



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

RUI SÉRGIO MONTEIRO MEDEIROS

ESTUDO DOS MATERIAIS METÁLICOS CONSTITUINTES NA CADEIA DE  
ISOLADORES ELÉTRICOS EM AMBIENTES AGRESIVOS

BELÉM - PARÁ

2017

RUI SÉRGIO MONTEIRO MEDEIROS

ESTUDO DOS MATERIAIS METÁLICOS CONSTITUINTES NA CADEIA DE  
ISOLADORES ELÉTRICOS EM AMBIENTES AGRESIVOS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial do Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial na Área de Materiais e Metalurgia.

**Orientador:** Prof. Dr. José Carlos de Araújo Filho

BELÉM - PARÁ

2017

#### FICHA CATALOGRÁFICA

Obs: Os detalhes de como fazer essa ficha serão fornecidos individualmente, na Biblioteca Central da UFPA. O cursista deve procurar a bibliotecária quando terminar todo o texto da monografia. Lá irá obter o número/registro CDU

**RUI SÉRGIO MONTEIRO MEDEIROS**

**ESTUDO DOS MATERIAIS METÁLICOS CONSTITUINTES NA CADEIA DE  
ISOLADORES ELÉTRICOS EM AMBIENTES AGRESIVOS**

Dissertação apresentada para obtenção do grau de  
Mestre em Engenharia Industrial, Instituto de  
Tecnologia, Universidade Federal do Pará.

**Área de Concentração:** Materiais e Metalurgia.

**Linha de Pesquisa:** Materiais Metálicos e  
Caracterização.

Aprovada em        de        de

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. José Carlos de Araujo Cardoso Filho  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Antonio Adelmo Freire Beserra  
(Membro)

---

Prof. Dr. Davi do Socorro Barros Brasil  
(Membro)

BELÉM - PARÁ

2017

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus, aos meus pais (in Memoriam) pela educação recebida na minha adolescência, minha família, esposa, filhos, irmãos, amigos e a todos que tornaram possíveis a concretização deste trabalho.

Deus, com todo seu amor e sua imensa misericórdia que hoje nós estamos aqui, por me proporcionar esta oportunidade e a sabedoria necessárias para alcançar meus objetivos.

Ao Prof. Dr. José Maria do Vale Quaresma pelo apoio, durante a realização deste trabalho. E a todos os professores do Mestrado Profissional.

Ao Prof. Dr. José Carlos Cardoso Filho pela orientação e desenvolvimento desta pesquisa.

A todos os meus amigos que conheci no curso de Pós-Graduação Profissional em Engenharia Industrial, em especial gostaria de agradecer a Viviane do Socorro da Costa pelo apoio e incentivo. Aos colegas e amigos de trabalho Regina do Socorro Melo Amaral e Leonardo Oliveira pela convivência e por toda a amizade e companheirismo.

A amiga Msc. Kelly Jacqueline Campos Brambilla pelo apoio, incentivo e amizade.

“A crítica dos outros só poderá trazer-lhe  
prejuízo se você consentir”

Emmanuel – Chico Xavier

## RESUMO

A extensão da costa brasileira aumenta a degradação dos materiais pelas condições de temperatura média e umidade relativa bem mais elevada do que nas outras regiões, principalmente, se forem consideradas as áreas litorâneas do Norte e Nordeste do Brasil e este trabalho teve como resultados os efeitos da corrosão em metais e a perda de massa sobre os isoladores e obteve valores que permitam determinar a taxa de corrosão em instalações da Eletrobrás/Eltronorte. Assim como os efeitos da poluição industrial e salinidade pelo (mecanismo de difusão/degradação) sobre o material dielétrico, que será o aço carbono SAE 1020, revestimento de zinco (galvanização por imersão a quente), com isolador de vidro que são utilizados nas linhas de transmissão no sentido de minimizar efeitos da corrosão e possíveis falhas em isoladores ampliando a vida útil dos materiais estudados. Nos sistemas de pintura não houve destaques entre os esquemas L3 e L5 nas duas áreas estudadas ocorrendo a diminuição gradual dos valores ao longo do tempo. Observou-se também que a taxa de corrosão entre as ECAS SEVC e SLII estudadas não teve grandes diferenças sendo assim classificadas como ambientes de baixa e média agressividade ambiental respectivamente. Nas placas de Aço galvanizados com 100 $\mu$  e 50 $\mu$  obtiveram valores próximos e baixos isto conferindo excelente proteção aos CP's. Portanto o Aço galvanizado apresenta melhor desempenho e aplicabilidades dando bom revestimento e resistência a corrosão em longos períodos de exposição. A lama vermelha carreada pelo vento aderente aos isoladores não promove nenhum tipo de processo corrosivo acelerado a estas estruturas, pois a mesma não constitui óxidos corrosivos.

**Palavras-chave:** Falhas em isoladores; corrosão metálica, taxa de corrosão, aço carbono, revestimento de zinco, galvanização.

## ABSTRACT

The extension of the Brazilian coast increases the degradation of the materials by the conditions of average temperature and relative humidity much higher than in the other regions, especially if the coastal areas of the North and Northeast of Brazil are considered and this work had the effects of the corrosion in metals and the loss of mass on the insulators and obtained values that allow to determine the rate of corrosion in Eletrobras / Eletronorte installations. As well as the effects of industrial pollution and salinity by the (diffusion / degradation mechanism) on the dielectric material, which will be SAE 1020 carbon steel, zinc plating (hot dip galvanizing) with glass insulator which are used in the lines of transmission in order to minimize corrosion effects and possible faults in insulators extending the useful life of the studied materials. In the painting systems there were no highlights between the L3 and L5 schemes in the two areas studied, with the gradual decrease of the values over time. It was also observed that the corrosion rate between the SEVC and SLII ECAS studied did not have great differences and were thus classified as environments of low and medium environmental aggressiveness respectively. In the galvanized steel plates with 100 $\mu$  and 50 $\mu$  obtained close and low values this conferring excellent protection to the CPs. Therefore galvanized steel presents better performance and applicability giving good coating and resistance to corrosion in long periods of exposure. The red mud carried by the wind adhering to the insulators does not promote any type of accelerated corrosive process to these structures, since it does not constitute corrosive oxides.

**Keywords:** Insulator failures; corrosion rate, corrosion rate, carbon steel, zinc coating, galvanizing.



## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1:</b> As áreas de estudo e as cidades de Belém-PA, Barcarena e São Luis.....	15
<b>Figura 2:</b> Subestação de Vila do Conde em Barcarena. (a) Influência do complexo da Albrás-Alunorte, (b) Atmosfera costeira e industrial. ....	16
<b>Figura 3:</b> Subestação de Pedrinhas II em São Luís-MA (a) São Luís-MA, (b) Influência do Complexo Alumar, (c) Atmosfera Marinha e Industrial. ....	17
<b>Figura 4:</b> Parâmetros climáticos de Barcarena - PA (a) Precipitação mensal, (b) Temperatura mensal.....	19
<b>Figura 5:</b> Parâmetros climáticos de São Luís - MA, (a) Precipitação mensal, (b) Temperatura mensal.....	20
<b>Figura 6:</b> Esquema representando as principais reações anódicas e catódicas de uma célula de corrosão. ....	22
<b>Figura 7:</b> Tabela de Soluções utilizadas para preparo e limpeza, antes e após ensaio de intemperismo artificial nos corpos de prova, CPs. ....	36
<b>Figura 8:</b> Placas secando em uma capela. ....	36
<b>Figura 9:</b> Balança analítica utilizada na pesagem.....	36
<b>Figura 10:</b> Placas prontas acondicionadas.....	37
<b>Figura 11:</b> Localização georreferenciada e a própria ECA SEVC. Nos pontos C1 a C4 estão instalados os cupons cilíndricos de aço carbono 1020 para a determinação da taxa de corrosão. ....	38
<b>Figura 12:</b> Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, instalados no painel ECA SEVC, no dia 03/09/2013.....	39
<b>Figura 13:</b> Tabela com os corpos de prova de aço galvanizado 50 $\mu$ m, instalados no painel ECA SEVC, no dia 03/09/2013.....	39
<b>Figura 14:</b> Tabela com os corpos de prova de aço galvanizado 100 $\mu$ m, instalados no painel ECA SEVC, no dia 03/09/2013.....	40
<b>Figura 15:</b> Tabela com os corpos de prova com sistemas de pintura utilizados pela ELETRONORTE, esquema L3, com Branco Munsell – N 9.5 (ITM – 1209).....	41
<b>Figura 16:</b> Tabela com os corpos de prova com sistemas de pintura utilizados pela ELETRONORTE, esquema L5, com Branco Munsell – N 9.5 (ITM – 1209).....	41
<b>Figura 17:</b> Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com 2 esquemas de pintura utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's, SEVC, no dia 03/09/2013. ....	41

<b>Figura 18:</b> Localização geográfica de instalação dos cupons cilíndricos de aço carbono 1020 na ECA SEVC: pontos C1, C2, C3 e C4.....	42
<b>Figura 19:</b> Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, forma de cupons cilíndricos, na SEVC, no dia 03/09/2013. ....	43
<b>Figura 20:</b> Localização georreferenciada (2° 42' 59" S; 44° 19' 2" O) e a própria ECA SESLII. ....	43
<b>Figura 21:</b> Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, instalados no painel ECA SESLII, no dia 04/09/2013. ....	44
<b>Figura 22:</b> Tabela com os corpos de prova de aço galvanizado 50 µm, instalados no painel ECA SESLII, no dia 04/09/2013. ....	44
<b>Figura 23:</b> Tabela com os corpos de prova de aço galvanizado 100 µm, instalados no painel ECA SESLII, no dia 04/09/2013. ....	45
<b>Figura 24:</b> Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com 2 esquemas de pintura utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's SESLII, no dia 04/09/2013. ....	46
<b>Figura 25:</b> Localização geográfica de instalação dos cupons cilíndricos de aço carbono 1020 na ECA SESLII. ....	47
<b>Figura 26:</b> Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, forma de cupons cilíndricos, na SESLII, no dia 04/09/2013. ....	47
<b>Figura 27:</b> Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com 2 esquemas de pintura utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's SEVC, no dia 03/09/2013. ....	49
<b>Figura 28:</b> Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com esquema de pintura L5 utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's SEVC, durante o período de estudo.....	50
<b>Figura 29:</b> Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com esquema de pintura L3 utilizada pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's, SEVC, durante o período de estudo.....	50
<b>Figura 30:</b> Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com 2 esquemas de pintura utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's, SESLII, no dia 04/09/2013. ....	51
<b>Figura 31:</b> Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com esquema de pintura L3 utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's, SESLII, durante o período de estudo.....	51

<b>Figura 32:</b> Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com esquema de pintura L5 utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's SESLII, durante o período de estudo.....	52
<b>Figura 33:</b> Gráficos ilustrando a variação percentual do brilho das tintas (graus) dos CP's metálicos instalados na ECA VC e SLII, em função do tempo de exposição ao intemperismo natural. ....	52
<b>Figura 34:</b> Placas de aço carbono 1020 antes da limpeza química (esquerda) e depois da limpeza química (direita) realizada no laboratório de corrosão da ELETRONORTE.....	53
<b>Figura 35:</b> Valores para a constante K. ....	54
<b>Figura 36:</b> Tabela com as taxas de corrosão e categorias de corrosividade atmosférica para o aço carbono nas ECA's VC e SLII. ....	55
<b>Figura 37:</b> Tabela com as taxas de corrosão e categoria da corrosividade atmosférica para o aço galvanizado 100 $\mu\text{m}$ . ....	55
<b>Figura 38:</b> Tabela com as taxas de corrosão e categoria da corrosividade atmosférica para o aço galvanizado 50 $\mu\text{m}$ . ....	56
<b>Figura 39:</b> Figura 16 Taxas de corrosão dos metais aço carbono, aço galvanizado de recobrimento 100 e 50 $\mu\text{m}$ , instalados nas ECA's VC e SLII nos distintos períodos de análise. ....	56
<b>Figura 40:</b> Taxa de corrosão do aço carbono instalado nas ECA's VC e SLII nos distintos períodos de análise.....	57
<b>Figura 41:</b> Taxas de corrosão dos aços galvanizados de recobrimento 100 e 50 $\mu\text{m}$ , instalados nas ECA's VC e SLII nos distintos períodos de análise.....	57
<b>Figura 42:</b> Lagoa de deposição de lama vermelha da ALUMAR – Ilha de São Luís – Maranhão .....	58
<b>Figura 43:</b> Tabela com os constituintes do Resíduo de bauxita. ....	58
<b>Figura 44:</b> Imagem dos cupons de aço carbono antes da limpeza química (esquerda) e após a limpeza química (direita).....	59
<b>Figura 45:</b> Tabela com as taxas de corrosão e categorias de corrosividade atmosférica para os corpos de prova de aço carbono 1020, em forma cilíndrica na ECA SLII.....	60
<b>Figura 46:</b> Tabela com as taxas de corrosão e categorias de corrosividade atmosférica para os corpos de prova de aço carbono 1020, em forma cilíndrica na ECA VC.....	61
<b>Figura 47:</b> Taxas de corrosão dos cupons instalados nas ECA's VC e SLII nos distintos períodos de análise.....	62

<b>Figura 48:</b> Tabela com as temperaturas (C0), umidades (%) e velocidade do vento das ECA's de VC e SLII no período de setembro de 2013 até agosto de 2014. ....	63
<b>Figura 49:</b> Imagem da SE VC com as setas vermelhas identificando as direções do vento, norte e noroeste.....	64
<b>Figura 50:</b> Imagem da SE SLII com a seta vermelha identificando a direção do vento, nordeste.....	65

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
1.1. OBJETIVOS .....	14
1.1.1 Geral.....	14
1.1.2 Específicos .....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 ÁREAS DE ESTUDO.....	15
2.1.1 Subestação de Vila do Conde (SEVC):.....	16
2.1.2 Subestação de Pedrinhas II:.....	17
2.3 PRINCIPAIS ATIVIDADES ECONÔMICAS DAS REGIÕES DE ESTUDO .....	18
2.4 CLASSIFICAÇÕES CLIMÁTICAS .....	18
2.5 CORROSÃO.....	21
2.5.1 A célula de corrosão.....	22
2.6 CORROSÃO ATMOSFÉRICA.....	24
2.6.1 Tipos de atmosferas corrosivas .....	24
2.6.2 Mecanismo do processo de corrosão atmosférica.....	25
2.6.2.1 Umidade .....	26
2.6.2.2 Influência da distância do objeto em relação ao mar.....	27
2.6.2.3 Influência da ação dos ventos.....	27
2.6.2.4 Temperatura.....	28
2.6.2.5 Precipitação .....	28
2.6.2.6 Passivação de metais .....	29
2.6.2.7 Revestimento de proteção.....	29
2.7 TAXAS DE CORROSÃO NO BRASIL.....	31
2.8 CORROSÃO ATMOSFÉRICA DE METAIS ESTRUTURAIS.....	32
2.8.1 Corrosão atmosférica do aço carbono .....	32
2.8.2 Corrosão atmosférica do aço galvanizado.....	33
3 EXPERIMENTAL .....	35
3.1 MATERIAIS UTILIZADOS .....	35
3.2 PREPARO DOS CORPOS METÁLICOS.....	35
3.2.1 Placas Metálicas .....	35
3.2.2 Cupons.....	37
3.3 INSTALAÇÃO DOS CORPOS METÁLICOS .....	37

3.3.1 Instalações dos corpos de prova metálicos, na forma de placas, com e sem proteção inorgânica superficial, na SEVC. ....	38
3.3.2 Instalações dos corpos de prova metálicos, na forma de placas, com proteção orgânica superficial, pintura, na SEVC. ....	40
3.3.3 Instalações dos corpos de prova metálicos, na forma de cupons, na SEVC. ....	42
3.3.4 Instalações dos corpos de prova metálicos, na forma de placas, com e sem proteção inorgânica superficial, na SESLII. ....	43
3.3.5 Instalações dos corpos de prova metálicos, na forma de placas, com proteção orgânica superficial, pintura, na SESLII. ....	45
3.3.6 Instalações dos corpos de prova metálicos, na forma de cupons, na SELSII. ....	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	49
4.1 MEDIDAS DE BRILHO DOS ESQUEMAS DE PINTURA L3 E L5.....	49
4.2 INTEMPERISMO NATURAL.....	53
4.2.1 Taxas de corrosão do aço carbono exposto nas ECA's VC e SLII. ....	54
4.2.2 Taxas de corrosão do aço galvanizado exposto nas ECA's VC e SLII.....	55
4.3 ESTAÇÃO METEREOLÓGICA .....	62
4.3.1 Dados Meteorológicos.....	62
5 CONCLUSÕES .....	66
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
7 REFERÊNCIAS .....	68

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos têm-se observado uma expansão da tecnologia aplicada em isoladores de alta tensão (Isoladores de vidro) que têm passado por constantes aperfeiçoamentos, tanto em relação ao projeto quanto aos materiais empregados na sua fabricação.

A importância da atmosfera, como meio corrosivo, pode ser confirmada pelo grande número de publicações científicas relacionadas com ensaios de corrosão utilizando diferentes materiais metálicos e prolongados períodos de exposição, nos mais diferentes países (Yuantai M, Ying L, Fuhui W 2010). Esta atmosfera, por sua vez, também se tornou mais poluída e, conseqüentemente, mais agressiva aos materiais nela expostos, dada a quantidade incessante de gases, produtos e vapores químicos lançados diariamente à atmosfera, solo, meios fluviais e marítimos (Dong J, Han E, Ke H , 2007).

