

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**

**KELLY JACQUELINE CAMPOS BRAMBILLA**

**INVESTIGAÇÃO DO GRAU DE CORROSIVIDADE SOBRE MATERIAIS METÁLICOS DAS REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (RD) DA REGIÃO METROPOLITANA DE SALVADOR-BA.**

**CURITIBA**

**2009**

**KELLY JACQUELINE CAMPOS BRAMBILLA**

**INVESTIGAÇÃO DO GRAU DE CORROSIVIDADE SOBRE MATERIAIS METÁLICOS DAS REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (RD) DA REGIÃO METROPOLITANA DE SALVADOR-BA.**

**Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de mestre, Curso de Pós-graduação em Engenharia, área de concentração em Engenharia e Ciências dos Materiais, do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.**

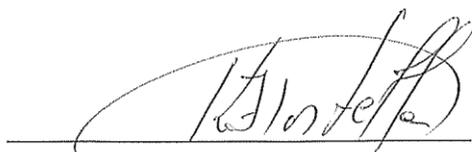
**Orientador: Prof. Dr. Kleber Franke Portella.**

**CURITIBA**

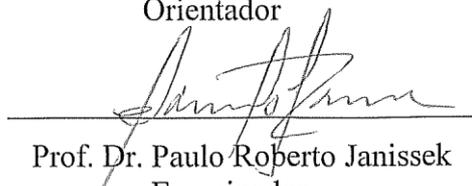
**2011**

## RELATÓRIO DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Aos seis dias do mês de maio de 2011, na Sala 1 do LACTEC – no Centro Politécnico – UFPR, foi instalada pelo Prof. Dr. Dante Homero Mosca Jr., coordenador do PIPE – Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, a Banca Examinadora para a centésima nonagésima nona defesa de dissertação de mestrado na área de concentração: Engenharia e Ciência dos Materiais. Estiveram presentes no ato, além do coordenador do Curso de Pós-Graduação, professores, alunos e visitantes. A Banca Examinadora, atendendo a determinação do colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, foi constituída pelos Professores Doutores: Kleber Franke Portella (UFPR), Ramon S. C. Paredes (UFPR), Paulo Roberto Janissek (UP) e José Carlos Alves Galvão (CEFET-PR). Às 09:00 horas, a banca iniciou os trabalhos, convidando a candidata **KELLY JACQUELINE CAMPOS BRAMBILLA** a fazer a apresentação da dissertação de mestrado intitulada “**INVESTIGAÇÃO DO GRAU DE CORROSIVIDADE SOBRE MATERIAIS METÁLICOS DAS REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (RD) DA REGIÃO METROPOLITANA DE SALVADOR – BA**”. Encerrada a apresentação, iniciou-se a fase de argüição pelos membros participantes. Tendo em vista a dissertação e a argüição, a banca decidiu pela Aprovação da candidata, (de acordo com a determinação dos artigos 68 e 69 da resolução 65/09 de 09.11.2009).

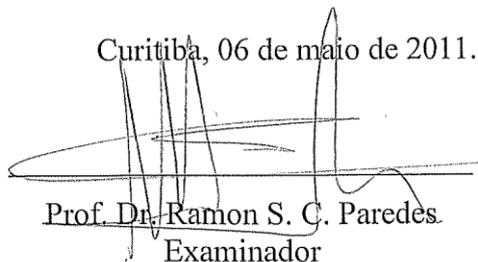


Prof. Dr. Kleber Franke Portella  
Orientador

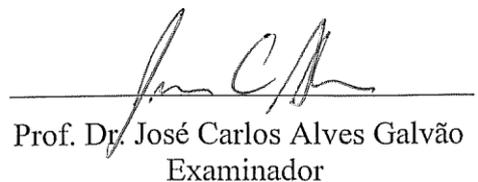


Prof. Dr. Paulo Roberto Janissek  
Examinador

Curitiba, 06 de maio de 2011.



Prof. Dr. Ramon S. C. Paredes  
Examinador



Prof. Dr. José Carlos Alves Galvão  
Examinador

## **DEDICATÓRIA**

**A minha mãe Delmira.  
À minha segunda mãe e irmã Luciene.  
Ao meu marido Ronni.  
Ao meu grande amigo Fabio.  
A minha ex professora de graduação Jaisa.  
E a todos que de alguma forma  
apoiaram na minha formação.**

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Kleber Franke Portella, pela oportunidade e atenção dispensada ao longo deste trabalho. Agradeço também pelo incentivo em minha vida profissional, em minha vida pessoal, pela confiança, pela amizade e orientação.

Ao meu marido, amigo e parceiro Ronni, pela paciência, sacrifício, companheirismo e todo o amor que me dedica. Sem você ao meu lado eu não teria conseguido esta vitória.

A toda à minha família, em especial as três mulheres fortes que ajudaram a moldar o meu caráter, minha mãe Delmira, minha Vó Zelita e minha irmã Luciene que considero minha segunda mãe. Muito obrigado, pela torcida, pelos conselhos, pelos puxões de orelha, pela inspiração, que me tornaram uma pessoa forte e batalhadora. Tenho muito orgulho de ter vocês como exemplo.

A Prof. Dra. Jaisa Fernandes Soares do departamento de química da Universidade Federal do Paraná, pelo incentivo que fez toda a diferença para que eu chegasse até aqui. Você acreditou em mim, quando eu não acreditava mais. Sem você, eu não teria nem me graduado.

Ao meu grande amigo Fabio, parceiro para de todas as horas que desde o início da graduação estive ao meu lado dando força. Obrigado pelos inúmeros momentos compartilhados de risos, grandes orientações, cumplicidade, brigas, discussões e pimentinhas.

A Doli por todos esses anos vividos ao nosso lado nos proporcionando com carinho gratuito sem pedir nada em troca.

Aos amigos do LACTEC, em especial ao aluno de iniciação científica Dasio pela grande ajuda e esforço. A Viviane, Francyele, Renata, Vinícius, Galvão, pelo carinho, ajuda e amizade sincera.

A Princia pelo apoio, amizade e por todos os momentos de dedicação.

Aos pesquisadores Maurílio, Alkimin e Isabella pelos ensinamentos e pela grande ajuda.

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC – por possibilitar a utilização de sua infra-estrutura e pelo apoio financeiro, bem como a Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia COELBA pela parceria e suporte durante o desenvolvimento dos estudos de campo. Agradeço também a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL e CNPQ pelo incentivo a pesquisa.

**Dê sempre o melhor... E o melhor virá!**

**O que você levou anos para construir, alguém pode destruir de uma hora para outra...**

**Construa assim mesmo!**

**Dê ao mundo o melhor de você, mas isso pode nunca ser o bastante...**

**Dê o melhor de você assim mesmo!**

**E veja você que, no final das contas, é entre você e DEUS...**

**Nunca foi entre você e eles!**

**Madre Teresa de Caucutá**

## 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. De acordo com Köppen, Salvador é uma cidade de clima quente e úmido, tipicamente tropical, com cerca de 2.466 h anuais de sol, ventilada (ventos anuais com velocidade média de 2,2 m/s) e uma temperatura média anual de 25 °C e com umidade média anual da ordem de 81%. Estas condições climáticas somadas a poluição industrial são extremamente prejudiciais aos materiais de engenharia, propiciando à corrosão ou degradação dos materiais metálicos, por possuir também um tempo de superfície úmida (t) elevado (» 4.000 h/ano), neste caso, classificado pela NBR 14643/01, como t<sub>4</sub>, ou seja, de alta corrosividade ambiental (C<sub>4</sub>). Assim, o estudo das variáveis que influenciam no processo de corrosão atmosférica, é de fundamental relevância, haja vista que grande parte dos materiais presentes no cotidiano está susceptível ao processo de degradação. Tem-se, como exemplo, a maioria dos metais das linhas de distribuição e transmissão de energia elétrica, bem como de comunicação de dados, tais como: cabos, torres, linhas telefônicas, acessórios de rede, entre outros. Com base nestas informações esta pesquisa propõe abordar diversos aspectos para a determinação da taxa de corrosividade e de deterioração de aço carbono da rede aérea de distribuição de energia elétrica (RD) da região metropolitana de Salvador-BA. Para tanto, foi desenvolvida uma metodologia baseada na implantação de 18 ECA's abrangendo diferentes ambientes corrosivos onde foram monitorados, mensalmente, parâmetros meteorológicos e a taxa de deposição dos principais poluentes atmosféricos (íons cloreto, sulfato, materiais particulados), a fim de se obter subsídios para a classificação da corrosividade atmosférica. Nestas ECA's foram instalados, além dos módulos de coleta de poluentes, painéis de intemperismo natural com corpos-de-prova dos materiais metálicos: aço carbono, aço galvanizado, alumínio e cobre em formas de placas e cupons de aço carbono. Foram também instalados nestas ECA's cupons de aço carbono assim como em outras 11 regiões da Bahia. Foram desenvolvidos modelos de rede neural e função dose-resposta, para a interpretação e predição da vida útil destes metais expostos nas ECA's. Foi possível observar que os metais com melhor desempenho frente a corrosão foram o cobre e o alumínio. As estações que classificaram-se como menos agressivas em relação a corrosividade ambiental considerando os poluentes atmosféricos e tempo

de superfície úmida, foram as ECA's CJD, PPE, SPS e CMU, sendo que as ECA's mais agressivas foram as de AML, PIT e CIU. As estações que classificaram-se como menos agressivas em relação a corrosividade ambiental considerando a taxa de corrosão, foram as ECA's CJD, PPE, PIT, SPS e CMU, sendo que as ECA's mais agressivas foram as de AML e CIU. A previsão da vida útil para o alumínio de acordo com o estudo da profundidade dos pites foi de 30 anos, isto se for considerado a formação de apenas um pite. A previsão para se perder metade da massa inicial de uma placa de aço carbono de 224,27 g de acordo com a função dose resposta e considerando a corrosão generalizada foi de 23 anos, mas em relação à corrosão por placas a previsão de vida útil para se romper completamente uma placa de espessura de 1900  $\mu\text{m}$ , foi de três anos e meio, considerando também a formação de apenas uma cavidade. A classificação da agressividade ambiental considerando a taxa de corrosão dos cupons de aço carbono para as ECA's, classificaram-se entre baixa e muito alta, ultrapassando os limites da norma. Com destaque para a Praia de Ipitanga. Em relação às redes neurais, o cobre foi o único metal que não apresentou bons coeficientes de correlação em relação aos resultados experimentais e os calculados pela rede. A possível explicação para este fato foi que três ECA's (CIU, AML e PIT) em relação às outras ECA's apresentaram resultados muito diferentes. Isto comprometeu a qualidade da rede, uma vez que refazendo-se a rede sem estas ECA's os resultados melhoraram muito. Mas para os outros metais os resultados foram bons, o que comprova que esta ferramenta pode ser um instrumento de estimativa da taxa de corrosão para a região metropolitana de Salvador. A função dose-resposta apresentou bons coeficientes de correlação, o que comprova que esta ferramenta também pode ser um instrumento de estimativa da perda de massa para as ECA's analisadas na região metropolitana de Salvador.

**Palavras-chave:** corrosão atmosférica; degradação de metais; mapa de corrosividade; funções dose-resposta.

## ABSTRACT

The extension of the Brazilian coast contributes positively to the degradation of materials by the conditions of average temperature and relative humidity much higher than in other regions, especially when looking at the coastal areas of northern and northeastern Brazil. According to Köppen, Salvador is a city of hot and humid, typically tropical, with about 2466 hours annual sunshine, ventilated (annual winds with average speed of 2.2 m / s) and an average annual temperature of 25 ° C and annual average humidity of about 81%. These weather conditions coupled with industrial pollution are extremely harmful to engineering materials, providing corrosion or degradation of metallic materials, by having a time of wet surface (t) high ("4000 h / year), in this case, sorted by NBR 14643/01, and t<sub>4</sub>, ie, high corrosive environment (C<sub>4</sub>). Thus, the study of the variables that influence the process of atmospheric corrosion is of fundamental importance, considering that most of the materials present in everyday life are likely to degradation process. There are, for example, most metals of distribution lines and electricity transmission and data communication, such as cables, towers, telephone lines, network accessories, among others. Based on this information it proposes to address various aspects to determine the rate of corrosion and deterioration of carbon steel used in electric power transmission and distribution lines (DL) in the metropolitan region of Salvador, Bahia. To this end, we developed a methodology based on the deployment of ACS's eighteen in different environments where they were monitored monthly meteorological parameters and deposition rates of main pollutants (ions chloride, sulphate, particulate materials) in order to obtain subsidies for classification of atmospheric corrosivity. These ACE's were installed in addition to the modules to collect pollutants, natural weathering panels with body-of-proof of metallic materials : mild steel, galvanized steel, aluminum and copper in forms of plates and carbon steel coupons. were also installed in these ACS's steel coupons carbon-11 as well as in other regions of Bahia. It was developed neural network models and dose-response function, is the interpretation and prediction of the Useful Life of These metals exposed in ACS's. It was observed that the metals with better performance against corrosion were copper and aluminum. The stations that were classified as less aggressive towards corrosive environment, considering the time of air pollutants and wet surface were ACS's CJD, EPP, CMU and SPS, and the ACS's were the most aggressive of AML, PIT and CIU. The stations that were classified as less aggressive towards environmental corrosivity considering the rate of corrosion were ACS's CJD, PPE, PIT, SPS and CMU, and the ACS's were the most aggressive AML and CIU. The predicted service life

for aluminum in accordance with the study of the depth of pits was 30 years, that if one considers only the formation of a pit. The forecast to lose half of the initial mass of a carbon steel plate from 224.27 g according to the dose-response function and considering the general corrosion was 23 years, but in relation to the etching plates expected life for breaking through a thick plate of 1900 micrometres was three and a half years, also considering the formation of only one cavity. The classification of environmental aggressiveness considering the rate of corrosion of carbon steel coupons for ACS's, ranked as low and very high, exceeding the limits of the standard. With emphasis on the Beach Ipitanga. Compared to neural networks, copper was the only metal that did not show good correlation coefficients in relation to the experimental results and those calculated by the network. A possible explanation for this was that three ACE's (CIU, AML and PIT) compared to other ACS's showed very different results. This affected the quality of the network, since re-forming the network without these ACS's results have improved greatly. But for the other metals the results were good, which proves that this tool can be a tool for estimating the corrosion rate for the metropolitan region of Salvador. The dose-response function showed good correlation coefficients, which proves that this tool can also to estimate the mass loss for ACS's analyzed in metropolitan Salvador.

**Keywords:** atmospheric corrosion; metals degradation; corrosion mapping; dose-response function.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Esquema representando as principais reações anódicas e catódicas de uma célula de corrosão. FONTE: SICA, Y. C. [7].	8
Figura 2.	Esquema do processo autocatalítico que ocorre na corrosão localizada (pite) [52].	19
Figura 3.	Esquema de uma célula de corrosão com íons [52].	20
Figura 4.	Esquema do neurônio artificial [85].	29
Figura 5.	Mapa de corrosividade atmosférica para o Brasil [53], segundo a ISO 129442.	31
Figura 6.	Esquema da localização das ECA's na RMS.	35
Figura 7.	Índice de Corrosividade de Brooks para o Brasil [53].	39
Figura 8.	Classificação climática de Köppen [89].	40
Figura 9.	Classificação climática de A. Strahler [89].	40
Figura 10.	Vela coletora de cloretos e suporte da vela.	42
Figura 11.	Vela coletora de sulfatos e suporte da vela.	43
Figura 12.	Imagens ilustrativas do calibrador direcional de poeira (DDDGD), sendo: a) o conjunto de coletores instalados em poste de distribuição de energia; b), c) e d) coleta de material particulado pela lavagem com água destilada.	44
Figura 13.	Painel de intemperismo natural da subestação de Camaçari-BA.	45
Figura 14.	Imagens dos CP's preparados para a exposição em ambiente natural e verificação do processo de corrosão, sendo: (a) cupom de aço carbono; (b) cupons de aço carbono instalados na ECA; e (c) placas metálicas de alumínio, cobre, aço galvanizado e aço carbono, respectivamente.	46
Figura 15.	Curva da perda de massa do CP, removida por ataque químico, em relação ao tempo de limpeza [7].	49
Figura 16.	Abordagens para classificação da corrosividade atmosférica.	52
Figura 17.	Esquema da rede neural artificial empregado na determinação da taxa de corrosão dos metais expostos nas ECA's instaladas na Bahia.	55
Figura 18.	Concentração média anual de cloretos ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$ ), e dos períodos de chuva e seca na região das ECA's instaladas na Bahia.	59
Figura 19.	Médias anuais das taxas de deposição de cloretos ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$ ) em função das distâncias (m) do mar das ECA's no período de análise.	60
Figura 20.	Mapas do teor médio anual de deposição de cloretos ( $\text{mg Cl}/\text{m}^2.\text{dia}$ ) da RMS, salientando os períodos seco e chuvoso.	61
Figura 21.	Médias anuais das concentrações de dióxido de enxofre ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$ ), nas ECA's instaladas na RMS entre setembro de 2008 e setembro de 2009.	62
Figura 22.	Mapas do teor médio anual de deposição de dióxido de enxofre, em $\text{mg SO}_2/\text{m}^2.\text{dia}$ , na RMS, com os períodos seco e chuvoso de setembro de 2008 a setembro de 2009.	63
Figura 23.	Médias anuais das condutividades ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), nos períodos de chuva e de seca das ECA's instaladas na RMS, entre setembro de 2008 e 2009.	65
Figura 24.	Mapas das médias anuais de condutividade, em $\mu\text{S}/\text{cm}$ , obtidas pelo sistema DDDGD na RMS. Os valores são correspondentes aos períodos seco e chuvoso entre setembro de 2008 e setembro de 2009.	65
Figura 25.	Composição iônica ( $\text{mg}/\text{L}$ ) encontrada na solução das velas coletoras de cloreto instaladas nas ECA's da RMS entre setembro de 2008 e setembro de 2009.	68
Figura 26.	Espectro da composição química da superfície metálica de uma placa de alumínio da ECA Amaralina após ser feita limpeza química [96].	69

Figura 27.	Micrografias por microscopia óptica, identificando pite na superfície de uma placa de alumínio da ECA Amaralina com, aproximadamente, 2 anos de exposição atmosférica.....	70
Figura 28.	O desenho esquemático de um cabo de força com seus respectivos tentos [116].....	70
Figura 29.	Mapa da média anual da taxa de corrosão do alumínio ( $\text{g/m}^2\cdot\text{ano}$ ) na RMS, entre setembro de 2008 e setembro de 2009.....	72
Figura 30.	Mapa da média anual da taxa de corrosão do aço carbono ( $\text{g/m}^2\cdot\text{ano}$ ) na RMS, entre setembro de 2008 e setembro de 2009.....	74
Figura 31.	Mapa da média anual da taxa de corrosão ( $\text{g/m}^2\cdot\text{ano}$ ) do aço galvanizado na RMS.....	76
Figura 32.	Imagem de uma placa de aço galvanizado após ensaio de Preece [96], demonstrando a não uniformidade do revestimento de zinco. ....	77
Figura 33.	Mapa da média anual da taxa de corrosão do cobre ( $\text{g/m}^2\cdot\text{ano}$ ) na RMS entre setembro de 2008 e setembro de 2009.....	80
Figura 34.	Taxas de corrosão dos metais aço carbono, aço galvanizado, alumínio e cobre instalados nas ECAs na RMS, entre setembro de 2008 e setembro de 2009. ....	81
Figura 35.	Valores de desvio padrão dos resultados obtidos no período para os metais alumínio, cobre, aço galvanizado e cobre, ilustrados graficamente. ....	82
Figura 36.	Taxas de corrosão do metal aço carbono, na forma de cupom (cilindro) instalado nas ECAs na RMS, entre setembro de 2008 e setembro de 2009.....	84
Figura 37.	Mapa da média anual da taxa de corrosão ( $\text{g/m}^2\cdot\text{ano}$ ) dos cupons de aço carbono instalados na RMS, entre setembro de 2008 a setembro de 2009.....	85
Figura 38.	Gráficos representando a função dose-resposta desenvolvida para o aço carbono exposto nas ECA's 1 a 7. ....	89
Figura 39.	Gráficos representando a função dose-resposta desenvolvida para o aço galvanizado exposto nas ECA's 1 a 7.....	92
Figura 40.	Gráficos representando a função dose-resposta desenvolvida para o alumínio exposto nas ECA's 1 a 7.....	95
Figura 41.	Gráficos representando a função dose-resposta desenvolvida para o alumínio exposto nas ECA's 1 a 7.....	98
Figura 42.	Comparação entre os valores de taxa de corrosão (g) experimental e os valores calculados pela rede neural do aço carbono das ECA's 1 a 7 da RMS.....	99
Figura 43.	Comparação entre os valores de taxa de corrosão (g) experimental e os valores calculados pela rede neural do alumínio das ECA's 1 a 7 da RMS.....	100
Figura 44.	Comparação entre os valores de taxa de corrosão (g) experimental e os valores calculados pela rede neural do aço galvanizado das ECA's 1 a 7 da RMS.....	100
Figura 45.	Comparação entre os valores de taxa de corrosão (g) experimental e os valores calculados pela rede neural do cobre das ECA's 1 a 7 da RMS.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Composição química elementar da água do mar, em quantidades médias aproximadas.....	18
Tabela 2.	Funções dose-resposta de materiais.. [79].....	27
Tabela 3.	ECA's e módulos de coleta instalados na região metropolitana de Salvador-BA.....	34
Tabela 4.	Índice de Deterioração de Brooks [54]. .....	38
Tabela 5.	Soluções utilizadas para preparo e limpeza, antes e após ensaio de intemperismo artificial no CP. ....	47
Tabela 6.	Identificação das placas metálicas expostas nas redes experimentais. ....	47
Tabela 7.	Composição química elementar presentes nos metais de base estudados.....	47
Tabela 8.	Valores para a constante K. ....	49
Tabela 9.	Categorias de corrosividade atmosférica [102]. ....	50
Tabela 10.	Classificação da agressividade do ambiente conforme Liesegang. ....	50
Tabela 11.	Classificação do ambiente em termos de tempo de superfície úmida (t), taxa de sulfatação (A) e teor de cloretos (B) [14]. ....	51
Tabela 12.	Categoria de corrosividade estimada da atmosfera sobre os metais. ....	51
Tabela 13.	Categorias de corrosividade atmosférica segundo dados obtidos no primeiro ano de exposição [102].....	52
Tabela 14.	Taxa média de cloretos (mg Cl <sup>-</sup> /m <sup>2</sup> .dia) obtida no período de análise. ....	59
Tabela 15.	Taxa média de dióxido de enxofre (mg SO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> .dia, considerando o período de chuvas e de seca.....	62
Tabela 16.	Classificação da corrosividade ambiental segundo Liesegang apud Kenny [112], entre setembro de 2008 e setembro de 2009 das ECA's instaladas na Bahia.....	64
Tabela 17.	Taxa média de condutividade (µS/cm) referente aos períodos de setembro de 2008 a setembro de 2009 e de estiagem e seca. ....	64
Tabela 18.	Agressividade ambiental e corrosividade da RMS, quanto às médias anuais medidas entre setembro de 2008 e setembro de 2009, do Cl <sup>-</sup> (mg/m <sup>2</sup> .dia), (B); sulfatos (SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> .dia)), (A); tempo de superfície úmida médio, t, (h/ano); e da corrosividade, C, quanto aos metais aço carbono, aço galvanizado, alumínio e cobre..	66
Tabela 19.	Teor de íons obtido em amostras extraídas das soluções das velas coletoras de cloreto nas ECA's, entre setembro de 2008 e setembro de 2009, em mg/l.....	67
Tabela 20.	Taxas de corrosão e categorias de corrosividade atmosférica para o alumínio na RMS. ....	71
Tabela 21.	Taxa de corrosão e categoria da corrosividade atmosférica para o aço carbono na RMS.....	73
Tabela 22.	Taxas de corrosão e categoria da corrosividade atmosférica para o aço galvanizado na RMS.....	75
Tabela 23.	Taxas de corrosão e categoria da corrosividade atmosférica para o cobre na RMS.....	79
Tabela 24.	Valores de taxa de corrosão, perda de massa e categoria da corrosividade atmosférica para os cupons de aço carbono instalados na RMS, entre setembro de 2008 e setembro de 2009.....	84
Tabela 25.	Valores da corrosividade (K) previstos para o aço carbono exposto por, aproximadamente, 12 meses nas ECA's 1 a 7. ....	86

