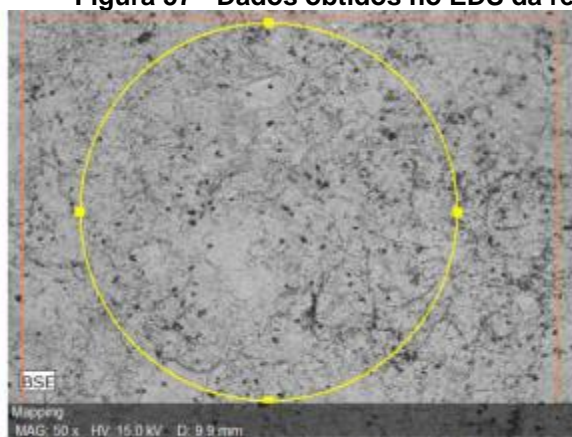


Figura 14a - Região de microanálise química semiquantitativa. Aumento 50x.

Fonte: Metalab (2019)

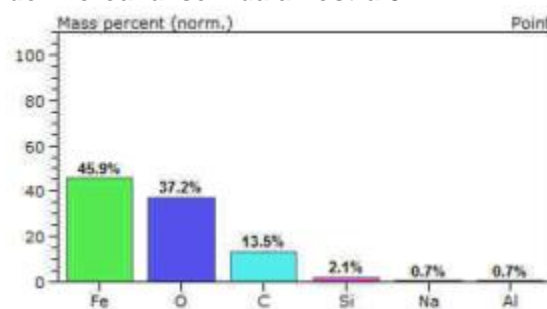


Figura 14b - Composição química semiquantitativa obtida.

Figura 58 - Dados obtidos no EDS da região de microanálise 2 da amostra 3

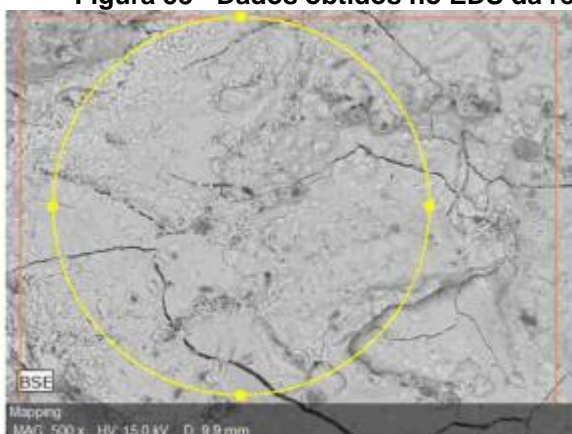


Figura 15a - Região de microanálise química semiquantitativa. Aumento 500x.

Fonte: Metalab (2019)

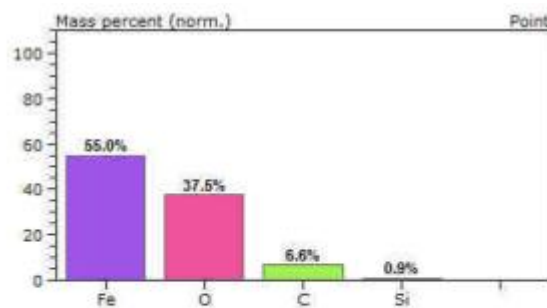


Figura 15b - Composição química semiquantitativa obtida.

Figura 59 - Dados obtidos no EDS da região de microanálise 3 da amostra 3

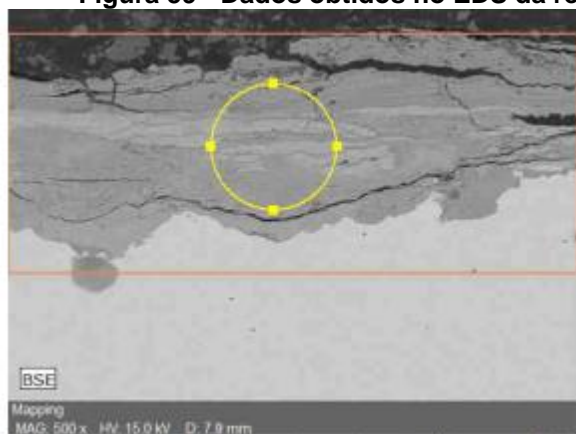


Figura 16a – Região de microanálise química semiquantitativa. Aumento 500x.