A existência desta variedade de projetos e materiais disponíveis torna difícil a tarefa de selecionar modelos para a aquisição e a aplicação em determinado ambiente e, também, dificulta a identificação de defeitos e das suas causas de falha quando instalados no sistema elétrico. Por esta razão, uma análise das potencialidades e dos defeitos associados às tecnologias de fabricação disponíveis no mercado de isoladores é de grande auxílio para o setor elétrico brasileiro.

Nesta pesquisa, foi proposto analisar o comportamento de materiais utilizados na linha de transmissão mediante: a) informações obtidas da literatura, b) desenvolvimento de ensaios e análises laboratoriais dos materiais submetidos a solicitações ambientais distintas, partindo de ambientes amenos (ambientes secos, com pouca umidade) até os de alta agressividade (com alta umidade, poluentes industriais e névoa salina) e c) a montagem de estações e a avaliação do grau de corrosividade em campo por meio de técnicas não destrutivas e de inspeção.

Com a implantação de técnicas não destrutivas e de inspeção instrumental pretende-se localizar e caracterizar as falhas na superfície de isoladores da LT. Também, pretende-se com o referido estudo delinear, por parâmetros levantados nos testes em campo e em laboratório, os valores críticos de operacionalidade, de forma que sejam identificados os limites para a

manutenção, via lavagem ou outro processo de limpeza aplicado, pintura anti-corrosivas ou mesmo substituição das unidades sob falha.

A proposta deste estudo está no desempenho do material , que correlacionará a sua geometria com o adequado ambiente de utilização, seja ele rural, urbano, industrial ou litorâneo. Será baseado em pesquisas de laboratório e de campo. O estudo está na taxa de corrosão, bem como dos ambientes nos quais os isoladores operam, a fim de avaliar o seu desempenho . No estudo de campo está na montagem de estações de monitoramento que permitirão avaliar, por meio de perda de massa o desempenho do grau de severidade da poluição local.

Esta pesquisa é resultado da diminuição da vida útil de isoladores nas linhas de transmissão da SE Vila do Conde/PA e da Diretoria de Comercialização e Produção da Eletronorte para propor ações para aumentar a confiabilidade dos sistemas de transmissão, principalmente aqueles que utilizam isoladores, devido à ocorrência de desligamentos não programados envolvendo tais equipamentos. Tais desligamentos foram ocasionados por defeitos de fabricação ou por deficiência nas técnicas de inspeção atualmente utilizadas na empresa. A premissa para os estudos em Belém/PA, Vila do Conde/PA e São Luis/MA está correlacionada aos ambientes com alta taxa de salinidade litorânea, alta agressividade ambiental por poluentes industriais, comparativamente a um padrão de referência.

Vale ressaltar que a nova regulação do setor elétrico brasileiro, com o surgimento da parcela variável, impõe às concessionárias de energia elétrica ações que aumentem a confiabilidade dos sistemas de transmissão e reduzam os custos de operação. Além disso, o aumento do número de linhas de transmissão e a diminuição das equipes de manutenção obrigam as empresas a investir no desenvolvimento de novas pesquisas que auxiliem os profissionais na predição de falhas e, conseqüentemente, aumentem a disponibilidade tanto das linhas de transmissão como de seus ativos associados.



## 1.1. OBJETIVOS

### 1.1.1 Geral

Este trabalho objetiva analisar os efeitos da corrosão metálica e a perda de massa sobre os isoladores e uma metodologia para obtenção de valores que permitam determinar a taxa de corrosão em instalações da Eletrobrás/Eletronorte.

### 1.1.2 Específicos

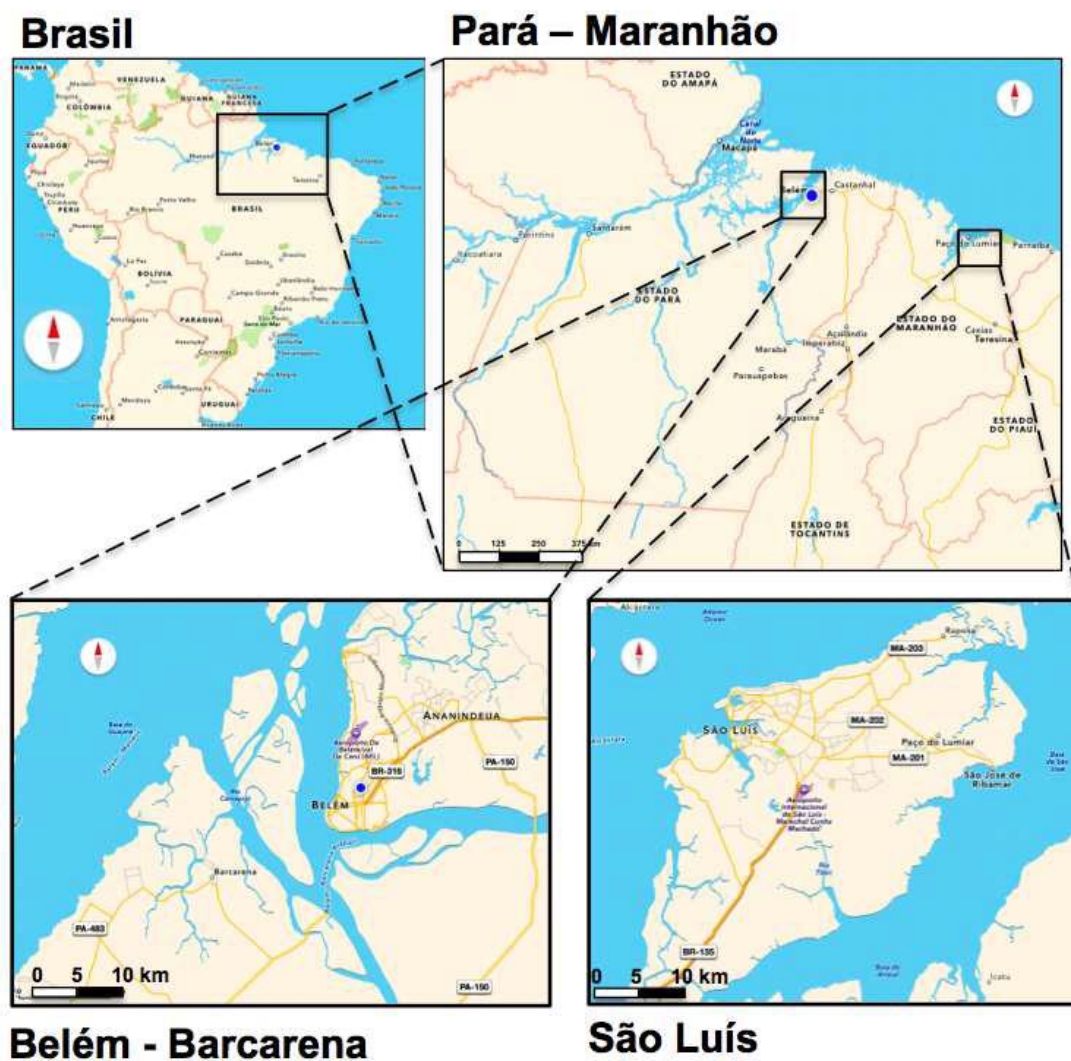
- Verificar a perda de massa sobre os materiais metálicos de aço carbono e galvanizado das Ecas instaladas.
- Analisar o desempenho do aço galvanizado e aço carbono nas estações de corrosividade atmosféricas (Ecas).
- Analisar o comportamento de materiais utilizados na linha de transmissão mediante a taxa de corrosão, bem como dos ambientes nos quais os isoladores operam, a fim de avaliar o seu desempenho .

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 ÁREAS DE ESTUDO

As áreas de estudo são as subestações Vila do Conde (SEVC), em Barcarena - PA e em São Luís - MA (SESL II) figura 1, que abrangem respectivamente ambientes urbano, industrial e industrial-marinho.

**Figura 1:** As áreas de estudo e as cidades de Belém-PA, Barcarena e São Luís.



Fonte: Google Earth (2015).

### 2.1.1 Subestação de Vila do Conde (SEVC):

Está localizada na área urbana de Barcarena - PA cidade situada na margem direita do rio Pará, no local denominado Ponta Grossa, confluência dos rios Amazonas, Tocantins, Guamá e Capim. (BARROS, 2009).

A Subestação de Vila do Conde localizada em Barcarena - PA é interligadora da usina hidrelétrica de Tucuruí para suprir as subestações Guamá, Santa Maria e o polo industrial de Belém e Barcarena. Está localizado às margens da Rodovia PA483, km 20 (BARROS, 2009). Pode ser vista na sequência de ampliações à Figura 2a a localização da subestação SEVC em relação ao complexo industrial da Alunorte Albrás e por fim a Figura 2b a subestação e os pontos de coleta utilizados.

**Figura 2:** Subestação de Vila do Conde em Barcarena. (a) Influência do complexo da Albrás-Alunorte, (b) Atmosfera costeira e industrial.

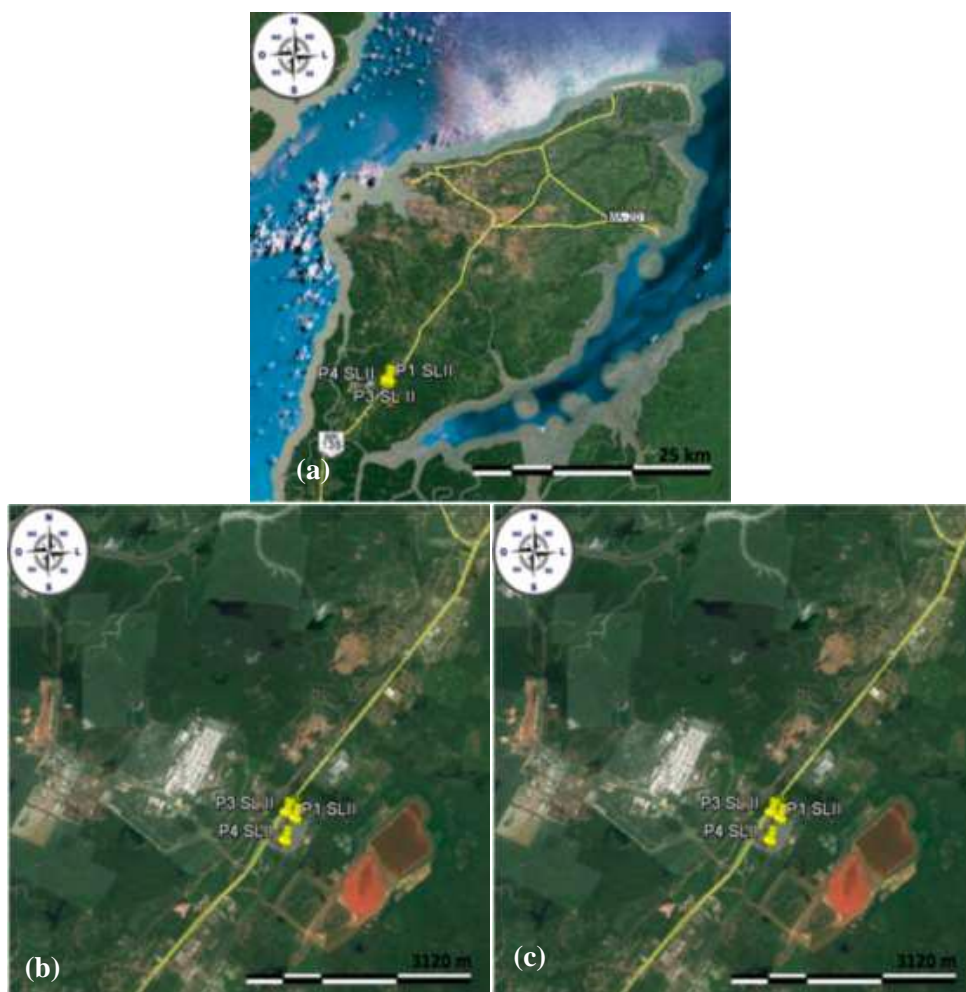


Fonte: Google Earth (2015).

### 2.1.2 Subestação de Pedrinhas II:

Está localizada na cidade de São Luís capital do estado do Maranhão, cidade insular no oceano atlântico (ARAÚJO; PARENTE JUNIOR; ESPIG, 2005). Pode ser vista na figura 3a a ilha de São Luís - MA e as rodovias de acesso. Na figura 3b tem-se a BR-135 e a subestação SESL II em relação ao complexo industrial da ALUMAR. Na figura 3c vê-se a subestação e os pontos de coleta.

**Figura 3:** Subestação de Pedrinhas II em São Luís-MA (a) São Luís-MA, (b) Influência do Complexo Alumar, (c) Atmosfera Marinha e Industrial.



**Fonte:** Google Earth (2015).

## 2.3 PRINCIPAIS ATIVIDADES ECONÔMICAS DAS REGIÕES DE ESTUDO

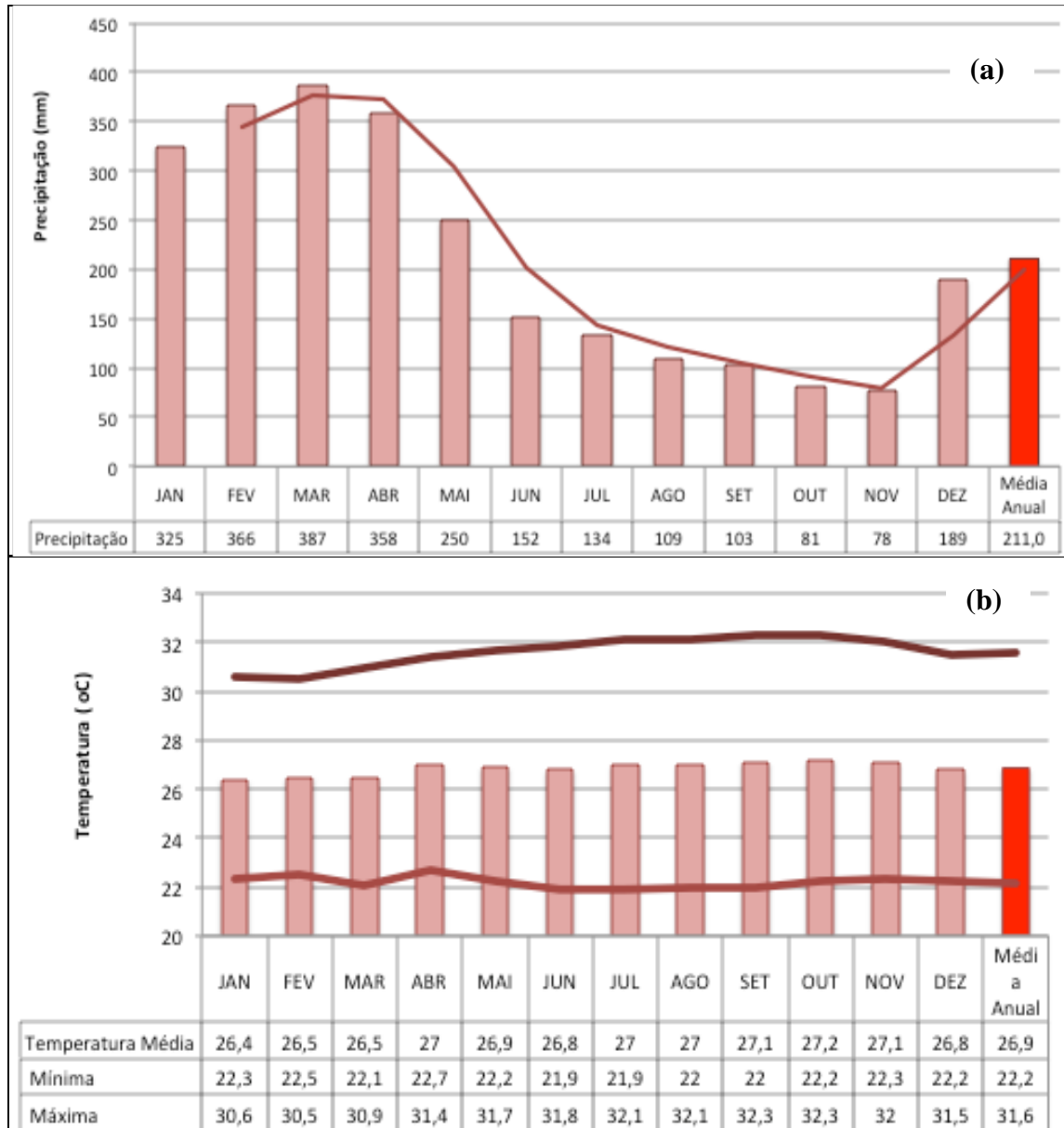
As atividades relacionadas ao complexo industrial e portuário das subestações de Vila do Conde; industrial e urbano de Pedrinhas envolvem transporte, carga e descarga, processamento, produção, armazenamento de insumos, minério, carvão, bauxita, alumina e alumínio; lagoa de deposição de lama vermelha configuram possíveis fontes geradoras e emissoras de poluentes que se somarão a efeitos regionais climáticos e meteorológicos que podem afetar o desempenho da transmissão de energia por efeitos adversos aos sistemas de isolamento das linhas de transmissão e subestações de energia elétrica.

A escolha dessas subestações baseou-se na importância estratégica ao sistema interligado nacional e pela oportunidade do entendimento e compreensão dos processos de desempenho, operação e degradação dos isoladores elétricos no ambiente amazônico.