Tabela 26.	Tratamento dos dados de poluentes atmosféricos por correlação linear múltipla para o aço carbono. ....	86
Tabela 27.	Valores da corrosividade (K) previstos para o aço-galvanizado exposto por, aproximadamente, 12 meses nas ECA's 1 a 7. ....	90
Tabela 28.	Tratamento dos dados de poluentes atmosféricos por correlação linear múltipla para o aço galvanizado. ....	91
Tabela 29.	Valores da corrosividade (K) previstos para o alumínio exposto por aproximadamente 12 meses nas ECA's 1 a 7. Valores da constante "n" que exprime o efeito passivador do ambiente, em conjunto com os dados experimentais para o mesmo período, com respectivos desvios-padrão e coeficientes de correlação linear da curva. ....	93
Tabela 30.	Tratamento dos dados de poluentes atmosféricos por correlação linear múltipla para o alumínio. ....	94
Tabela 31.	Valores da corrosividade (K) previstos para o cobre exposto por aproximadamente 12 meses nas ECA's 1 a 7. Valores da constante "n" que exprime o efeito passivador do ambiente, em conjunto com os dados experimentais para o mesmo período, com respectivos desvios-padrão e coeficientes de correlação linear da curva. ....	96
Tabela 32.	Tratamento dos dados de poluentes atmosféricos por correlação linear múltipla para o alumínio. ....	97
Tabela 33.	Relação da taxa de corrosão experimental ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) e os calculados pela redes neurais ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) referentes ao aço carbono. ....	102
Tabela 34.	Relação da taxa de corrosão experimental ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) e os calculados pela redes neurais ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) referentes ao cobre. ....	102
Tabela 35.	Relação da taxa de corrosão experimental ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) e os calculados pela redes neurais ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) referentes ao aço galvanizado. ....	103
Tabela 36.	Relação da taxa de corrosão experimental ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) e os calculados pela redes neurais ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) referentes ao alumínio. ....	103
Tabela 37.	Valores da média, desvio padrão e as variações do desvio padrão dos metais aço carbono, alumínio, cobre e aço galvanizado. ....	104
Tabela 38.	Quadro resumo da classificação qualitativa das ECA's, em função dos parâmetros ambientais e da corrosividade atmosférica dos metais. ....	105

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

- A** – Taxa de sulfatação
- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRACO** – Associação Brasileira de Corrosão
- ANEEL** – Agência Nacional de Energia Elétrica
- ASTM** - American Society for Testing and Materials
- B** - Taxa de cloreto
- BA** – Bahia
- C.I.** – Complexo Industrial
- Cl<sup>-</sup>** - Íons cloreto
- CP** – Corpo de prova
- CP's** – Corpos de prova
- DDDG** – “direct dust distribution gauge” - Medida de severidade do grau de poluição
- ECA** – Estação de corrosão atmosférica
- ECA's** – Estações de corrosão atmosférica
- Id** – Índice de Deterioração de Brooks
- ISO** – International Standards Organizations
- LACTEC** – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento
- MEV** – Microscopia Eletrônica de Varredura
- MICAT** – Mapa Ibero-americano de Corrosividade Atmosférica
- NACE** – The Corrosion Society International
- NBR** – Norma Brasileira
- P.S.** – Partículas Sedimentáveis
- PIB** – Produto Interno Bruto
- PIPE** – Programa de Pós Graduação em Engenharia
- RMS** – Região Metropolitana de Salvador
- RD** – Rede de Distribuição de Energia
- SE** – Subestação de Energia Elétrica
- SIG** – Sistemas de Informação Geográfica
- SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>** - Íons Sulfato
- UFPR** – Universidade Federal do Paraná
- UR** – Umidade Relativa

**COELBA** - Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia

**CPTEC** – Centro de Previsão de Tempo e Clima

**IDW** – Inverse Distance Weighed

**LACTEC** – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento

**MATLAB** – software

**CJD** – SE Cajazeiras 2

**PIT** – SE Pituba

**SE AML** – SE Amaralina

**SE SPS** – SE Sauípe

**SE CMU** – SE Camaçari

**CIU** – SE Complexo industrial I

**SE PPE** – SE Paripe

**SCR** – SE São Cristóvão

**FED** – SE Federação

**PUD** – SE Pituaçu

**PR IPI** – Praia de Ipitanga

**LPN** – SE Lapinha

**CDL** – SE Candeal

**IPG** – SE Itapagipe

**CAB** – SE Centro Administrativo

**CIA AER** – Estrada CIU ao aeroporto

**LDF** – SE Lauro de Freitas

**ES COC** – Estrada do coco

**LISTA DE SÍMBOLOS E UNIDADES**

**%** - por cento

**±** - mais ou menos

**°** - grau

**°C** – grau Celsius

**cm** – centímetro

**cm<sup>2</sup>** – centímetro quadrado

**e<sup>-</sup>** - elétrons

**g** - gramas

**h** – hora

**m<sup>2</sup>** – metro quadrado

**P** – pressão parcial de vapor

**P<sub>s</sub>** – pressão de saturação

**S** - siemens

**t** – tempo

**μ** – micron

**μm** – micrometros

**τ** – tempo de superfície úmida

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. DESCRIÇÃO GERAL E OBJETIVOS DA PESQUISA .....	4
1.2. PRODUÇÃO TÉCNICA E TRABALHOS PUBLICADOS .....	6
<b>2. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>7</b>
2.1    CORROSÃO.....	7
2.1.1 <i>A célula de corrosão</i> .....	8
2.1.2 TIPOS DE CORROSÃO .....	10
2.2    PASSIVAÇÃO DE METAIS .....	11
2.3    CORROSÃO ATMOSFÉRICA.....	12
2.3.1 <i>Tipos de atmosferas corrosivas [3]</i> .....	12
2.3.2 <i>Mecanismo do processo de corrosão atmosférica</i> .....	13
2.4    CORROSÃO ATMOSFÉRICA DE METAIS ESTRUTURAIS .....	21
2.4.1 <i>Corrosão atmosférica do aço carbono</i> .....	21
2.4.2 <i>Corrosão atmosférica do aço galvanizado</i> .....	22
2.4.3 <i>Corrosão atmosférica do cobre</i> .....	24
2.4.4 <i>Corrosão atmosférica do alumínio</i> .....	25
2.5    CINÉTICA DO PROCESSO DE CORROSÃO ATMOSFÉRICA E FUNÇÕES DOSE- RESPOSTA .....	26
2.6    MODELAGEM DA TAXA DE CORROSÃO UTILIZANDO REDES NEURAS ARTIFICIAIS .....	28
2.7    SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) COMO FERRAMENTA PARA MAPEAMENTO DA CORROSIVIDADE ATMOSFÉRICA .....	29
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>33</b>
3.1    REGIÃO DE MONITORAMENTO.....	33
3.2    CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA E LEVANTAMENTO DE DADOS METEOROLÓGICOS DA REGIÃO DE SALVADOR, BA.....	36
3.3    ESTAÇÕES PARA O MONITORAMENTO DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS.....	40
3.3.1 <i>Determinação do teor de cloretos (Cl) na atmosfera</i> .....	41
3.3.2 <i>Determinação da taxa de sulfatação total na atmosfera</i> .....	42
3.3.3 <i>Medida de severidade do grau de poluição por meio de calibradores direcionais de poeira (DDDGs)</i> .....	44
3.4    ESTAÇÕES DE INTEMPERISMO NATURAL, ECA's.....	45
3.5    CLASSIFICAÇÃO DA CORROSIVIDADE ATMOSFÉRICA.....	50
3.6    METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DAS FUNÇÕES DOSE-RESPOSTA.....	53
3.7    METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DAS REDES NEURAS .....	54

3.8	ELABORAÇÃO DO MAPA DE CORROSÃO ATMOSFÉRICA.....	55
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>57</b>
4.1	RESULTADOS REFERENTES AO PRIMEIRO ANO DE TESTES NA RMS .....	57
4.1.1	<i>Classificação climática e dados meteorológicos.....</i>	<i>57</i>
4.1.2	<i>Taxa de cloretos totais na atmosfera das ECA´s instaladas na Bahia .....</i>	<i>58</i>
4.1.3	<i>Taxa de dióxido de enxofre total na atmosfera das ECA´s instaladas na Bahia.....</i>	<i>61</i>
4.1.4	<i>Medida de severidade do grau de poluição por meio de calibradores direcionais de poeira (DDDGs).....</i>	<i>64</i>
4.1.5	<i>Tipos e concentrações de íons encontrados nas soluções dos coletores de cloretos .....</i>	<i>67</i>
4.1.6	<i>Modelo matemático baseado em funções dose-resposta .....</i>	<i>85</i>
3.1.8	<i>Modelo matemático baseado em funções redes neurais .....</i>	<i>99</i>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>106</b>
<b>6</b>	<b>TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>108</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>109</b>

## 1. INTRODUÇÃO

---

O avanço tecnológico ocorrido no último século veio acompanhado de uma maior utilização de peças e estruturas metálicas em todos os setores de nossa sociedade. Este fato torna o estudo da corrosão, particularmente no que diz respeito ao seu controle, fundamental para preservar a vida útil destes materiais, além de minimizar gastos oriundos dos processos corrosivos. Segundo estudo realizado nos Estados Unidos entre 1999 e 2001, estimou-se em US\$ 276 bilhões (3,1% PIB americano) o custo total da corrosão por ano, sendo que deste valor, US\$ 69 a 82 bilhões (1% PIB) poderiam ser economizados se todas as medidas viáveis de prevenção e controle de corrosão fossem postas em prática [1]. No Brasil, a estimativa de gastos relativos aos processos corrosivos está na faixa de US\$ 15 bilhões ao ano, podendo-se economizar cerca de US\$ 5 bilhões mediante o uso de métodos de prevenção e controle [2].

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 [3]. 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 [4].

As proporções destes contaminantes são variáveis, dependem da proximidade das fontes emissoras e das condições locais, tais como: temperatura, precipitação, umidade relativa, radiação solar, vento, velocidade do fluido ou vazão, absorvidade e tipo de solo, pressão, entre outros [2,3]. Assim, como por exemplo, nos locais com alto teor de partículas em suspensão, a velocidade dos ventos pode atuar como agente veiculador da degradação por erosão. É por isso que não é recomendável estudar a corrosão atmosférica sem o estudo preliminar dos aspectos meteorológicos e ambientais que interferem sobre a mesma [5].

A corrosão pode ser definida como processo de reação química ou eletroquímica que caracteriza uma interação destrutiva entre um material e o meio circundante. Para se instalar o processo corrosivo é necessária a presença de um eletrólito, como por exemplo, a água,

uma diferença de potencial, além de oxigênio e, em alguns casos, agentes agressivos encontrados no meio [6].

Assim, o estudo das variáveis que influenciam no processo de corrosão atmosférica, bem como a realização do mapeamento ambiental, é de fundamental relevância, haja vista que grande parte dos materiais presentes no cotidiano está susceptível ao processo de degradação. Tem-se, como exemplo, a maioria dos materiais das linhas de distribuição e transmissão de energia elétrica, bem como de comunicação de dados, tais como: cabos, torres, linhas telefônicas, acessórios de rede, entre outros [7].

Salvador é uma cidade de clima quente e úmido, tipicamente tropical, com cerca de 2.466 h anuais de sol, ventilada (ventos anuais com velocidade média de 2,2 m/s) e uma temperatura média anual de 25 °C. É considerada uma das cidades mais ensolaradas do mundo, com umidade média anual da ordem de 81%, tendo a vantagem de ser cercada pelo mar em três de seus lados. Estas condições climáticas são ideais para a atração turística, mas, extremamente prejudiciais aos materiais, principalmente nos locais onde há, concomitantemente, poluição industrial. Assim, têm-se como desvantagens, em boa parte das regiões analisadas: ambiente propício à corrosão ou degradação dos materiais como os metálicos, pela instauração de um tempo de superfície úmida (t) elevado (» 4.000 h/ano), neste caso, classificado pela NBR 14643/01 [8], como t4, ou seja, de alta corrosividade ambiental (C4); altas taxas de salinidade e material particulado de dureza elevada, devidos aos ventos predominantes em direção ao continente, podendo causar corrosão atmosférica pelos íons cloretos e sulfatos e, também, erosão por abrasão das superfícies dos materiais e, alta taxa de radiação solar, com valor médio >2.400 h/ano, o que amplia a possibilidade de degradação também dos materiais poliméricos [9].

Pesquisadores da área vêm desenvolvendo trabalhos [10-14] científicos, onde correlacionam as variáveis climatológicas e a contaminação atmosférica local, por meio de funções dose-resposta que auxiliam na avaliação da corrosividade atmosférica e tem como objetivo estimar a taxa de corrosão para diferentes tipos de materiais em uma determinada região. Uma série de funções dose-resposta foi construída a partir do envelhecimento de amostras padrão, em diferentes estações de envelhecimento, estabelecidas em diferentes sítios [15]. Um dos estudos mais abrangentes foi patrocinado pela ONU “ECE Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution”, conhecida como “ICP Materials” [16]. Esse estudo

gerou funções dose-resposta a partir de 39 sítios de envelhecimento natural, em 12 países europeus, de materiais como aço, chapas galvanizadas, rochas naturais e alumínio.

O desenvolvimento de redes neurais para os modelos da rede neural e da função dose-resposta, conforme descritos e definidos anteriormente, foram utilizados para a interpretação e predição da vida útil de alguns metais submetidos ao envelhecimento natural.

Estudos recentes [17,18] relatam o desenvolvimento de modelos representativos baseados na metodologia de redes neurais artificiais para prever a taxa de corrosão dos metais e de processos complexos envelhecimento, desde que selecionados com rigor os parâmetros de arquitetura da rede.

Nesta pesquisa foi proposta uma metodologia para a classificação da corrosividade atmosférica local, aliada a modelos matemáticos de predição da taxa de corrosão e perda de massa a partir de funções dose-reposta e redes neurais, baseados no monitoramento de contaminantes atmosféricos, corpos de prova metálicos expostos no ambiente natural (aço carbono 1020; aço galvanizado; alumínio liga 6351 e cobre eletrolítico) e de dados meteorológicos da região metropolitana de Salvador-BA.

## 1.1. DESCRIÇÃO GERAL E OBJETIVOS DA PESQUISA

A presente dissertação foi realizada no Programa de Pós Graduação em Engenharia, área de concentração: Engenharia e Ciências dos Materiais, alocado na Universidade Federal do Paraná, UFPR, em parceria com o Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, LACTEC.

Para elaboração desta pesquisa, foram compilados dados obtidos de um projeto de Pesquisa & Desenvolvimento realizados na região de estudo (região metropolitana de Salvador-BA), em que participei como bolsista de mestrado e apoio técnico do LACTEC. As pesquisas tiveram como foco os sistemas de distribuição de energia elétrica local. O projeto, intitulado: “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”, foi proposto para a Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia. Os dados foram monitorados durante o período de 2008 a 2009. Teve como objetivo, propor a elaboração de uma metodologia para classificação e mapeamento da corrosividade atmosférica dos diferentes ambientes agressivos da atmosfera da região metropolitana de Salvador-BA e, para tal, a implementação de estações de corrosão atmosférica (ECA's) para o monitoramento de poluentes atmosféricos e exposição de corpos-de-prova padrões ao intemperismo natural. Os objetivos gerais desta pesquisa foram:

- complementar os estudos sobre a influência dos contaminantes atmosféricos aliados às condições meteorológicas que influenciam diretamente no processo de corrosão atmosférica dos metais.
- monitorar no período de um ano, contaminantes atmosféricos e dados meteorológicos em 7 ECA's da região metropolitana de Salvador-BA, onde foram instalados placas metálicas e cupons metálicos, visando demonstrar o grau de agressividade ambiental frente aos materiais estudados.
- monitorar no período de um ano, dados meteorológicos em outros 11 locais da região metropolitana de Salvador-BA, onde foram instalados apenas cupons metálicos a fim de desenvolver um mapa de corrosividade atmosférica.

- desenvolver modelos matemáticos baseado em funções dose-resposta e redes neurais, para prever o comportamento dos diferentes materiais estudados, nas regiões monitoradas.
- elaborar mapas de corrosividade atmosférica e de concentração da deposição de poluentes a partir de dados da taxa de corrosão dos metais-padrão expostos na região de estudo, utilizando um SIG denominado ArcView 9.0.

## 1.2. PRODUÇÃO TÉCNICA E TRABALHOS PUBLICADOS

- BRAMBILLA, K. J. C.; PORTELLA, K. F.; Silva, D. D.; CABUSSÚ, Mário Seixas; CERQUEIRA, Dailton Pedreira ; SALLES, R. N. . Desempenho de cupons de aço carbono 1020 na região metropolitana de Salvador-BA. In: INTERCORR 2010, 2010, Fortaleza - CE. INTERCORR 2010. Fortaleza-CE: ABRACO, 2010.
- BRAMBILLA, K. J.C; PORTELLA, G. D. G.; PORTELLA, K. F.; SILVA, G. C.; CABUSSÚ, M. S.; JOUKOSKI, A.; CERQUEIRA, D. P.; SALLES, R. N. Corrosividade ambiental e degradação de materiais metálicos em duas regiões do Brasil: Sauípe-Ba e Pontal do Sul-PR. IV Congresso Brasileiro de Oceanografia – CBO 2010, Rio Grande do Sul – Brasil. Anais do CBO 2010,2010.
- PORTELLA, K. F.; BRAMBILLA, K. J. C.; CABUSSÚ, M. S.; CERQUEIRA, D. P.; SALLES, R. N.; INONE, P. C.; PIAZZA, F.; HENKE, S. L.; SILVA, J. M.; SILVA, G. C.. Northeastern Brazilian marine atmospheric corrosion performances of galvanized steel and copper specimens. 19<sup>th</sup> International Congress of Chemical and Process Engineering/7<sup>th</sup> European Congress of Chemical Engineering ECCE – 7, Prague - Czech Republic, 2010.
- PORTELLA, K. F.; BRAMBILLA, K. J. C.; CABUSSÚ, M. S.; CERQUEIRA, D. P.; SALLES, R. N.; INONE, P. C.; PIAZZA, F.; HENKE, S. L.; SILVA, J. M.; SILVA, G. C.; **Northeastern Brazilian marine atmospheric corrosion performances of galvanized steel and copper specimens**. Journal of Chemistry and Chemical Engineering, Brazil, n<sup>o</sup> 5, p. 435-442, 2011.

## 2.0 REVISÃO DA LITERATURA

Neste Capítulo encontram-se reunidos tópicos da literatura sobre os processos de degradação de materiais sob influência do meio ambiente externo.

### 2.1 CORROSÃO

Para HELENE [19], corrosão é uma interação destrutiva de um material com o ambiente, seja por reação química, ou eletroquímica.

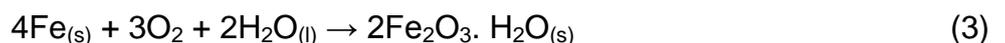
De acordo com GENTIL [3], o produto da corrosão de um metal é bem semelhante ao minério do qual é originalmente extraído, isto é, o metal tende a retornar a sua condição de estabilidade.

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 [20]. A velocidade de corrosão depende fortemente da umidade relativa do ar e dos constituintes da atmosfera [21].

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):

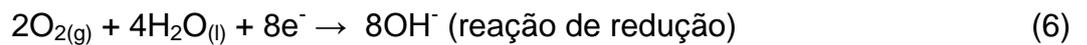
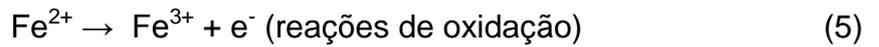


Por exemplo, o ferro degrada na presença de água e oxigênio e a reação global pode ser representada por:



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

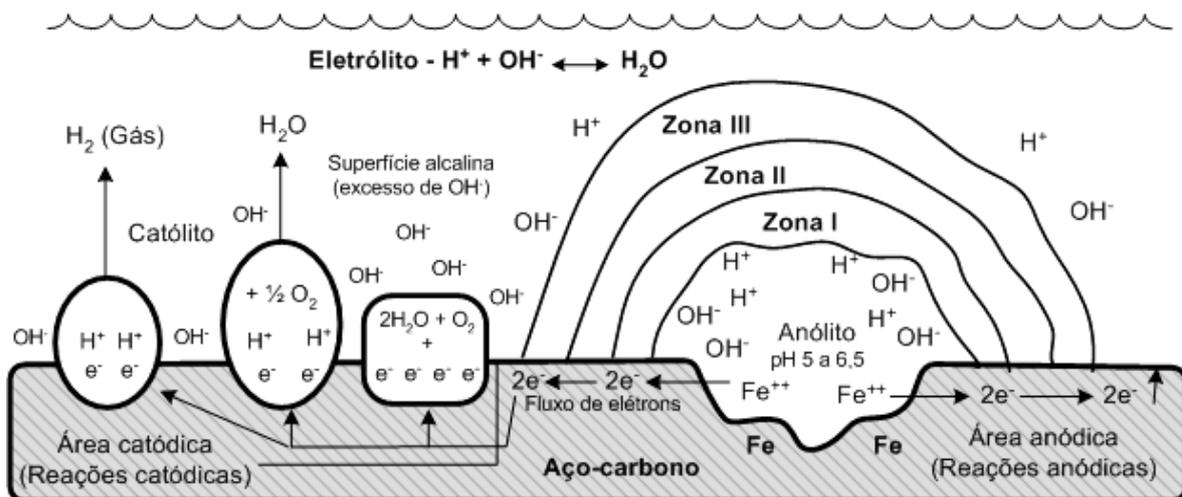




A reação de oxidação (ou anódica), ao gerar íons metálicos em solução, dissolve o metal ou o transforma em outro composto, produzindo o fenômeno da corrosão. Porém, para que o processo corrosivo prossiga é necessário uma reação de redução (ou catódica) que consuma os elétrons liberados. Caso contrário, a reação de oxidação atinge o equilíbrio e a corrosão cessa [22].

### 2.1.1 A célula de corrosão

Na Figura 1, encontram-se mostradas as principais reações químicas de corrosão [7, 23-26] 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 1. Esquema representando as principais reações anódicas e catódicas de uma célula de corrosão. FONTE: SICA, Y. C. [7].**

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 [27]. 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.

### **2.1.2 TIPOS DE CORROSÃO**

Para identificar, visualmente, a forma ou causas da corrosão e seus mecanismos encontram-se apresentados na sequência os principais tipos de corrosão [3]:

- uniforme, que se processa em toda a extensão da superfície, ocorrendo perda uniforme de espessura;
- em placas, localizada em regiões da superfície metálica e não em toda a sua extensão, formando placas com escavações;
- alveolar, que acontece na superfície metálica produzindo sulcos ou escavações semelhantes a alvéolos apresentando fundo arredondado e profundidade geralmente menor que o seu diâmetro;
- puntiforme, que ocorre na forma pontual ou em pequenas áreas localizadas na superfície metálica produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa e profundidade geralmente maior que seu diâmetro;
- intergranular, que se processa entre os grãos da rede cristalina do material metálico, o qual perde suas propriedades mecânicas e pode fraturar quando solicitado por esforços mecânicos;
- intragranular, acontecendo no interior dos grãos da rede cristalina do material metálico, o qual, perdendo suas propriedades mecânicas, poderá fraturar à menor solitação mecânica;
- filiforme, acontecendo sob a forma de finos filamentos, que se propagam em diferentes direções e que não se cruzam;

- por esfoliação, na qual a corrosão se processa de forma paralela à superfície metálica. Ocorre em chapas ou componente extrudados que tiveram seus grãos alongados e achatados. O produto de corrosão, volumoso, ocasiona a separação das camadas contidas entre as regiões que sofrem ações corrosivas; e por
- empolamento pelo hidrogênio, no qual o hidrogênio atômico penetra no material metálico e, como tem pequeno volume atômico, difunde-se rapidamente em regiões com descontinuidades (inclusões e vazios) e transforma-se em hidrogênio molecular, H<sub>2</sub>, exercendo pressão e originando a formação de bolhas.

## 2.2 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 [3].

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 [3] 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.

### **2.3 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 [29].

A corrosão atmosférica tem recebido nos últimos tempos, por parte de alguns autores [30-31] uma atenção que tem gerado vários estudos sistemáticos. Como exemplo destes estudos pode-se citar a inclusão do Brasil no projeto MICAT - "Mapa Iberoamericano 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 [32].

#### **2.3.1 Tipos de atmosferas corrosivas [3]**

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.

### **2.3.2 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 [33].

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).

## 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 [33].

A umidade relativa é a relação, em porcentagem, entre a quantidade de vapor de água existente no ar e a quantidade máxima que o ar pode conter, na mesma temperatura. Esta umidade também pode ser expressa em função da pressão. Sendo (P) a pressão parcial do vapor existente a uma determinada temperatura, ( $P_s$ ) a pressão de saturação a essa mesma temperatura, e UR a umidade relativa, tem-se:

$$UR = \frac{P}{P_s} \cdot 100 \quad (10)$$

O tempo de superfície úmida é uma variável crítica com relação à extensão da corrosão [34]. Ele indica o tempo durante o qual a superfície metálica está coberta por um filme de água que torna possível a corrosão, determinando, portanto, a duração do processo eletroquímico.

Este tempo varia com as condições climáticas locais e depende da umidade relativa do ar, da duração e frequência das chuvas, névoa, orvalho, temperatura do ar e da superfície metálica, velocidade dos ventos, horas de luminosidade, etc. A natureza do produto de corrosão formado também pode afetar grandemente o tempo de superfície úmida. Se o filme do produto de corrosão é microporoso, a condensação capilar pode causar a condensação de umidade bem abaixo do valor crítico de umidade relativa.

### **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 [35].

COSTA [36] 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 [37] *apud* JAERGERMAN [38] 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.

### **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 aerosol marinho. FELIU [35] 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 aerosol, 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 [39], observou que a concentração do aerosol marinho é maior para ventos com velocidades entre 7,0 e 11,0 m/s, enquanto SPIEL [40], 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 [41], MORCILLO [42], FITZGERALD [43] e O'DOWD [44], o aumento de deposição salina ocorre devido a ventos com sopros a partir de 3,0 m/s.

## **Temperatura**

Segundo CASCUDO [45], 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.

## **Partículas sedimentáveis na atmosfera**

As partículas sólidas, sob a forma de poeira ou fuligem, são responsáveis por tornar a atmosfera mais corrosiva devido a alguns fatores, em geral estas partículas retêm mais

facilmente a umidade sobre o metal, dando origem a eletrólitos ativos, ou seja, estas partículas aumentam a condutividade da camada da superfície [46].