Fonte: Metalab (2019)

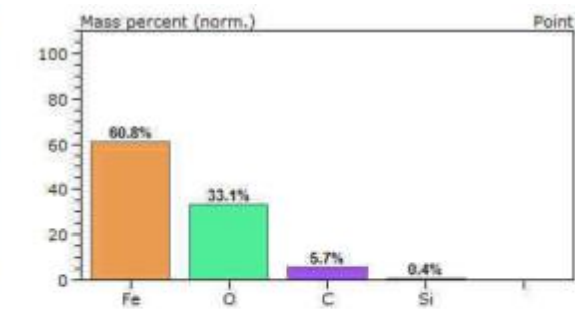


Figura 16b – Composição química semiquantitativa obtida.

Todas as amostras apresentaram a presença de Ferro, Oxigênio e Carbono como principais componentes, o que corresponde corretamente com os componentes que formam a pátina. Algumas amostras apresentaram além destes elementos químicos o Silício, Zinco, Sódio e Alumínio, em quantidade muito pequena. Destes é possível explicar preliminarmente somente a presença do zinco, uma vez que a peça em contato com a estaca metálica no local onde foi retirada a amostra possui proteção por galvanização. Parte do Zinco da galvanização pode ter se depositado sobre peça de aço patinável.

6 CONCLUSÃO

Conforme relatado no desenvolvimento deste trabalho, não se identificou a influência individual entre das grandezas levantadas em campo ou obtidas em laboratório, sejam elas pH, resistividade, teor de cloretos ou umidade do solo e a corrosão das estacas,.

Da mesma maneira, ao consolidar os valores encontrados, não se identificou a relação entre a combinação das grandezas e a presença de corrosão. No entanto, é necessário lembrar que as propriedades estudadas neste trabalho representam cerca de 50% das considerações feitas na Tabela 11. Outras grandezas podem influenciar no nível de corrosão de aços em contato com o solo e que não foram objeto deste trabalho, sejam elas potencial de oxi-redução, teor de ions de enxofre e dióxido de enxofre (SO₂) no solo ou ainda, a granulometria deste.

A formação da película passivadora depende da exposição do aço patinável ao ar atmosférico. Isto porque a formação da pátina é provocada pela reação do cobre, presente no aço patinável, com o enxofre, presente no SO₂. Esta reação forma sulfatos de baixa solubilidade, precipitando nos poros da camada de óxido, provocando então a diminuição da porosidade da película e impedindo que o oxigênio continue reagindo com o ferro.

Como a reação citada acima ocorre em ciclos de umedecimento e secagem, além da necessidade da presença de SO₂, que é um gás presente na atmosfera, a literatura não indica a utilização do aço patinável em locais de transição solo-ar, muito menos em locais totalmente submersos ou subterrâneos.

Diante do exposto, uma justificativa para a presença de corrosão nas peças de aço patinável seja justamente pelo fato da estaca ser utilizada enterrada no solo, além de parte dela estar na área de transição solo-ar, as duas situações não indicadas na literatura para este tipo de aço.

É de suma importância que monitorem-se as estacas na situação estudada, principalmente quanto a perda de massa ocasionada pela corrosão, estando em constante análise sobre seu efeito na resistência mecânica da peça.

Tendo em vista as vantagens na utilização da técnica de cravação das estacas helicoidais, sugere-se que a mesma não seja abandonada, buscando outros tipos de aço para confecção das peças metálicas ou ainda verificar a possibilidade de utilização de eletrodos de sacrifício.

Sabe-se que na região em estudo se aplicou estacas de aço galvanizado em outra linha de transmissão, onde se identificou não haver corrosão.

7 SUGESTÃO PARA OUTROS TRABALHOS

Pode-se dizer que o assunto abordado neste trabalho é muito amplo, pela própria natureza e complexidade do tema corrosão. Diversos fatores podem influenciar para a existência de perda de massa metálica por conta de reação química, sendo que alguns deles foram abordados aqui.

Sendo assim, sugere-se que outros trabalhos sejam desenvolvidos sobre o tema, como por exemplo, avaliação do comportamento das estacas helicoidais de aço patinável em outras regiões, que apresentem solos de características diferentes, uma vez que a região analisada neste trabalho foi predominantemente arenosa, conforme análise tátil-visual.