## 2.4 CLASSIFICAÇÕES CLIMÁTICAS

O município de Barcarena tem uma temperatura média alta e pluviosidade significativa ao longo de todo o ano. Segundo a classificação de Köppen e Geiger o clima é Af, a temperatura média é 26,9 °C e a pluviosidade média anual são de 2532 mm. O mês mais seco é novembro com 78 mm e em março verifica-se o máximo de precipitação, com uma média de 387 mm. Se comparados os meses de máxima e mínima precipitação a variabilidade de precipitação é de 309 mm (cerca de 12%) ver figura 4a. A temperatura média do mês de outubro, o mais quente do ano, é de 27,2 °C. A temperatura mais baixa de todo o ano é em janeiro, com a média de 26,4 °C. E durante o ano as temperaturas médias variam 0,8 °C, ver figura 4b conforme se observa no gráfico de variação climática. (IMET, 2015).

**Figura 4:** Parâmetros climáticos de Barcarena - PA (a) Precipitação mensal, (b) Temperatura mensal.



Fonte: INMET (2015).

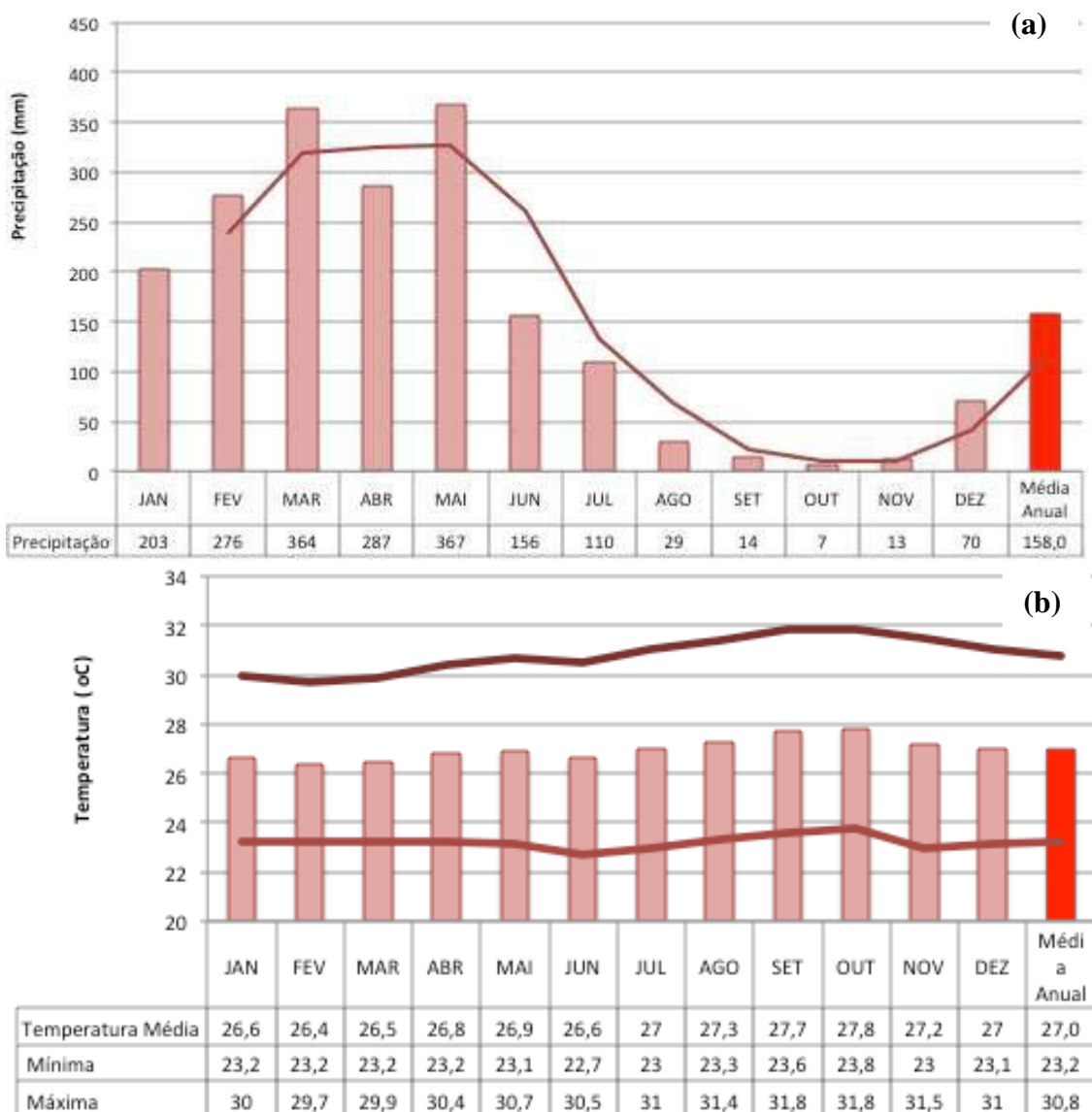
São Luís se encontra sob clima tropical As de acordo com a Köppen e Geiger, apresentando no inverno muito mais pluviosidade que no verão. Tem uma temperatura média de 27 °C e a média anual de pluviosidade é de 1896 mm.

O mês de outubro é o mais seco com precipitação média de 7 mm. O mês de maio apresenta a maior precipitação média, com 367 mm, representando uma diferença drástica de

precipitação entre as estações de 360mm, as precipitações mais intensas são nos períodos de outono-inverno.

Outubro é o mês mais quente com a temperatura média de 27,8°C, fevereiro é o mês com a menor temperatura média ao longo do ano de 26,4°C. Ao longo do ano as temperaturas médias variam 1,4 °C, conforme figura 5 onde tem-se o gráfico de variação climática (IMET, 2013).

**Figura 5:** Parâmetros climáticos de São Luís - MA, (a) Precipitação mensal, (b) Temperatura mensal.



Fonte: INMET (2015).

A região de estudo é dominada pelos climas equatorial (Af e As) na classificação de Köppen e Geiger, com clima megatérmico (tropical úmido) com temperaturas entre 24 e 33°C, amplitude térmica anual de até 3°C, com chuvas abundantes e regulares, entre 1500 e 3100, mm por ano e insolação anual entre 2200 e 2400h. Ao ano são de 150 a 250 dias com ocorrência de chuva, com umidade relativa média anual maior que 80% (ROCHA, 2009).

Pode-se afirmar que Belém e Barcarena possuem características climáticas semelhantes, enquanto que São Luís, mostra a mesma amplitude térmica que Belém e Barcarena, contudo apresenta um período seco mais pronunciado de julho a dezembro.

## 2.5 CORROSÃO

Para Helene (1986), corrosão é uma interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química, ou eletroquímica. De acordo com Gentil (2003), o produto da corrosão de um metal é bem semelhante ao minério do qual é originalmente extraído, isto é, o metal tende a retornar a sua condição de estabilidade.

A corrosão atmosférica é um dos processos mais comuns, pois a grande maioria das estruturas expostas a atmosfera é metálica. Ela ocorre quando se forma uma fina película de eletrólito sobre a superfície do metal, o que possibilita o ataque do tipo eletroquímico. A película é formada devido à presença de umidade na atmosfera. Mesmo para umidade relativa baixa, como 60%, pode ocorrer a formação dessa película (SPIEL, D. E.; LEEUW, 1996). A velocidade de corrosão depende fortemente da umidade relativa do ar e dos constituintes da atmosfera (MEIRA, et al 2006).

Para que a corrosão ocorra, é necessário o desenvolvimento simultâneo de duas reações: a de oxidação (que libera elétrons) e a de redução (que recebe elétrons):

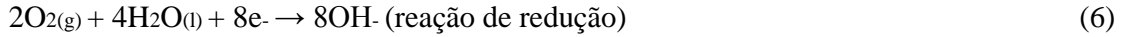


Por exemplo, o ferro degrada na presença de água e oxigênio e a reação global pode ser representada por:





A reação (3) pode ser dividida nas reações (4) (5) e (6):

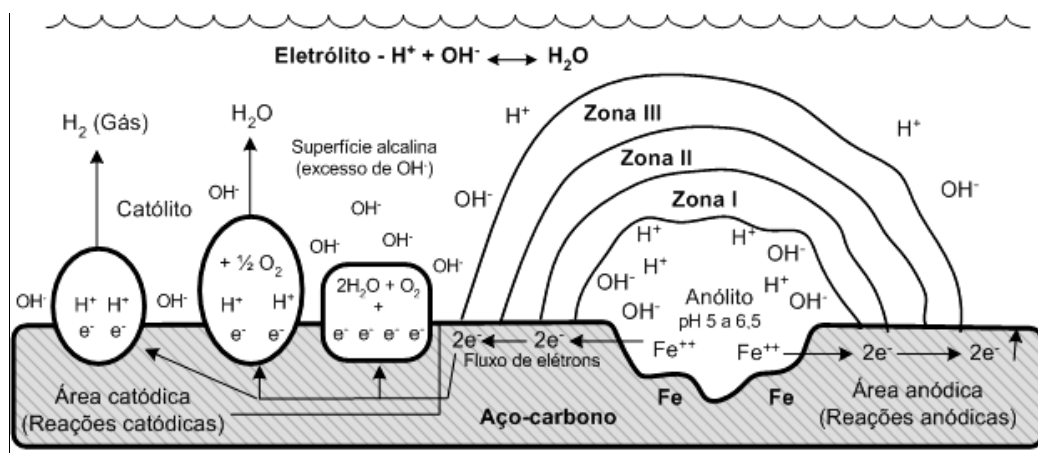


A reação de oxidação (ou anódica), ao gerar íons metálicos em solução, dissolve o metal ou o transforma em outro composto, produzindo o fenômeno da corrosão. Porém, para que o processo corrosivo prossiga é necessário uma reação de redução (ou catódica) que consuma os elétrons liberados. Caso contrário, a reação de oxidação atinge o equilíbrio e a corrosão cessa (MORCILLO, M. et al, 2000).

### 2.5.1 A célula de corrosão

Para Brambilla(2009)Na Figura 6, encontram-se mostradas as principais reações químicas de corrosão que ocorrem no ânodo e, também, no catodo, que são as áreas onde o metal se ioniza, passando à solução, com perda progressiva do metal e, de recepção dos elétrons pela solução, respectivamente.

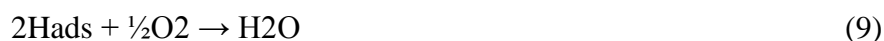
**Figura 6:** Esquema representando as principais reações anódicas e catódicas de uma célula de corrosão.



Fonte: SICA, Y. C, 2007.

A primeira reação, esquematizada na Zona I, ocorre quando o Fe metálico passa à solução como íon  $\text{Fe}^{2+}$ , com a liberação de dois elétrons. O  $\text{Fe}^{2+}$  reage com os íons

hidróxidos para formar hidróxido de ferro. Esta reação é importante, pois retira o  $\text{Fe}^{2+}$  da solução e gera o hidróxido de ferro insolúvel. Isto muda o equilíbrio na célula de corrosão e permite que mais ferro se ionize e passe à solução. O hidróxido de ferro é um precipitado branco transitório, que se forma na superfície do metal corroído. Depois, esquematicamente na Zona II, a reação do  $\text{Fe}^{2+}$  ocorre com o  $\text{O}_2$  para formar  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ou óxido de ferro magnético, sendo esta, uma das reações mais complexas e acontece com liberação de íons hidrogênio. Na Zona III, ocorre uma reação esquemática mais direta: o  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  reage com o oxigênio para formar óxido de ferro hidratado, ou  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Este é o produto amarelo-avermelhado comumente conhecido como ferrugem. Os íons negativos no eletrólito, como carbonatos, cloretos, sulfatos e hidroxilas, são atraídos para a área anódica por causa dos íons ferro positivos disponíveis neste ponto. Como as hidroxilas reagem com os íons ferro para formar hidróxidos de ferro, um excesso de íons hidrogênio permanece na solução, criando uma condição levemente ácida. As reações catódicas, apesar de menos complexas que as reações anódicas, são extremamente importantes no controle da velocidade da corrosão que ocorre no ânodo. Esta reação é essencialmente a de neutralização dos elétrons que são gerados quando o ferro passa à solução. Os elétrons podem ser neutralizados por uma destas reações (7 a 10):



A reação de neutralização (7 ou 8) é a dos íons hidrogênio com elétrons para formar hidrogênio gasoso. O ferro irá, portanto, deslocar o hidrogênio da água espontaneamente (CESP – Companhia Energética de São Paulo. São Paulo, 1987) Este é o primeiro passo no processo corrosivo e uma das mais importantes reações químicas envolvendo o ferro.

A reação (9), que também remove hidrogênio da área catódica na superfície metálica, é a do hidrogênio atômico com oxigênio para formar água. Na reação (10), o oxigênio reage com água e elétrons para formar hidroxilas. Esta é uma reação extremamente importante do ponto de vista de um revestimento, já que as hidroxilas são fortemente alcalinas. Quando elas se concentram na área catódica do metal, qualquer revestimento sobre o metal deverá ser fortemente resistente aos álcalis ou tenderá à saponificação e degradação. O metal age como

circuito externo, formado pelo ânodo e o cátodo que estão sob a superfície metálica. Se há dois tipos de metal, eles devem estar em contato ou devem ter uma conexão externa para que o processo corrosivo possa ocorrer. A condutividade ou a resistência do circuito externo também ajuda determinar a velocidade do processo corrosivo.

## 2.6 CORROSÃO ATMOSFÉRICA

A corrosão como fenômeno químico exerce um fascínio pela complexidade das trocas iônicas capazes de destruir as mais tenazes ligas metálicas formuladas pelo homem, um quinto da produção mundial de aço é destinado a repor perdas causadas pela corrosão representando, só nos EUA, 3% do PIB todos os anos, algo em torno de US\$ 400 bilhões. No Brasil, os gastos podem chegar a cerca de US\$ 10 bilhões, grande parte na indústria petrolífera. Além disso, tem-se a grave ocorrência de quebra da confiabilidade operacional em sistemas funcionais com paralisação e interrupção de sistemas provocados pela corrosão atmosférica em ambientes de maresia ou de atmosferas típicas de indústrias siderúrgicas KUCERA, V.; MATTSON A, 1987 corrosão atmosférica tem recebido nos últimos tempos, por parte de alguns autores Garcia et al e SICA, Y. C, 2006 uma atenção que tem gerado vários estudos sistemáticos. Como exemplo destes estudos pode-se citar a inclusão do Brasil no projeto MICAT - "Mapa Ibero-americano de Corrosividade Atmosférica". O projeto MICAT está baseado na exposição de quatro materiais padrões (aço carbono, cobre, zinco e alumínio) em estações de ensaio e no acompanhamento de seu processo de corrosão KENNY, E. D.; SICA, Y. C.; CRUZ, O. M. et al, 2004.

### 2.6.1 Tipos de atmosferas corrosivas

Segundo Brambilla(2009) a maior aplicação dos metais ainda se dá em ambiente atmosférico, embora outros ambientes, principalmente os de processos químicos industriais, possam ser mais agressivos. Apesar de que na exposição atmosférica o metal não esteja envolvido maciçamente em eletrólito, a umidade provoca fenômenos eletroquímicos semelhantes. Muitos ambientes apresentam características mistas, além de não haver

demarcação definitiva para cada tipo. Pode-se dividir os ambientes em 5 tipos básicos de atmosferas corrosivas:

- atmosferas industrial;
- atmosfera marinha;
- atmosfera rural;
- atmosfera urbana.
- atmosfera marinho industrial.

Na atmosfera industrial, a presença de  $\text{SO}_2$  é o mais importante. Resultante da queima de combustível, partículas de pó de  $\text{SO}_2$  são captadas pela umidade formando ácido sulfúrico. As gotículas microscópicas de água da umidade se depositam nas superfícies expostas juntamente com uma parte de  $\text{SO}_2$  e  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (ácido sulfuroso). A atmosfera marinha é carregada com partículas de  $\text{NaCl}$  trazidas pelos ventos e depositadas nas superfícies expostas.

Já, a atmosfera rural não contém contaminantes químicos fortes, mas pode conter poeira orgânica e inorgânica. Seus principais constituintes são a umidade e elementos gasosos como  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}_2$ . Na atmosfera urbana há a presença de fumos e sulfatos provenientes da combustão. Em presença de alta umidade relativa e condensação pode estabelecer elevada taxa de corrosão, pois promove uma interação mais intensa dos contaminantes perante estruturas metálicas. Ambiente marinho-industrial. Neste ambiente é notável a presença de íons cloretos, bem como de compostos de enxofre devido à emissão de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e outros, na atmosfera, pela queima de combustíveis fósseis. Caracteriza-se por regiões litorâneas altamente industrializadas, normalmente próximas de portos.

### 2.6.2 Mecanismo do processo de corrosão atmosférica

Existem vários fatores que compõem a atmosfera, tanto químicos quanto físicos. É composta normalmente por uma mistura de gases, sendo os principais o oxigênio, o nitrogênio e o vapor d'água. No entanto, contém uma série de contaminantes, como fumaça, cinzas, partículas em suspensão, partículas salinas e gases, provenientes de unidades industriais, de motores de combustão interna e de outras fontes naturais e artificiais. Sua proporção é

variável segundo a proximidade dessas fontes e as condições climáticas locais, participando ativamente no processo de deterioração dos materiais SICA, Y. C.; KENNY, E. D.; PORTELLA, K. F., et al. 2006.

Dentre os principais fatores que ocasionam a degradação espontânea dos materiais pela influência das condições atmosféricas, o macroclima contribui diretamente nesse processo. As precipitações aquosas (chuva, neve ou neblina), a condensação da umidade ocorrida por mudanças de temperatura (orvalho) aliada à radiação solar e a composição química da atmosfera, como a contaminação do ar pela emissão de gases ou vapores ácidos ( $\text{SO}_2$ ;  $\text{SO}_3$ ;  $\text{SO}_4$ ;  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{NO}_x$ ) e aerossóis marinhos (íons cloretos ( $\text{Cl}^-$ ) ou derivados do cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ )), são os principais fatores responsáveis pelo processo de corrosão atmosférica e definem o macroclima de uma região.