Podem-se citar dois fatores relevantes no qual o índice de partículas sedimentáveis interfere na cinética do processo corrosivo: (i) a deposição de material não-metálico como os silicatos, que por serem higroscópicos retém umidade favorecendo a corrosão eletroquímica; e, (ii) a deposição de particulados metálicos como o ferro e o alumínio que podem criar condições de aeração diferencial ocorrendo corrosão localizada abaixo do depósito, ou ainda, se o material metálico for de natureza química diferente daquele da superfície, pode ocorrer corrosão galvânica do material mais ativo.

A atmosfera de Salvador, por se tratar de uma atmosfera marinha, contém aerossóis marinhos ou partículas salinas que podem ser arrastadas por muitos quilômetros de distância da orla para o continente, sendo veiculadas pela direção e velocidade dos ventos predominantes.

A água do mar pode ser considerada uma das mais corrosivas, visto que contém concentrações relativamente elevadas de sais funcionando como eletrólito forte, o que provoca um rápido processo eletroquímico de corrosão. De acordo a norma ASTM D 1141-90 [47], encontra-se na Tabela 1 a composição química elementar da água do mar.

### **Radiação solar acumulada**

A radiação solar influencia diretamente na temperatura superficial metálica, proporcionando ciclos de seco e molhado. A intensidade da luz solar e a refletividade da superfície metálica com relação ao sol são os principais fatores que corroboram para esses ciclos. O aumento na temperatura pode aumentar ou reduzir a corrosão por secagem da superfície.

### **Precipitação**

A precipitação leva à dissolução dos íons da atmosfera, principalmente  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$  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.

**Tabela 1.** Composição química elementar da água do mar, em quantidades médias aproximadas.

Composto	Concentração (g/L)
NaCl	25,5
MgCl <sub>2</sub>	5,2
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	4,1
CaCl <sub>2</sub>	1,2
KCl	0,9
NaHCO <sub>3</sub>	0,2
KBr	0,1
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	0,03
SrCl <sub>2</sub>	0,03
NaF	0,003
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	9,94x10 <sup>-5</sup>
Mn(NO <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	3,4 x10 <sup>-5</sup>
Cu(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	3,08 x10 <sup>-5</sup>
Zn(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	9,6 x10 <sup>-6</sup>
Pb(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	6,6 x10 <sup>-6</sup>
AgNO <sub>3</sub>	4,9 x10 <sup>-7</sup>

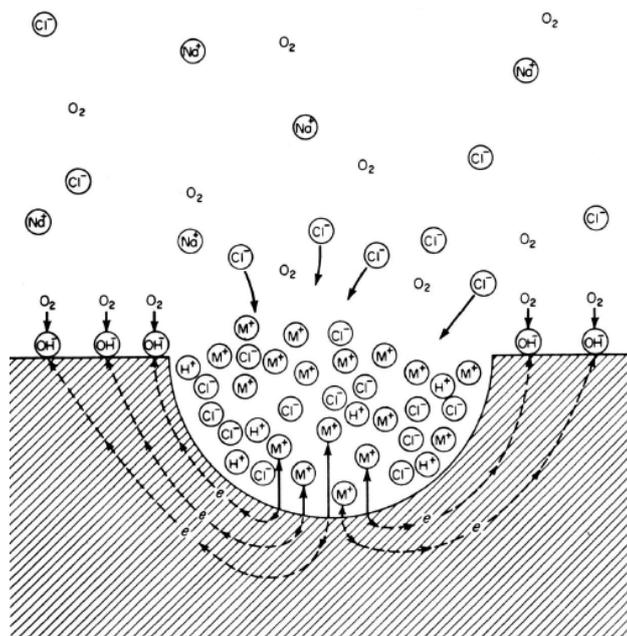
### Teor de cloretos

O íon cloreto é um dos mais significantes contaminantes naturais do ambiente marinho que provoca grande degradação na estrutura do aço. Entretanto, esta degradação não é definitiva, pode mudar dependendo das condições climáticas [48].

Sua principal fonte é a água do mar, onde eles se encontram combinados ao sódio, magnésio e cálcio. Estes sais são higroscópicos, promovem a condensação de água sobre os materiais e conseqüentemente, a aceleração da corrosão [49].

Diferente dos outros agentes externos que produzem ataques quase que generalizados dos metais, como o  $\text{SO}_x$  e o  $\text{NO}_x$ , os cloretos produzem ataques localizados na forma de perfurações muito pequenas e que se propagam rapidamente, chamados de pites. Dentre os tipos de corrosão, a formação de pites é muito comum em água do mar e a mais difícil de controlar [50].

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 autocatalítica. Isto é, o processo de corrosão dentro do pite cria condições necessárias que estimulam a contínua atividade dentro do mesmo, como é mostrado, esquematicamente, na Figura 2. Neste esquema, encontra-se mostrado um metal M em contato com uma solução aerada de NaCl [51].



**Figura 2.** Esquema do processo autocatalítico que ocorre na corrosão localizada (pite) [52].

### Teor de sulfatos

A fonte natural de sulfato provém da atividade vulcânica, sendo as emissões antropogênicas provenientes principalmente da queima de combustíveis fósseis. Isso ocorre pelo fato de grande parte dos combustíveis fósseis conterem enxofre, procedente de

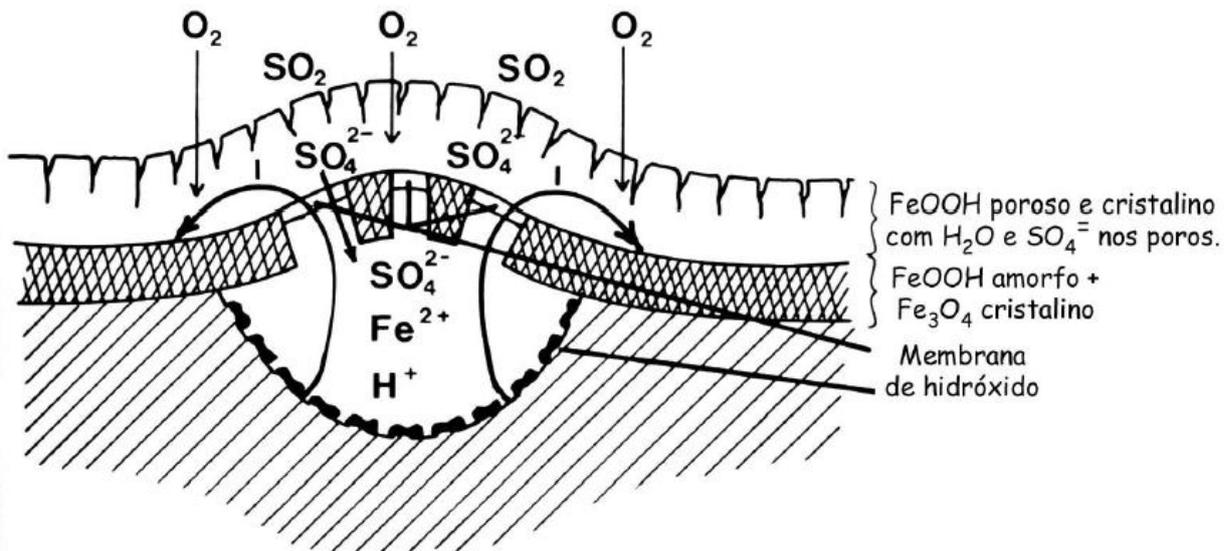
aminoácidos e proteínas que formam parte da matéria orgânica, a qual originou o combustível. Somente uma pequena parte do  $\text{SO}_2$  emitido (cerca de 10%) provém de fundições e fabricação de ácido sulfúrico.

O  $\text{SO}_2$  é um gás extremamente reativo, sendo absorvido nas superfícies metálicas, e sob condições de umidade, as superfícies de óxido metálico catalizam o  $\text{SO}_2$  a trióxido de enxofre ( $\text{SO}_3$ ) e promovem a formação de ácido sulfúrico de acordo com a reação (11):



O tempo de vida do  $\text{SO}_2$  na atmosfera é geralmente 0,5 a 2 dias, o que corresponde a uma distância média de transporte em torno de poucos quilômetros. A intensidade da ação dos gases é proporcional à distância da fonte.

Na Figura 3, está mostrado, esquematicamente, o mecanismo de ação dos íons sulfato sobre o aço [52].



**Figura 3.** Esquema de uma célula de corrosão com íons [52].

## 2.4 CORROSÃO ATMOSFÉRICA DE METAIS ESTRUTURAIS

### 2.4.1 Corrosão atmosférica do aço carbono

Um metal se dissolve pela formação de íons metálicos a um potencial dado pela fórmula de Nernst [46], representada nas Equações 12 e 13.



$$E^0 = -\frac{RT}{nF} \ln\left(\frac{a_{\text{Me}^{++}}}{a_{\text{Me}}}\right), \text{sendo } a_{\text{Me}} = 1 \quad (13)$$

Onde  $E^0$  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 [46, 53].

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 [54, 55].

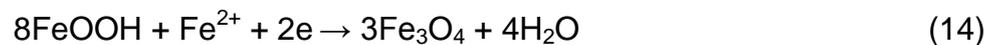
Tudo isso se torna importante para o estudo da corrosão, pois, nas condições em que se formam produtos solúveis é de se esperar que ocorra corrosão, enquanto que, a formação de produtos insolúveis pode paralisá-la, chegando inclusive a proteger o metal por passivação. A velocidade de corrosão alcança 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 oxihidróxidos ( $\alpha\text{-FeOOH}$ , goetita;  $\gamma\text{-FeOOH}$ , lepidocrocita;  $\beta\text{-FeOOH}$ , akaganeita), o óxido ferroso-férrico ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , magnetita) e o hidróxido ferroso ( $\text{Fe}(\text{OH})_2$ ). 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  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  precipita-se, inibindo a formação da película de ferrugem. Entretanto o  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  não é estável e, em presença de oxigênio, se oxida a  $\text{FeOOH}$ . 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:



#### 2.4.2 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 [56, 57]. O

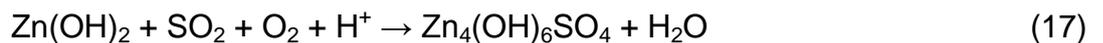
zinco atua como um ânodo de sacrifício sobre o aço, conferindo-lhe proteção galvânica eficaz, evitando-se, assim, um impacto direto de ataque corrosivo sobre o aço.

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 [58]. 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 [59,60]. 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 [59]. Este método de proteção tem sido utilizado por muitos anos, principalmente na indústria automotiva, que contribuiu para o desenvolvimento desses revestimentos [61].

A corrosão atmosférica do zinco resulta da reação:

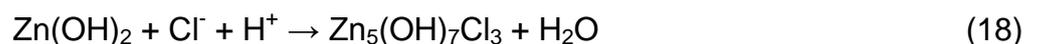


A formação de sais básicos ocorre pela reação do hidróxido de zinco com os poluentes da atmosfera. Em presença de  $\text{SO}_2$ , formam-se os sulfatos básicos de fórmula  $\text{Zn}(\text{OH})_x(\text{SO}_4)_y$ .



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  $\text{Zn}(\text{OH})_2$  com os cloretos forma os cloretos básicos do tipo  $\text{Zn}(\text{OH})_x\text{Cl}_{2-x}$ .

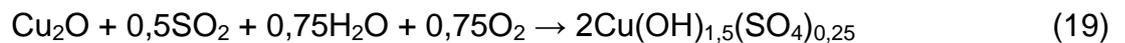


A velocidade de corrosão do zinco é então inferior à velocidade medida em uma atmosfera industrial fortemente poluída.

### 2.4.3 Corrosão atmosférica do cobre

Corrosão do cobre na atmosfera tem sido estudada extensivamente desde que o cobre é um material tipicamente usado em sistemas eletro-eletrônicos [62,63].

O primeiro produto de corrosão formado instantaneamente sobre a superfície do cobre é a cuprita ( $\text{Cu}_2\text{O}$ ). Posteriormente, a cuprita reage lentamente com os constituintes da atmosfera ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_2$ ) formando sais básicos, sempre quando o pH da película for suficientemente alto.



A resistência do cobre à corrosão atmosférica é determinada principalmente pelo papel protetor da camada de produtos de corrosão que permanecem aderidos à sua superfície, particularmente a camada interna do cuprite que se comporta como uma barreira física evitando a oxidação do metal. Parece, que o interior do cuprite também serve como intermediário na formação de patina que envolve a oxidação dos íons de cobre para formar base de sais cúpricos. Por exemplo, a transformação do cuprite em paratacamite tem sido relatada em patinas costeiras [64].

Os sais básicos formados são espécies insolúveis que permanecem aderidos à camada interna da cuprite para fornecer certa proteção ao metal. O cloreto é um sal higroscópico que contribui para manter a umidade da superfície do metal e da sua camada de produtos de corrosão. O cloreto de sódio, por exemplo, em atmosfera com umidade relativa acima de 75% torna-se higroscópico [65,66], e em um ambiente com umidade relativa média acima de 90%, facilita a formação de uma camada permanente de água na superfície onde é depositado. Jesus *et al.* [67] concluíram que a taxa de corrosão aumentou e o potencial de corrosão diminuiu com o aumento do teor de cloreto no meio, mostrando que a concentração de cloreto influencia a resistência à corrosão de tubos de cobre.

A camada de superfície aquosa é apropriada para a adsorção e oxidação do dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) para formar uma camada superficial rica em ácidos sulfatados [68]. Além do que sabe-se que a partir da composição dos produtos de corrosão, é evidente que o dióxido de enxofre e os óxidos de nitrogênio desempenham um papel central na formação

de pátina. Apurou-se que, na sua presença, a corrosão começa a ser significativa, logo que a umidade relativa está acima de 50-63% [69,70].

Em um ambiente seco o cobre se oxida formando uma camada protetora de  $\text{Cu}_2\text{O}$ , mas sem formação de patina [71]. Esta é formada quando a superfície do cobre e sua camada de óxido permanecem molhada, Nassau *et al.* [72] mostraram que patinas de cobre formadas enquanto expostas em um outdoor eram compostas de cuprite  $\text{Cu}_2\text{O}$ , brochantite  $\text{CuSO}_4(\text{OH})_6$ , antlerite  $\text{Cu}_3\text{SO}_4(\text{OH})_4$ , posnkakite  $\text{Cu}_4\text{SO}_4(\text{OH})_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , e atacamite  $\text{Cu}_2\text{Cl}(\text{OH})_3$ .

#### 2.4.4 Corrosão atmosférica do alumínio

O alumínio tem elevada resistência à corrosão em vários ambientes; este comportamento pode ser atribuído à presença do filme protetor que se forma rapidamente ao ar ou em soluções neutras, o qual se mantém estável em meios levemente ácidos ou alcalinos (pH entre 5 e 8). Entretanto, fora destes limites de pH, o Al corrói [73,74 e 75].

Em soluções ácidas, tem-se a dissolução do filme de óxido:



Já, em soluções alcalinas, há a formação do íon  $\text{Al}^{3+}$  que é insolúvel, mas em meio muito básico há a formação do aluminato, que é solúvel [76].



Contudo, mesmo em soluções com valores de pH para os quais o óxido é estável, a presença de ânions agressores como o cloreto, pode resultar em ataques localizados (pites) [77].

A superfície de um óxido é coberta por uma camada de grupos hidroxila, e que as propriedades ácido-base de Lewis desses grupos determinam a carga superficial do filme quando imerso em solução aquosa. Estes grupos hidroxila (-MOH, onde M é o metal) permanecerão não dissociados se o pH da solução aquosa é o mesmo do ponto isoelétrico do óxido [78]. Porém, se o pH é menor do que o do ponto isoelétrico, a superfície terá uma carga positivo:



Se o pH é maior do que o do ponto isoelétrico, então a superfície terá uma carga negativa:



Como já mencionado, em soluções neutras o filme de óxido de alumínio tem uma carga de superfície predominantemente positiva, favorecendo portanto a adsorção de íons negativos como os cloretos sobre uma camada de óxido onde as forças de interação são de natureza atrativa.

O alumínio pode ser atacado de maneira uniforme pela dissolução da camada de óxido por ácidos ou outros íons reativos, conduzindo a formação de sais solúveis tais como o  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  ou sais básicos que se incorporam à camada de produtos da corrosão.

Os íons halogênios ( $\text{Cl}^-$ ) na atmosfera se absorvem aos defeitos da camada de óxido, conduzindo à formação de complexos solúveis  $\text{Al}(\text{OH})_2\text{Cl}$ . A difusão das espécies solúveis produz o afinamento da camada de óxido e o surgimento de uma fissura. A tendência dos ânions capazes de originar a formação de fissuras sobre o alumínio obedece a seguinte ordem:



## 2.5 CINÉTICA DO PROCESSO DE CORROSÃO ATMOSFÉRICA E FUNÇÕES DOSE-RESPOSTA

De acordo com Haagenrud [79], as funções dose-resposta são funções que caracterizam a resposta de um produto quanto à degradação com a intensidade do agente de degradação incidente (dose). A resposta é medida por um ou mais indicadores de degradação. Como exemplo, a corrosão de metais pode ser expressa por um modelo matemático que relaciona a corrosão com o tempo de exposição pela função, como pode ser visto na Equação (26).

$$M = A \cdot t^n \quad (26)$$

Onde:

M é a corrosão no instante t;

A, é constante, que depende da deposição de poluentes ou outros agentes de degradação na superfície; e, n é o expoente, cujo valor depende dos processos de difusão dos agentes agressivos.

Na Tabela 2, estão apresentados alguns exemplos de função dose-resposta. Os dados foram obtidos em 28 países, compreendendo 250 locais de ensaio.

**Tabela 2.** Funções dose-resposta de materiais [79]

Materiais	Função dose-resposta	Coeficientes	Coeficientes de correlação múltipla
aço carbono	$Fe = A.t^n$	$A = 33,0+57,4Cl+26,6S$	$R = 0,73$
zinco	$Zn = A.t^n$	$A = 0,785+5,01Cl+2,26S$	$R = 0,73$
cobre	$Cu = A.t^n$	$A = 1,03+1,45Cl+2,00S$	$R = 0,60$

Os ensaios de intemperismo natural na atmosfera são, em geral, de longa duração e se processam em condições não repetitivas e não reprodutíveis, pois os resultados mostram uma apreciável dispersão. A taxa de corrosão depende fundamentalmente do tempo de superfície úmida e da taxa de deposição de poluentes, em particular, os íons cloretos ( $Cl^-$ ) e compostos de enxofre ( $SO_2$ ,  $SO_3$ ,  $H_2S$  e  $SO_4^{2-}$ ).

A velocidade da corrosão dos metais na atmosfera é controlada por fatores ambientais de complexa interação, tais como o efeito dos contaminantes atmosféricos aliados aos parâmetros meteorológicos. Estes fatores são característicos das diferentes atmosferas corrosivas e conferem uma grande dispersão da velocidade de corrosão, que pode ser dezenas ou centenas de vezes maiores em uns lugares do que em outros. Este fato justifica o grande interesse de se conhecer as variáveis fundamentais que controlam o processo corrosivo na atmosfera.

Na bibliografia que trata sobre a corrosão atmosférica são escassos os dados referentes aos metais expostos por períodos prolongados (10-20 anos, ou mais). Unicamente, mediante a análise destes dados é possível estabelecer quais relações matemáticas são mais consistentes para definir a cinética do processo de corrosão atmosférica em exposições prolongadas e que se possa prever o comportamento dos metais e suas ligas em longo prazo na atmosfera.

Funções dose-resposta são relações matemáticas obtidas por meio de tratamentos estatísticos específicos para um conjunto de dados observados, que fornecem equações de correlação, que possibilitam, por exemplo, a predição da velocidade de corrosão a partir de parâmetros que influenciam diretamente no processo corrosivo de metais e ligas, como os parâmetros meteorológicos e os contaminantes atmosféricos.

## **2.6 MODELAGEM DA TAXA DE CORROSÃO UTILIZANDO REDES NEURAIS ARTIFICIAIS**

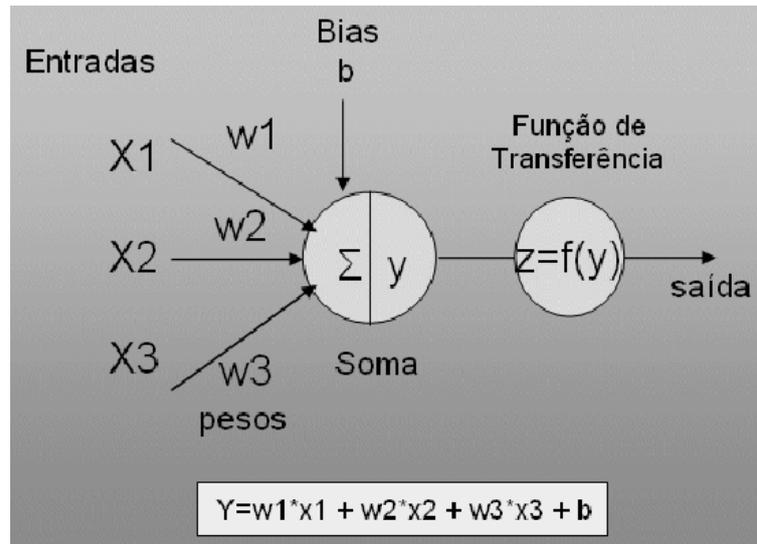
Foram desenvolvidos estudos [80-83] de modelos representativos baseados na metodologia de redes neurais artificiais para prever a taxa de corrosão dos metais, os quais estão sendo bem aceitos devido ao seu potencial em prever quaisquer processos complexos desde que selecionados com rigor os parâmetros de arquitetura da rede.

Nas redes neurais artificiais, a idéia é simular o funcionamento de um neurônio usando equações matemáticas e compor uma rede de neurônios artificiais, na qual informações lógicas ou valores numéricos possam ser processados para gerar uma saída.

Como informações de entrada podem ser consideradas os parâmetros ambientais de maior relevância no processo corrosivo dos metais conforme revisão da literatura [7], que são a temperatura, umidade relativa, precipitação, tempo de superfície úmida, velocidade média do vento, radiação solar, concentração média de íons cloreto, concentração média de compostos de enxofre, partículas sedimentáveis.

Na Figura 4, está mostrado o esquema de um neurônio artificial. No neurônio artificial, as entradas são valores numéricos ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ), os quais são ponderados e somados para compor um único sinal de entrada [84].

$$S = b + \sum x_i * w_i \quad (27)$$



**Figura 4. Esquema do neurônio artificial [85].**

A maioria dos modelos de redes neurais possui alguma regra de treinamento, onde os pesos de suas conexões são ajustados de acordo com os padrões apresentados. Em outras palavras, elas aprendem pelos exemplos.

Arquiteturas neurais são tipicamente organizadas em camadas, usualmente as camadas são classificadas em três grupos:

- camada de entrada, onde os padrões são apresentados à rede;
- camadas intermediárias, onde é feita a maior parte do processamento, pelas conexões ponderadas; podem ser consideradas como extratoras de características;
- camada de saída, onde o resultado final é concluído e apresentado.

As redes neurais proporcionam então, o desenvolvimento de um modelo, para prever a taxa de corrosão de alguns metais de interesse para o setor elétrico, como aço-carbono, cobre, aço galvanizado e alumínio, considerando contaminantes atmosféricos.

## **2.7 SISTEMA DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) COMO FERRAMENTA PARA MAPEAMENTO DA CORROSIVIDADE ATMOSFÉRICA**

As previsões de corrosão atmosférica e de agressividade das atmosferas podem ser transpostas por meio de mapas de corrosividade atmosférica de países, ou áreas

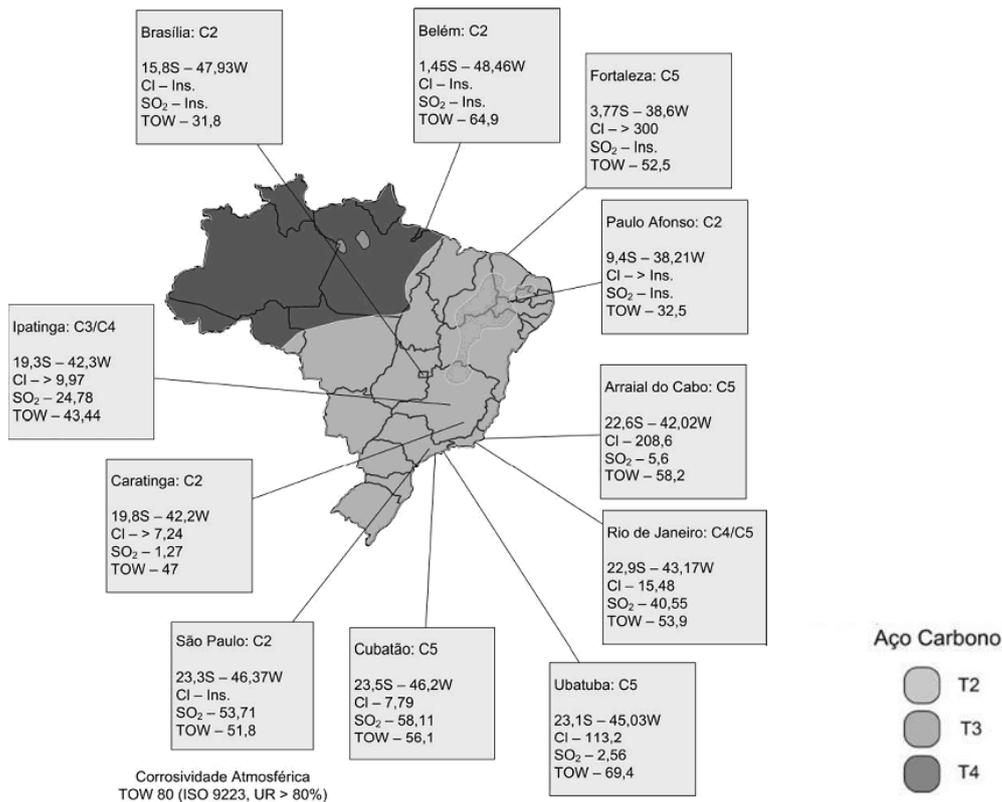
geográficas que informem diretamente os riscos da corrosão atmosférica para determinados metais-padrão.