Como este trabalho concentrou-se somente na análise de resistividade, pH, teor de cloreto e umidade do solo, sugere-se realizar outros estudos contemplando, além destas grandezas, outros fatores causadores de corrosão, como presença de sulfatos (SO_4^{-2}), íons de enxofre (S^{-2}) e potencial redox do solo.

Sugere-se ainda estudar a influência de cada fator isoladamente, utilizando simulação em laboratório.

A retirada da subjetividade na medição do grau de corrosão das estacas também é importante, sugerindo-se então estudos de caso onde a medição do grau de corrosão seja por um método numérico, como área afetada pela corrosão ou percentual da perda de massa da peça, por exemplo.

Outro tema a ser estudado é a corrosão em fundações metálicas em aço patinável provocada por corrente de fuga em torres de linhas de transmissão.

Diante da vantagem econômica em se utilizar o método de aplicação das estacas helicoidais, sugere-se ainda pesquisar sobre comportamento de estacas galvanizadas instaladas em outras linhas de transmissão.

Ainda, uma possibilidade de estudos seria verificar o comportamento das estacas de aço patinável mediante pintura de proteção contra corrosão

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/geracao-distribuida-ultrapassa-20-mil-conexoes/656877. Acesso em 27 out 2018 (2018a)

_____. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>. Acesso em: 27 out. 2018 (2018b)

ASCHCAR, R. **Recomendações e informações técnicas sobre fundações de linhas de transmissão**. 8º Encontro Regional Latino Americano da Cigré. Ciudad Del Iest, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS. **Corrosão e tratamento superficial dos metais**. São Paulo, 1971.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7117**: Medição da resistividade e determinação da estratificação do solo. Rio de Janeiro, 2012a.

_____. **NBR16097**: Solo - Determinação do teor de umidade — Métodos expeditos de ensaio. Rio de Janeiro, 2012b.

_____. **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 6211**: Corrosão atmosférica - Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 5008**: Bobinas e chapas grossas laminadas a quente de aço baixa liga, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5920**: Bobinas e chapas finas laminadas a frio, de aços de baixa liga e alta resistência, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural — Requisitos e ensaios. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 5921**: Bobinas e chapas finas laminadas a quente, de aços de baixa liga e alta resistência, resistentes à corrosão atmosférica, para uso estrutural - Requisitos e ensaios. Rio de Janeiro, 2015.

____NBR 7007: Aço-carbono e microligados para barras e perfis laminados a quente para uso estrutural. Rio de Janeiro, 2016.

ASTM A242: **Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel.** EUA, 2018.

ASTM A588: **Standard Specification for High-Strength Low-Alloy Structural Steel, up to 50 ksi [345 MPa] Minimum Yield Point, with Atmospheric Corrosion Resistance.** EUA, 2019.

ASTM A 606: **Standard Specification for Steel, Sheet and Strip, High-Strength, Low-Alloy, Hot-Rolled and Cold-Rolled, with Improved Atmospheric Corrosion Resistance.** EUA, 2018.

ASTM A 709: Standard Specification for Structural Steel for Bridges. EUA, 2018.

AZEVEDO, Crystian P.B.; DINIZ, Sofia M.C. **Avaliação da confiabilidade de fundações de torres estaiadas em linhas de transmissão.** Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia/ Congresso Ibero Latino-Americano sobre Métodos Computacionais em Engenharia. Porto: Associação Portuguesa de Mecânica Teórica, Aplicada e Computacional, 2007

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Boletim Mensal de Monitoramento do Sistema Elétrico Brasileiro, maio 2018. Brasília, DF, 2018.

BRASIL. **Lei nº9.427 de 26 de dezembro de 1996.** Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1996. Disponível em http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9427cons.htm. Acessado em: 27 de abril de 2019.

CAMARGO, C. Celso de Brasil. **Transmissão de energia elétrica: aspectos fundamentais.** Florianópolis: Editora da UFSC, 2009.

CARVALHO, Igor P.G; **Estudo teórico-experimental da capacidade de carga à tração e compressão de estacas metálicas helicoidais.** Dissertação (Mestrado em engenharia de estruturas). Universidade Federal de Minas Gerais; Belo Horizonte, 2007.