Em contrapartida o microclima, é o clima específico que se forma sobre os materiais, na camada de eletrólito, sendo composto por: (i) tempo de superfície úmida, em geral proveniente do orvalho ou precipitação; (ii) pelo aquecimento dos materiais por meio da radiação global, em especial, pela radiação infravermelha; e, (iii) pelo acúmulo de íons de natureza ácida ( $\text{SO}_3^{2-}$ ;  $\text{NO}_2^-$ ;  $\text{Cl}^-$ ) na película aquosa depositada sobre o material (eletrólito)(BRAMBILLA K.J.C,2009)..

#### 2.6.2.1 Umidade

Sendo a corrosão atmosférica um fenômeno essencialmente eletroquímico, a água existente na atmosfera, sob diferentes formas, constitui um dos fatores mais importantes do processo corrosivo. A água que se deposita sobre a superfície metálica pode ser proveniente de processo de adsorção e de condensação, que são determinadas pela umidade relativa do ar (VIANNA R. O, 1980).

### 2.6.2.2 Influência da distância do objeto em relação ao mar

A influência da distância em relação ao mar constitui o mais importante aspecto no estudo da corrosão em zona de atmosfera marinha FELIU, 1999.

COSTA, E. A. L, 2001 a partir de estudos experimentais constatou que o potencial médio de agressão aos materiais expostos ao cloreto aerossol marinho, em três estações, à distância máxima de 500 m é, aproximadamente, 8 vezes maior do que o obtido para outras seis estações localizadas além desta.

Segundo um estudo realizado na cidade de Salvador por VILASBOAS, 2004 apud JAERGERMAN, 1990 observou-se que nos primeiros 400 m de solo a partir da costa, há uma redução acentuada da concentração de cloretos no aerossol marinho, na região do mediterrâneo.

### 2.6.2.3 Influência da ação dos ventos

A velocidade do vento está relacionada com a influência da dispersão entre os poluentes atmosféricos e o tempo de secagem do eletrólito na superfície do metal. Os cloretos presentes nas regiões de atmosfera marinha provêm da água do mar, a forma como esse agente é transportado tem origem na formação do aerossol marinho. (FELIU, 1999) constatou que o impacto do vento com a superfície marítima origina a formação de bolhas que explodem, em seguida formando gotículas ou espuma dando origem ao aerossol, esse mecanismo é importante na liberação de partículas de sal.

Pode-se observar então que a localização geográfica e a influência das correntes de ar delimitam a ação dos ventos nas estruturas. PIAZZOLA, 1997 observou que a concentração do aerossol marinho é maior para ventos com velocidades entre 7,0 e 11,0 m/s, enquanto SPIEL, 1996 em estudo semelhante definiu que as concentrações de partículas salinas se elevam a partir de ventos com velocidades superiores a 5,0 m/s, e de acordo com MEIRA 2006, MORCILLO 2000, FITZGERALD 1991 e O'DOWD 1997, o aumento de deposição salina ocorre devido a ventos com sopros a partir de 3,0 m/s.

#### 2.6.2.4 Temperatura

Segundo CASCUDO, 1997, a temperatura exerce um papel duplo. Se por um lado seu aumento leva a um aumento na velocidade das reações e da mobilidade iônica, sua diminuição pode levar à condensação que produz aumento na umidade local. Admite-se que um aumento de 10 °C na temperatura dobre a velocidade da reação, embora haja evidências que esse acréscimo seria de apenas 1,6 vezes.

Em contrapartida, se a temperatura for elevada, irá diminuir a possibilidade de condensação de vapor de água na superfície metálica e a adsorção de gases, o que conseqüentemente reduz a velocidade da corrosão devido a não formação ou a diminuição da permanência do eletrólito sobre o metal.

As flutuações de temperatura também têm grande influência na velocidade de corrosão atmosférica, pois acarretam alterações na umidade relativa.

#### 2.6.2.5 Precipitação

Para Brambilla(2009), a precipitação leva à dissolução dos íons da atmosfera, principalmente Cl<sup>-</sup> e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> provenientes do mar. Por outro lado, a chuva que normalmente é responsável pela lixiviação dos poluentes atmosféricos, pode também diminuir a concentração de eletrólitos e, também, a taxa de corrosão.

O grave inconveniente dos pites é que muitas vezes eles são detectados somente após a estrutura quebrar por falha mecânica, já que dificilmente são observados antes, devido ao seu pequeno tamanho. O processo de corrosão por pite é um tipo único de reação anódica auto catalítica. Isto é, o processo de corrosão dentro do pite cria condições necessárias que estimulam a contínua atividade dentro do mesmo, como é mostrado, esquematicamente. Neste esquema, encontra-se mostrado um metal M em contato com uma solução aerada de NaCl (KUCERA, V.; MATTSON, E, 1987).

#### 2.6.2.6 Passivação de metais

O processo de passivação é um fenômeno superficial e natural, o qual pode ser entendido como sendo a reação entre as espécies metálicas e as substâncias contidas nesse meio. A passivação também pode ocorrer à temperatura ambiente e formar produtos de oxidação ou óxidos, que agem na proteção do metal, tornando esta superfície mais estável ao meio (SICA,2001).

Estes óxidos são formados por reações anódicas e, dependendo do metal e do meio, podem formar, óxidos ou hidróxidos conforme a seguinte reação:



De uma forma geral, há dois tipos principais de reações anódicas. A primeira trata-se da simples dissolução do metal para formar cátions solúveis e a segunda, que define o conceito de passivação, é quando ocorre a dissolução do metal para formar produtos de corrosão sólidos.

Gentil,(2003) comenta que alguns autores admitem que a passivação seja causada por um filme invisível de óxido na superfície metálica ou por um estado oxidado da superfície, que impedem o contato entre o metal e o meio corrosivo, essa é a “Teoria do filme de óxido”.

Esta passivação faz com que o material aja como área catódica. Entretanto íons como o de cloreto, destroem este filme e eliminam esta passivação. Eles penetram através de falhas da película de óxido dispersando-a.

#### 2.6.2.7 Revestimento de proteção

Para a proteção dos metais é tradicional o uso de tintas orgânicas, recobrimentos metálicos e não-metálicos, tais como as camadas galvanizadas, fosfatizadas, aluminizadas, anodizadas, etc. São, normalmente, eficazes contra o processo corrosivo, mas dependem de vários fatores: método de aplicação, meio ambiente, tempo de exposição à intempérie, entre outros. Um menor desempenho contra a corrosão do substrato protegido é quase sempre



verificado em regiões de alta agressividade ambiental, em atmosferas marítimas e industriais. Nestas regiões, a vida útil de materiais metálicos como o aço carbono usado em transformadores de redes de distribuição de energia elétrica (RDE's) é extremamente reduzida, constatando-se casos de furos no tanque de óleo devido à corrosão, em tempo de operação médio de um ano, o que estimula a um estudo mais aprofundado do mecanismo de degradação envolvido.

Nestes casos, o problema poderá não estar centrado no recobrimento ou pintura bem sucedido, com demãos de fundo, intermediária e acabamento, mas sim, na escolha inadequada do componente químico de proteção da tinta (resina e pigmentos), da qualidade superficial do metal de base e da metodologia de aplicação. Assim, tem-se maior ou menor resistência à radiação solar, à umidade e aos agentes agressivos externos (gás carbônico, chuva ácida, cloretos, radiação UV, etc.). A exposição de transformadores de RDE's em regiões da orla marítima do Estado do Paraná, pintados com sistemas de pintura e técnicas adequados, tem demonstrado vida útil maior (superior a 10 anos), em virtude do conhecimento das condições atmosféricas locais quanto à sua agressividade química.

Diversas técnicas analíticas vêm sendo empregadas com objetivo de melhor caracterizar o desempenho das tintas ao longo da sua exposição ao meio ambiente. Dentre estas, destaca-se a medida do brilho, característica que depende essencialmente da quantidade de pigmentos no seu volume, sendo brilhante quando em pouca concentração uma vez que estes tendem a ficar submersos na resina e fosca ou sem brilho, no caso oposto, onde parte deste material acaba ficando exposta à superfície, vantagem na sua medida é a possibilidade de acompanhar a degradação da tinta em função do tempo de exposição, pelos efeitos da radiação solar, oxigênio e chuvas.

A degradação da resina acaba por deixar expostas as partículas de pigmento, diminuindo seu brilho com o tempo. A análise tem como resultado valores em unidades de brilho (UB). Esta unidade pode ser compreendida fazendo-se analogia a um espelho perfeito, uma vez que este reflete 100% da luz incidente. Assim, uma tinta considerada muito brilhante e com cerca de 98 UB teria, comparativamente, 9,8% do brilho de um espelho perfeito (Garcia, C. M.;2006).

## 2.7 TAXAS DE CORROSÃO NO BRASIL

Segundo Sica e Kenny et al,(2001) o potencial corrosivo determinado pelo índice de Brooks na região de São Luís, MA, foi de 4,7, o qual classificou a atmosfera das regiões estudadas como agressivas e de grau de deterioração moderado com tendência a alto. Os teores de íons cloreto indicaram que na região predominou o ambiente marinho. Os complexos industriais contribuíram para a dispersão de material particulado, com consequência para a formação de corrosão galvânica, já que foram detectadas partículas de alumínio. Parte da galvanização teve dissolução parcial do revestimento com ataque localizado do substrato em virtude da espessura da camada de revestimento de zinco inicial, a qual não foi suficiente para oferecer proteção catódica ao aço-carbono durante o período de exposição. Para o aço carbono e o alumínio, a atmosfera de São Luís foi considerada agressiva com graus de corrosividade ambiental entre C3 e C5, de média a muito alta. A corrosividade ambiental para o cobre foi classificada como C5 ou muito alta. Neste caso, cabe salientar que este metal tem a característica de formar óxidos aderentes e pouco porosos, ou seja, de gerar uma camada passivante que reduz o efeito corrosivo em função do seu tempo de exposição. Pela análise do comportamento da corrosão dos metais, foi notada a tendência a inflexão da taxa de corrosão, para o alumínio e para o cobre e o aço-carbono, seguindo a mesma tendência de passivação com o tempo.

Em algumas cidades brasileiras (norte, nordeste, sudeste e sul), as taxas de corrosão medidas em conjunto com os parâmetros meteorológicos, deu e vem dando subsídios para inferir a um tempo médio de vida útil de metais e outros acessórios de redes de distribuição de energia, com sugestões de aplicação dos mesmos em diferentes regiões ou com mudanças de proteção superficial e volumétrica do material (HENKE, S. L. et al,1990) Materiais poliméricos empregados em equipamentos e acessórios (polietileno, silicone e outros), também estão sujeitos à degradação, principalmente, devido aos diversos estresses, os quais podem agir de forma individual e combinada. Dentre estes estresses, podem ser citados: o elétrico (campo elétrico, sobretensão), o térmico (gradientes de temperatura), o mecânico (tração) e o ambiental (radiação, intempéries e contaminação). A ação destes estresses pode levar à degradação e ao envelhecimento do material isolante podendo, no estágio final, ter como consequência a falha do equipamento e/ou acessório, sendo necessária a avaliação dos

materiais quanto à possibilidade de substituição por outros semelhantes que apresentem maior resistência a estas condições meteorológicas PORTELLA, K. F.; PIAZZA, F.; et al,(2008).

## 2.8 CORROSÃO ATMOSFÉRICA DE METAIS ESTRUTURAIS

### 2.8.1 Corrosão atmosférica do aço carbono

Um metal se dissolve pela formação de íons metálicos a um potencial dado pela fórmula de Nernst , representada nas Equações 12 e 13.



$$E_0 = -\frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{a_{\text{Me}^{2+}}}{a_{\text{Me}}}\right), \text{ sendo } a_{\text{Me}} = 1 \quad (13)$$

Onde  $E^\circ$  é a força eletromotriz;  $n$  é o número de elétrons transferidos;  $R = 8,315 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$ ;  $T = 298,2 \text{ K}$  ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$ );  $F = 96485 \text{ C mol}^{-1}$  Não há dissolução a um potencial inferior e, acima deste, a forma estável é a iônica, dissolvendo-se o metal segundo a reação (12), independente do pH do meio, visto que a presença dos íons  $\text{H}^+$  ou  $\text{OH}^-$  não intervém no processo SILVA, G. C.; PORTELLA, K. F,(2013).

Entretanto, de alguma forma, os íons  $\text{H}^+$  e  $\text{OH}^-$ , não somente altera o potencial, como condicionam as reações de corrosão, pois os íons  $\text{Me}^{++}$  produzidos nelas dão lugar a óxidos e hidróxidos, compostos que influem sobre a velocidade de corrosão pelas suas características mais ou menos protetoras. Além disso, acima de certo valor de potencial, distinto para cada metal, os metais se dissolvem, juntamente com os óxidos e hidróxidos previamente precipitados, originando ânions ou íons complexos MAGALHÃES, E. M,(2013).

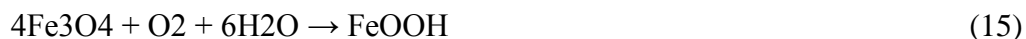
Para Gentil,(2003),Tudo isso se torna importante para o estudo da corrosão, pois, nas condições em que se formam produtos solúveis é de se esperar que ocorra corrosão, enquanto que, a formação de produtos insolúveis pode paralisá-la, chegando inclusive a proteger o metal por passivação. A velocidade de corrosão alcança em um determinado período de exposição um regime estável e no geral muda pouco durante a exposição posterior.

Entre os produtos da corrosão atmosférica do ferro geralmente encontram-se os oxi-hidróxidos ( $\alpha$ -FeOOH, goetita;  $\gamma$ -FeOOH, lepidocrocita;  $\beta$ -FeOOH, akaganeita), o óxido ferroso-férrico (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, magnetita) e o hidróxido ferroso (Fe(OH)<sub>2</sub>). Os compostos que se detectam com maior facilidade são aqueles mais insolúveis e que, portanto, são encontrados em concentrações elevadas. Nas atmosferas rurais, urbanas e industriais, longe da costa, geralmente se detecta exclusivamente goethita e lepidocrocita. Sua existência pode ser confirmada pela microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nas atmosferas marinhas também ocorre a formação de akaganeita e magnetita. Pela lixiviação com água destilada quente e posterior concentração pode-se chegar a detectar a presença de cloretos e sulfatos de ferro solúveis. Ambas as espécies tendem a se concentrar na camada aderente de produtos de corrosão.

Em atmosferas não contaminadas, os produtos primários da corrosão do ferro, principalmente hidróxido ferroso, se transformam em óxidos férricos hidratados insolúveis (produtos secundários), de natureza amorfa e coloidal, que dificultam a difusão através dos reagentes e produtos da reação, freando extraordinariamente o processo da corrosão. Em ausência de acidez o Fe(OH)<sub>2</sub> precipita-se, inibindo a formação da película de ferrugem. Entretanto o Fe(OH)<sub>2</sub> não é estável e, em presença de oxigênio, se oxida a FeOOH. Em regiões da película onde o acesso de oxigênio está limitado (próximo à interface aço/ferrugem), os oxi-hidróxidos se reduzem eletroquimicamente à magnetita, de acordo com a seguinte reação:



Posteriormente, a magnetita se reoxida pelo oxigênio do ar em presença de umidade:



### 2.8.2 Corrosão atmosférica do aço galvanizado

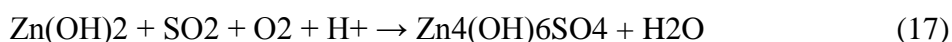
O zinco tem muitas características que o tornam apropriado para o revestimento de superfícies de aço, ou seja, ele tem capacidade de melhorar a resistência à corrosão do ferro e aço. A vida útil dos revestimentos de zinco, geralmente, depende de sua espessura, sendo mais ou menos independente do método de aplicação (imersão a quente, revestimento

metalizado ou galvanoplastia). Testes realizados nos Estados Unidos têm mostrado que uma fina camada de 0,025 mm (0,984 mil) em áreas suburbanas ou rurais duram 11 anos ou mais; 8 anos nas áreas marinhas e quase três anos no litoral( RINCÓN A,2009),. O zinco atua como um ânodo de sacrifício sobre o aço, conferindo-lhe proteção galvânica eficaz, evitando-se, assim, um impacto direto de ataque corrosivo sobre o aço. Aproximadamente 1 nm da camada mais externa da superfície de zinco corroído é rica em contaminantes na superfície, tais como o cloreto e íons sulfato, sendo que a composição da camada de corrosão não é constante com a profundidade(FLINN D.R, 1982). Além disso, medições experimentais do ponto isoelétrico, em função do pH 6-8 indicam que a probabilidade de possuir produtos de corrosão do zinco com carga de superfície negativa diminui na ordem de: hidroxicarbonato de zinco>> hidroxissulfato de zinco> hidróxido de zinco hidroxicloreto de zinco>> óxido de zinco[(VELEVA L,2009). Assim, a carga negativa dos produtos de corrosão do zinco tem a capacidade de auxiliar na repulsão dos íons cloreto e impedindo desta forma o ataque ao zinco (PANCHENKOY,2005). Este método de proteção tem sido utilizado por muitos anos, principalmente na indústria automotiva, que contribuiu para o desenvolvimento desses revestimentos (WILCOX,1993).

A corrosão atmosférica do zinco resulta da reação:



A formação de sais básicos ocorre pela reação do hidróxido de zinco com os poluentes da atmosfera. Em presença de SO<sub>2</sub>, formam-se os sulfatos básicos de fórmula Zn(OH)<sub>x</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>y</sub>.