É uma ferramenta que contém informações sobre o alcance do fenômeno da corrosão em um determinado ponto geográfico, e, assim, auxilia na seleção do material metálico e do sistema de proteção mais adequados, incluindo as operações de manutenção subsequentes.

O interesse em confeccionar estes mapas é antigo e crescente, principalmente, para as companhias de energia elétrica e telecomunicações, siderurgias, empresas fabricantes de tintas, entre outras. Sendo assim, pesquisadores das mais diversas instituições e países estão em busca do seu desenvolvimento. O projeto MICAT, iniciado em 1989 teve a participação de 14 países (Argentina, Brasil, Chile, Colômbia, Costa Rica, Cuba, Equador, Espanha, México, Panamá, Peru, Portugal, Uruguai e Venezuela) sendo que, um dos principais objetivos do projeto foi a elaboração de mapas de corrosividade da região ibero-americana que demonstrasse a agressividade das diferentes atmosferas.

O projeto produziu, para o Brasil, dois mapas de agressividade distintos. O primeiro apresenta o mapeamento segundo o Índice de Deterioração de Brooks. O segundo foi elaborado tendo como base a ISO 129442. Espécimes foram expostos em locais previamente determinados, cobrindo regiões com diferentes graus de agressividade.

Na Figura 5, estão mostrados os resultados obtidos pela aplicação da ISO 129442. Este mapa é um poderoso auxiliar na escolha correta do grau de corrosividade de atmosferas, especialmente as industriais e costeiras. O mapa do Brasil traz, adicionalmente, a corrosividade atmosférica considerando-se somente como variável o tempo de umedecimento.



**Figura 5. Mapa de corrosividade atmosférica para o Brasil [53], segundo a ISO 129442.**

A finalidade básica destes mapas é a representação visual do grau de corrosividade atmosférica para diferentes regiões. Porém o principal motivo pelo qual estes mapas foram criados, é para a sua utilização como ferramenta para visualização da amplitude da agressividade atmosférica para um determinado local e, com isso, poder selecionar o material metálico mais adequado, tanto do ponto de vista de resistência à corrosão como do econômico. Outra aplicação é a sua utilização no planejamento da frequência de operações de manutenção, conforme a agressividade das regiões.

Diversos países vêm confeccionando seus mapas de corrosividade, atribuindo diferentes critérios. Os principais e mais usuais são:

- determinando a taxa de corrosão de metais-padrão (aço-carbono; alumínio; cobre e zinco) e, posteriormente, classificando-os conforme a norma ISO 9223 em categorias de corrosividade (C1 – C5);
- estimando a corrosividade de metais-padrão conforme a norma ISO 9223 a partir de parâmetros ambientais, tais como a taxa de sulfatação total; deposição de íons cloretos e o tempo de superfície úmida; e,

- elaborando funções dose-resposta que possam prever o tempo de vida útil dos diferentes materiais metálicos expostos na atmosfera, e a partir destas funções mapear regiões quanto ao grau de agressividade sobre os metais-padrão estudados.

Para o desenvolvimento do mapa de corrosividade atmosférica a partir de dados da taxa de corrosão de metais-padrão expostos na região de estudo, necessita-se de uma vasta rede experimental a qual possui alto custo de implantação. Devido a esse empecilho, a forma mais econômica de se elaborar um mapa de corrosividade atmosférica é a partir da monitoração de poluentes atmosféricos (deposição de íons cloretos e de compostos de enxofre) e tempo de superfície úmida calculado sobre o metal, e posterior classificação dos ambientes em categorias de corrosividade para cada material metálico.

Para a criação de mapas de classificação da corrosividade atmosférica e de concentração da deposição de poluentes foi utilizado um SIG denominado ArcView 9.0 [53]. Os SIG's constituem tecnologias para investigação de fenômenos diversos, relacionados com engenharia urbana, meio ambiente, geologia, mapas de corrosividade, entre outros. E possui quatro elementos essenciais. São eles: (i) aquisição de dados; (ii) processamento e armazenamento dos dados; (iii) manipulação e análise de dados; e, (iv) geração de produto.

Aronoff [86] define SIG como um conjunto manual ou computacional de procedimentos utilizados para armazenar e manipular dados georreferenciados.

No decorrer dos anos 80, com a grande popularização e barateamento das estações de trabalho gráficas, além do surgimento e a evolução dos computadores pessoais e dos sistemas gerenciadores de bancos de dados relacionais, ocorreu uma grande difusão do uso de GIS. A incorporação de muitas funções de análise espacial proporcionou também um alargamento das suas aplicações. Na década atual, observa-se um grande crescimento do ritmo de penetração do GIS nas organizações, sempre alavancado pelos custos decrescentes do hardware e do software e, também, pelo surgimento de alternativas menos custosas para a construção de bases de dados geográficas.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

---

Para a classificação, correlação e mapeamento da corrosividade atmosférica da região metropolitana de Salvador foram levantados dados referentes a 18 (dezoito) ECA's. Estas estações tiveram como finalidade medir o índice de poluição e agressividade do meio sobre a superfície de diversos metais, por meio de parâmetros, tais como: taxa de sulfatação total na atmosfera expressa em teores de ( $\text{SO}_2$ ); teor de deposição de cloretos ( $\text{Cl}^-$ ); e o índice de material particulado, medido pelo sistema "direct dust distribution gauge (DDD)", aliados aos parâmetros meteorológicos, tais como: temperatura, umidade relativa, precipitação, tempo de umedecimento, pressão, radiação global, insolação, evaporação, direção e velocidade dos ventos.

Neste capítulo serão detalhados os procedimentos utilizados na coleta, manipulação e análise das amostras de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_2$ , P.S. e em corpos de prova, bem como será detalhada a metodologia aplicada para a obtenção da taxa de corrosividade local, nas ECA's das redes experimentais estudadas.

#### 3.1 REGIÃO DE MONITORAMENTO

Para o monitoramento da corrosividade atmosférica foram escolhidos às ECA's Amaralina, Pituba, Paripe, Cajazeiras, Sauípe, Complexo Industrial e Camaçari, sendo que nestas estações foram monitorados a taxa de corrosão atmosférica de placas de alumínio, cobre, aço galvanizado e aço carbono. Foram monitorados, também, dados meteorológicos, assim como, concentrações de medida de severidade da taxa de poluição.

Foram escolhidos também às ECA's São Cristovão, Federação, Pituaçu, Praia de Ipitanga, Lauro de Freitas, Lapinha, Candeal, Itapagipe, Centro Administrativo, Aeroporto e Estrada do coco. Nestas estações o monitoramento da taxa de corrosão ocorreu, em sua maioria, por cupons de aço Carbono.

Na Tabela 3, encontram-se listados os módulos e o período de coleta de dados para cada ECA.

**Tabela 3.** ECA's e módulos de coleta instalados na região metropolitana de Salvador-BA.

ECA's	Período de instalação		Localização	Módulos de coleta
	Início	Fim		
1	24/9/2008	18/8/2010	Cajazeiras (CJD)	(1); (2); (3); (4) e (5)
2	24/9/2008	18/8/2010	Complexo Industrial (CIU)	(1); (2); (3); (4) e (5)
3	25/9/2008	18/8/2010	Paripe (PP)	(1); (2); (3); (4) e (5)
4	25/9/2008	18/8/2010	Pituba (PIT)	(1); (2); (3); (4) e (5)
5	26/9/2008	18/8/2010	Sauípe (SPS)	(1); (2); (3); (4) e (5)
6	29/9/2008	18/8/2010	Camaçari (CMU)	(1); (2); (3); (4) e (5)
7	30/9/2008	18/8/2010	Amaralina (AML)	(1); (2); (3); (4) e (5)
8	20/10/2008	18/8/2010	São Cristovão (SCR)	(5)
9	17/10/2008	18/8/2010	Federação (FED)	(5)
10	17/10/2008	18/8/2010	Pituaçu (PUD)	(5)
11	7/11/2008	18/8/2010	Praia de Ipitanga (PR IPI)	(5)
12	11/11/2008	18/8/2010	Lapinha (LPN)	(5)
13	11/11/2008	18/8/2010	Candeal (CDL)	(5)
14	16/10/2008	18/8/2010	Itapagipe (IPG)	(5)
15	20/10/2008	18/8/2010	Centro Administrativo (CAB)	(5)
16	20/10/2008	18/8/2010	Lauro de Freitas (LDF)	(5)
17	6/11/2008	18/8/2010	Aeroporto (AER)	(5)
18	6/11/2008	18/8/2010	Estrada do Coco (ES COC)	(5)

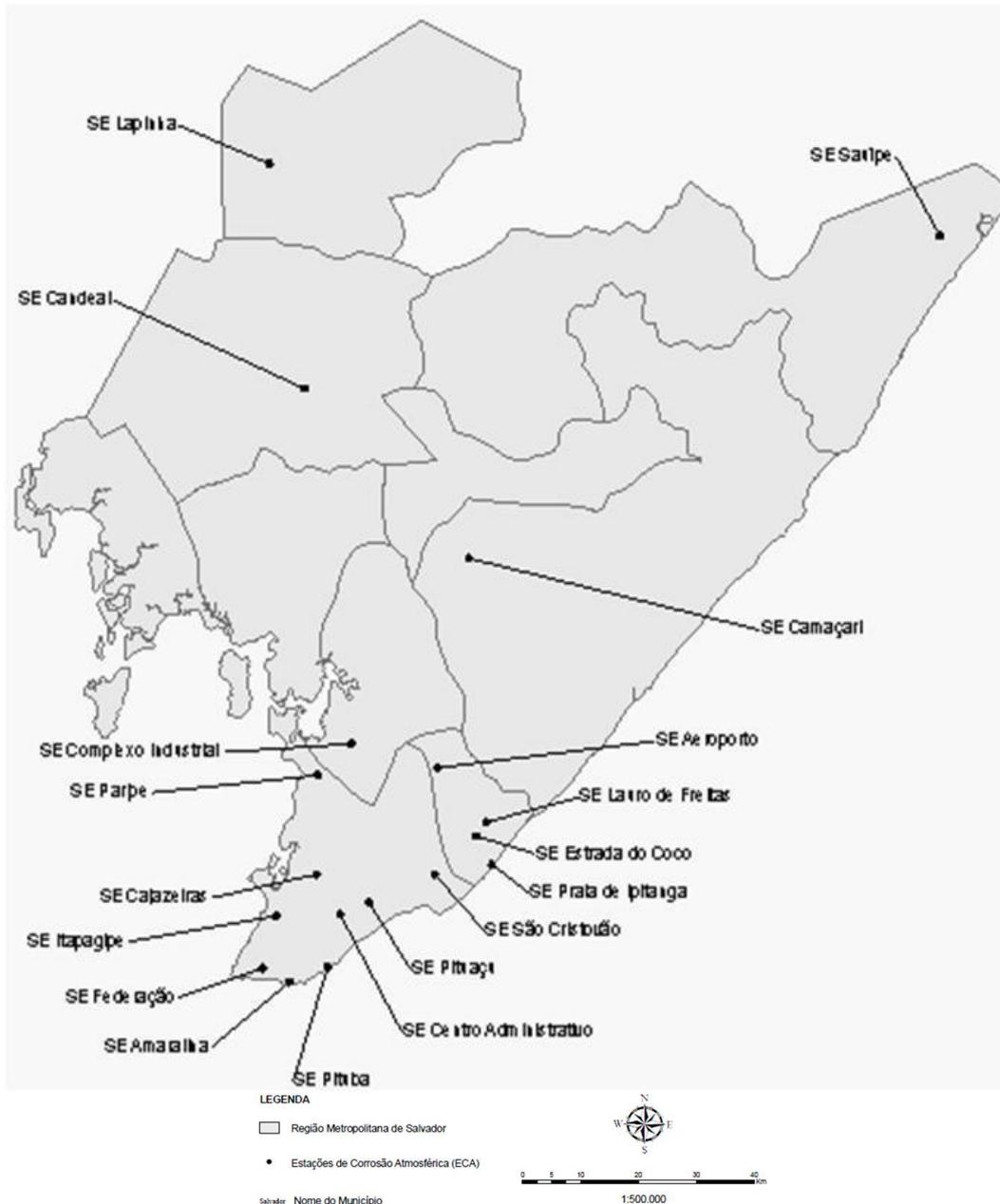
Nota: (1) coletor de cloretos; (2) coletor de sulfatos; (3) coletor de DDDG; (4) painel de intemperismo natural com placas metálicas e (5) painel de intemperismo natural com cupons de aço carbono.

Na Figura 6, têm-se esquematizado a localização das ECA's na região metropolitana de Salvador-BA.

O critério para a localização das ECA's foi definido em função das regiões com maior registro de quedas intempestivas de energia devido à elevada agressividade local frente aos materiais metálicos e, conseqüentemente, alto custo com manutenção.

Para a classificação e a correlação da região de Salvador-Ba foram levantados dados referentes às 18 ECA's localizadas em distintas áreas abrangendo desde os ambientes mais

agressivos, devido à salinidade e aos poluentes industriais, até os menos agressivos nas regiões mais afastadas da orla marítima e dos complexos industriais. Entre as ECA's escolhidas há o destaque para a ECA de Camaçari, que é o maior complexo industrial integrado do hemisfério sul, o pólo tem mais de 90 empresas químicas, petroquímicas e de outros ramos de atividade como a indústria automotiva, de celulose, metalurgia do cobre, têxtil, bebidas e serviços [87]. Destaca-se, também, as ECA's de Amaralina, Pituba e Praia de Ipitanga, que são regiões bem próximas ao mar.



**Figura 6. Esquema da localização das ECA's na RMS.**

## 3.2 CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA E LEVANTAMENTO DE DADOS METEOROLÓGICOS DA REGIÃO DE SALVADOR, BA.

A atmosfera é a camada gasosa da biosfera, indispensável para a vida na Terra. Além de partículas de poeira, grãos de pólen, microorganismos e sais marinhos, entre outros, ela é composta por uma mistura de gases: 79% de nitrogênio, 20% de oxigênio e 1% de outros gases, entre os quais se incluem o dióxido de carbono, o vapor de água e os gases raros (argônio, neônio, hélio, criptônio, ozônio, etc.), assim chamados porque existem em quantidades muito pequenas.

De acordo com a temperatura, pressão e concentração de substâncias características, a atmosfera subdivide-se em cinco camadas principais, que são: troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera e exosfera. O alvo da discussão neste trabalho é a troposfera, camada que ocorre a maioria das interações físicas e químicas atmosféricas.

Devido ao intenso movimento de energia térmica e das significativas diferenças de temperatura, a troposfera é a camada mais instável da atmosfera. É nessa camada que ocorrem as condições meteorológicas e, também, é nesta camada que ocorre a libertação de efluentes gasosos provenientes das chaminés industriais e dos escapamentos dos veículos motorizados.

O ar atmosférico continental está sendo freqüentemente contaminado por poluentes antropogênicos, principalmente, nas áreas urbanas. A poluição atmosférica está associada a atividades tecnológicas que estão presentes ao longo da história do homem. Estes poluentes são quaisquer formas de matéria sólida, líquida ou gasosa e de energia que, presentes na atmosfera, podem torná-la poluída. Os poluentes atmosféricos podem ser classificados de acordo com:

### **Estado Físico: material particulado; gases e vapores**

Origem: poluentes primários (emitidos já na forma de poluentes); poluentes secundários (formados na atmosfera por reações químicas ou fotoquímicas).

O material particulado pode ser classificado de acordo com o método de formação:

**poeiras:** partículas sólidas, geralmente formadas por processos de desintegração mecânica (moagem, britagem, etc). As partículas formadas são geralmente não esféricas.

**fumos:** partículas sólidas formadas por condensação ou sublimação de substâncias gasosas originadas da vaporização/sublimação de sólidos. A formação dos fumos é usualmente acompanhada de reações químicas (oxidação no caso de fumos metálicos).

**fumaça:** partículas principalmente sólidas, usualmente vindas da combustão de combustíveis fósseis, materiais asfálticos ou madeiras. Contém fuligem, partículas líquidas e, no caso da madeira e carvão, uma fração mineral (cinzas).

**névoas:** partículas líquidas produzidas por condensação ou por dispersão de um líquido.

## Classe Química

- **poluentes orgânicos e poluentes inorgânicos**

Como já verificado, as condições de altos teores de umidade em conjunto com altas temperaturas favorecem, notavelmente, aos processos de deterioração dos materiais na atmosfera. Baseado neste conceito, Brooks *apud* Morcillo *et al.* [54] apresentou um índice sobre o potencial corrosivo a partir de dados meteorológicos. O valor numérico denominado índice de deterioração de Brooks (Id), pode representar um importante índice sobre o potencial corrosivo a partir de dados meteorológicos, e é calculado a partir da pressão de saturação do vapor de água à temperatura e umidade relativa médias da região, conforme Equação (28).

$$Id = \frac{(UR - 65) \cdot P}{100} \quad (28)$$

Onde (Id) é o índice de deterioração média anual de Brooks; (UR) é a umidade relativa média anual (em porcentagem); e (P) é a pressão de saturação do vapor de água na atmosfera (em mbar), correspondente à temperatura média anual; este valor pode ser obtido experimentalmente ou por meio de tabelas padrão [88].

De acordo com o valor de (Id) podem ser estabelecidos os seguintes graus de deterioração que tem correlação direta com a agressividade do ambiente, conforme ilustrado na Tabela 4.

**.Tabela 4. Índice de Deterioração de Brooks [54].**

<b>Id</b>	<b>GRAU DE DETERIORAÇÃO</b>	<b>Id</b>	<b>AGRESSIVIDADE</b>
Id < 1	Muito baixo	0 - 1	Não agressivo
1 < Id < 2	Baixo	1 - 2	Muito pouco agressivo
2 < Id < 5	Moderado	2 - 4	Pouco agressivo
Id > 5	Alto	4 - 5	Agressivo
		5 - 10	Muito agressivo

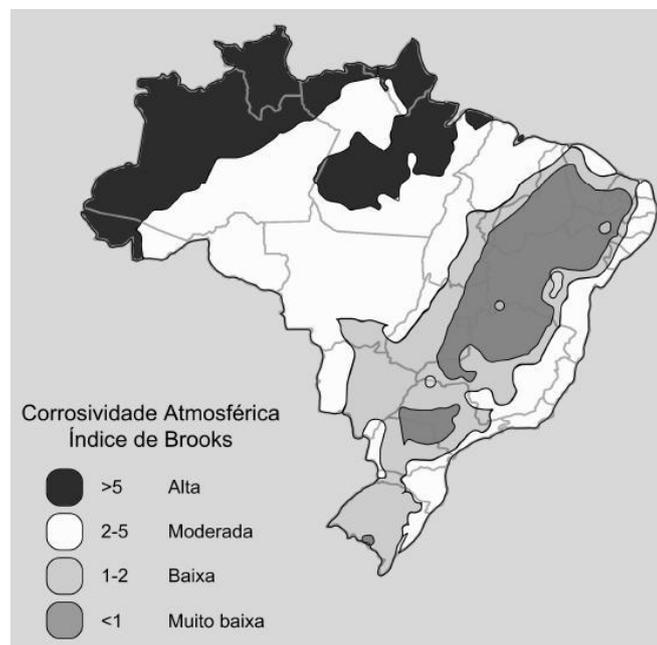
De acordo com os dados meteorológicos das diferentes regiões do Brasil, tem-se na Figura 7, a classificação da corrosividade atmosférica segundo a metodologia de Brooks. Embora de conceituação teórica mais simples do que o modelo apresentado pela ISO 129442 (pois somente considera a umidade e a temperatura como fatores intervenientes), ela pode ser utilizada na qualificação da agressividade das grandes áreas rurais do Brasil, onde os dados são escassos ou inexistentes. Em contrapartida, certa reserva deve ser considerada quando se avaliam grandes cidades, áreas industriais e regiões costeiras. Como visto anteriormente, a água é o eletrólito necessário às reações eletroquímicas, mas são os agentes poluentes (não considerados no Índice de Brooks) que imprimem aumento da velocidade de corrosão. A observação da Figura 7 indica que a maior parte do território brasileiro é de muito baixa, baixa ou moderada agressividade.

Para classificação climática da região metropolitana de Salvador-BA foi seguida a metodologia de Köppen e, como complemento, a de A. Strahler [89].

A classificação climática de A. Strahler (1951) [89] tem por base a influência das massas de ar em áreas diferenciadas. Nela, não se trabalha, portanto, com as médias de chuvas e temperaturas, mas com a explicação de sua dinâmica.

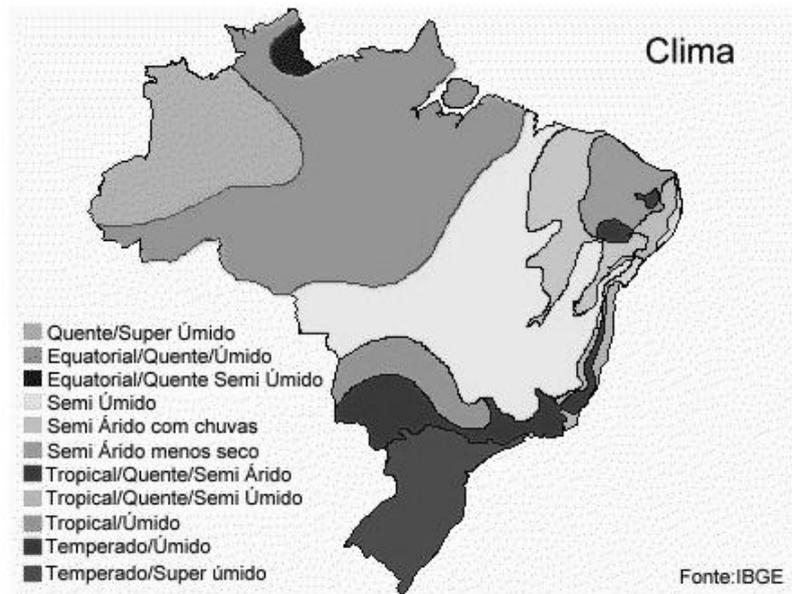
Outra forma de classificação climática, a de Wilhelm Köppen [89], apesar de clássica e intensamente utilizada e de ter facilitado a um avanço em tendências climáticas para a sua época (final do século XIX) é, hoje, bastante problemática, pois não leva em conta os deslocamentos das massas de ar. Nela, estão representados cinco tipos de clima que

classificam o Brasil com base na temperatura e na pluviosidade média anual (Am – equatorial; Aw – tropical; Bsh – semi-árido; Cwa – tropical de altitude e Cf – subtropical). Köppen se baseia, também, nos principais sistemas dinâmicos da circulação atmosférica atuantes no Brasil (massa equatorial atlântica e continental – mEa e mEc, massa tropical atlântica e continental – mTa e mTc e a massa polar atlântica – mPa). Já, a classificação climática de A. Strahler propõe que os climas no território brasileiro são controlados por massas de ar equatoriais-tropicais e tropicais-polares e divide, igualmente a Köppen, a atmosfera em cinco tipos climáticos: clima equatorial úmido – convergência dos alísios; clima litoral úmido – influenciado pela mTa; clima tropical alternadamente úmido e seco; clima tropical semi-árido e clima subtropical úmido.

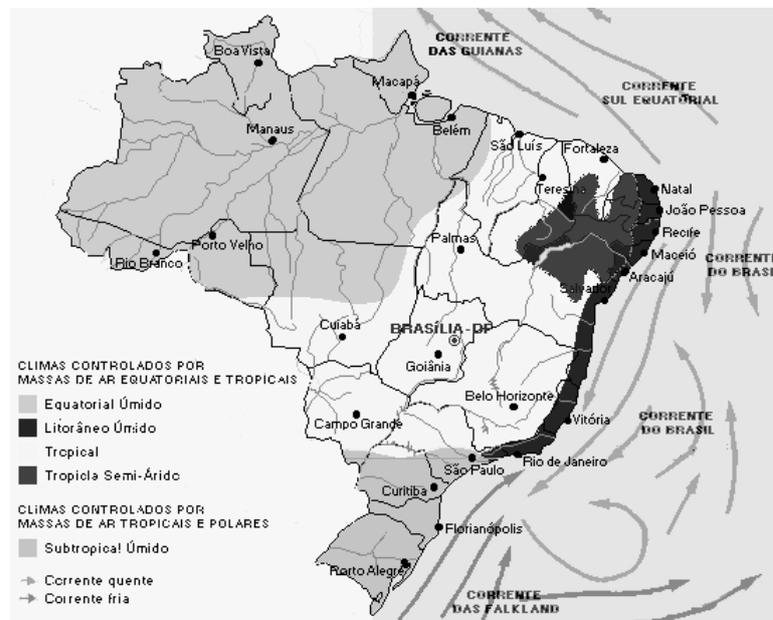


**Figura 7.** Índice de Corrosividade de Brooks para o Brasil [53].

Nas Figura 8 e Figura 9, encontram-se apresentados os mapas com o resumo da classificação climática de Köppen e os diferentes climas do Brasil por A. Strahler, respectivamente.