COBURN, S.K.; KIM, Yong-Wu. **Weathering Steel**. Metals Handbook ASM International, Estados Unidos da América, volume 13, Corrosion, p.2406 a 2429, 1987.

COMINELI, Osvaldo. G. **Desenvolvimento de aço patinável com alto Cu, baixo Mn e melhor reciclabilidade de sucata**. In: 64º Congresso Anual da ABM, 2009, Belo Horizonte. Anais do 64º Congresso Anual da ABM, 2009.

DÍAZ MORA, N; CORONEL, N.; SILVA, J.M.;STECANELLA, M.B.; VELÁZQUEZ, E.C.; SHINYA, O.N. **Diagnostico da corrosão de estruturas metálicas nas torres da linha de transmissão de alta tensão Acaray-Oviedo**. XII ERIAC – Encontro Regional Ibero-Americano do CIGRÉ. Cigré, Fóz do Iguaçu, 2007.

DONAGEMA, Guilherme K.; CAMPOS, David V.B. de; CALDERANO, Sebastião B.; TEIXEIRA, Wenceslau G.; VIANA, João H.M. **Manual de Métodos de Análise de Solo, 2ª edição revista**. EMBRAPA SOLOS. Rio de Janeiro, 2011.

DUTRA, Aldo. D.; NUNES, Laerce de P.: **Proteção catódica: técnica de combate à corrosão**. Rio de Janeiro: JR Editora técnica, 1987.

ELETROSUL. Lista de construção. Desenho ELETROSUL. Lista de construção. Desenho LSL1-7840-011. ELETROSUL, 1978.

_____. Lista de construção. Desenho L115-5102-A3. Fluxo Engenharia. 2013a.

_____. Lista de materiais. Desenhos L114-3113-A4. SAE Towers, 2013b

_____. Lista de materiais. Desenho L114-3540-A4 Brametal, 2013c.

EMBRAPA. Laboratório de Agrometeorologia. Disponível em <http://agromet.cpact.embrapa.br/>. Acesso em 12 out 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2017**. Brasília: EPE, 2017.

FARIA, Adão. V. **Avaliação do desempenho frente à corrosão atmosférica dos aços USI-SAC-41 e USI-SAC-300 em atmosferas industrial e marinha**. Dissertação (mestrado em engenharia de metalurgia e de minas). Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

FERRAZ, Henrique. **O Aço na Construção Civil**. Revista Eletrônica de Ciências nº22, outubro a dezembro 2003. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

FUCHS, Rubens D.; ALMEIDA, Marcio T.de; **Projetos mecânicos das linhas aéreas de transmissão**. Editora Edgar Blucher. São Paulo, 1982.

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

GOES Jr, Enock José A.;ROEDER, Jakson S.;SILVA, Jonatas G. da. **Determinação condutométrica de cloridrato de tetraciclina em formulações farmacêuticas**. Quim. Nova, Vol. 40, Nº 8, 952-956. Universidade Católica de Brasília. Brasília, 2017.

GOLDEMBERG, José. **Energia e desenvolvimento**. Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo, vol. 12, nº 33. São Paulo, Maio/Agosto 1998.

GRIFFIN, Richard B. **Marine atmospheres**. Metals Handbook ASM International, Estados Unidos da América, volume 13, Corrosion, p.2406 a 2429, 1987.

GUTIÉRREZ-KLINSKY, Gelafito E. **Uma contribuição ao estudo das pontes em vigas mistas**. Dissertação (Mestrado em engenharia de estruturas) Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

HOEL, Paul G. **Estatística Elementar**. Editora Atlas S.A. São Paulo, 1981.

KENNY, Elaine D.; GRYNGLAS, Miriam; CLARO, Zuleika M.P.T.; PINTO, José A.Q.; SILVA, Mitiko K. da; SILVA, José R.A.; KONISHI, Roberto; WANDERLEY, Vanda G.; CAVALCANTI, Eduardo H.; MARCONDES, Ligia; PANOSSIAN, Zehbour; ABOUD, Jorge R.; ARAÚJO, Marcelo M.de; FRAGATA, Fernando de L.; ALMEIDA, Maria J.B.S.de. **Corrosão atmosférica do aço patinável em atmosferas brasileiras**. In: Congresso Brasileiro de Corrosão, 1995, Rio de Janeiro: ABRACO. 1995. v. 1, p. 1-16.