Esses produtos apresentam baixa solubilidade em meio neutro e alta solubilidade em meio ácido. Em uma atmosfera muito poluída, o pH do eletrólito na superfície do zinco pode baixar a ponto de dissolver os sulfatos básicos. Em atmosfera marinha a reação do Zn(OH)<sub>2</sub> com os cloretos forma os cloretos básicos do tipo Zn(OH)<sub>x</sub>Cl<sub>2-x</sub>.



A velocidade de corrosão do zinco é então inferior à velocidade medida em uma atmosfera industrial fortemente poluída (WILCOX,2005).

### 3 EXPERIMENTAL

Neste capítulo, encontram-se disponibilizados os principais procedimentos de análises, os materiais utilizados, bem como as informações adicionais às técnicas trabalhadas e não disponibilizadas.

#### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Aço carbono 1020;

Aço galvanizado (com espessura de 50  $\mu\text{m}$ );

Aço galvanizado (com espessura de 100  $\mu\text{m}$ );

#### 3.2 PREPARO DOS CORPOS METÁLICOS

##### 3.2.1 Placas Metálicas

Para a verificação da taxa de corrosão foram preparados os metais aço carbono 1020, aço carbono 1020 recoberto com camadas galvanizadas de 50 e 100  $\mu\text{m}$ . Para cada painel, foram preparadas 8 placas para sua retirada após exposição por um período de 3 meses nas ECA's SEVC e SESLII.

Inicialmente, as superfícies destas placas foram limpas com acetona p.a. e depois de enxaguadas elas foram secas conforme Figura 7, e pesadas em uma balança eletrônica semi-analítica de 2 casas decimais, marca Bel Engineering, modelo S4202B, Figura 8. Este procedimento só poderá ser adotado se não houver necessidade de algum tratamento químico de decapagem superficial dos mesmos, anterior ao desengraxe. Em caso positivo, este deverá ser realizado conforme indicado na Tabela 4.

**Figura 7:** Tabela de Soluções utilizadas para preparo e limpeza, antes e após ensaio de intemperismo artificial nos corpos de prova, CPs.

CPs	Método/solução de limpeza (antes do ensaio)	Solução para remoção dos produtos de corrosão (após o ensaio)
Aço carbono	Jateamento abrasivo da superfície com granalha de aço	Solução de Clarke (1L-HCl; 20g Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 50g SnCl <sub>2</sub> )
Aço galvanizado	Solução de hidróxido de amônia (1L-H <sub>2</sub> O; 150 ml-NH <sub>4</sub> OH)	A mesma do preparo

Fonte: ABNT NBR 6210:2008

**Figura 8:** Placas secando em uma capela.



Fonte: Da pesquisa

**Figura 9:** Balança analítica utilizada na pesagem.



Fonte: Da pesquisa.

Foram medidos o comprimento, a largura e a espessura das placas, utilizando um micrometro digital calibrado e um paquímetro em metal 6", marca Western. Foram tomados os devidos cuidados de se diminuir os erros de processo ao se escolher apenas um paquímetro e um micrometro que foi utilizado durante todo o processo. Assim como, foi determinado também apenas uma pessoa para realizar estas medidas.

As placas foram identificadas de acordo com anilhas aleatórias, estas foram fixadas às placas com fita Helleman e foram acondicionadas em sacos plásticos. Figura 9.

**Figura 10:** Placas prontas acondicionadas.



**Fonte:** Da pesquisa.

Desta forma a equipe do laboratório de corrosão do LACTEC providenciou novas placas substitutas em bom estado, 8 placas de aço galvanizado com 50  $\mu\text{m}$  e 8 placas de aço galvanizado com 100  $\mu\text{m}$  e da mesma forma foi feito com o aço carbono 1020.

### 3.2.2 Cupons

Os cupons metálicos foram limpos pesados em uma balança analítica de 3 casas decimais, modelo FA2204, marca bioscale. Depois, foram identificados com suas respectivas hastes metálicas e acondicionados em sacos plásticos.

## 3.3 INSTALAÇÃO DOS CORPOS METÁLICOS

Foram instalados os corpos de prova metálicos, na forma de placas, com e sem revestimentos orgânicos e inorgânicos, e cupons cilíndricos em aço carbono, nas estações de corrosão de Vila do Conde e de São Luís II, codificadas como SEVC e SESLII, respectivamente.



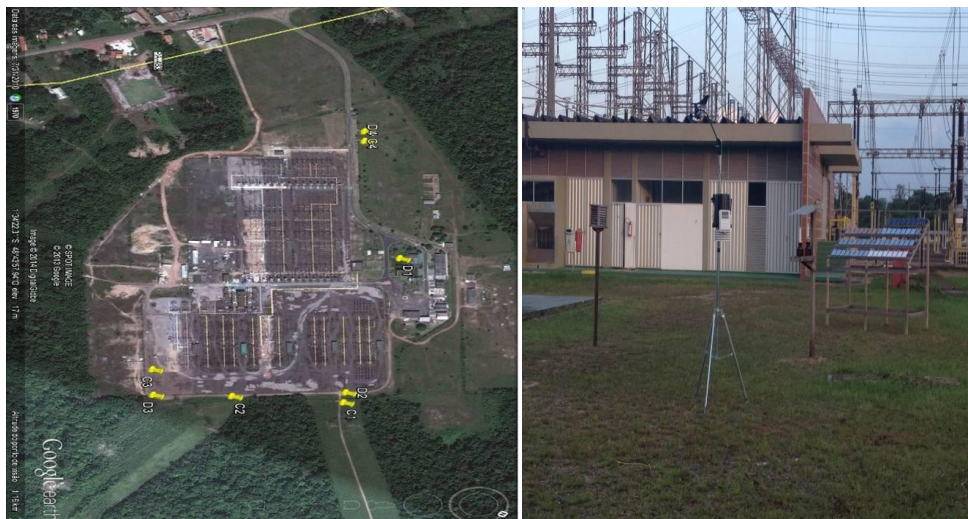
### 3.3.1 Instalações dos corpos de prova metálicos, na forma de placas, com e sem proteção inorgânica superficial, na SEVC.

Na Figura 10, está localizada a ECA SEVC, com os corpos de prova metálicos, na forma de placas. Os pontos estão representados pelas letras D e C, quando estão localizados os cupons cilíndricos de aço carbono para a avaliação da taxa de corrosão atmosférica local.

O painel de madeira foi fabricado de forma a atender as recomendações da NBR 6209, com inclinação de  $30^\circ$  em relação à horizontal para o suporte das peças metálicas. Procurou-se evitar a aproximação de elevações, de construções de grande porte e outros fatores que pudessem influenciar o microclima local. Neste painel foram dispostos, de cima para baixo e da esquerda para a direita, os corpos de prova listados nas Tabela 5 a Tabela 7.






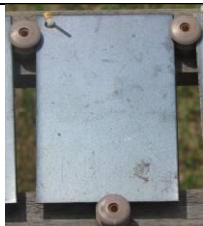


A periodicidade de retirada é de 3 meses, devendo o pesquisador realizar o registro fotográfico da peça ainda no painel e, em seguida, retirar uma peça de cada metal, da esquerda para a direita, anotando a referência da anilha e, na ausência desta, verificando nas próximas peças e anteriores para que seja devidamente referenciada. Após a retirada, com luva, o CP deverá ser embalado em um saco plástico, preferencialmente em saco bolha, e encaminhado ao laboratório.

**Figura 11:** Localização georreferenciada e a própria ECA SEVC. Nos pontos C1 a C4 estão instalados os cupons cilíndricos de aço carbono 1020 para a determinação da taxa de corrosão.











**Fonte:** Da pesquisa.

**Figura 12:** Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, instalados no painel ECA SEVC, no dia 03/09/2013.

Material	CÓDIGOS UTILIZADOS			
	VC1	VC2	VC3	VC4
Aço carbono 1020				
				









Fonte: Da pesquisa.

**Figura 13:** Tabela com os corpos de prova de aço galvanizado 50  $\mu\text{m}$ , instalados no painel ECA SEVC, no dia 03/09/2013.

Material	CÓDIGOS UTILIZADOS			
	1V	2V	3V	4V
Aço galv. 50 $\mu\text{m}$				
				

Fonte: Da pesquisa

**Figura 14:** Tabela com os corpos de prova de aço galvanizado 100  $\mu\text{m}$ , instalados no painel ECA SEVC, no dia 03/09/2013.

Material	CÓDIGOS UTILIZADOS			
	1X	2X	3X	4X
Aço galv. 100 $\mu\text{m}$				
				

Fonte: Da pesquisa.

3.3.2 Instalações dos corpos de prova metálicos, na forma de placas, com proteção orgânica superficial, pintura, na SEVC.

Os códigos dos CP's indicados na Tabela 8 e na Tabela 9, referem-se a dois sistemas de pintura utilizados pela Eletronorte: esquemas L3 e L5, ambos, com tonalidade Branco Munsell – N 9.5 (ITM – 1209).

A preparação do substrato para cada esquema utilizado, bem como a espessura de cada de mão também estão indicados nas referidas Tabelas.

Na Tabela 10, estão apresentados os CP's com os esquemas de pintura expostos na região de Vila do Conde ECA SEVC, com seus respectivos códigos.

É recomendável que as medidas de brilho sejam realizadas mensalmente, com registro fotográfico de cada peça e anotações quanto a defeitos superficiais como gizamento, empolamento e manchamento superficial pelo substrato.

**Figura 15:** Tabela com os corpos de prova com sistemas de pintura utilizados pela ELETRONORTE, esquema L3, com Branco Munsell – N 9.5 (ITM – 1209).

Preparação da superfície: limpeza por meio de compostos químicos (NBR 15158) seguido pelo jateamento abrasivo no metal quase branco, Sa21/2 (mínimo) – [ISO 8501-1]			
Demão	Nome da tinta	Especificação	Espessura seca mínima (µm)
1 <sup>a</sup>	Tinta epóxi de alta espessura, curada com poliamina	IA2	120
2 <sup>a</sup>	Tinta poliuretano acrílico alifático	A2	45
3 <sup>a</sup>	Tinta poliuretano acrílico alifático	A2	45









Fonte: Da pesquisa.

**Figura 16:** Tabela com os corpos de prova com sistemas de pintura utilizados pela ELETRONORTE, esquema L5, com Branco Munsell – N 9.5 (ITM – 1209).

Preparação da superfície: limpeza por meio de compostos químicos (NBR 15158), seguido pelo jateamento abrasivo no metal quase branco, Sa21/2 (mínimo) – [ISO 8501-1]			
Demão	Nome da tinta	Especificação	Espessura seca mínima (µm)
1 <sup>a</sup>	Tinta de fundo epóxi rica em zinco, curada com poliamida	F2	80 a 100
2 <sup>a</sup>	Tinta epóxi de alta espessura, curada com poliamida	IA1	100
3 <sup>a</sup>	Tinta poliuretano acrílico alifático	A2	45

Fonte : Da pesquisa

**Figura 17:** Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com 2 esquemas de pintura utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's, SEVC, no dia 03/09/2013.

Material	CÓDIGOS UTILIZADOS			
	ESQUEMA L5			
	VP1	VP2	VP3	VP4
ECA SEVC (Corpos de prova)				
	ESQUEMA L3			
	VP5	VP6	VP7	VP8
				

Fonte: Da pesquisa.

### 3.3.3 Instalações dos corpos de prova metálicos, na forma de cupons, na SEVC.

Na ECA SEVC foram instalados em pontos adicionais, em postes localizados nos 4 lados da SEVC, 8 cupons cilíndricos de aço carbono 1020, por ponto de coleta, para a verificação se a taxa de corrosão está influenciada por fontes primárias de emissão de poluentes ou se a mesma é do tipo generalizada no local. Na Figura 11 estão indicados os locais de coleta dos cupons metálicos de aço carbono 1020.

**Figura 18:** Localização geográfica de instalação dos cupons cilíndricos de aço carbono 1020 na ECA SEVC: pontos C1, C2, C3 e C4.



Fonte: Google Earth (2015).

Na Tabela 11, estão listados os códigos dos referidos cupons, sua localização georreferenciada e sua massa inicial para arquivo.

Cada um destes CP's foram retirados do local, devidamente embalado em saco plástico com a sua respectiva identificação (haste com as anilhas), com luva de látex, a cada 3 meses, ou seja, em periodicidade trimestral, sendo anotado o dia e o local da retirada, preferencialmente, com registro fotográfico da peça.

No laboratório, estes cupons foram limpos, conforme o esquema de decapagem química indicada para o aço carbono 1020 e, após limpo, desengraxado e seco, pesado na mesma balança inicial. A localização e a série dos CPs deverão ser confirmadas com registro fotográfico do local e o georreferenciamento.

**Figura 19:** Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, forma de cupons cilíndricos, na SEVC, no dia 03/09/2013.

Cupons de aço carbono	CÓDIGOS UTILIZADOS								
	1	2	3	4	5	6	7	8	GEORREF
<b>Ponto D1</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	1° 34' 29" S 48° 44' 03" O
<b>Ponto VC1, D2</b>	3N	4YJ	3HB	3I	3S	3P	3HA	3V	1° 34' 22" S 48° 43' 84" O
<b>Ponto VC2</b>	3M	3O	3Y	3R	3L	4YN	3Q	3T	1° 34' 31" S 48° 43' 79" O
<b>Ponto VC3, D3</b>	3J	3U	7TR	7TM	7TA	7TU	7TP	3Z	1° 34' 40" S 48° 43' 83" O
<b>Ponto VC4, D4</b>	7TX	7TE	7TF	7TH	3K	7TJ	7TQ	7TK	1° 34' 41" S 48° 44' 17" O

Fonte: Da pesquisa.

3.3.4 Instalações dos corpos de prova metálicos, na forma de placas, com e sem proteção inorgânica superficial, na SESLII.









Na Figura 15, está localizada a ECA SESLII, com os corpos de prova metálicos, na forma de placas. No painel foram dispostos, de cima para baixo e da esquerda para a direita, os corpos de prova listados entre a Tabela 12 a Tabela 14.

**Figura 20:** Localização georreferenciada (2° 42' 59" S; 44° 19' 2" O) e a própria ECA SESLII.





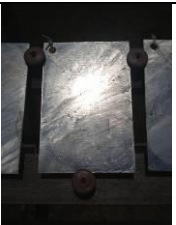
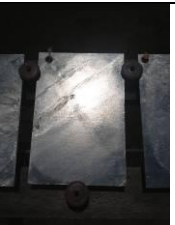

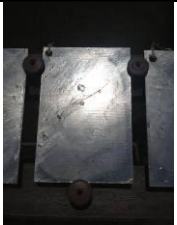


Fonte: Da pesquisa.

**Figura 21:** Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, instalados no painel ECA SESLII, no dia 04/09/2013.

Material	CÓDIGOS UTILIZADOS			
	LC1	LC2	LC3	LC4
Aço carbono 1020				
				

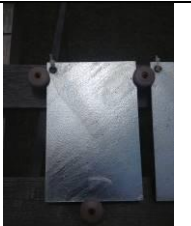
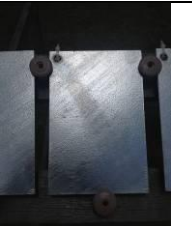





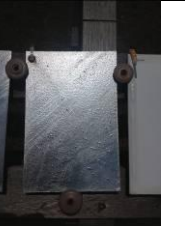
Fonte: Da pesquisa.

**Figura 22:** Tabela com os corpos de prova de aço galvanizado 50  $\mu\text{m}$ , instalados no painel ECA SESLII, no dia 04/09/2013.

Material	CÓDIGOS UTILIZADOS			
	1T	2T	3T	4T
Aço galv. 50 $\mu\text{m}$				
				

Fonte: Da pesquisa.

**Figura 23:** Tabela com os corpos de prova de aço galvanizado 100  $\mu\text{m}$ , instalados no painel ECA SESLII, no dia 04/09/2013.

Material	CÓDIGOS UTILIZADOS			
	1 P	2 P	3 P	4 P
Aço galv. 100 $\mu\text{m}$				
				






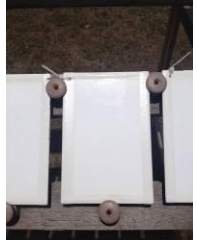


Fonte: Da pesquisa.

3.3.5 Instalações dos corpos de prova metálicos, na forma de placas, com proteção orgânica superficial, pintura, na SESLII.

Na Tabela, encontram-se mostrados os CPs com os 2 esquemas de pintura indicados pela ELETRONORTE.



**Figura 24:** Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com 2 esquemas de pintura utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's SESLII, no dia 04/09/2013.

Material	CÓDIGOS UTILIZADOS			
ECA SESLII (Corpos de prova)	ESQUEMA L3			
	SP1	SP2	SP3	SP4
				
	ESQUEMA L5			
	SP5	SP6	SP7	SP8
				

Fonte: Da pesquisa.

### 3.3.6 Instalações dos corpos de prova metálicos, na forma de cupons, na SELSII.

Na ECA SESLII foram instalados em pontos adicionais, em postes localizados nos 4 lados da SEVC, 8 cupons cilíndricos de aço carbono 1020, por ponto de coleta, para a verificação se a taxa de corrosão está influenciada por fontes primárias de emissão de poluentes ou se a mesma é do tipo generalizada no local.

Na Figura 16, estão indicados os locais de coleta dos cupons metálicos de aço carbono 1020.