**Figura 8. Classificação climática de Köppen [89].**



**Figura 9. Classificação climática de A. Strahler [89].**

### 3.3 ESTAÇÕES PARA O MONITORAMENTO DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS

Para o monitoramento dos contaminantes atmosféricos foram instalados módulos para a coleta de sulfatos e de cloretos em cada estação. Foram instalados, também, coletores do tipo DDDG, mas este foi monitorado por apenas um ano, ou seja, o primeiro ano.

Para a instalação das estações de coleta de poluentes foram analisados os atuais e relevantes problemas de corrosão registrados na área pela concessionária de energia, bem como a provável origem dos poluentes na região de interesse. A direção e a velocidade dos ventos foram parâmetros importantes na escolha do local, pois influenciam diretamente na dispersão e no sinergismo dos contaminantes. A seguir, está apresentada a metodologia adotada para quantificação destes poluentes.

A amostragem nas estações de coleta de poluentes foi realizada mensalmente. O material foi coletado e etiquetado de forma a conter todas as informações relevantes sobre o período de exposição e sobre a coleta. Após a coleta, o material foi despachado para o laboratório para a realização das análises químicas quantitativas.

### **3.3.1 Determinação do teor de cloretos (Cl<sup>-</sup>) na atmosfera**

A determinação do teor de cloretos existente na atmosfera foi realizada conforme a norma ABNT NBR 6211 [90], que prescreve o método da vela úmida, sendo empregado, especificamente, à determinação de ácido clorídrico (HCl) proveniente de atmosferas poluídas e de cloretos solúveis em água como os existentes em aerossóis de atmosferas marinhas e industriais. A aparelhagem dos coletores de cloretos é composta de vela coletora, frasco coletor, suporte do frasco coletor e proteção da aparelhagem.

A vela coletora foi constituída de um tubo de ensaio de vidro com, aproximadamente, 25 mm de diâmetro e 200 mm de altura, envolto com gaze cirúrgica. A área externa da gaze exposta teve, aproximadamente, 100 cm<sup>2</sup>. O sistema de coleta (tubo com a gaze) foi introduzido numa rolha de borracha ficando com uma altura de 150 mm acima desta, conforme pode ser observado na Figura 10. Ambas as extremidades da gaze passaram por orifícios de 8 mm de diâmetro, ficando a 20 mm distantes da base do cilindro, de modo que restasse um comprimento livre suficiente para as mesmas ficarem mergulhadas na solução coletora, a qual era constituída de 200 ml de glicerol,  $\text{CHOH}(\text{CH}_2\text{OH})_2$ , em 800 ml de água destilada.

Para o frasco coletor foi utilizado um vidro âmbar de boca larga e com capacidade interna para 1000 ml, a fim de se adicionar a solução coletora em volume suficiente para não evaporar durante os 30 dias de exposição no campo.

Toda a aparelhagem foi instalada sobre um suporte de madeira adequado, com altura mínima de 1 m do solo e distante cerca de 3 m de qualquer obstáculo lateral, de modo a fornecer a fixação, a real adsorvidade dos sais presentes na atmosfera local e a devida proteção contra as intempéries, no período de exposição, que foi de cerca de 1 anos.

O princípio do método consiste na adsorção do cloreto na superfície da gaze e posterior absorção em água contendo glicerol. Para a determinação da concentração dos íons cloretos resultantes foi utilizada a cromatografia de troca iônica. De acordo com a norma [90] os resultados foram expressos em mg de cloreto por unidade de área (m), por dia.

A alteração do método de norma, onde se tinha o uso de medidas colorimétricas do teor de cloretos presente na solução, pela técnica da cromatografia de troca iônica, teve-se como vantagem se poder explorar outros ânions, também, solúveis no sistema de adsorção.



**Figura 10.** Vela coletora de cloretos e suporte da vela.

### 3.3.2 Determinação da taxa de sulfatação total na atmosfera

Foi realizada conforme a norma ABNT NBR 6921 [91], que prescreve o método para determinação gravimétrica da taxa de sulfatação total na atmosfera, obtida pela fixação, em uma superfície reativa, de compostos de enxofre como  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ . A aparelhagem dos coletores de sulfatos foi composta de vela coletora à base de dióxido de chumbo ( $\text{PbO}_2$ ), abrigo da vela e embalagem para transporte das velas.

A vela coletora foi constituída por um tubo de ensaio com, aproximadamente, 25 mm de diâmetro, envolvido em gaze cirúrgica. Esta foi recoberta com uma pasta reativa

constituída de goma adragante (Agar) e dióxido de chumbo impregnado na proporção de 8 g de dióxido de chumbo para 8 ml de pasta de goma adragante, de modo a formar uma superfície reativa aos compostos de enxofre. A gaze foi enrolada no cilindro (tubo de ensaio de vidro), a fim de se obter uma área com, aproximadamente, 100 cm<sup>2</sup>, conforme observado na Figura 11. Tem-se assim um método comparativo, em que é possível mensurar o teor de compostos de enxofre por unidade de área, e relacioná-lo com a deposição deste em superfícies de estruturas metálicas expostas a atmosfera.



**Figura 11. Vela coletora de sulfatos e suporte da vela.**

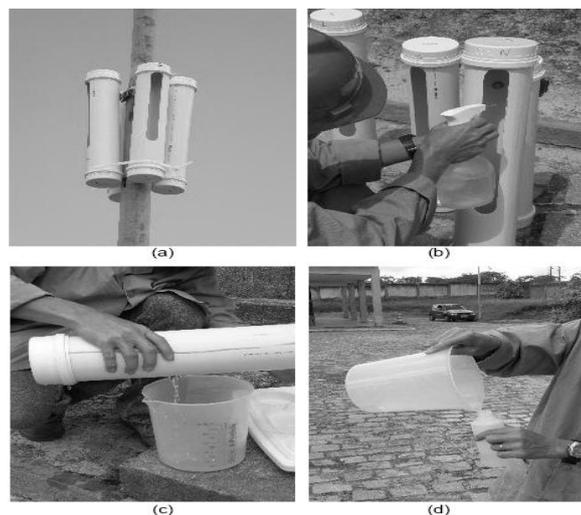
Abrigo da vela. O local foi constituído por uma caixa com venezianas a fim de proporcionar proteção contra a chuva e assegurar a ventilação adequada para a coleta do poluente. O abrigo foi confeccionado de madeira (itauba) pintada com verniz marítimo de baixa reatividade aos compostos de enxofre. O abrigo foi instalado em um suporte a uma altura mínima de 1 m acima do piso e em posição mais alta que todos os obstáculos situados num raio de 3 m conforme previsto em norma.

Princípio do Método. O mesmo consiste na fixação de compostos contendo enxofre por uma superfície reativa composta por pasta de goma adragante (Agar) e PbO<sub>2</sub> sobre gaze cirúrgica enrolada em um tubo de ensaio. Após cerca de 30 dias de exposição nas ECA's da região metropolitana de Salvador e arredores, foram realizadas as coletas das velas para a quantificação dos sais de enxofre absorvidos. A concentração de sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) foi obtida por cromatografia de troca iônica. Os resultados foram obtidos a partir de cálculos estequiométricos equivalentes ao dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). De acordo com a norma [91] os resultados foram expressos em mg de dióxido de enxofre por unidade de área (cm), por dia.

### 3.3.3 Medida de severidade do grau de poluição por meio de calibradores direcionais de poeira (DDDGs)

O método de medida de severidade da poluição na isolação, denominado DDDG, tem sido aplicado com sucesso por pesquisadores do Nirro Research Institute (Irã) [92] e por pesquisadores da ESKOM (África do Sul) [93]. Neste método quatro calibradores de poeira, cada um direcionado para um ponto cardeal, foram usados para coletar a poluição da atmosfera, por intermédio dos materiais particulados, conforme está ilustrado na Figura 12. O método é de simples aplicação, de baixo custo e livre de manutenção. Além disto, a direção da maior intensidade da poluição pode ser medida [92].

Diversos estudos têm mostrado a correlação dos resultados do DDDG com os métodos tradicionais de determinação da severidade da poluição [92, 93].



**Figura 12.** Imagens ilustrativas do calibrador direcional de poeira (DDD), sendo: a) o conjunto de coletores instalados em poste de distribuição de energia; b), c) e d) coleta de material particulado pela lavagem com água destilada.

O princípio do método para a determinação dos materiais particulados foi obtido pela medida da condutividade da solução resultante onde estes resultados podem ser expressos em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . O sistema tem como inconveniente não analisar material particulado em suspensão e que não interferem na condutividade elétrica da solução, como as partículas metálicas, sílica, entre outros. Tais depósitos, mesmo não vindo a produzir alteração da condutividade do eletrólito, quando sedimentados na superfície de outros materiais, podem propiciar corrosão por pilha galvânica e, também, facilitar o acúmulo de umidade e sujidades

sob o material sedimentado. Mesmo assim, por ser um método consagrado no setor, foi adotado para a criação de um banco de dados para a avaliação dos processos de corrosão.

### 3.4 ESTAÇÕES DE INTEMPERISMO NATURAL, ECA's

A implantação das estações de intemperismo natural (ECA's) teve como objetivo avaliar a agressividade dos contaminantes atmosféricos, aliada às condições climáticas locais, sobre o desempenho dos corpos de prova (CP's) metálicos semelhantes às estruturas metálicas usadas na região. Estas estações foram situadas em áreas capazes de representar, o melhor possível, a região de avaliação de forma a considerar todos os parâmetros ambientais envolvidos, pois de acordo com a natureza e a concentração dos contaminantes um ambiente pode ser caracterizado como muito agressivo para um determinado metal e pouco agressivo para outro.

As ECA's foram localizadas no mesmo espaço geográfico das estações de coleta de contaminantes a fim de possibilitar a avaliação das variáveis micro e macroclimáticas da corrosão atmosférica local.

Os painéis foram instalados conforme norma ABNT NBR 6209 [94]. Todos os painéis foram posicionados com a frente voltada para o norte geográfico, a fim de proporcionar maior incidência diária dos raios solares sobre as superfícies metálicas. Na ECA de Amaralina o painel foi instalado a uma altura aproximada de 9 m. O objetivo foi avaliar o local sem barreiras naturais aos ventos soprados de quaisquer direções.

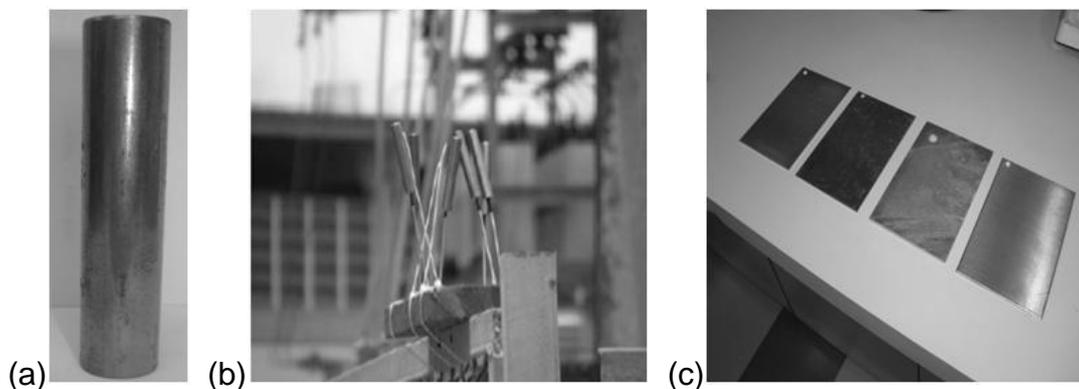
Os painéis para exposição de CP's foram confeccionados em perfis de madeira com inclinação de 30° em relação à horizontal, conforme pode ser observado na Figura 13. Eles são dotados de estabilidade mecânica suficiente para resistir à força dos ventos e à massa dos CP's.



**Figura 13.** Painel de intemperismo natural da subestação de Camaçari-BA.

Na Figura 14 (a), está mostrada a foto do cupom de aço carbono utilizado na avaliação da taxa de corrosão do metal instalado nas ECA's; na (b) está apresentada a sua forma de instalação no campo; e, na (c) as placas metálicas de alumínio, cobre, aço galvanizado e aço carbono preparadas para suas exposições ao intemperismo natural.

Os CP's foram devidamente cortados, desengraxados com solvente (acetona), preparados por limpeza química (Tabela 5), pesados e tiveram suas áreas determinadas conforme a norma ABNT NBR 6210 [95]. Após os seus preparos, estes foram codificados por meio de um orifício na superfície, com braçadeiras poliméricas e anilhas de letras e números. No caso dos cupons, estes foram codificados por meio de uma haste metálica contendo letras e números (Figura 14 (b)), estas hastes foram inseridas em um orifício feito dentro do CP, com a devida proteção para não haver contato entre os metais.



**Figura 14.** Imagens dos CP's preparados para a exposição em ambiente natural e verificação do processo de corrosão, sendo: (a) cupom de aço carbono; (b) cupons de aço carbono instalados na ECA; e (c) placas metálicas de alumínio, cobre, aço galvanizado e aço carbono, respectivamente.

Na Tabela 6, encontra-se a lista de metais padrão expostos nas respectivas ECA's, e na Tabela 7 está apresentada a composição química elementar presente nos metais de base.

**Tabela 5. Soluções utilizadas para preparo e limpeza, antes e após ensaio de intemperismo artificial no CP.**

Corpo de prova	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; 20 g - Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; 50 g-SnCl <sub>2</sub> )
alumínio	Solução de hidróxido de sódio (1L-H <sub>2</sub> O; 30 g-NaOH)	solução ácida (1L-H <sub>2</sub> O; 20 g-CrO <sub>3</sub> ; 50 ml-H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> )
cobre	Solução de ácido nítrico (1L-H <sub>2</sub> O; 50 ml-HNO <sub>3</sub> )	Solução de ácido clorídrico (1L-H <sub>2</sub> O; 500 ml-HCl)
aço galvanizado	Solução de hidróxido de amônia (1L-H <sub>2</sub> O; 150 ml-NH <sub>4</sub> OH)	A mesma do preparo

**Tabela 6. Identificação das placas metálicas expostas nas redes experimentais.**

Código do CP	Material / Revestimento
<b>A</b>	Alumínio 6351
<b>C</b>	aço carbono 1020
<b>G</b>	aço galvanizado
<b>CB</b>	Cobre eletrolítico

**Tabela 7. Composição química elementar presentes nos metais de base estudados.**

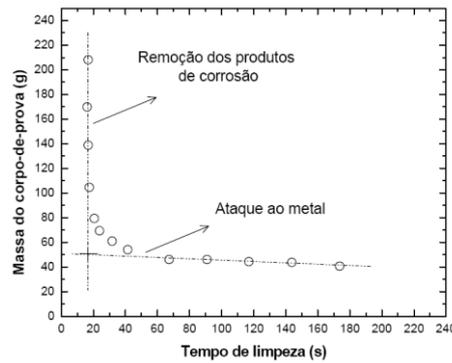
Metal	Elementos Químicos (%)																			
	S	C	Ti	Pb	Cu	Mg	Si	Al	Ni	P	Cr	Mo	Fe	Zn	Sn	Ag	Cd	Be	Co	Mn
<b>Aço carbono 1020</b>	0,02	0,03	0,01	0,01	0,01	0,33	0,04	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....
<b>Alumínio 6351</b>	.....	.....	0,01	0,01	0,15	0,01	0,08	.....	0,01	.....	0,01	.....	0,38	0,01	0,01	.....	.....	.....	.....	.....
<b>Cobre eletrolítico</b>	.....	.....	.....	0,01	.....	0,01	0,02	0,01	0,01	.....	0,01	.....	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01

A norma ISO 9223, recomenda o uso de CP's de zinco com composição mínima de 98,5% em Zn metálico, no entanto, foram utilizados CP's de aço galvanizado constituídos de um substrato (aço carbono) revestido com zinco por imersão a quente com espessura de

camada de 80  $\mu\text{m}$ . Esta escolha baseou-se na grande utilização deste material nas estruturas metálicas utilizadas no setor de distribuição e transmissão de energia elétrica local. Foram utilizados também o método de ensaio de Preece conforme norma ASTM A239-95 (2009) [96], com o intuito de verificar a uniformidade do revestimento.

Os CP's foram retirados com periodicidade trimestral. Após cada período de exposição e de terem passado por uma prévia inspeção visual e registro fotográfico, foi realizada a limpeza adequada dos produtos de corrosão de acordo com o tipo de material padrão. Neste trabalho foi adotada, primeiramente, a limpeza mecânica leve dos produtos de corrosão fracamente aderidos, utilizando-se escovas de cerdas macias, e, em seguida, procedeu-se à limpeza química que implicou na remoção dos produtos de corrosão dissolvendo-os em reagentes químicos adequados para cada tipo de material, conforme as recomendações das normas ABNT NBR 6210 e ASTM G1-90 [97]. Conforme mencionado anteriormente, na Tabela 5, 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 de intemperismo natural.

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. A massa final dos metais, após remoção dos produtos de corrosão, foi determinada pela interseção das retas correspondentes à remoção dos produtos de corrosão e ao ataque do substrato, conforme demonstrado na Figura 15, reproduzida novamente neste trabalho. Como os valores resultantes foram similares, foram adotados os resultados obtidos por Sica [7], como padrão.



**Figura 15.** Curva da perda de massa do CP, removida por ataque químico, em relação ao tempo de limpeza [7].

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 29, transcrita da norma [97].

$$\text{Taxa de corrosão} = \frac{K.M}{S.t.\rho} \quad (29)$$

Onde (K) é uma constante que determina a unidade da taxa de corrosão (Tabela 8); (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>.

Para os CP's de alumínio, após a constatação de ataque localizado, estes foram avaliados quanto a forma e o tipo de corrosão com auxílio de um microscópio estereoscópio da marca NIKON, modelo SMZ800 e, posteriormente, em uma investigação mais detalhada, pela análise metalográfica utilizando um microscópio óptico Leitz-Wetzlar, modelo MM6. As amostras para metalografia foram cortadas, embutidas a quente com baquelite, lixadas até grana 1200 e polidas com pasta de diamante de 3 μm.

**Tabela 8.** Valores para a constante K.

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

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.

### 3.5 CLASSIFICAÇÃO DA CORROSIVIDADE ATMOSFÉRICA

A série de normas ISO 9223 [98], ISO 9224 [99], ISO 9225 [100] e ISO 9226 [101] foi elaborada com o objetivo de fornecer guias para classificar do grau de corrosividade da atmosfera frente a materiais metálicos padrões tais como o aço carbono, alumínio, cobre e zinco.

Tal como a norma NBR 14643 [102] da ABNT, todas as referências anteriores refletem o atual conhecimento sobre classificação da corrosividade atmosférica e caracterizam a atmosfera em cinco categorias de corrosividade, variando de C<sub>1</sub> (muito baixa) a C<sub>5</sub> (muito alta), conforme demonstrado na Tabela 9.

**Tabela 9. Categorias de corrosividade atmosférica [102].**

CATEGORIA DE CORROSIVIDADE	AGRESSIVIDADE
C <sub>1</sub>	Muito baixa
C <sub>2</sub>	Baixa
C <sub>3</sub>	Média
C <sub>4</sub>	Alta
C <sub>5</sub>	Muito Alta

A classificação foi realizada com base em três variáveis independentes que são, tempo de superfície úmida (t) e contaminação por teores de SO<sub>2</sub> (A) e Cl<sup>-</sup> (B), conforme mostrado nas Tabelas 10, 11 e 12, bem como por medidas da variável dependente a taxa de corrosão dos metais padrões listadas na Tabela 13.

**Tabela 10. Classificação da agressividade do ambiente conforme Liesegang.**

Ambiente corrosivo	Contaminação atmosférica		
	SO <sub>3</sub> (mg/100cm <sup>2</sup> .dia)	SO <sub>2</sub> (mg/m <sup>2</sup> .dia)	Cl <sup>-</sup> (mg/m <sup>2</sup> .dia)
1. Rural	0,12 - 0,37	9,6 - 29,6	< 30
2. Urbano	0,37 - 1,25	29,6 - 100,0	< 30
3. Industrial	1,25 - 2,50	100,0 - 200,0	< 30
4. Marinho	0,12 - 0,37	9,6 - 29,6	30 – 3000
5. Marinho Industrial	1,25 - 2,50	100,0 - 200,0	30 - 3000

**Tabela 11. Classificação do ambiente em termos de tempo de superfície úmida (t), taxa de sulfatação (A) e teor de cloretos (B) [14].**

<b>Categoria</b>	<b>(t), (h/ano)</b>	<b>SO<sub>2</sub> (A), (mg/m<sup>2</sup>.dia)</b>	<b>Cl<sup>-</sup> (B), (mg/m<sup>2</sup>.dia)</b>
t <sub>1</sub> ; A <sub>0</sub> ; B <sub>0</sub>	<= 10	<= 10	<= 3
t <sub>2</sub> ; A <sub>1</sub> ; B <sub>1</sub>	10 - 250	10 - 35	3 – 60
t <sub>3</sub> ; A <sub>2</sub> ; B <sub>2</sub>	250 - 2500	35 - 80	60 – 300
t <sub>4</sub> ; A <sub>3</sub> ; B <sub>3</sub>	2500 - 5500	80 - 200	300 – 1500
t <sub>5</sub>	> 5500	> 200*	> 1500*

Nota: \* valores estimados.

**Tabela 12. Categoria de corrosividade estimada da atmosfera sobre os metais.**

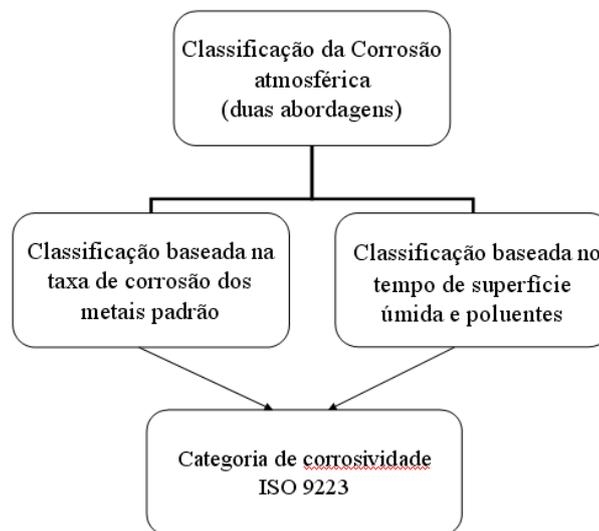
Aço carbono															
	t <sub>1</sub>			t <sub>2</sub>			t <sub>3</sub>			t <sub>4</sub>			t <sub>5</sub>		
	B <sub>0</sub> -B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> -B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> -B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> -B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>	B <sub>0</sub> -B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>3</sub>
A <sub>0</sub> - A <sub>1</sub>	1	1	1 - 2	1	2	3 - 4	2 - 3	3 - 4	4	3	4	5	3 - 4	5	5
A <sub>2</sub>	1	1	1 - 2	1 - 2	2 - 3	3 - 4	3 - 4	3 - 4	4 - 5	4	4	5	4 - 5	5	5
A <sub>3</sub>	1 - 2	1 - 2	2	2	3	4	4	4 - 5	5	5	5	5	5	5	5
Zinco e cobre															
A <sub>0</sub> - A <sub>1</sub>	1	1	1	1	1 - 2	3	3	3	3 - 4	3	4	5	3 - 4	5	5
A <sub>2</sub>	1	1	1 - 2	1 - 2	2	3	3	3 - 4	4	3 - 4	4	5	4 - 5	5	5
A <sub>3</sub>	1	1 - 2	2	2	3	3 - 4	3	3 - 4	4	4 - 5	5	5	5	5	5
Alumínio															
A <sub>0</sub> - A <sub>1</sub>	1	2	2	1	2 - 3	4	3	3 - 4	5	3	3 - 4	5	4	5	5
A <sub>2</sub>	1	2	2 - 3	1 - 2	3 - 4	4	3	4	5	3 - 4	4	5	4 - 5	5	5
A <sub>3</sub>	1	2 - 3	3	3 - 4	4	4	3 - 4	5	5	4 - 5	5	5	5	5	5

**Tabela 13. Categorias de corrosividade atmosférica segundo dados obtidos no primeiro ano de exposição [102].**

categoria de corrosividade	unidades	zinco	cobre	alumínio	aço carbono
C <sub>1</sub>	g/m <sup>2</sup> /ano	≤ 0,7	≤ 0,9	desprezível	≤10
	µm/ano	≤ 0,1	≤ 0,1	desprezível	≤ 1,3
C <sub>2</sub>	g/m <sup>2</sup> /ano	0,7 -5	0,9-5	≤ 0,6	10-200
	µm/ano	0,1- 0,7	0,1-0,6	-	1,3-25
C <sub>3</sub>	g/m <sup>2</sup> /ano	5-15	5-12	0,6 - 2	200-400
	µm/ano	0,7-2,1	0,6-1,3	-	25-50
C <sub>4</sub>	g/m <sup>2</sup> /ano	15-30	12-25	2-5	400-650
	µm/ano	2,1-4,2	1,3-2,8	-	50-80
C <sub>5</sub>	g/m <sup>2</sup> /ano	30-60	25-50	5-10	650-1500
	µm/ano	4,2-8,4	2,8-5,6	-	80-200

O fluxograma apresentado na Figura 16 demonstra as duas vias que podem ser utilizadas para a classificação da corrosividade atmosférica de uma determinada região.