LEITE, Leandro A.S. **Estudo da corrosão de aços-carbono e patinável durante 39 meses de exposição em ambiente marinho-industrial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2007.

KOSOW, Irving L. **Máquinas elétricas e transformadores**. Porto Alegre: Globo,1982.

LUTENEGGER, Alan J. **Historical Development of Iron Screw-Pile Foundations: 1836–1900**. International Journal for the history of engineering and technology, vol 81. Massachusetts, 2011.

Mathay, W. L. **Uncoated Weathering Steel Bridges**. Highway Structures Design Handbook, Vol. 1, American Institute of Steel Construction, Pittsburg, 1993, Chapter 9.

MAMEDI FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

MARTH, Jonathan Duarte; KOESTER, Edinei; ARNDT, Arthur Lacerda. **Mapa Geológico-Geomorfológico do Município de Pelotas-RS**. XII Congresso de iniciação científica. Pelotas, 2008.

MENDONÇA, Cecília.; BARROS, Rui. C. de. **Dimensionamento de estacas helicoidais para fundações de painéis fotovoltaicos**. 2º Congresso Luso-Africano de Construção Metálica Sustentável. Maputo, Moçambique, 2018.

MORENO, J.A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Secção de Geografia. Secretaria da Agricultura. Porto Alegre, 1961.

MUKAKA, M.M. **A guide to appropriate use of Correlation coefficient in medical research**. Malawi medical Journal. Blantyre, 2012.

MURATA, T. Weathering steel. Uhlig's Corrosion Handbook. J. Wiley & Sons. Nova Iorque, 2000.

NCHRP REPORT 272. **Performance of weathering steel in bridges**. National Cooperative highway research program. Report 272. Maryland, 1984.

PANNONI, Fábio D. ; ROCHA, Hélio R.; BRETAS, Dirceu ; MARCONDES, Lígia . **Investigação da corrosão de um aço carbono e de um aço patinável submetidos à diferentes condições ambientais**. 48º Congresso Anual da ABM no Rio de Janeiro. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1993. v. 1. p. 135-154.

PANNONI, Fábio D.. **História, comportamento e usos dos aços patináveis na engenharia estrutural brasileira**. In: 59º Congresso Anual da ABM - Internacional, 2004, São Paulo. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2004. p. 678-689.

PERKO, Howard A. **Helical piles: a practical guide to design and installation**. Nova Jersey, 2009.

POHLMAN, Steven L. General corrosion. Metals Handbook ASM International, Estados Unidos da América, volume 13, Corrosion, p.177 a 194, 1987.

RAMANATHAN, Lalgudi.V. **Corrosão e seu controle**. Hemus Editora, São Paulo, 1989.

SAADAT, Hadi. Power system analysis. Nova Iorque. The McGraw-Hill companies.1999.

SANTOS FILHO, João .M.S.M dos. **Efeito da instalação de estacas helicoidais em solo tropical**. Dissertação (mestrado em geotecnia). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

SCHMITT, G.; SCHÜTZE, M.; HAYS, G.F.; BURNS, W.; HAN, E.H.; POURBAIX, A.; JACOBSON, G. **Global needs for knowledge dissemination, Research, and development in materials deterioration and corrosion control**. The World corrosion organization. Maio de 2009.

SERRA, Eduardo T. **Corrosão e proteção anticorrosiva dos metais no solo**. Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – CEPEL. Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, Bruno O da. **Estimativa do torque de instalação de fundações por estacas helicoidais por meio de resultados de ensaio de SPT**. Dissertação (mestrado em ciências). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

SLATER, John E. **Corrosion in structures**. Metals Handbook ASM International, Estados Unidos da América, volume 13, Corrosion, p.2406 a 2429, 1987.

TOLMASQUIM, Mauricio T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. Empresa de Pesquisa Energética: Rio de Janeiro, 2016.

TRAVASSOS, S.J.; MOURA, M.R.; SANTOS, J.V.; ALMEIDA, M.B.; TOMACHUCK, C.R; DE MELO, H.G. **Medidas de espessuras por indução magnética da camada de ferrugem em aços patináveis expostos à atmosfera de São Paulo**. 23º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Foz do Iguaçu, 2018

UFSM. **Museu de solos do Rio Grande do Sul**. <http://w3.ufsm.br/msrs/index.php/explore/solos/136-um-pelotas>. Acessado em 19/12/2019.