**Figura 25:** Localização geográfica de instalação dos cupons cilíndricos de aço carbono 1020 na ECA SESLII.



**Fonte:** Google Earth (2015).

Na Tabela 16, estão listados os códigos dos referidos cupons, sua localização georreferenciada.

**Figura 26:** Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, forma de cupons cilíndricos, na SESLII, no dia 04/09/2013.

Cupons de aço carbono	CÓDIGOS UTILIZADOS								GEORREF
	1	2	3	4	5	6	7	8	
<b>Ponto D1</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	2° 42' 59" S 44° 19' 05" O
<b>Ponto D2</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	2° 42' 56" S 44° 19' 04" O
<b>Ponto LC1</b>	7TQ	7TD	7TI	7TV	7TS	7TB	7TZ	7TY	2° 42' 58" S 44° 19' 06" O
<b>Ponto LC2</b>	9U	9Z	9I	8K	8C	7HQ	8E	7HR	2° 42' 55" S 44° 19' 06" O
<b>Ponto D3</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	2° 43' 57" S 44° 19' 07" O
<b>Ponto LC3</b>	9J	8B	8M	8N	9K	8F	8H	9W	2° 43' 06" S 44° 19' 05" O
<b>Ponto D4</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	2° 43' 06" S 44° 19' 06" O
<b>Ponto LC4</b>	9L	8G	9V	9Y	8I	8J	9X	8A	2° 42' 60" S 44° 18' 56" O

**Fonte:** Da pesquisa.

Cada um destes CP's foi retirado do local, devidamente embalado em saco plástico com a sua respectiva identificação (haste com as anilhas), com luva de látex, a cada 3 meses, ou seja, em periodicidade trimestral, sendo anotado o dia e o local da retirada, preferencialmente, com registro fotográfico da peça.

No laboratório, estes cupons deverão ser limpos, conforme o esquema de decapagem química indicada para o aço carbono 1020 e, após limpo, desengraxado e seco, pesado na mesma balança inicial.

Observação: a localização e a série dos CPs deverão ser confirmadas com registro fotográfico do local e o georreferenciamento.









## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, está disponibilizado os principais resultados obtidos a partir da metodologia trabalhada e de forma a atender os objetivos previstos na pesquisa.

### 4.1 MEDIDAS DE BRILHO DOS ESQUEMAS DE PINTURA L3 E L5

Nas Tabelas 18 a 22, encontram-se apresentados os resultados de brilho dos corpos de prova com os 2 esquemas de pintura trabalhados. Estes resultados foram utilizados ao longo do tempo para verificar o efeito da radiação UV sobre os mesmos e, também, das intempéries locais.

**Figura 27:** Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com 2 esquemas de pintura utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's SEVC, no dia 03/09/2013.

Material	CÓDIGOS UTILIZADOS			
	ESQUEMA L5			
ECA SEVC (Corpos de prova e resultado médio do brilho com o desvio padrão, N=3 medidas)	VP1	VP2	VP3	VP4
				
	$77,6 \pm 7,6$	$78,7 \pm 3,0$	$80,5 \pm 1,8$	$78,6 \pm 2,2$
	ESQUEMA L3			
	VP5	VP6	VP7	VP8
				
	$79,5 \pm 0,8$	$78,9 \pm 2,8$	$76,7 \pm 1,6$	$77,0 \pm 1,8$

Fonte: Da pesquisa.

**Figura 28:** Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com esquema de pintura L5 utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's SEVC, durante o período de estudo.

<b>ECA VC</b>	<b>SE VILA DO CONDE L5</b>							
<b>Data</b>	<b>CÓDIGO E MEDIDAS DE BRILHO (GRAUS)</b>							
	<b>VP1</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>VP2</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>VP3</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>VP4</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>11/12/2014</b>	67,2	2,0	69,6	0,6	71,8	1,4	66,7	0,5
<b>12/03/2015</b>	47,1	0,6	50,8	0,7	48,4	0,9	53,7	1,6
<b>24/07/2015</b>	19,1	1,6	21,7	0,4	20,6	0,7	15,2	1,4









**Fonte:** Da pesquisa.

**Figura 29:** Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com esquema de pintura L3 utilizada pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's, SEVC, durante o período de estudo.

<b>ECA VC</b>	<b>SE VILA DO CONDE L3</b>							
<b>Data</b>	<b>CÓDIGO E MEDIDAS DE BRILHO (GRAUS)</b>							
	<b>VP5</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>VP6</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>VP7</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>VP8</b>	<b>Desvio padrão</b>
<b>Referência</b>	<b>79,5</b>	<b>0,8</b>	<b>78,9</b>	<b>2,8</b>	<b>76,7</b>	<b>1,6</b>	<b>77,0</b>	<b>1,8</b>
<b>11/12/2014</b>	69,3	2,1	64,8	0,6	67,3	2,1	67,7	2,9
<b>12/03/2015</b>	50,3	0,4	46,2	0,7	49,7	0,9	55,4	1,1
<b>24/07/2015</b>	19,3	0,9	17,5	0,5	19,2	0,6	17,7	1,0

**Fonte:** Da pesquisa.

**Figura 30:** Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com 2 esquemas de pintura utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's, SESLII, no dia 04/09/2013.

Material	CÓDIGOS UTILIZADOS			
	ESQUEMA L3			
	SP1	SP2	SP3	SP4
ECA SESLII (Corpos de prova e resultado médio do brilho com o desvio padrão, N=3 medidas)				
	$78,0 \pm 3,0$	$78,9 \pm 1,2$	$78,9 \pm 7,2$	$72,6 \pm 0,6$
	ESQUEMA L5			
	SP5	SP6	SP7	SP8
				
	$73,3 \pm 9,2$	$79,0 \pm 0,8$	$80,5 \pm 2,0$	$72,6 \pm 3,4$

Fonte: Da pesquisa.

**Figura 31:** Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com esquema de pintura L3 utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's, SESLII, durante o período de estudo.

ECA SLII	SE SÃO LUIZ DO MARANHÃO II L3							
Data	CÓDIGO E MEDIDAS DE BRILHO (GRAUS)							
	SP1	Desvio padrão	SP2	Desvio padrão	SP3	Desvio padrão	SP4	Desvio padrão
Referência	78,0	3,0	78,9	1,2	78,9	7,2	72,6	0,6
09/12/2014	37,9	3,1	40,0	0,2	45,0	3,5	40,3	0,5
10/03/2015	24,6	0,7	25,4	0,2	29,9	2,0	27,4	0,5
14/07/2015	13,0	1,2	12,2	0,5	14,0	1,5	15,9	0,6

Fonte: Da pesquisa.

**Figura 32:** Tabela com os corpos de prova de aço carbono 1020, com proteção orgânica, com esquema de pintura L5 utilizados pela Eletronorte, instalados nos painéis das ECA's SESLII, durante o período de estudo.

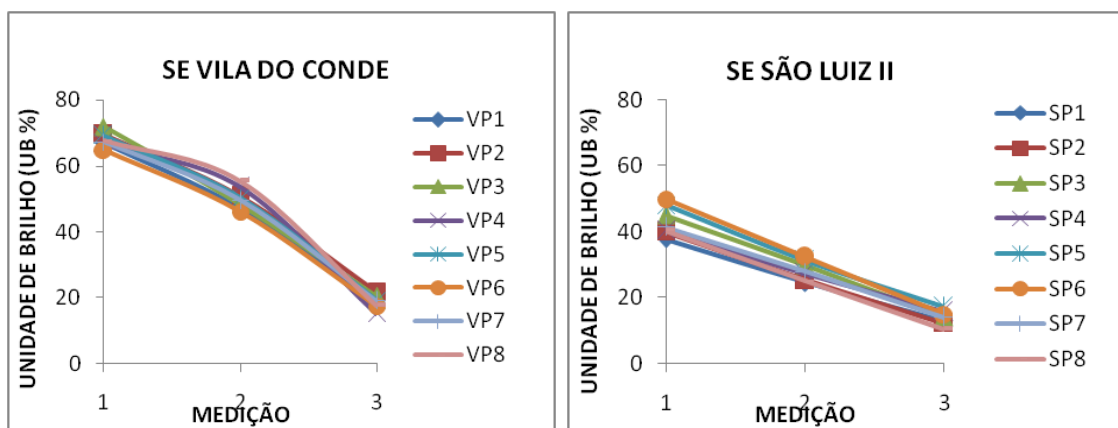
ECA SLII	SE SÃO LUIZ DO MARANHÃO II L5							
Data	CÓDIGO E MEDIDAS DE BRILHO (GRAUS)							
	SP5	Desvio padrão	SP6	Desvio padrão	SP7	Desvio padrão	SP8	Desvio padrão
Referência	73,3	9,2	79,0	0,8	80,5	2,0	72,6	3,4
09/12/2014	48,2	1,8	50,0	2,2	41,5	1,9	40,4	1,8
10/03/2015	31,4	2,0	32,5	1,0	28,0	1,9	25,1	0,9
14/07/2015	17,2	1,1	14,9	1,1	14,0	0,6	10,5	0,6

Fonte: Da pesquisa.

Foi possível no período de exposição ao ambiente natural de Belém e São Luiz, observar algumas alterações nos sistemas de pintura, principalmente quanto ao brilho, foram observadas, conforme pode ser constatado na Figura 17. Neste caso, verificou-se diminuição dos valores de medida de brilho indicando a degradação da resina das tintas ao longo do tempo.

Em ambas as estações, ainda não foi possível destacar entre os sistemas de pintura L3, com tinta de base curada com poliamina e L5 com tinta de base rica em zinco e poliamida, qual o melhor desempenho. Os valores foram aproximados não havendo destaque entre os sistemas L3 e L5.

**Figura 33:** Gráficos ilustrando a variação percentual do brilho das tintas (graus) dos CP's metálicos instalados na ECA VC e SLII, em função do tempo de exposição ao intemperismo natural.



Fonte: Da pesquisa.

## 4.2 INTEMPERISMO NATURAL

Nos dias 15 ao dia 18 de dezembro de 2013, foi realizado uma visita técnica a Eletronorte, onde foi inicializado as limpezas químicas dos corpos de prova metálicos, para obtenção da taxa de corrosão de acordo com o método gravimétrico.

As amostras passaram por uma prévia inspeção visual e registro fotográfico, foi realizado a limpeza adequada dos produtos de corrosão de acordo com o tipo de material padrão, conforme as recomendações das normas ABNT NBR 6210 e ASTM G1-90.

Conforme mencionado anteriormente, na Tabela 4, encontram-se apresentadas as soluções ou processos utilizados para o preparo e a limpeza dos CP's antes de serem expostos, bem como para a remoção dos produtos de corrosão após o ensaio.

Como estas soluções de limpeza são susceptíveis a atacar o substrato, foi utilizado o método de limpeza sugerido pela norma, no qual realizam-se várias vezes o processo de limpeza, pesando o CP após cada intervalo de limpeza e anotando os pontos para o levantamento de uma curva que relaciona o tempo de limpeza com a massa do CP após cada intervalo. Os intervalos utilizados foram a cada 5 minutos para os CP's que visualmente apresentavam menos produtos de corrosão e a cada 12 minutos para os CP's que apresentavam maior ataque ou produtos de corrosão mais aderentes.

Na Figura 18, é possível observar uma placa de aço carbono 1020 antes da limpeza química e depois da limpeza química.

**Figura 34:** Placas de aço carbono 1020 antes da limpeza química (esquerda) e depois da limpeza química (direita) realizada no laboratório de corrosão da ELETRONORTE.



Fonte: Da pesquisa.



Devido a essa perda de massa ser influenciada pela área exposta e pelo tempo de exposição, essas variáveis foram combinadas e expressas numa fórmula que determina a taxa de corrosão, conforme Equação 7, transcrita da norma ASTM G1-90.

$$\text{Taxa de corrosão} = \frac{K.M}{S.t. \rho} \quad (7)$$

Onde (K) é uma constante que determina a unidade da taxa de corrosão (Tabela 23); (M) é a perda de massa em g, com aproximação de 1 mg; (S) é a área do CP em cm<sup>2</sup>, com aproximação de 0,01 cm<sup>2</sup>; (t) é o tempo de exposição em h e (ρ) é a massa específica em g/cm<sup>3</sup>.

**Figura 35:** Valores para a constante K.

Unidade	Valor de K
Milímetros por ano (mm/ano)	$8,76.10^4$
Micrômetros por ano (μm/ano)	$8,76.10^7$
Gramas por metro quadrado por hora (g/m <sup>2</sup> /h)	$1,00.10^4.ρ$
Miligramas por decímetro quadrado por dia (mdd)	$2,40.10^6.ρ$
Miligramas por decímetro quadrado por ano (mda)	$8,76.10^8.ρ$

**Fonte:** Da pesquisa.

Nota: Para o cálculo de corrosão na última unidade não é necessário entrar com o valor da massa específica, uma vez que esta variável é cancelada na fórmula.

As categorias de corrosividade atmosférica serão apresentadas após 1 ano de exposição em intemperismo de acordo com a norma NBR 14643.

#### 4.2.1 Taxas de corrosão do aço carbono exposto nas ECA's VC e SLII.

As taxas de corrosão do aço carbono estão apresentadas na Tabela 24.

**Figura 36:** Tabela com as taxas de corrosão e categorias de corrosividade atmosférica para o aço carbono nas ECA's VC e SLII.

Estação	Metal		Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
			dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$ )	
SE VC	Aço carbono		98	74,91	589,54	C2-
	Aço carbono		205	76,65	603,22	
	Aço carbono		279	66,41	522,61	
	Aço carbono					
Valor médio				<b>72,66</b>	<b>571,79</b>	
SE SLII	Aço carbono		98	107,15	843,26	C3-
	Aço carbono		203	56,85	447,44	
	Aço carbono		279	45,46	357,78	
	Aço carbono					
Valor médio				<b>69,82</b>	<b>549,49</b>	

Fonte: Da pesquisa.

#### 4.2.2 Taxas de corrosão do aço galvanizado exposto nas ECA's VC e SLII.

Utilizando um medidor de espessura de revestimento metálico e não metálico, modelo CM-8822, foi possível analisar a uniformidade da camada de revestimento de galvanização e constatar uma superfície não uniforme. Este fato corrobora com um processo de corrosão mais intenso, principalmente, nos locais de pequena ou nenhuma aderência do zinco.

As taxas de corrosão do aço galvanizado 100  $\mu\text{m}$  estão apresentadas na Tabela 25.

**Figura 37:** Tabela com as taxas de corrosão e categoria da corrosividade atmosférica para o aço galvanizado 100  $\mu\text{m}$ .

Estação	Metal		Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
			dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$ )	
SE VC	Aço galv 100		98	2,49	19,60	C2-
	Aço galv 100		205	1,21	9,54	
	Aço galv 100		279	1,62	12,72	
	Aço galv 100					
Valor médio				<b>1,77</b>	<b>13,95</b>	
SE SLII	Aço galv 100		98	2,66	20,92	C3-
	Aço galv 100		203	1,13	8,92	
	Aço galv 100		279	1,46	11,47	
	Aço galv 100					
Valor médio				<b>1,75</b>	<b>13,77</b>	

Fonte: Da pesquisa.

As taxas de corrosão do aço galvanizado 50  $\mu\text{m}$  estão apresentadas na Tabela 26.

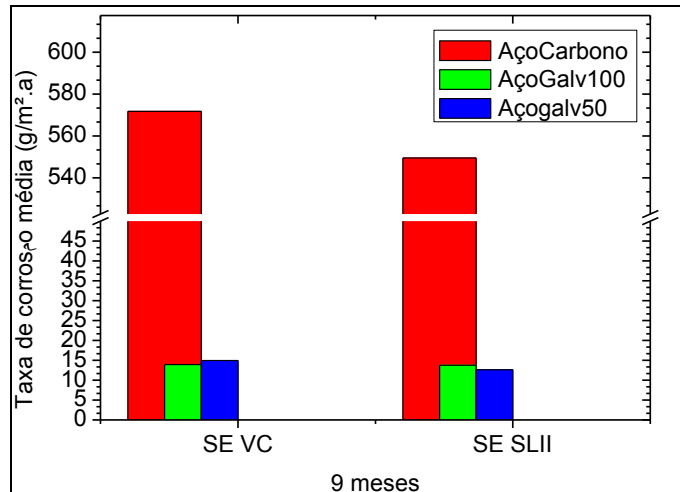
**Figura 38:** Tabela com as taxas de corrosão e categoria da corrosividade atmosférica para o aço galvanizado 50  $\mu\text{m}$ .

Estação SE VC	Metal	Tempo de Exposição dias	Taxas de Corrosão		Classificação
			( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$ )	
	Aço galv. 50 $\mu\text{m}$	98	3,14	24,71	C2-
	Aço galv. 50 $\mu\text{m}$	205	1,07	8,43	
	Aço galv. 50 $\mu\text{m}$	279	1,49	11,73	
	Aço galv. 50 $\mu\text{m}$				
Valor médio			<b>1,90</b>	<b>14,96</b>	
SE SLII	Aço galv. 50 $\mu\text{m}$	98	2,36	18,55	C3
	Aço galv. 50 $\mu\text{m}$	203	1,27	9,99	
	Aço galv. 50 $\mu\text{m}$	279	1,19	9,34	
	Aço galv. 50 $\mu\text{m}$				
Valor médio			<b>1,61</b>	<b>12,63</b>	-

Fonte: Da pesquisa.