Todas estas classificações são elaboradas a partir de um ano de exposição dos CP's, caracterizando uma taxa de corrosão estacionária definida.



**Figura 16. Abordagens para classificação da corrosividade atmosférica.**

### 3.6 METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DAS FUNÇÕES DOSE-RESPOSTA

De acordo com Haagenrud [79], o comportamento do fenômeno de corrosão atmosférica dos metais é governado pela Equação de Pourbaix, transcrita na Equação 30.

$$P = K \cdot t^n \quad (30)$$

Onde: (P) representa a perda de espessura média do metal em  $\mu\text{m}$  ou perda de massa (g); (t) é o tempo de exposição em meses ou anos; (K) e (n) são as constantes que representam a corrosão em  $\mu\text{m}$  ou g para o primeiro ano e o efeito passivador do ambiente, o qual depende diretamente do metal, das condições físico-químicas da atmosfera e de condições de exposição, respectivamente. Essas constantes são determinadas empiricamente a partir da extrapolação bi logarítmica dos dados experimentais de corrosão ( $\mu\text{m}$ ) ou (g) vs tempo (meses) conforme a Equação 31.

$$\log P = \log K + n \log t \quad (31)$$

A representação em coordenadas log-log da Equação (30) evidenciada pela Equação (31) é uma linha reta. Por meio da regressão linear, utilizando-se o método dos mínimos quadrados calculam-se as constantes K (intercepto) e n (inclinação) da reta.

É possível, também, determinar a constante K com base nos teores de poluentes atmosféricos ( $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_2$ ) e aerossóis (P.S.) por meio da regressão linear múltipla que resulta em uma equação do tipo da apresentada na Equação (32).

$$K' = a_0 + a_1 \cdot [\text{Cl}^-] + a_2 \cdot [\text{SO}_2] + a_3 \cdot [\text{M.P}] \quad (32)$$

Onde os coeficientes ( $a_0 - a_3$ ) são as constantes calculadas; (K') é a corrosão anual em  $\mu\text{m}$  ou g;  $[\text{Cl}^-]$  é a média anual da taxa de deposição de cloretos em  $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ ;  $[\text{SO}_2]$  é a média anual da taxa de sulfatação total na atmosfera e  $[\text{M.P}]$  é a média anual do teor de material em  $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot 30$  dias.

Com esse tratamento obtém-se a função dose resposta que exprime a perda de espessura média ou a perda de massa média dos metais expostos em cada ECA, conforme descrito na Equação (33).

$$C = K' \cdot t^n \quad (33)$$

### 3.7 METODOLOGIA PARA ELABORAÇÃO DAS REDES NEURAIS.

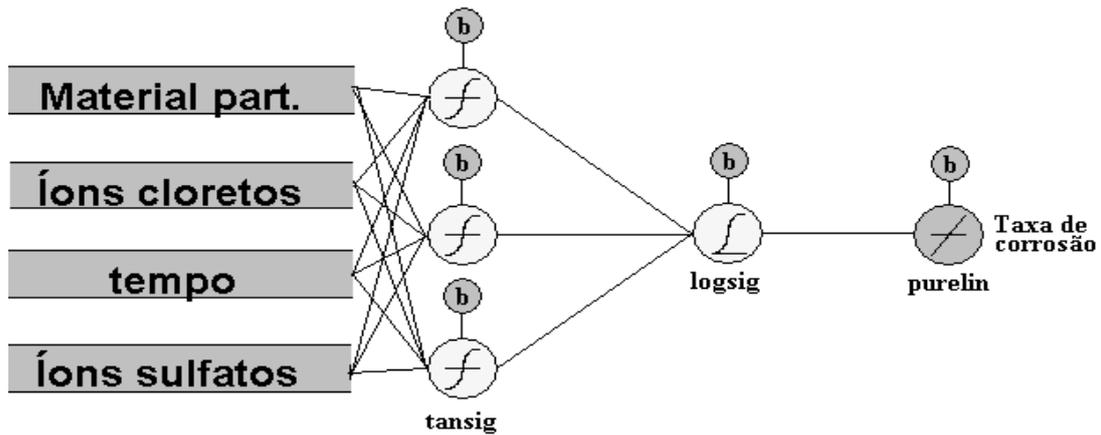
As redes neurais artificiais são ferramentas úteis para modelar e caracterizar os processos de corrosão atmosférica. Estas, foram baseadas em dados experimentais observados, dos quais são elaboradas simulações com o objetivo de estimar a velocidade de corrosão dos materiais metálicos a partir de um conjunto conhecido de parâmetros ambientais, os quais são utilizados para treinar a rede.

Para se criar uma rede neural é necessário realizar testes simulados na tentativa de se ajustar as informações reais com as calculadas pela rede para se fazer uma predição da realidade. Então, para cada situação é necessário testes, que levarão a um treinamento e aprendizagem da rede, não existe uma regra, uma “receita”. Desta forma, as redes neurais neste trabalho basearam-se em experiências já realizadas por Elaine[85], que realizou em sua tese um trabalho muito similar o qual criou-se um modelo de redes neurais artificiais, para predizer a taxa de corrosão do aço-carbono, do cobre e do alumínio, em função de parâmetros ambientais monitorados em dois diferentes ambientes do Brasil. Os resultados encontrados por ela foram bons, desta forma foi possível utilizar o mesmo tipo de rede.

Com o objetivo de predizer o comportamento quanto à corrosão do aço galvanizado, aço carbono, cobre e alumínio utilizados neste trabalho, em diferentes ambientes, foi utilizada uma metodologia específica para a determinação da corrosividade na região metropolitana de Salvador-BA.

A rede utilizada nas análises pode ser visualizada, esquematicamente, na Figura 17 e possui a seguinte arquitetura:

- 4 neurônios na camada de entrada, um para cada parâmetro ambiental;
- 2 camadas intermediárias de neurônios sigmoidais, a primeira com funções tipo tangente (tansig) e a segunda com uma função tipo logarítmica (logsig).
- 1 neurônio de saída com uma função linear (purelin) que amplifica o sinal recebido para valores reais de taxa de corrosão.



**Figura 17.** Esquema da rede neural artificial empregado na determinação da taxa de corrosão dos metais expostos nas ECA's instaladas na Bahia.

Antes de se efetuar simulações com o objetivo de estimar a taxa de corrosão a partir de um conjunto conhecido de parâmetros ambientais, a rede neural artificial precisa ser treinada. Ou seja, os pesos de cada sinapse precisam ser definidos por meio de um aprendizado realizado a partir de informações conhecidas para a entrada (dados ambientais) e para a saída (taxa de corrosão).

O pré-processamento dos dados, definição e treinamento da rede neural artificial foram montados em um algoritmo para ser analisado com o software MatLabR. Neste treinamento foram feitas uma normalização e uma validação dos dados.

A avaliação do treinamento pode ser medida pelas comparações entre os resultados atingidos e os valores de saída esperados. O resultado foi tanto melhor quanto mais próximo de zero esteve o intercepto e mais próximo de  $45^\circ$  foi à inclinação. A resposta desta análise foi baseada nos parâmetros de inclinação e intercepto que definiram a reta de correlação. Outro parâmetro que mediu o ajuste foi o coeficiente de correlação R obtido entre os resultados modelados e valores experimentais. Quanto mais próximo de 1,0 melhor foi à correlação dos dados.

### 3.8 ELABORAÇÃO DO MAPA DE CORROSÃO ATMOSFÉRICA

Para o mapeamento da região metropolitana de Salvador-BA foi utilizado o banco de dados ambientais (taxas de corrosão e teor de contaminantes atmosféricos) registrados

durante o período estudado nas 18 ECA's. Estes dados foram georreferenciados por meio de um software de geoprocessamento, *ArcView GIS 9.0*, que possui um alto grau de modelagem de dados geográficos para representação espacial e informações sobre os perfis, sejam dados vetoriais ou matriciais [103].

Os dados georreferenciados foram definidos "layers" pontuais e vetoriais para serem interpolados pelo método de interpolação determinística, denominado "Inverse Distance Weighted", IDW, no qual foi assumido que cada dado de entrada teve uma influência local que diminuiu com a distância de afastamento do foco problema [104]. O método IDW é um recurso de análise geo-espacial disponível na extensão "Spatial Analyst" do "ArcView 9.0". Este método se baseou na linearidade ponderada da combinação do conjunto de índices de agressividade, determinados para cada ECA, no qual o fator de ponderação foi o inverso da distância, fornecendo uma superfície contínua, denominada "raster" da corrosividade atmosférica [14]. Cabe destacar que para uma maior precisão de resultados há a necessidade de se aumentar a quantidade de pontos de coleta na RMS.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

### 4.1 RESULTADOS REFERENTES AO PRIMEIRO ANO DE TESTES NA RMS

As investigações foram realizadas nas ECA's instaladas na RMS entre setembro de 2008 e setembro de 2009.

#### 4.1.1 Classificação climática e dados meteorológicos

A temperatura média anual na RMS foi de  $(25,2 \pm 1,2)$  °C, conforme dados locais e publicados [105].

A umidade relativa foi consideravelmente alta, variando de 77 a 96% [105], corroborando com os dados e constatações levantadas por Aragão *et al.* [106]. 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, conforme dados da literatura [46, 107]. Os estudos realizados confirmaram que a região de Salvador seguiu a um padrão climático sazonal, sem alterações significativas no período, o que pode facilitar tanto para a interpolação quanto extrapolação dos resultados obtidos para a perda de massa e sua respectiva taxa de corrosão dos metais trabalhados.

De acordo com Köppen [89], Salvador é uma cidade de clima quente e úmido, tipicamente tropical. Situada no litoral leste da Região Nordeste, a capital baiana é uma das cidades brasileiras de maior pluviosidade anual, 2.098,7 mm, dos quais cerca de 53% foram registrados nos sistemas de coleta meteorológicos instalados nas ECAs e de dados da literatura (DNMET, 1992), fato também diagnosticado por Barreto *et al.* [108], na série pluviométrica da estação climatológica principal do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) em Salvador.

A média acumulada de radiação solar para o período de 2009 foi de cerca de  $2 \text{ MJ/m}^2$  [105]. Ao se comparar com dados e avaliações da literatura [4], pode-se prever que tal valor médio influenciou no tempo de superfície úmida do metal.

A direção predominante do vento no período foi de noroeste (levantamentos locais e da literatura [105]), ou seja, proveniente do oceano, a velocidades médias de 7 m/s. Assim, nas regiões onde o mar tem arrebentações mais acentuadas (típicas da região de Amaralina, Pituba e praia de Ipitanga) aumentou-se a probabilidade de corrosão dos metais em estudo.

A partir de séries oriundas das estações SUDENE [109, 110], foram realizados estudos e estimativas das variações interanuais das velocidades médias de vento na Bahia, tendo-se verificado variações máximas da ordem de  $\pm 12\%$  em torno da média de longo prazo (7 a 9 anos).

Com base nos resultados da radiação solar e da temperatura medidas no período, foi estimado um tempo de superfície úmida (t) elevado ( $\gg 4.000$  h/ano), neste caso, classificado pela NBR 14643/01 [2], como  $t_4$  [8, 111].

O índice de deterioração da atmosfera (ID), obtido no período a partir da expressão Brooks para a cidade de Salvador-BA foi de 5,1 como pode ser visto na Equação 34, sendo classificado então como muito agressivo.

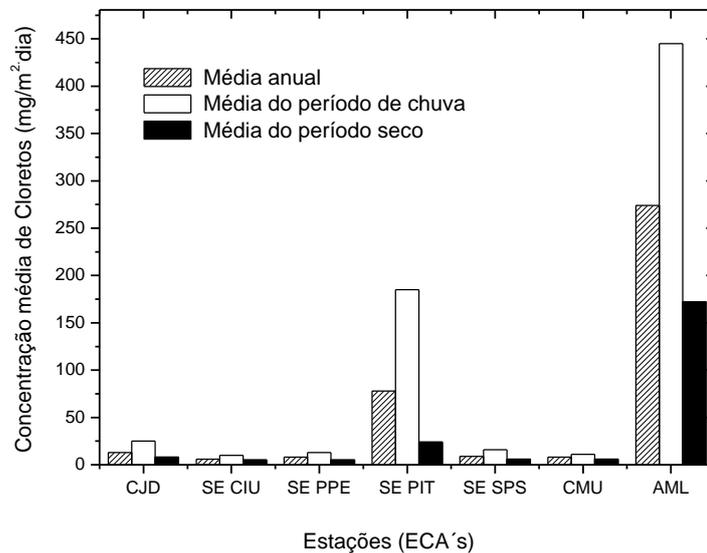
$$ID = \frac{(81 - 65) \times 32}{100} = 5,1 \quad (34)$$

#### 4.1.2 Taxa de cloretos totais na atmosfera das ECA's instaladas na Bahia

Na Tabela 14 e na Figura 18, encontram-se mostrados os resultados da concentração média anual de cloretos, assim como as respectivas médias nos períodos chuvosos que vai de abril a agosto e de estiagem de setembro a março. A análise dos gráficos da figura demonstra haver contrariedade à solubilidade do íon, o que significa comentar que no período de estiagem deveria haver maior concentração de íons cloreto na atmosfera e, conseqüentemente, maior absorção do mesmo na vela com resultados também superiores. Esta inconstância pode ser explicada pelo fato de que no período chuvoso houve maior intensidade de ventos ( $6,82 \pm 0,45$ ) m/s, contra ( $6,29 \pm 0,36$ ) m/s no período de estiagem e, com isto, maior tendência de arrebentação das marés, maior probabilidade de arraste de materiais particulados a distâncias também maiores e, que, apesar do maior índice de pluviosidade, as chuvas não foram esporádicas e não contínuas.

**Tabela 14.** Taxa média de cloretos ( $\text{mg Cl}^-/\text{m}^2.\text{dia}$ ) obtida no período de análise.

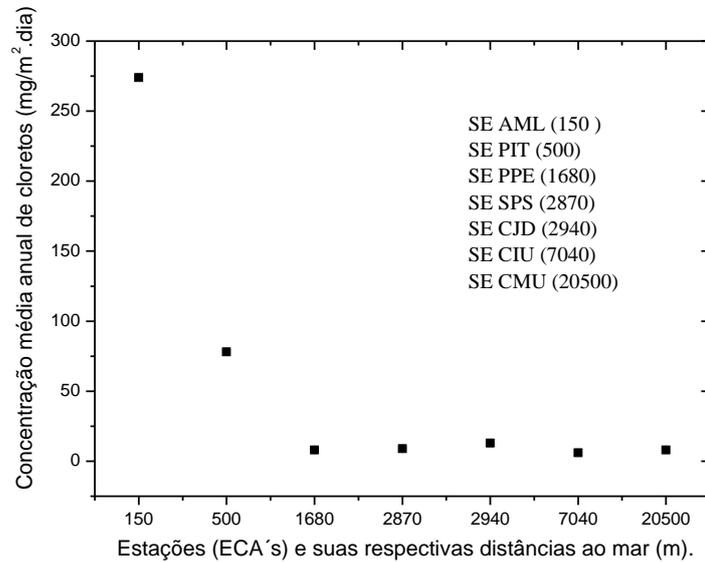
Nº	ECA	Média	Taxa média de cloretos ( $\text{mg Cl}^-/\text{m}^2.\text{dia}$ )	
			Período de Estiagem (setembro a março)	Período de Chuvas (abril a agosto)
1	SE CJD	13	8	25
2	SE CIU	6	5	10
3	SE PPE	8	5	13
4	SE PIT	78	24	185
5	SE SPS	9	6	16
6	SE CMU	8	6	11
7	SE AML	274	172	445

**Figura 18.** Concentração média anual de cloretos ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$ ), e dos períodos de chuva e seca na região das ECA's instaladas na Bahia.

De acordo com a Figura 18, pode-se observar, também, que a ECA Pituba e a ECA Amaralina se destacaram em relação às outras estações por terem maiores concentrações de cloreto. Ambas as ECAs se encontram nas proximidades da orla em locais de maior arrebentação das marés.

Na Figura 19, está apresentada a taxa de salinidade, com relação a cloretos, obtida em cada ECA e em função da sua distância relativa à praia (distância obtida por GPS). Os maiores valores foram equivalentes às menores distâncias da orla, demonstrando a coerência da experimentação realizada em relação a outras investigações [41]. Em

contrapartida, foi encontrada na literatura [36] teores de cloretos maiores ao se adentrar ao continente do que na própria orla. Observou-se que o experimento realizado ao longo do tempo não completou um ciclo sazonal (1 ano).

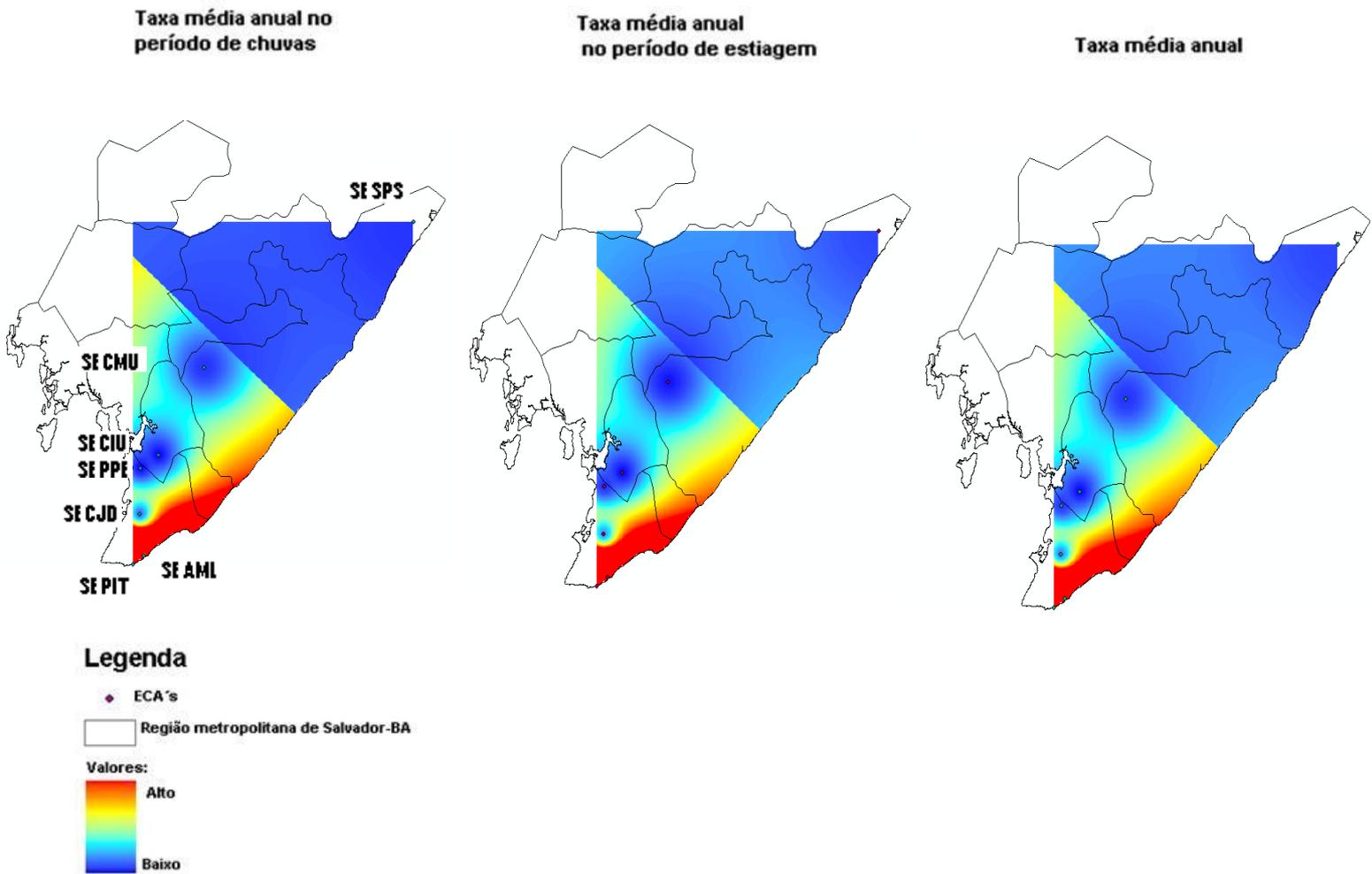


**Figura 19. Médias anuais das taxas de deposição de cloretos (mg/m<sup>2</sup>.dia) em função das distâncias (m) do mar das ECA's no período de análise.**

A partir dos resultados, a agressividade do ambiente para cada ECA pode ser ordenada da seguinte forma:

**AML > PIT > CJD > SPS > PPE ≈ CMU > CIU**

Para melhor visualização pela extrapolação georreferencial, a RMS foi mapeada segundo a concentração média anual dos íons cloreto, medidos em cada ECA, assim como com as médias nos períodos de chuva e de estiagem, conforme Figura 20.



**Figura 20.** Mapas do teor médio anual de deposição de cloretos ( $\text{mg Cl}^-/\text{m}^2.\text{dia}$ ) da RMS, salientando os períodos seco e chuvoso.

#### 4.1.3 Taxa de dióxido de enxofre total na atmosfera das ECA's instaladas na Bahia

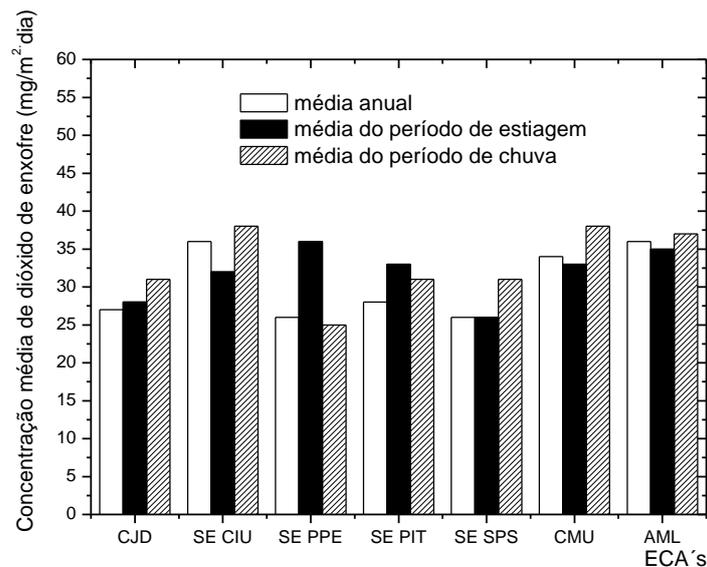
A taxa de deposição anual de  $\text{SO}_2$  para cada ECA está apresentada na Tabela 15 e na Figura 21, assim como a sua média nos períodos chuvosos que vai de abril a agosto e no período de estiagem de setembro a março. De acordo com os valores listados na tabela e a tendência das curvas mostradas na figura, o teor de dióxido de enxofre também foi maior no período chuvoso. A explicação para este comportamento pode ser a mesma atribuída à avaliação para os teores de cloretos, ou seja, maior intensidade dos ventos e uma precipitação pluviométrica esparsa e não contínua.

Observou-se, também, que as ECA's de Camaçari (CMU), Complexo Industrial (CIU) e Amaralina (AML), obtiveram as maiores concentrações de  $\text{SO}_2$  em relação às outras

estações. Este comportamento se deu pela presença de indústrias próximas às estações de Camaçari e do Complexo Industrial e, pela proximidade da ECA Amaralina à orla marítima, respectivamente. É uma consequência do aerosol marinho das ondas do mar e dos ventos [36].