VELOZO, Liliane T. **Metodização do Estudo das Fundações para Suportes de Linhas de Transmissão**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

VERCON. **Plano de inspeção e controle de qualidade, PICQ 001/12/388**. Belo Horizonte, 2012.

**APENDICE A - Determinação de umidade residual para medição de
teor de cloreto**

Amostra	Cápsula	Peso úmido + cápsula (g)	Peso seco + cápsula (g)	Peso cápsula (g)	Peso água (g)	Peso seco (g)	Umidade residual %
1	1n	50,05	48,23	18,77	1,82	29,46	6,19
1	7n	46,64	44,84	17,55	1,80	27,29	6,59
1	4n	49,68	47,67	17,27	2,01	30,40	6,60
2	5n	47,25	46,89	18,79	0,36	28,10	1,29
2	2n	47,19	47,02	18,41	0,17	28,61	0,60
2	3n	46,35	46,00	17,95	0,35	28,05	1,24
3	6n	46,67	43,09	17,46	3,57	25,63	13,93
3	19n	51,45	47,33	16,73	4,12	30,60	13,46
3	8n	49,34	45,45	18,80	3,90	26,65	14,62
4	9n	46,84	44,88	18,86	1,96	26,03	7,53
4	10n	42,87	41,02	17,38	1,84	23,64	7,80
4	11n	46,44	44,41	18,14	2,04	26,27	7,75
5	12n	46,59	45,83	17,14	0,76	28,70	2,64
5	15n	46,82	46,11	17,89	0,71	28,22	2,53
5	14n	47,53	46,76	17,64	0,77	29,12	2,63
6	9	46,61	45,49	16,93	1,13	28,56	3,94
6	42	46,13	45,03	17,13	1,10	27,90	3,94
6	19	49,39	48,27	19,95	1,12	28,32	3,94
7	8	47,93	45,83	17,36	2,10	28,47	7,37
7	33	48,92	46,78	18,43	2,14	28,35	7,57
7	36	49,44	47,33	19,39	2,11	27,94	7,56
8	18	47,76	45,42	18,82	2,34	26,60	8,80
8	30	47,63	45,36	19,19	2,27	26,16	8,68
8	44	46,92	44,50	18,01	2,42	26,49	9,14
9	38	46,76	45,35	18,43	1,41	26,92	5,25
9	11	48,36	46,83	17,57	1,54	29,26	5,25
9	34	46,53	45,06	18,78	1,47	26,28	5,58
10	4	46,23	44,60	18,83	1,63	25,77	6,34
10	47	46,06	44,37	17,45	1,69	26,92	6,27
10	12	46,99	45,21	16,33	1,78	28,89	6,16
11	16	48,81	47,51	18,98	1,30	28,53	4,55
11	2	49,71	48,40	19,63	1,30	28,77	4,53
11	27	48,24	46,98	19,11	1,26	27,87	4,54
12	25	48,90	46,30	18,05	2,60	28,25	9,20
12	14	48,67	46,10	17,44	2,57	28,66	8,96
12	41	47,71	45,40	19,83	2,31	25,56	9,04

Fonte: Autor (2019)

APENDICE B - Umidade residual média para medição de teor de cloreto

Tabela 35 – Umidade residual média

Amostra	umidade média (%)
1	6,46
2	1,04
3	14,01
4	7,69
5	2,60
6	3,94
7	7,50
8	8,87
9	5,36
10	6,25
11	4,54
12	9,07

Fonte: Autor (2019)

APENDICE C – Peso de solo úmido equivalente para medição de teor de cloreto

Amostra	Peso úmido equivalente ao seco (g)
1	212,92
2	202,08
3	228,01
4	215,38
5	205,20
6	207,88
7	215,00
8	217,75
9	210,71
10	212,51
11	209,08
12	218,14

Fonte: autor (2019)

APENDICE D – Volume de água adicionada para medição de teor de cloreto

Amostra	Volume de água adicionada (ml)
1	987
2	998
3	972
4	985
5	995
6	992
7	985
8	982
9	989
10	987
11	991
12	982

Fonte: autor (2019)