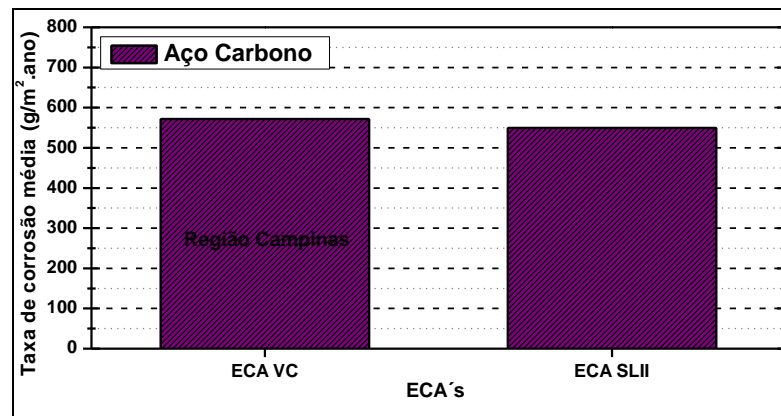
De uma forma geral, de acordo com as Tabelas 25 a 26 foi possível observar que não houve grandes diferenças nas taxas de corrosão dos metais entre as ECA's VC e SLII até o momento, conforme Figura 19 a 21.

**Figura 39:** Figura 16 Taxas de corrosão dos metais aço carbono, aço galvanizado de recobrimento 100 e 50  $\mu\text{m}$ , instalados nas ECA's VC e SLII nos distintos períodos de análise.



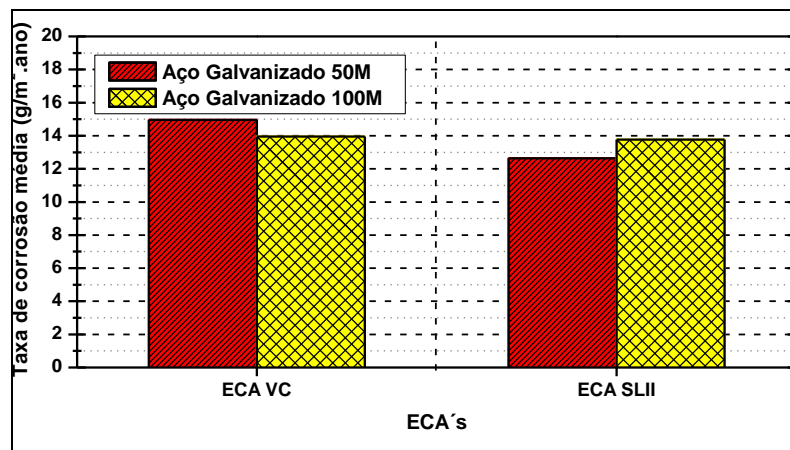
Fonte: Da pesquisa.

**Figura 40:** Taxa de corrosão do aço carbono instalado nas ECA's VC e SLII nos distintos períodos de análise.



Fonte: Da pesquisa.

**Figura 41:** Taxas de corrosão dos aços galvanizados de recobrimento 100 e 50  $\mu$ m, instalados nas ECA's VC e SLII nos distintos períodos de análise.



Fonte: Da pesquisa.

É importante salientar que a SE SLII está a uma distância aproximada do mar ao leste de 5,31 km e ao oeste de 8,25 km. Assim como também está muito próximo à área dos lagos (0,67 km de distância), que é uma lagoa de deposição de lama vermelha da indústria Alumar, Figura 22. A lama vermelha (red mud) é a denominação genérica para o resíduo insolúvel gerado durante a etapa de clarificação do processo Bayer (sub-produto gerado no processo de beneficiamento da bauxita), sendo normalmente disposta em lagoas projetadas especialmente para este fim. Neste ambiente é notável a presença de íons cloretos, bem como de compostos de enxofre devido à emissão de SO<sub>2</sub>, SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>S e outros, na atmosfera, pela queima de combustíveis fósseis.

**Figura 42:** Lagoa de deposição de lama vermelha da ALUMAR – Ilha de São Luís – Maranhão



**Fonte:** Silva Filho, 2007.

A alumina produzida a partir do processo de refinamento (Processo Bayer) é, por sua vez, empregada como matéria-prima para a produção de alumínio metálico pela redução eletrolítica da alumina em um banho de criolita natural ou sintética fundida ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), método conhecido como processo Hall-Héroult, que não produz resíduos. Este método é empregado para a produção de alumínio metálico tanto pela ALBRAS como pela ALUMAR.

A ALUMAR adota o sistema de empilhamento a seco para a armazenagem dos resíduos da bauxita. No final da sua utilização, as áreas de armazenagem são cobertas e reflorestadas.(Relatório CEPEL-23379/2013).

**Figura 43:** Tabela com os constituintes do Resíduo de bauxita.

<b>Constituintes do Resíduo de bauxita</b>	<b>(%) peso</b>
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	29,538
$\text{SiO}_2$	17,283
$\text{CaO}$	1,082
$\text{Al}_2\text{O}_3$	22,539
$\text{TiO}_2$	4,058
$\text{Na}_2\text{O}$	12,508
$\text{V}_2\text{O}_5$	0,280
$\text{MgO}$	0,148
$\text{K}_2\text{O}$	0,027
PF (perda ao fogo)	12,035

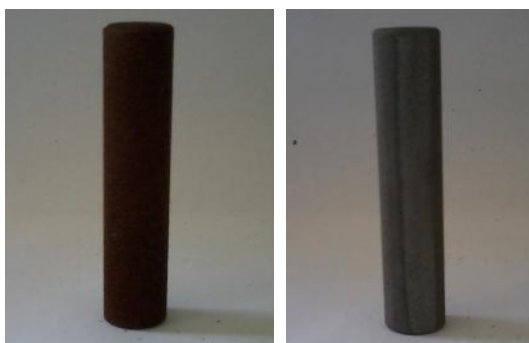
**Fonte:** Magalhães, 2012.

Por sua vez, a SE VC também está próxima a uma lagoa de lama vermelha, neste caso produzido pela indústria Alunorte. Esta lagoa fica a uma distância da subestação de 1,66 km. O mar está a uma distância de aproximadamente 2,98 km. A subestação também está próxima de um setor industrial ao oeste e a indústria Albrás e Alunorte ao norte.

Em relação a SE SLII, a subestação de Vila do Conde tem ao leste somente a presença de vegetação, tendo apenas na sua direção oeste a proximidade com o mar, sendo que na SE SLII, a subestação esta próxima do mar por dois lados, direção leste e oeste. No que tange a influência da lama vermelha, a diferença entre as SE VC e SLII, é à distância, no caso de SLII a lama está mais próxima do que em SEVC.

Com relação ao procedimento para a obtenção da taxa de corrosão dos cupons de aço carbono 1020, estes são similares aos das placas metálicas, mas com uma pequena diferença, neste caso se mede as dimensões, pelo menos altura e diâmetro, utilizando um paquímetro como já foi citado anteriormente.

**Figura 44:** Imagem dos cupons de aço carbono antes da limpeza química (esquerda) e após a limpeza química (direita).



**Fonte:** Da pesquisa.

As taxas de corrosão e categorias de corrosividade atmosférica para os corpos de prova do aço carbono 1020 em forma cilíndrica da ECA SLII estão apresentadas na Tabela 28.

**Figura 45:** Tabela com as taxas de corrosão e categorias de corrosividade atmosférica para os corpos de prova de aço carbono 1020, em forma cilíndrica na ECA SLII.

PONTO LC1	Metal	Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
		dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$ )	
	7TQ	203	47,9	376,8	C3
	7TD				
	7TV				
	7TS				
	7TB				
	7TZ				
	7TI	98	172,4	1356,5	
	7TY	279	37,9	298,1	
Valor médio			<b>86,07</b>	<b>677,13</b>	
PONTO LC2	Metal	Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
		dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$ )	
	9U				C3
	9Z	203	48,4	380,9	
	9I				
	8K				
	8C				
	7HQ	279	41,9	329,4	
	8E				
	7HR	99	142,9	1124,6	
Valor médio			<b>77,73</b>	<b>611,63</b>	
PONTO LC3	Metal	Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
		dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$ )	
	9J	279	30,5	239,8	C3
	8B				
	8M				
	8N	98	118,2	930,1	
	9K				
	8F				
	8H				
	8O	203	30,5	240,3	
	9W				
Valor médio			<b>74,35</b>	<b>585,20</b>	
PONTO LC4	Metal	Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
		dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$ )	
	9L				C3
	8G	98	127,3	1001,8	
	9V				
	9Y				
	8I				
	8J	279	29,7	233,9	
	9X				
	8A	203	38,3	301,6	
Valor médio			<b>65,10</b>	<b>512,43</b>	

Fonte: Da pesquisa.

De acordo com a Tabela 27, foi possível observar que não houve destaque nos pontos LC1 a LC4 no que se refere à taxa de corrosão. Os resultados de uma forma geral foram próximos.

As taxas de corrosão e categorias de corrosividade atmosférica para os corpos de prova do aço carbono 1020 em forma cilíndrica da ECA VC estão apresentadas na Tabela 28.

**Figura 46:** Tabela com as taxas de corrosão e categorias de corrosividade atmosférica para os corpos de prova de aço carbono 1020, em forma cilíndrica na ECA VC.

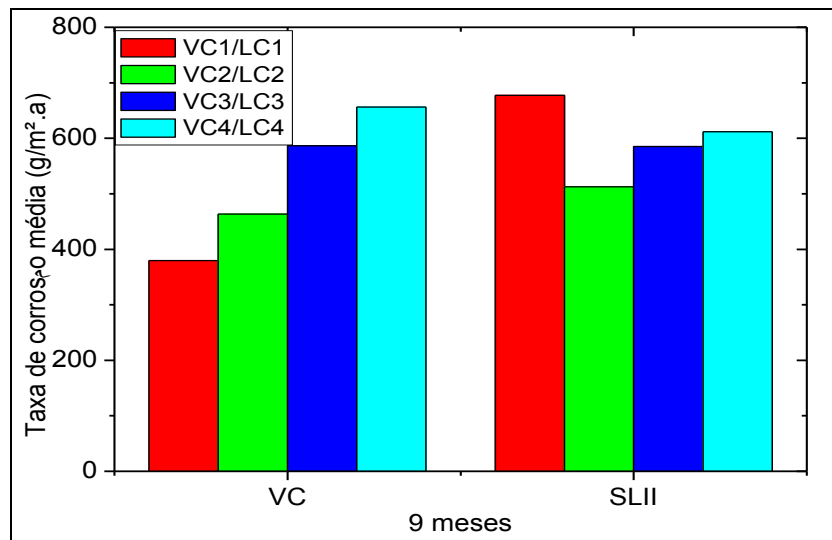
	Metal	Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
		dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$ )	
PONTO VC1	3N	98	28,0	220,1	C2
	4YJ				
	3HB	279	55,5	437,1	
	3I				
	3S				
	3P				
	3HA	205	61,1	481,1	
	3V				
Valor médio			<b>48,20</b>	<b>379,43</b>	
	Metal	Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
		dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$ )	
PONTO VC2	3M	205	67,5	531,3	C2
	3O				
	3Y	98	132,3	1041,2	
	3R				
	3L				
	4YN	279	50,4	396,6	
	3Q				
	3T				
Valor médio			<b>83,40</b>	<b>656,37</b>	
	Metal	Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
		dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$ )	
PONTO VC3	3J				C2
	3U	279	48,1	378,3	
	7TR	205	49,1	386,3	
	7TM				
	7TA				
	7TU				
	7TP	98	126,4	994,7	
	3Z				
Valor médio			<b>74,53</b>	<b>586,43</b>	
	Metal	Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
		dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$ )	
PONTO VC4	7TX	98	75,7	595,8	C2
	7TE				
	7TF	205	53,1	417,9	
	7TH				
	3K				
	7TJ				
	7TK	279	47,8	376,0	
Valor médio			<b>58,87</b>	<b>463,23</b>	

Fonte: Da pesquisa.



Em relação às Tabelas 27 e 28, observou-se que de uma forma geral a ECA de SLII obteve resultados de taxa de corrosão um pouco mais significativos do que em relação à ECA VC. Isto pode ser observado na Figura 26.

**Figura 47:** Taxas de corrosão dos cupons instalados nas ECA's VC e SLII nos distintos períodos de análise.



Fonte: Da pesquisa.

### 4.3 ESTAÇÃO METEOROLÓGICA

#### 4.3.1 Dados Meteorológicos

Devido a problemas técnicos ocorridos com as estações, assim como a ausência de coletas de dados em períodos aleatórios, fez-se necessário a obtenção de dados locais assim como publicados no Centro de Previsão do tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).

De acordo com a Tabela 29, notou-se que no período de estudo, a temperatura e umidade do ambiente das duas estações, não foram muito diferentes entre si. Não podendo de esta forma ser um fator preponderante para se definir diferenças de resultados das taxas de corrosão entre as estações.

São necessários claros, mais tempo, e mais dados meteorológicos para que o estudo se aprofunde e seja mais conclusivo.

**Figura 48:** Tabela com as temperaturas (C0), umidades (%) e velocidade do vento das ECA's de VC e SLII no período de setembro de 2013 até agosto de 2014.

Data	Direção do vento		Velocidade do vento (m/s)		Índice pluviométrico (mm)		Temperatura (°C)		Umidade relativa (%)	
	VC	SLII	VC	SLII	VC	SLII	VC	SLII	VC	SLII
set/13	95	86	6	4	12	1	27	28	93	73
out/13	86	81	6	4	9	16	28	27	92	72
nov/13	88	79	6	4	7	46	28	27	90	62
dez/13	90	79	7	3	15	337	27	22	94	68
jan/14	107	45	6	1	8	368	26	25	97	31
fev/14	108	3	5	0	11	286	26	25	97	78
mar/14	85	6	5	0	34	34	26	26	95	87
abr/14	100	5	5	0	70	3	26	26	96	89
mai/14	114	127	4	1	70	17	27	25	92	92
jun/14	103	102	4	2	37	49	27	27	92	87
jul/14	101	78	6	2	28	8	27	27	93	82
ago/14	84	77	5	3	37	36	27	27	94	79

Fonte: Da pesquisa.

A temperatura média nas ECA's de VC e SLII variaram entre 27 e 26 oC, respectivamente conforme dados locais e publicados pela CPTEC,2014.

O índice pluviométrico médio na ECA de VC e SLII variou entre 28 e 100 mm, respectivamente conforme dados locais e publicados pela CPTEC,2014.

A umidade relativa média da SE VC variou de 90 a 97 %, e a SE SLII variou de 62 a 92 % [56]. Estes valores, somados ao da temperatura média anual, podem ter contribuído para um aumento da probabilidade de corrosão dos metais expostos devido à formação de uma película fina de eletrólitos no substrato.

Segundo dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), o clima em Belém é quente e úmido, tipicamente equatorial, influência direta da floresta amazônica, com chuvas abundantes durante o ano todo, sem a ocorrência de uma estação seca. O índice pluviométrico é de 2921,7 mm (ano). Os meses mais quentes são de julho a novembro, quando a temperatura pode chegar a 35 graus, porém a temperatura média anual é de 25,9°C (INMET,2004).

O clima de São Luís é tropical, quente e úmido. A temperatura mínima na maior parte do ano fica entre 21 e 27 graus e a máxima geralmente fica entre 27 e 34 graus. Apresenta

dois períodos distintos: um chuvoso, de janeiro a julho, e outro seco, de agosto a dezembro. A média pluviométrica é de 2290 mm por ano (INMET,2004).

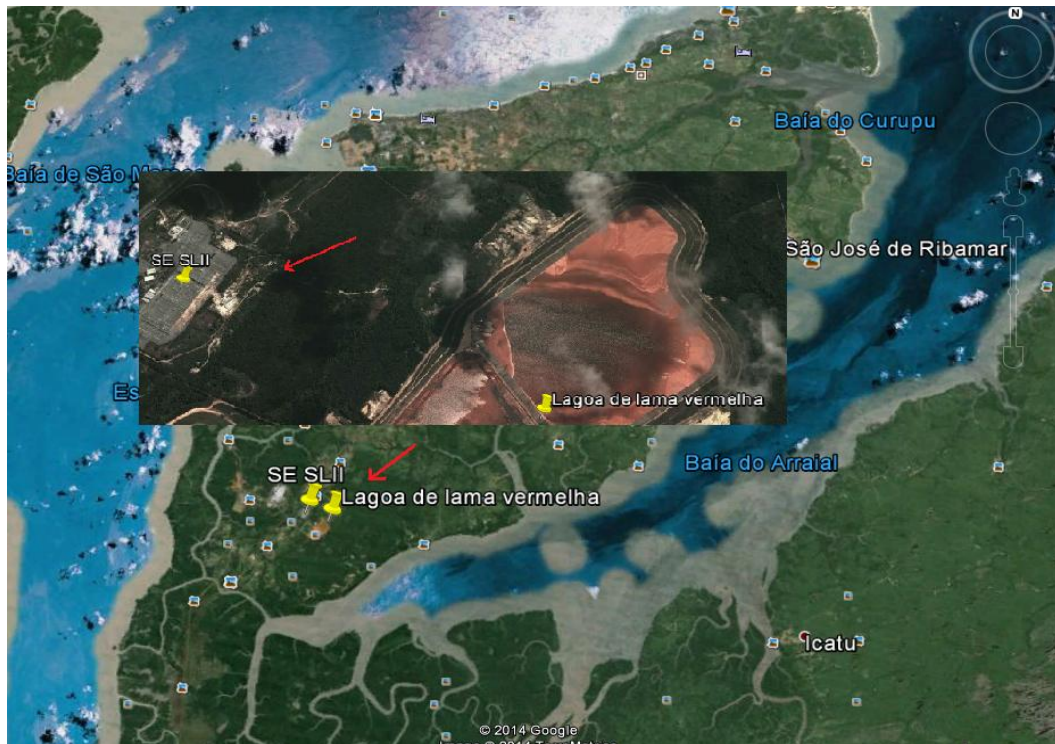
A direção do vento no período de estudo para a ECA VC variou entre norte e noroeste, ou seja, proveniente do mar e do setor industrial, a velocidades médias de 5 m/s, Figura 27. Já a direção do vento para a ECA de SLII variou em sua maioria na direção nordeste, proveniente do mar mais ao longe e bem próximo à lagoa de lama vermelha, Figura 28. A velocidade média foi de 2 m/s.