**Tabela 15. Taxa média de dióxido de enxofre ( $\text{mg SO}_2/\text{m}^2.\text{dia}$ , considerando o período de chuvas e de seca.**

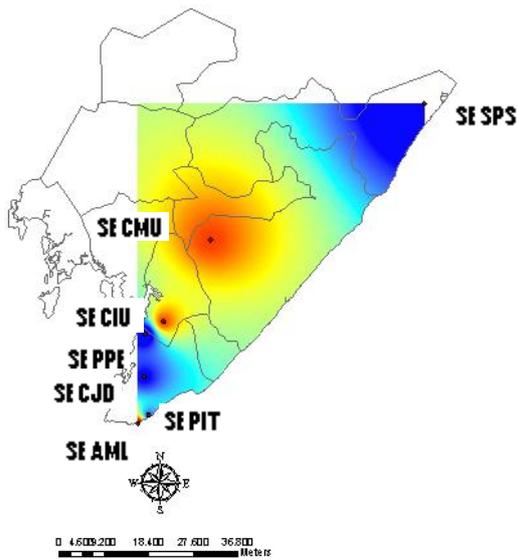
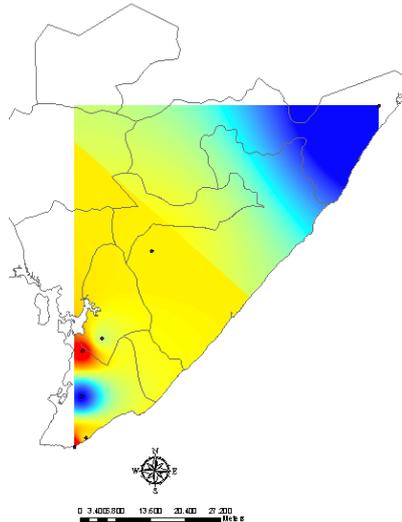
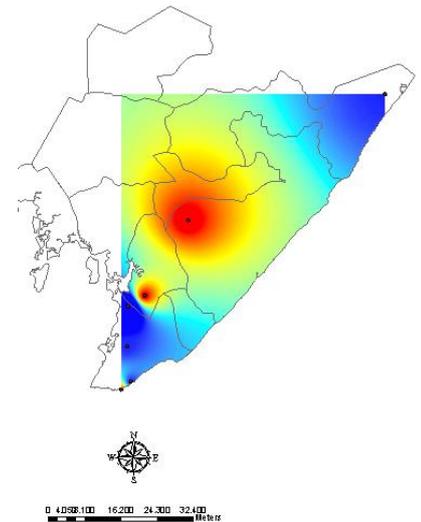
Nº	ECA	Média	Período de Estiagem (setembro a março)	Período de Chuvas (abril a agosto)
1	SECJD	27	28	31
2	SE CIU	36	32	38
3	SE PPE	26	36	25
4	SE PIT	28	33	31
5	SE SPS	26	26	31
6	SE CMU	34	33	38
7	SE AML	36	35	37



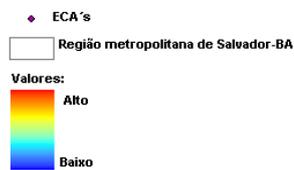
**Figura 21. Médias anuais das concentrações de dióxido de enxofre ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$ ), nas ECA's instaladas na RMS entre setembro de 2008 e setembro de 2009.**

Para uma melhor visualização e considerando a extrapolação georreferencial, a região metropolitana de Salvador-BA foi mapeada, segundo a concentração dos íons de dióxido de enxofre medidos em cada ECA, em média anual, assim como nos períodos de chuvas e estiagem, conforme Figura 22.

Taxa média anual

Taxa média anual  
no período de estiagemTaxa média anual no  
período de chuvas

### Legenda



**Figura 22.** Mapas do teor médio anual de deposição de dióxido de enxofre, em  $\text{mg SO}_2/\text{m}^2.\text{dia}$ , na RMS, com os períodos seco e chuvoso de setembro de 2008 a setembro de 2009.

A partir dos resultados citados, a agressividade do ambiente em cada ECA, em ordem decrescente, pode ser ordenada da seguinte forma:

**CIU  $\approx$  AML > CMU > PIT > CDJ > PPE  $\approx$  SPS**

Para a classificação da corrosividade ambiental segundo Liesegang *apud* Kenny [112], foram utilizados os valores medidos de cloretos. A classificação está apresentada na Tabela 16.

**Tabela 16.** Classificação da corrosividade ambiental segundo Liesegang *apud* Kenny [112], entre setembro de 2008 e setembro de 2009 das ECA's instaladas na Bahia.

Estações (ECA's)	Ambiente corrosivo
AML	marinho industrial
PIT	marinho
CJD	rural
SPS	rural
CMU	urbano
CIU	urbano
PPE	rural

Nota. Nesta classificação estão considerados os teores de cloretos medidos e apresentados na Tabela 14.

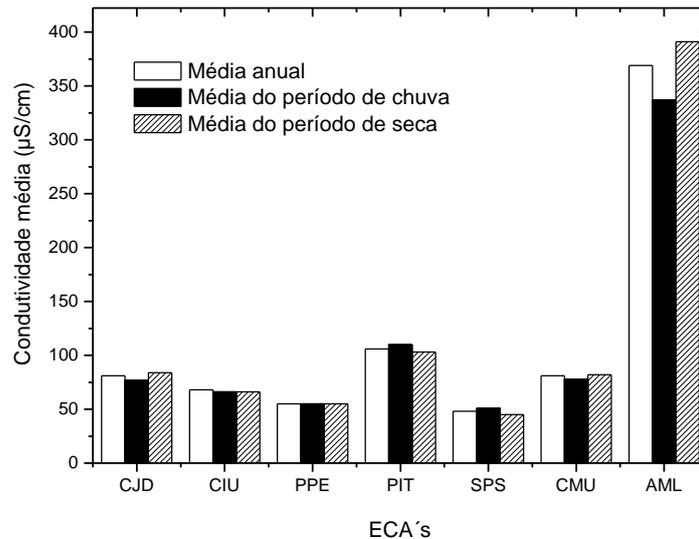
#### 4.1.4 Medida de severidade do grau de poluição por meio de calibradores direcionais de poeira (DDDGs)

As condutividades das soluções contendo os materiais particulados coletados nas ECA's instaladas na Bahia estão mostradas na Tabela 17 e na Figura 23. Notou-se que a ECA de Amaralina apresentou os maiores valores em condutividade (369  $\mu\text{S}/\text{cm}$  contra um valor médio geral de 72,8  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) em relação às outras estações pelo fato desta estar próxima ao mar.

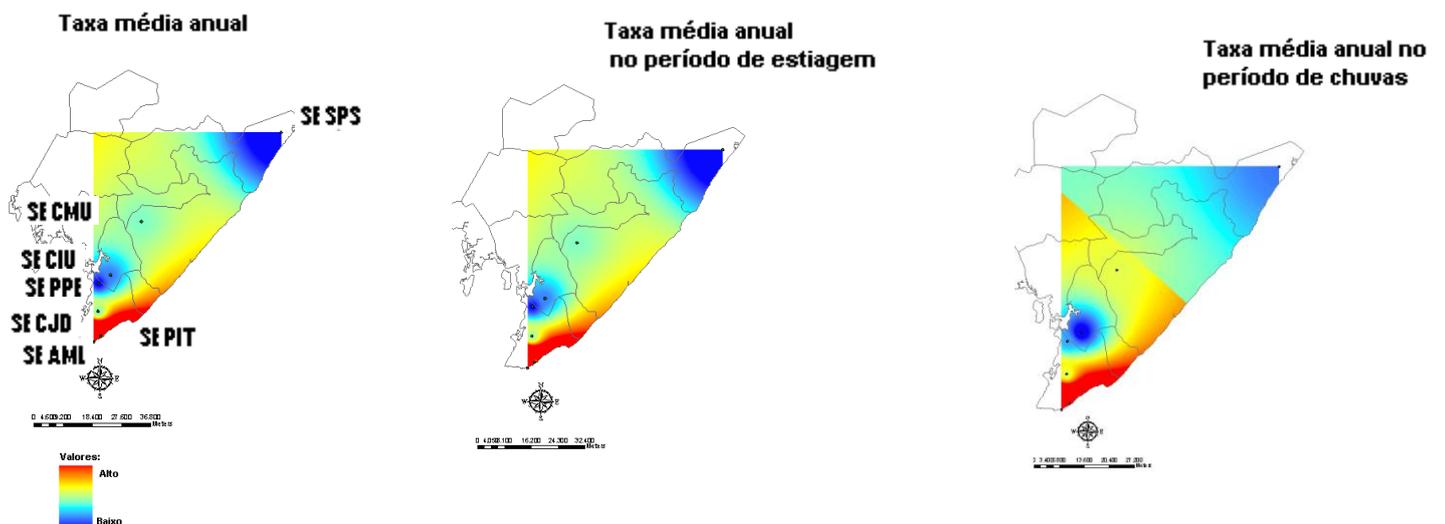
Para melhor visualização e considerando a extrapolação georreferencial, a RMS foi mapeada, segundo a condutividade medida em cada ECA, com média anual, assim como nos períodos de chuva e estiagem, conforme Figura 24.

**Tabela 17.** Taxa média de condutividade ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) referente aos períodos de setembro de 2008 a setembro de 2009 e de estiagem e seca.

Nº	ECA	Média	Período de Estiagem (setembro a março)	Período de Chuvas (abril a agosto)
1	SE CJD	81	84	77
2	SE CIU	68	71	66
3	SE PPE	55	55	55
4	SE PIT	106	103	110
5	SE SPS	48	45	51
6	SE CMU	81	82	78
7	SE AML	369	391	337



**Figura 23.** Médias anuais das condutividades ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), nos períodos de chuva e de seca das ECA's instaladas na RMS, entre setembro de 2008 e 2009 .



**Figura 24.** Mapas das médias anuais de condutividade, em  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , obtidas pelo sistema DDDG na RMS. Os valores são correspondentes aos períodos seco e chuvoso entre setembro de 2008 e setembro de 2009.

A partir dos resultados da Tabela 17, a agressividade do ambiente, em ordem decrescente, para cada ECA pode ser ordenada da seguinte forma:

**AML > PIT > CMU ≈ CJD > CIU > PPE > SPS.**

Também, foi possível notar que de uma forma geral a precipitação não teve grandes influências nas taxas de deposição de sedimentos atmosféricos.

A classificação da agressividade ambiental, a partir dos DDDG's (Vosloo *et al.*, 2007) [93] para as ECA's ficou entre leve a muito pesada.

Na Tabela 18, estão listados os parâmetros da classificação da agressividade do ambiente das ECA's, da RMS, quanto às taxas de salinidade, expressa em  $\text{Cl}^-$  ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$ ) – (B), e de sulfatação, expressa em  $\text{SO}_2$  ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$ ) – (A), o tempo de superfície úmida médio (2500 a 5500), expresso em h/ano; e a corrosividade quanto aos metais aço carbono, aço galvanizado, alumínio e cobre, referente ao período citado. De acordo com os resultados, pode-se notar que em relação à classificação da agressividade do ambiente da RMS a corrosividade foi de média a alta. Destacam-se as ECA's Amaralina, Complexo Industrial e Pituba, como sendo as mais agressivas.

**Tabela 18. Agressividade ambiental e corrosividade da RMS, quanto às médias anuais medidas entre setembro de 2008 e setembro de 2009, do  $\text{Cl}^-$  ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$ ), (B); sulfatos ( $\text{SO}_2$  ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$ )), (A); tempo de superfície úmida médio, t, (h/ano); e da corrosividade, C, quanto aos metais aço carbono, aço galvanizado, alumínio e cobre.**

ECA	Agressividade ambiental e corrosividade						
	t (h/ano)	A ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$ )	B ( $\text{mg}/\text{m}^2.\text{dia}$ )	Aço carbono	Aço galvanizado	Alumínio	Cobre
CJD	t <sub>4</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>
CIU	t <sub>4</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> -C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> -C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> -C <sub>4</sub>
PP	t <sub>4</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>
PIT	t <sub>4</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub> -C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>
SPS	t <sub>4</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>
CMU	t <sub>4</sub>	A <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>
AML	t <sub>4</sub>	A <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>4</sub>

#### 4.1.5 Tipos e concentrações de íons encontrados nas soluções dos coletores de cloretos

Adicionalmente e com inovação neste trabalho de pesquisa, foi feita, também, a investigação e determinação de outros íons encontrados nas soluções das velas coletoras de cloreto na RMS, por cromatografia iônica, cujos resultados estão apresentados na Tabela 19 e na Figura 25.

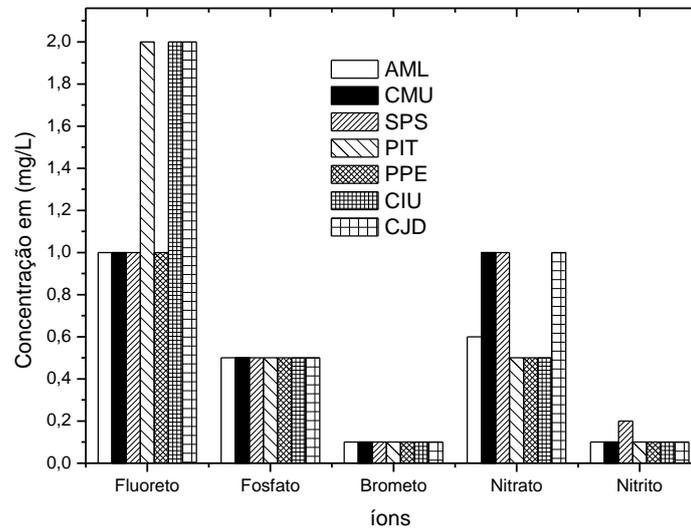
**Tabela 19.** Teor de íons obtido em amostras extraídas das soluções das velas coletoras de cloreto nas ECA's, entre setembro de 2008 e setembro de 2009, em mg/l.

Concentração iônica, em mg/l, das amostras extraídas das soluções de coleta de íons cloreto							
	CJD	CIU	PP	PIT	SPS	CMU	AML
F <sup>-</sup>	1,0	1,0	1,0	2,0	1,0	2,0	2,0
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
Br <sup>-</sup>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,6	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	1,0
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1

As ECA's Amaralina, Pituba e Complexo Industrial, obtiveram concentrações de fluoreto maiores do que as demais. Segundo a "Health Canada" [113], a indústria de produção de alumínio primário é uma das principais fontes antrópicas de emissão de fluoretos para a atmosfera e pode ser uma possível fonte química deste íon na região de Camaçari, BA, tanto quanto outros compostos cerâmicos à base de argilas provenientes no material particulado. Para as ECA's mais próximas à orla (Pituba e Amaralina) os teores mais elevados deste íon podem ser resultantes, além dos contribuintes já citados, do seu arraste no aerosol da água do mar, tal como observado pelo íon cloreto. Dissolvido em água o composto contribui para a diminuição do pH nas camadas de eletrólitos sobre os materiais de engenharia, atacando, principalmente, os compostos à base de silício e promovendo o aumento da velocidade de corrosão dos metais.

As concentrações dos íons fosfato e brometo estão próximas ao do limite de detecção do aparelho e não apresentaram alterações ao longo do período analisado, podendo ser consideradas normais para causar algum efeito deletério aos metais.

Os íons nitrato e nitrito podem ser provenientes do material particulado que se deposita na vela, bem como de sua presença no ar atmosférico, principalmente o  $\text{NO}_2$ , que se transforma em ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ), sendo o principal componente da chuva ácida [114]. Estes íons também promovem efeito corrosivo sobre os materiais de engenharia, principalmente os metais e cerâmicos.

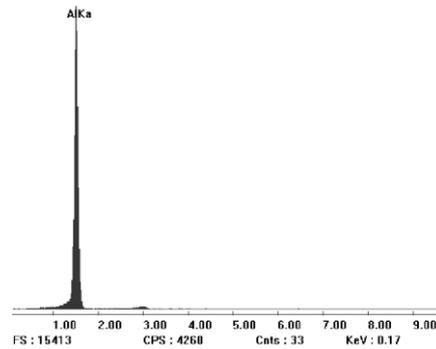


**Figura 25. Composição iônica (mg/L) encontrada na solução das velas coletoras de cloreto instaladas nas ECA's da RMS entre setembro de 2008 e setembro de 2009.**

É importante salientar a necessidade de um aperfeiçoamento desta análise dos íons encontrados na solução coletora de cloretos em trabalhos futuros.

### Intemperismo Natural

Foi realizada análise química elementar das superfícies de placas metálicas expostas ao intemperismo natural, após a sua limpeza química [96] para verificar se foi retirado todo o óxido gerado pela corrosão. O espectro resultante, obtido por EDS, está apresentado na Figura 26, para uma das placas de alumínio, retiradas da ECA de Amaralina. Os resultados obtidos desta investigação demonstraram que a limpeza foi efetiva, tanto em função da solução utilizada, quanto do tempo de imersão, já que não houve a presença de óxidos (oxigênio) na superfície limpa da amostra.



**Figura 26.** Espectro da composição química da superfície metálica de uma placa de alumínio da ECA Amaralina após ser feita limpeza química [96].

#### **4.1.5.1 Taxas de corrosão do alumínio exposto na RMS**

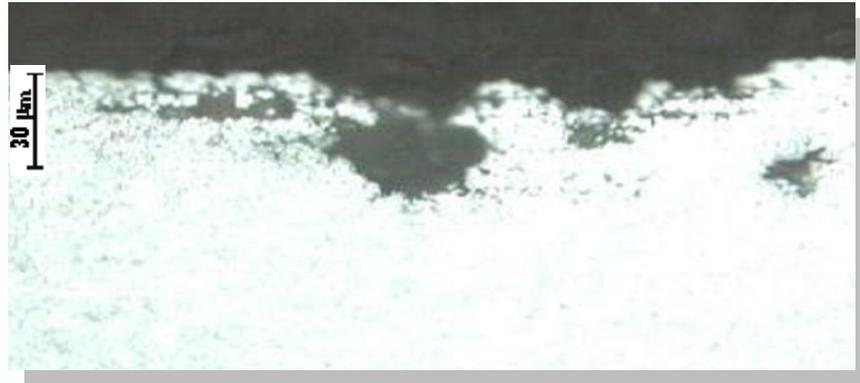
As taxas de corrosão do alumínio exposto na RMS, obtidas pelo método gravimétrico, estão apresentadas na Tabela 20, assim como suas respectivas categorias de corrosividade atmosférica.

De acordo com os resultados, observou-se que na ECA de Amaralina foi obtida uma maior taxa de corrosão em relação às outras ECA's. Este fato é consequente do maior teor de íons cloreto encontrado na região (cerca de 20 vezes maior do que ao encontrado na nas outras ECA's), pela sua proximidade à zona de arrebentação marítima.

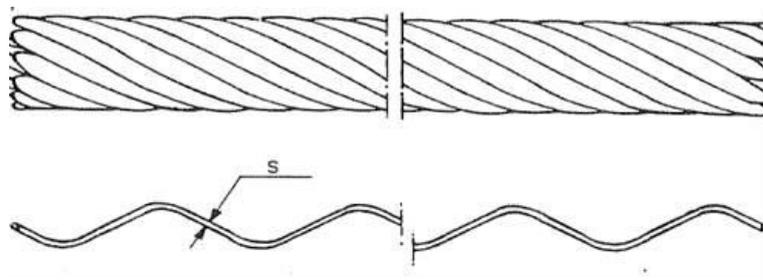
Nesta ECA foi observado que o processo de corrosão do alumínio também aconteceu por pites, cujas profundidades medidas foram entre 13 e 39  $\mu\text{m}$ , em 1 ano de exposição. Já, em 2 anos de exposição, como estudo complementar a este trabalho [115], as profundidades de pites encontrados num total de 28 pontos, foram de 25 a 56  $\mu\text{m}$ . Na Figura 27, tem-se uma micrografia por microscopia óptica, identificando um pite na superfície de uma placa de alumínio da ECA de Amaralina em exposição atmosférica de 2 anos.

O efeito da profundidade deste pite sobre um dos acessórios de uma rede de distribuição de energia (RD), pode ser verificado neste exemplo: um cabo de força da RD tem por volta de 14 mm de diâmetro [116], conforme ilustrado esquematicamente na Figura 28. O cabo geralmente tem 7 tentos, sendo que cada tento tem 2 mm de diâmetro. Se os pites formados em 1 ano estão tendo uma profundidade média de 39  $\mu\text{m}$  em 10 anos teriam 390  $\mu\text{m}$ , ou seja, 0,39 mm  $\approx$  0,5 mm. Desta forma, pode-se atribuir pela agressividade

ambiental local, pela necessidade de manutenção da RD, contendo este tipo de material, em, no máximo, 30 anos, com a possibilidade de haver compromisso mecânico do filamento.



**Figura 27.** *Micrografias por microscopia óptica, identificando pite na superfície de uma placa de alumínio da ECA Amaralina com, aproximadamente, 2 anos de exposição atmosférica.*



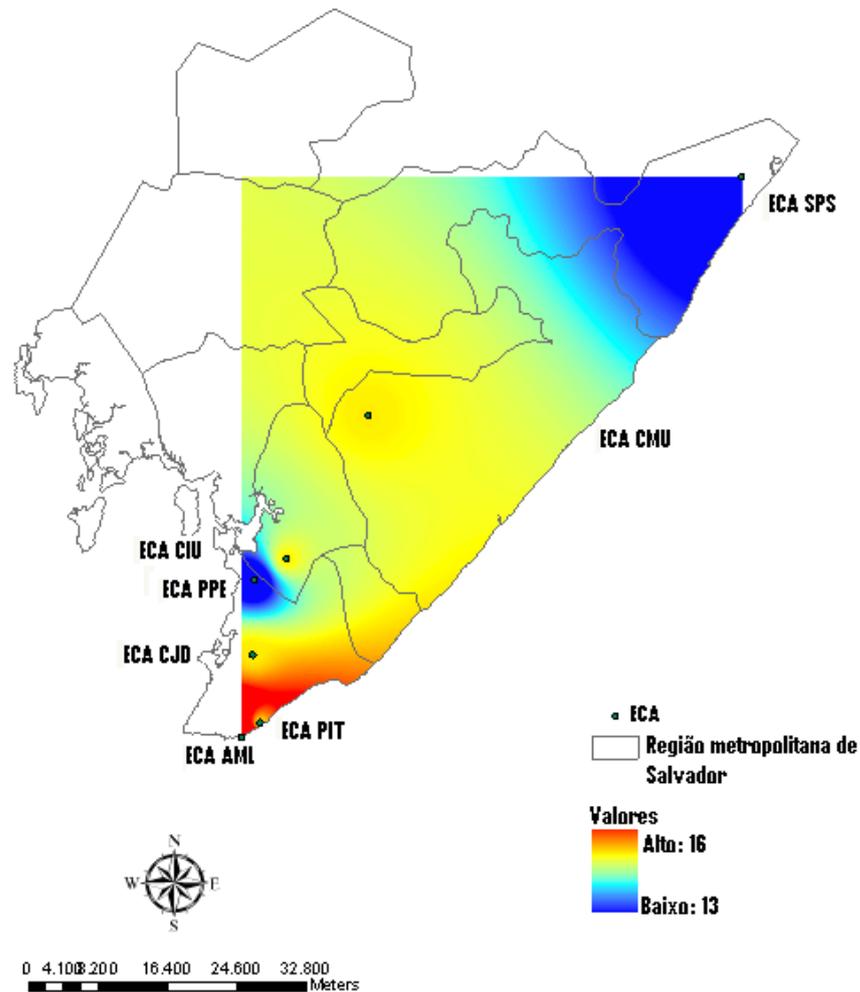
**Figura 28.** *O desenho esquemático de um cabo de força com seus respectivos tentos [116].*

Também, foi possível constatar quanto às categorias estimadas de corrosividade atmosférica que os locais analisados na RMS puderam ser classificados para o primeiro ano como de muito alta agressividade ambiental. Os valores ultrapassaram os limites estabelecidos pela norma [102]. Este desempenho do alumínio pode ser explicado pela retirada inicial do óxido de proteção de acordo com a limpeza química que foi feita. Sem o óxido de proteção, e sendo o alumínio entre os metais estudados o mais reativo, este se oxidou mais rapidamente obtendo uma maior classificação. Ao longo do tempo de análise foi observada uma mudança de comportamento para taxas de corrosão menores, talvez consequente da formação de sua camada de óxido passiva conferindo a este maior proteção quanto à corrosão, conforme comentado na literatura [3].

**Tabela 20.** Taxas de corrosão e categorias de corrosividade atmosférica para o alumínio na RMS.

Estação	Código	Exemplo de CP avaliado	Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
			dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{ano}$ )	
SE CJD	A1		76	10	27	C <sub>5+</sub>
	A2		174	4	10	
	A3		245	4	10	
	A4		315	3	9	
	Valor médio				5	
SE PIT	A1		76	10	27	C <sub>5+</sub>
	A2		174	5	13	
	A3		245	3	9	
	A4		315	3	8	
	Valor médio				5	
SE AML	A1		76	11	29	C <sub>5+</sub>
	A2		174	5	13	
	A3		245	4	11	
	A4		315	4	11	
	Valor médio				6	
SE SPS	A1		76	9	24	C <sub>5+</sub>
	A2		174	4	12	
	A3		245	3	8	
	A4		315	3	8	
	Valor médio				5	
SE CMU	A1		76	9	24	C <sub>5+</sub>
	A2		174	4	11	
	A3		245	4	10	
	A4		315	3	9	
	Valor médio				5	
SE CIU	A1		76	9	24	C <sub>5+</sub>
	A2		174	4	11	
	A3		245	4	11	
	A4		315	3	8	
	Valor médio				5	
SE PPE	A1		76	9	25	C <sub>5+</sub>
	A2		174	4	11	
	A3		245	3	8	
	A4		315	3	7	
	Valor médio				5	

Para melhor visualização e considerando a extrapolação georreferencial, a RMS foi mapeada, segundo a média da taxa de corrosão anual do alumínio em cada ECA, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 29.



**Figura 29.** Mapa da média anual da taxa de corrosão do alumínio (g/m<sup>2</sup>.ano) na RMS, entre setembro de 2008 e setembro de 2009.

#### 4.1.5.2 Taxas de corrosão do aço carbono exposto na RMS

Pela análise dos resultados da Tabela 21, notou-se que para o aço carbono foram obtidas nas ECA's de Amaralina, Complexo Industrial e Camaçari taxas de corrosão maiores em relação às outras estações, tal como para o alumínio. Para a ECA Amaralina, como já comentado anteriormente, teve-se o agravante do ataque por cloretos, como listado na Tabela 14.

Para as ECA's de Camaçari e do Complexo Industrial as maiores taxas de corrosão, comparativamente às outras ECA's, tiveram contribuição do ataque por sulfato, em função das suas maiores concentrações, pelas suas proximidades às indústrias. Nestas estações as taxas de cloreto foram mais baixas em relação à da ECA de Amaralina.