**Figura 49:** Imagem da SE VC com as setas vermelhas identificando as direções do vento, norte e noroeste.



Fonte: INMET, 20014.

**Figura 50:** Imagem da SE SLII com a seta vermelha identificando a direção do vento, nordeste.



Fonte: INMET, 20014.

O tempo de superfície úmida ( $t$ ), (período durante o qual uma superfície metálica fica coberta por uma película de eletrólito) será obtido na próxima coleta, quando totalizará um ano de estudo, possibilitando assim o cálculo da somatória de horas por ano, em que foi registrado temperaturas acima de zero graus (0C) e umidade relativa igual ou acima de 80 %.

## 5 CONCLUSÕES

Através das medidas de brilho dos corpos de prova com esquemas de pintura (L3 e L5) verificou-se como efeito da radiação UV e das intempéries locais, no período de exposição, em Vila do Conde e São Luiz algumas alterações no sistema de pintura ocorrendo uma diminuição dos valores de medidas de brilho indicando degradação da resina das tintas ao longo do tempo e que os valores de perda de brilho foram aproximados, não havendo destaque entre os sistemas.

Observou-se que a taxa de corrosão do Aço Carbono entre as ECAS SEVC e SLII estudadas não teve grandes diferenças sendo classificadas como ambientes de baixa e média agressividade ambiental respectivamente.

Nos cupons de Aço Carbono(1020) também não houveram grandes destaques com diferença da taxa de corrosão entre ECAS em torno de 173,45(g/cm<sup>2</sup>.ano)

Nas placas de Aço galvanizado com 100 $\mu$  e 50 $\mu$  obtiveram valores bem próximos e baixos isso se dá ao desempenho da galvanização empregados nos CP'S.

Portanto apesar de não ter ocorrido grandes diferenças entres as Ecas o aço galvanizado apresentou melhor desempenho, na sua aplicação prática verifica-se que a velocidade de corrosão do zinco em atmosfera naturais e soluções aquosas relativamente neutras e razoavelmente baixa, conferindo assim um bom revestimento e uma boa resistência a corrosão de longa duração.

A presença da lama vermelha aderente às estruturas metálicas carreadas pelos ventos devido ao seu armazenamento a céu aberto pela ALUNORTE e ALUMAR próximo às SE'SL II, não promove qualquer processo de corrosão acelerado nestas estruturas, uma vez que a mesma é constituída de óxidos não corrosivos.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Por meio da análise dos resultados do trabalho desenvolvido, são sugeridos linhas de pesquisa para a realização de trabalhos futuros:

- Analisar o comportamento de materiais utilizados na linha de transmissão mediante a taxa de corrosão, bem como dos ambientes nos quais os isoladores operam, a fim de avaliar o seu desempenho mecânico e elétrico.
- Avaliar, por meio de perda de massa o desempenho do grau de severidade da poluição da SE Vila do Conde/PA e São Luis II/MA nos ambientes com alta taxa de salinidade litorânea, alta agressividade ambiental por poluentes industriais, comparativamente a um padrão de referência.
- Analisar a taxa de cloreto e sulfato nas Ecas de VC e SL II.

## 7 REFERÊNCIAS

ABNT NBR 14643. **Corrosão atmosférica - classificação da corrosividade de atmosferas.** Rio de Janeiro, 2001.

ABNT NBR 6211: **Determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida.** Rio de Janeiro, 2001, 6 p.

ABNT NBR 6921: **Sulfatação total na atmosfera – determinação da taxa pelo método da vela de dióxido de chumbo.** Rio de Janeiro, 2002.

ABNT NBR 6209: **Materiais metálicos não revestidos – ensaio não acelerado de corrosão atmosférica.** Rio de Janeiro, 1986.

ABNT NBR 6210: **Preparo, limpeza e avaliação da taxa de corrosão de corpos de prova em ensaios de corrosão atmosférica.** Rio de Janeiro, 1982.

ASTM. B 117-03. **Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus (Vol. 03.02).** West Conshohocken, PA, USA: ASTM International.

ARAÚJO, E. P., PARENTE JUNIOR, J. C., & ESPIG, S. A. (2005). **Estudo das Unidades de Paisagem da Ilha do Maranhão: Delimitação e dinâmica.** XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Goiânia: INPE.

ANSELMO, N. *et al.* **Corrosion behavior of supermartensitic stainless steel in aerated and CO<sub>2</sub>-saturated synthetic seawater,** *Materials Science and Engineering A*, v.428, p. 73-79, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G 1-90: **Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens.** 1990, 7 p.

BARROS, M. B. (2009). **Mineração, Finanças Públicas e Desenvolvimento Local no Município de Barcarena - PA.** Dissertação de Mestrado- Instituto de Filosofia e Ciências Humanas-PPGEO Belém.

BRAMBILLA, K. J. C. **Investigação do grau de corrosividade sobre materiais metálicos das redes aéreas de distribuição de energia elétrica (RD) da região metropolitana de Salvador-BA,** Universidade Federal do Paraná, 2011.

BRAMBILLA, K. J. C.; PEREIRA, P. A. M.; PORTELLA, K. F.; INONE, P. C.; PIAZZA, F.; HENKE, S. L.; SILVA, G. C. da; SILVA, J. M. DA; CABUSSÚ, M. S.; CERQUEIRA, D. P.; SALLES, R. N. **"Northeastern Brazilian Marine Atmospheric Corrosion Performances of Galvanized Steel and Copper Specimens."** *Journal of Chemistry and Chemical Engineering*, v. 5, p. 435-442.

COSTA, E. A. L. **Determinação do Potencial de Agressão dos Sais Marinhos Sobre as Argamassas de Revestimento na Região Metropolitana.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.(dist. Mar).

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras de concreto.** São Paulo: PINI, 1997.36. SINGH, D. D. N.; YADAV, S.; SAHA, S. J. K.; Role of climatic conditions on corrosion characteristics, *Corros. Sci.* 50 (2008) 93–110.

DONG J, HAN E, KE H. **Introduction to atmospheric corrosion research in China.** *Science and Technology of Advanced Materials*; 2007:8, 559-65.

FELIU, S.; MORCILLO, M.; CHICO, B. **Effect of Distance From Sea on Atmospheric Corrosion Rate.** *Corrosion*, v. 55, n. 9, 1999.

FITZGERALD, J. W. **Marine Aerosols: a Review:** *Atmospheric Environment*, v. 25A, n. 3 / 4, 1991.

FLINN D.R, CRAMER S.D, CARTER J.P, HURWITZ D.M, LINSTROM J, in: BABOIAN R. (Ed.), **Materials Degradation Caused by Acid Rain**, ACS Symposium Series, vol. 318, ACS, Washington, DC, 1982, pp. 119–151.

GENTIL, V. **Corrosão. 4ª ed.**, LTC-Livros Técnicos e Científicos S.A., RJ, 2003.

Garcia, C. M.; Portella, K. F.; Vergés, G. R.; Freire, K. R. R.; Joukoski, A.; Baron, O.; Motta, H. N.; Paula, J. F.; Relatório 4082/2003, LACTEC: Curitiba, 2003 apud PORTELLA, K. F.; GARCIA, M.C.; VERGÉS, G. R.; et. al. **Desempenho físico-químico de metais e estruturas de concreto de redes de distribuição de energia: estudo de caso na região de Manaus.** *Química nova*, vol.29, n. 4,724-734, 2006.

HELENE, PAULO R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** São Paulo: Editora Pini – Instituto de pesquisas Tecnológicas IPT, 1986. 47p.



HENKE, S. L. et al. **Mapeamento do litoral paranaense quanto à corrosão atmosférica.** COPEL/LAC COM. TÉC. 0011/1990.

INMET- **INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA.** (2009). <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>. Acesso em 16 de 02 de 2015, disponível em <http://www.inmet.gov.br>.

ISO 9223: **Corrosion of metal and alloys, classification of corrosivity of atmospheres.** Genebra, 1992.

JAEGERMANN, C. **Effect of Water-Cement Ratio and Curing on Chloride Penetration into Concrete Exposed to Mediterranean Sea Climate.** ACI Materials Journal, 1990.

JAMES, G. (2013). **Princípios de Química Ambiental.** (M. J. Oliveira, Trad.) Rio de Janeiro, RJ, Brasil: LTC.

KUCERA, V.; MATTSON, E. **Corrosion Mechanism,** editado por MANSFELD, F. Ed. Marcel Dekker Inc., New York, U.S.A., 1987, p.211-220.

KENNY, E. D.; SICA, Y. C.; CRUZ, O. M. et al. **Desenvolvimento de metodologia para monitoramento do grau de poluição nos alimentadores de 13,8 kV e 69 kV da ilha de São Luís,** LACTEC/CEMAR, 2004.

KENNY, E. D.; **“Avaliação do impacto da poluição ambiental no processo da corrosão atmosférica de metais através de redes neurais”.** Curitiba 2009. 116 f. tese (doutorado), Universidade Federal do Paraná.

MEIRA, *et al.* **Deposição de Cloretos em Zona de Atmosfera Marinha: Comportamento Sazonal e sua Relação com Estruturas de Concreto.** Trabalho apresentado no XI Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. Florianópolis, 2006.

MORCILLO, M. *et al.* **Salinity in Marine Atmospheric Corrosion: It's Dependence on the Wind Regime Existing in the Site.** Corrosion Science, n. 42, 2000.

MAGALHÃES, E. M., **Estudo da extração de compostos de ferro da lama vermelha visando extração e/ou recuperação de compostos de titânio,** tese de doutorado, UFPA, Belém, 2012.

O'DOWD, C. D.; SMITH, M. H.; CONSTERDINE, I. A.; LOWE, J. A. **Marine Aerosol. Seasalt, and the Marine Sulphur Cycle: a Short Review.** Atmospheric Environment, v. 31, n.1, 1997.

PIAZOLA, J.; DESPIAU, S. **Contribution of Marine Aerosols in the Particle Size Distribution Observed in Mediterranean Coastal Zone.** Atmospheric Environment, v. 18, 1997.

PEREIRA, P. A. M. **Investigação do impacto das variáveis climáticas e contaminantes em subestações de energia elétrica da região de campinas e baixada santista e sua correlação matemática utilizando a estrutura neural inteligente.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2013.

SPIEL, D. E; LEEUW, G. **Formation and Production of Sea Spray Aerosol.** J. Aerosol Sci, v. 27, s1, 1996.

PORTELLA, K. F.; LACERDA, L. A. de; CAMPOS FILHO, D. F. et al. **"Desenvolvimento de metodologia para minimizar o impacto da corrosividade em LT's"**. RT LACTEC/ELETRONORTE/ANEEL, 1919 (2006).

PORTELLA, K. F. et al. **Desenvolvimento de Metodologia para Minimizar o Impacto da Corrosividade em LT's.** Relatório Técnico LACTEC 1918, ELETRONORTE/ANEEL, 98 (2006).

PORTELLA, K. F.; LACERDA, L. A. de; et al. **"Pesquisa e desenvolvimento de metodologias para estudo de corrosão em usinas termelétricas a diesel/gás"**. RT LACTEC/ELETRONORTE 19742, 2006.

PORTELLA, K. F.; GARCIA, C. M.; et al. **"Desempenho físico-químico de metais e estruturas de concreto armado de redes de distribuição de energia. Estudo de caso na região de Manaus"**. Quim. Nova, Vol. 29, No. 4, 724-734, 2006

PORTELLA, K. F.; PIAZZA, F.; et al. **"Mapeamento ambiental para a determinação do grau de corrosividade e de degradação de materiais das redes aéreas de distribuição de energia elétrica com soluções corretivas"**. Projeto. LACTEC/COELBA, Curitiba, PR, 2008 (em andamento).

PORTELLA, K. F. et al. **Mapeamento Ambiental para a Determinação do Grau de Corrosividade e da Degradação de Materiais das Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica com Soluções Corretivas**. Projeto COELBA/ ANEEL, Ciclo 2006/2007.

PORTELLA, K. F. et al. **Mapeamento Ambiental para a Determinação do Grau de Corrosividade e da Degradação de Materiais das Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica com Soluções Corretivas**. RT LACTEC, COELBA/ ANEEL (2011).

PIAZZA, F.; SILVA, G.C.; et al. **Desenvolvimento de novo sistema para avaliação de redes de distribuição sob condições de multiestressamento**. Projeto COPEL/ANEEL; Ciclo 2004-2005.

PEREIRA, P. A. M. **Investigação do impacto das variáveis climáticas e contaminantes em subestações de energia elétrica da região de campinas e baixada santista e sua correlação matemática utilizando a estrutura neural inteligente**. UFPR/PIPE, 2013.

PIAZZA, F. ; MUNARO, M. et al. **Pesquisa do comportamento dos cabos protegidos e acessórios de rede aérea protegida, submetidos às solicitações típicas da região Centro-Oeste do Brasil**. Projeto CEMAT/ ANEEL Ciclos 2001-2002 e 2003-2004.

PANCHENKOY. M., STREKALOV P.V., “**Protect Metals**”, n. 41, pp. 557-567, 2005

ROCHA, E. P. (2009). **Zoneamento Ecológico Econômico do Pará**. Belém, Brasil.

RINCÓN A., SÁNCHEZ M., ROMERO N., SALAS O., DELGADO R., LÓPEZ B., URUCHURTU J., MARROCO M., PANOSIAN Z., “**Construction and Building Materials**”, *Sciencedirect*, v. 23, p. 1465-1471, 2009.

Relatório Técnico nº. 5A: **Observações e medições nas estações de corrosão atmosféricas no litoral. Projeto Litoral**. CESP – Companhia Energética de São Paulo. São Paulo, 1987

Relatório CEPEL - 23379/2013 - **Classificação e caracterização das atmosferas nas dependências da SE Vila do Conde – PA e da SE Pedrinhas – MA pertencentes à Eletronorte**.

SPIEL, D. E.; LEEUW, G. **Formation and Production of Sea Spray Aerosol**. *J. Aerosol Sci*, v. 27, s1, 1996.

SICA, Y. C.; KENNY, E. D.; PORTELLA, K. F.; CAMPOS FILHO, D. F.; J. Braz. Chem. Soc., 2007, 18, 153: ABNT NBR 14643. **Corrosão atmosférica - classificação da corrosividade de atmosferas**. Rio de Janeiro, 2001.

SICA, Y. C. **Mapeamento da Corrosividade Atmosférica da Ilha de São Luís do Maranhão e a Correlação das Variáveis Ambientais que Influenciaram na Degradação dos Materiais Metálicos**, UFPR, 2006.

SICA, Y. C.; KENNY, E. D.; PORTELLA, K. F., et al. **Atmospheric Corrosion Performance of Carbon Steel, Galvanized Steel, Aluminum and Copper in the North Brazilian Coast**. J of Braz. Chem Soc, 2006.

SINGH, D. D. N.; YADAV, S.; SAHA, S. J. K.; **Role of climatic conditions on corrosion characteristics**, Corros. Sci. 50 (2008) 93–110.

SILVA, G. C.; PORTELLA, K. F. **Pesquisa em inovação tecnológica de materiais, equipamentos e projetos para melhoria de infraestrutura, operação, manutenção, segurança e confiabilidade de linhas de transmissão e redes de distribuição de energia elétrica**. RT LACTEC/CPFL/ANEEL, 2013.

SILVA, J. M.; PORTELLA, K. F.; AZEVEDO, F. S. C. et al. **Diagnóstico da corrosão em torres de linhas de transmissão, utilizando análises de laboratório e de campo e a otimização na convivência com correntes de desequilíbrio circulantes**. P&D ANEEL/ELETRONORTE, 2013 (em andamento).

SILVA, G. C.; BEZERRA, R. C. da. **Desenvolvimento de Tecnologia para Avaliação de Desempenho de Isoladores de Alta Tensão e, Áreas de Alta Agressividade Ambiental**. P&D LACTEC/ELETRONORTE, 2013 (em andamento).

Silva Filho, E. B.; Alves, M.C.M.; Da Motta, M.; **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas**, scielo, v.12, n.2, Rio de Janeiro, 2007.

UHLIG H. **The corrosion handbook**. New York, USA: John Wiley & Sons Inc.; 1978

VIANNA R. O. **O programa de corrosão atmosférica desenvolvido pelo CENPES**. Boletim Técnico PETROBRÁS, v. 23, n. 1, p. 39-47, 1980.

VILASBOAS, J. M. L. **Durabilidade das Edificações de Concreto Armado em : Uma Contribuição para a Implantação da NBR 6118:2003**. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologia Ambiental no Processo Produtivo) – Escola Politécnica. Universidade Federal da , , 2004.

VELEVA L., ACOSTA M., MERAZ E., “**Atmospheric corrosion of zinc induced by runoff**”, *Corrosion Science*, n. 51, pp. 2055-2062, 2009.

YUANTAI M, YING L, FUHUI W. **The atmospheric corrosion kinetics of low carbon steel in a tropical marine environment**. *Corrosion Science*, 2010: 52,1796-00.

WILCOX, G.D., GABE, D.R., “**Electrodeposited Zinc alloy coatings**”, *Corrosion Science*, v. 35, n. 5-8, pp. 1251-1258, 1993. <http://www.cptec.inpe.br/>, acessado em 09 de outubro de 2014.