Com estes resultados, foi possível estimar que os locais das ECA's, no período referido, tiveram ambientes de média à alta agressividade para o aço carbono.

**Tabela 21. Taxa de corrosão e categoria da corrosividade atmosférica para o aço carbono na RMS.**

Estação	Código	Exemplo de CP avaliado	Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
			dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$ )	
SE CJD	C1		76	34	270	C <sub>3</sub>
	C2		174	23	184	
	C3		245	25	198	
	C4		315	32	253	
Valor médio				<b>28</b>	<b>226</b>	
SE PIT	C1		76	67	527	C <sub>3</sub>
	C2		174	38	303	
	C3		245	37	289	
	C4		315	30	240	
Valor médio				<b>46</b>	<b>339</b>	
SE AML	C1		76	118	932	C <sub>4</sub>
	C2		174	86	678	
	C3		245	62	490	
	C4		315	61	478	
Valor médio				<b>82</b>	<b>644</b>	
SE SPS	C1		76	36	281	C <sub>3</sub>
	C2		174	31	245	
	C3		245	27	217	
	C4		315	40	319	
Valor médio				<b>33</b>	<b>265</b>	
SE CMU	C1		76	66	522	C <sub>4</sub>
	C2		174	41	326	
	C3		245	48	378	
	C4		315	65	511	
Valor médio				<b>55</b>	<b>434</b>	
SE CIU	C1		76	102	807	C <sub>4</sub>
	C2		174	67	528	

	<b>C3</b>	245	61	483	
	<b>C4</b>	315	60	474	
	<b>Valor médio</b>		<b>72</b>	<b>573</b>	
<b>SE PPE</b>	<b>C1</b>	76	30	232	<b>C<sub>3</sub></b>
	<b>C2</b>	174	21	162	
	<b>C3</b>	245	25	197	
	<b>C4</b>	315	38	301	
	<b>Valor médio</b>		<b>28</b>	<b>223</b>	

Para melhor visualização e considerando a extrapolação georreferencial, a RMS foi mapeada segundo a média da taxa de corrosão anual do aço carbono em cada ECA, conforme ilustrado na Figura 30.

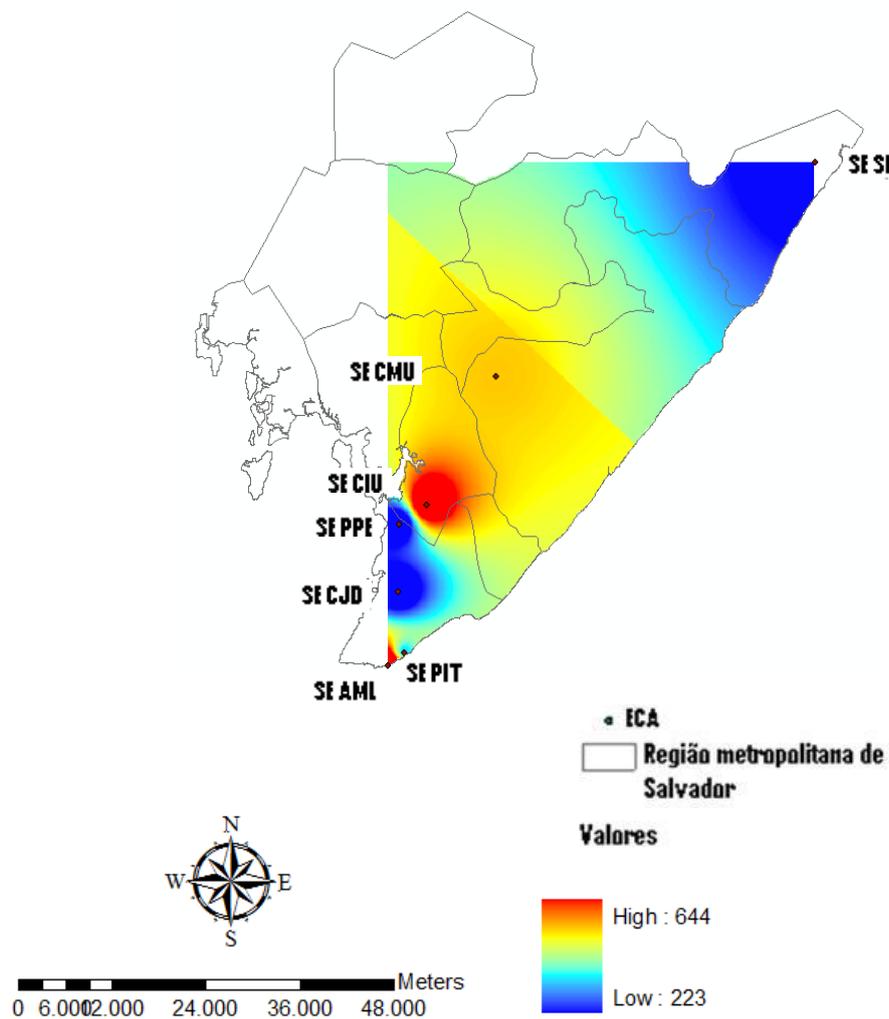


Figura 30. Mapa da média anual da taxa de corrosão do aço carbono (g/m<sup>2</sup>.ano) na RMS, entre setembro de 2008 e setembro de 2009.

#### 4.1.5.3 Taxas de corrosão do aço galvanizado exposto na RMS

Pelos resultados obtidos, a ECA Amaralina também mostrou ter um ambiente agressivo ao aço galvanizado (Tabela 22), assim como para os outros materiais metálicos já apresentados. Este fenômeno também pode ser atribuído ao alto teor de íons cloreto medido no local. Também, além dos outros fatores ambientais (umidade relativa, temperatura e ventos) o que pode ter contribuído para este processo de corrosão, foi a mais elevada taxa de sulfatação, também encontrada nas ECA's de Camaçari e do Complexo Industrial.

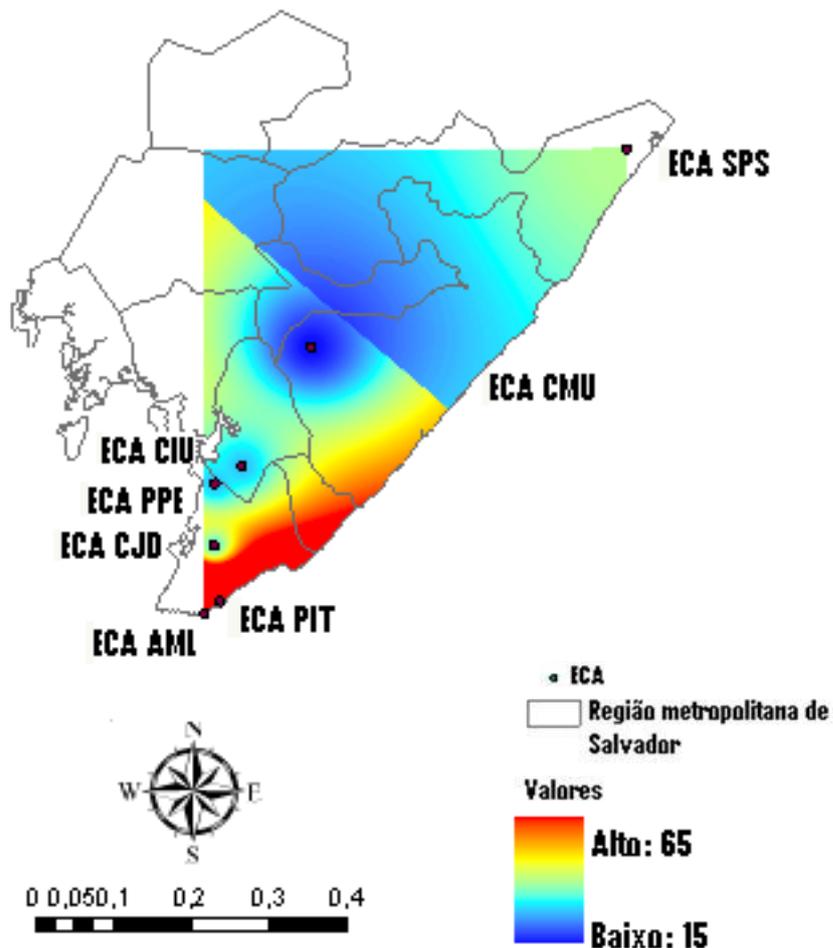
Pelos resultados, a ECA Amaralina pode ser classificada com de média a muito alta agressividade ambiental para o aço galvanizado.

**Tabela 22. Taxas de corrosão e categoria da corrosividade atmosférica para o aço galvanizado na RMS.**

Estação	Código	Exemplo de CP avaliado	Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
			dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$ )	
SE CJD	G1		76	4	30	C <sub>4</sub>
	G2		174	2	13	
	G3		245	2	17	
	G4		315	2	13	
	Valor médio				2	
SE PIT	G1		76	3	25	C <sub>4</sub>
	G2		174	3	26	
	G3		245	3	22	
	G4		315	2	19	
	Valor médio				3	
SE AML	G1		76	18	142	C <sub>5+</sub>
	G2		174	11	86	
	G3		245	3	26	
	G4		315	1	6	
	Valor médio				8	
SE SPS	G1		76	2	18	C <sub>4</sub>
	G2		174	2	18	
	G3		245	3	21	
	G4		315	2	19	
	Valor médio				2	
SE CMU	G1		76	2	19	C <sub>3</sub>
	G2		174	2	16	
	G3		245	2	13	
	G4		315	1	11	
	Valor médio					

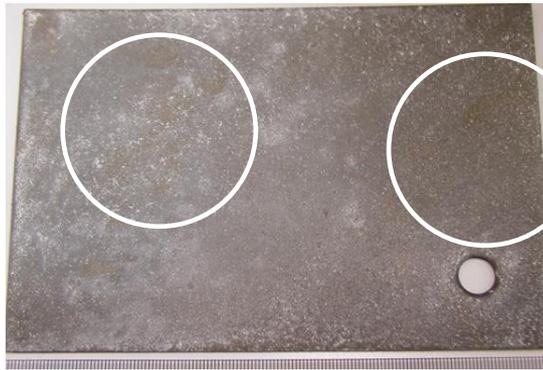
		<b>Valor médio</b>	<b>1</b>	<b>15</b>	
<b>SE CIU</b>	<b>G1</b>	76	2	18	<b>C<sub>4</sub></b>
	<b>G2</b>	174	2	19	
	<b>G3</b>	245	2	15	
	<b>G4</b>	315	2	14	
		<b>Valor médio</b>	<b>2</b>	<b>16</b>	
<b>SE PPE</b>	<b>G1</b>	76	3	23	<b>C<sub>4</sub></b>
	<b>G2</b>	174	2	18	
	<b>G3</b>	245	2	14	
	<b>G4</b>	315	1	12	
		<b>Valor médio</b>	<b>2</b>	<b>17</b>	

Para melhor visualização e considerando a extrapolação georreferencial a RMS foi mapeada, segundo a média da taxa de corrosão anual do aço galvanizado em cada ECA, conforme Figura 31.



**Figura 31.** Mapa da média anual da taxa de corrosão (g/m<sup>2</sup>.ano) do aço galvanizado na RMS.

Em teste de Preece realizado conforme a norma brasileira ASTM A239-95 (2009) [96], foi verificada uma superfície de revestimento de zinco na placa de aço carbono não uniforme, como pode ser visto na Figura 32, as manchas circundadas mostram oxidação na placa após o ensaio. Este fator pode ter agravado os efeitos da agressividade local quanto ao processo de corrosão. Recomenda-se, portanto, testes preliminares em peças estruturais das RDs e, também, das linhas de transmissão, cujas torres são, na maioria dos casos, formadas por aço galvanizado.



**Figura 32.** Imagem de uma placa de aço galvanizado após ensaio de Preece [96], demonstrando a não uniformidade do revestimento de zinco.

#### **4.1.5.4 Taxas de corrosão do cobre exposto na RMS**

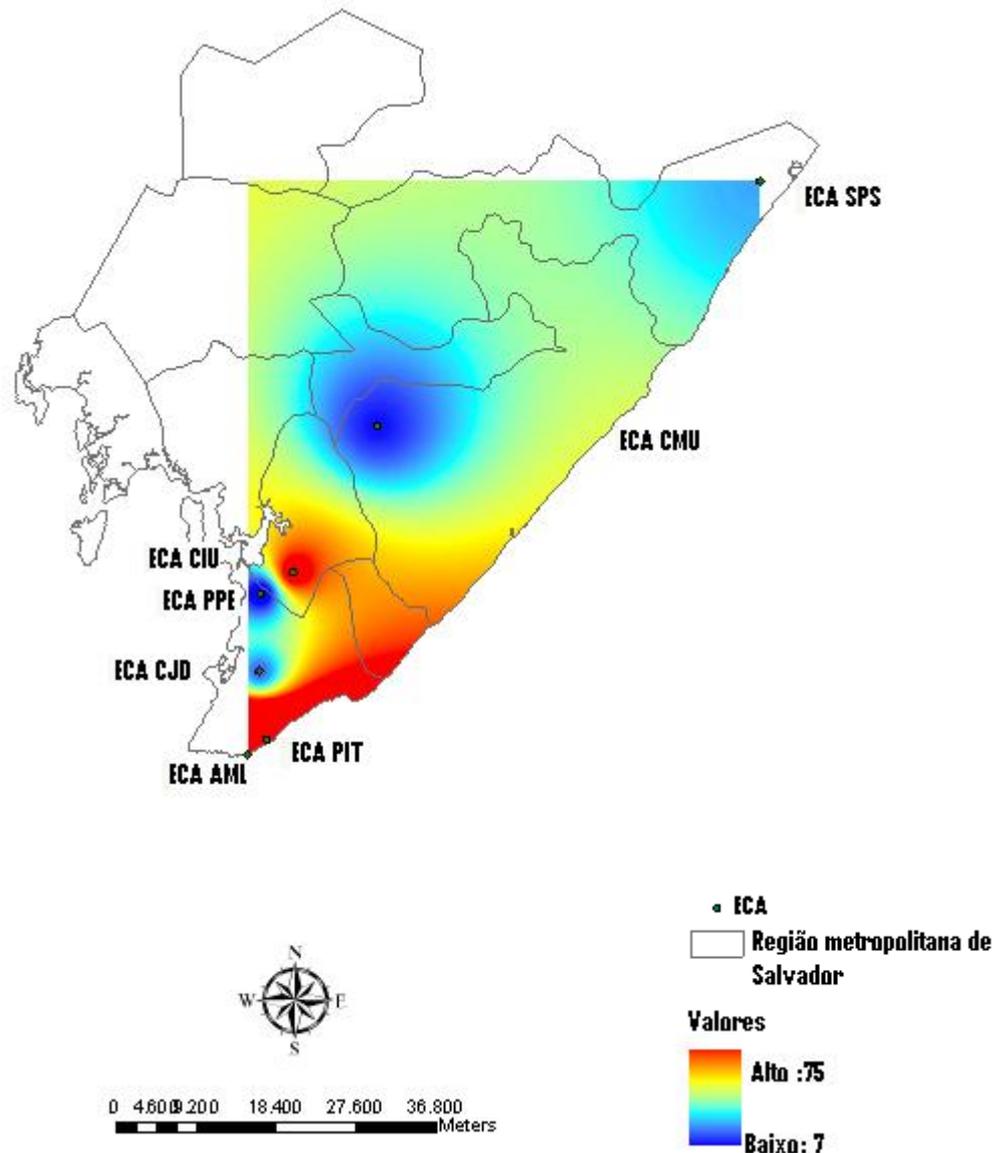
Conforme demonstrado na Tabela 23, a taxa de corrosão e a corrosividade do metal cobre também foi maior nas ECA's de Amaralina, Complexo Industrial e Pituba do que nas outras estações. Para as ECA's Amaralina e Pituba a possível explicação para este fato é a mesma já discutida anteriormente, estando relacionada à salinidade presente no ar atmosférico (maior teor de íons cloreto pela proximidade às zonas de arrebentação das marés). Para as ECA's próximas ao pólo industrial os valores encontrados devem estar relacionados, principalmente, aos maiores teores de dióxido de enxofre presentes no local.

De acordo com estes resultados da Tabela 23, foi possível, também, constatar quanto as categorias estimadas de corrosividade atmosférica das ECA's, no período referido, que o cobre obteve classificação de agressividade média à muito alta, ultrapassando os limites estabelecidos pela norma [102].

Para uma melhor visualização e considerando a extrapolação georreferencial, a RMS foi mapeada, segundo a média da taxa de corrosão anual do cobre em cada ECA, conforme Figura 33.

**Tabela 23. Taxas de corrosão e categoria da corrosividade atmosférica para o cobre na RMS.**

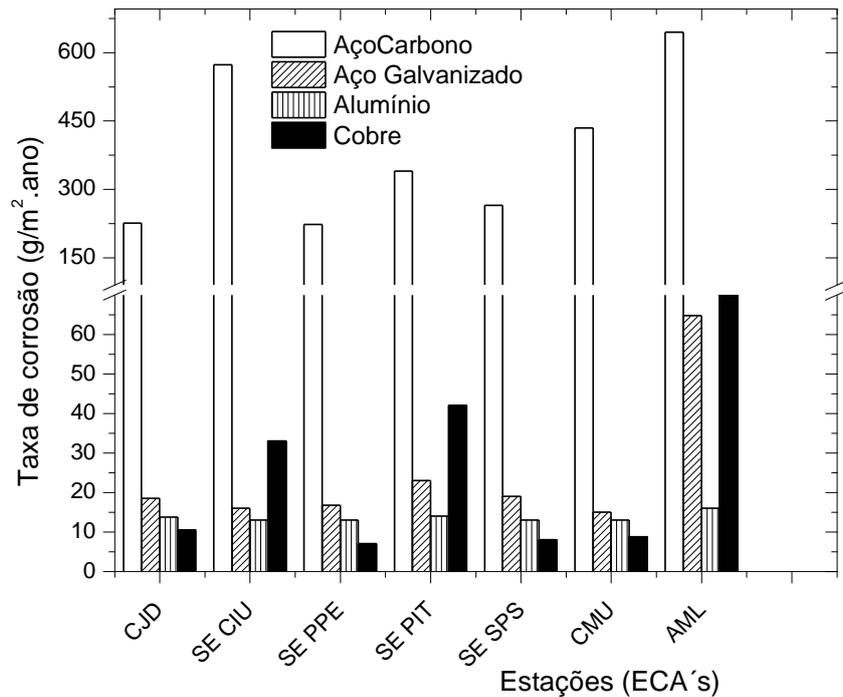
Estação	Código	Exemplo de CP avaliado	Tempo de Exposição	Taxas de Corrosão		Classificação
			dias	( $\mu\text{m}/\text{ano}$ )	( $\text{g}/\text{m}^2.\text{ano}$ )	
SE CJD	CB1		76	2	18	C <sub>3</sub>
	CB 2		174	1	9	
	CB 3		245	1	8	
	CB 4		315	1	7	
	Valor médio				1	
SE PIT	CB 1		76	8	70	C <sub>5</sub>
	CB 2		174	5	48	
	CB 3		245	3	28	
	CB 4		315	3	24	
	Valor médio				5	
SE AML	CB 1		76	14	127	C <sub>5+</sub>
	CB 2		174	9	77	
	CB 3		245	6	55	
	CB 4		315	5	43	
	Valor médio				8	
SE SPS	CB 1		76	1	10	C <sub>3</sub>
	CB 2		174	1	10	
	CB 3		245	1	7	
	CB 4		315	<1	5	
	Valor médio				1	
SE CMU	CB 1		76	2	14	C <sub>3</sub>
	CB 2		174	1	8	
	CB 3		245	1	6	
	CB 4		315	1	7	
	Valor médio				1	
SE CIU	CB 1		76	5	49	C <sub>5</sub>
	CB 2		174	3	30	
	CB 3		245	3	23	
	CB 4		315	3	30	
	Valor médio				3	
SE PPE	CB 1		76	1	11	C <sub>3</sub>
	CB 2		174	1	7	
	CB 3		245	1	6	
	CB 4		315	<1	4	
	Valor médio				1	



**Figura 33.** Mapa da média anual da taxa de corrosão do cobre (g/m<sup>2</sup>.ano) na RMS entre setembro de 2008 e setembro de 2009.

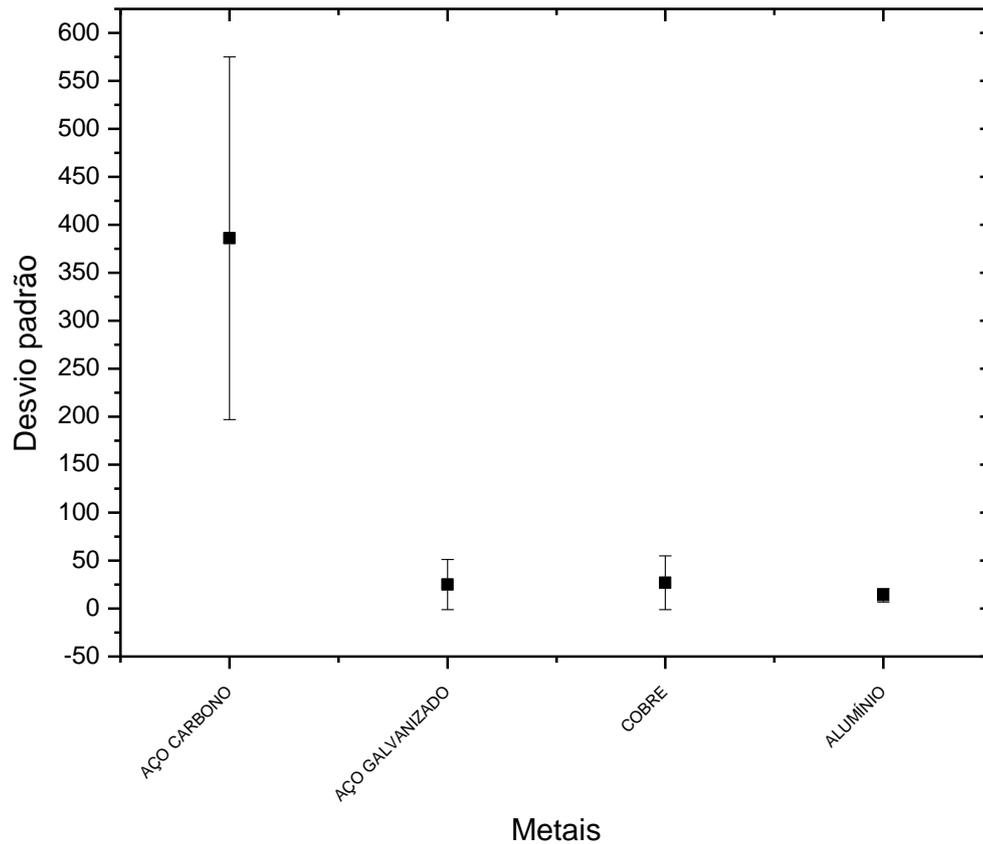
#### 4.1.5.5 Resumo gráfico das taxas de corrosão dos metais expostos na RMS

Na Figura 34, é possível observar de uma forma resumida as taxas de corrosão do aço carbono, alumínio, aço galvanizado e cobre nas ECA's instaladas na RMS, entre setembro de 2008 e setembro de 2009. Os metais com melhor desempenho foram o cobre e o alumínio (metais mais utilizados pelos setores de geração, distribuição e transmissão de energia, em função de sua condutividade elétrica), devido as suas menores taxas de corrosão.



**Figura 34. Taxas de corrosão dos metais aço carbono, aço galvanizado, alumínio e cobre instalados nas ECAs na RMS, entre setembro de 2008 e setembro de 2009.**

Na Figura 35, encontram-se ilustrados graficamente os valores de desvio padrão dos respectivos resultados de taxa de corrosão para os metais alumínio, cobre, aço galvanizado e aço carbono. Observa-se que o aço carbono obteve valores maiores em relação aos outros metais, o aço galvanizado e o cobre obtiveram valores próximos, e o alumínio obteve os menores valores. Com exceção para o aço carbono, cuja dispersão de valores foi maior, pode-se atribuir que a metodologia de avaliação da taxa de corrosão empregada foi correta.



**Figura 35.** Valores de desvio padrão dos resultados obtidos no período para os metais alumínio, cobre, aço galvanizado e aço carbono, ilustrados graficamente.

#### **4.1.5.6 Taxas de corrosão do aço carbono na forma de cilindro metálico (cupom) exposto na RMS**

Os cilindros de aço carbono foram práticos para avaliar a taxa de corrosão dos principais pontos da RD da RMS, pela facilidade de instalação em diversos locais, em postes e dentro das subestações; também, por passarem despercebidos aos transeuntes, não havendo perdas técnicas do material por vandalismo ou roubo; por terem geometrias similares aos cabos e de boa parte dos acessórios da rede elétrica; e, por fim, por serem facilmente manuseados no laboratório durante o preparo superficial anterior e posterior ao seu envelhecimento natural e, pela praticidade no seu transporte ao campo.

Na Tabela 25 e na Figura 36, estão apresentados os resultados da taxa de corrosão, perda de massa e da categoria de corrosividade atribuída aos cupons de aço carbono instalados em 18 pontos selecionados da RD na RMS.

Os cupons expostos na Praia de Ipitanga obtiveram a maior perda de massa, conseqüentemente, a maior taxa de corrosão entre as demais estações. Esta ECA está a cerca de 80 m da zona de arrebentação do mar.

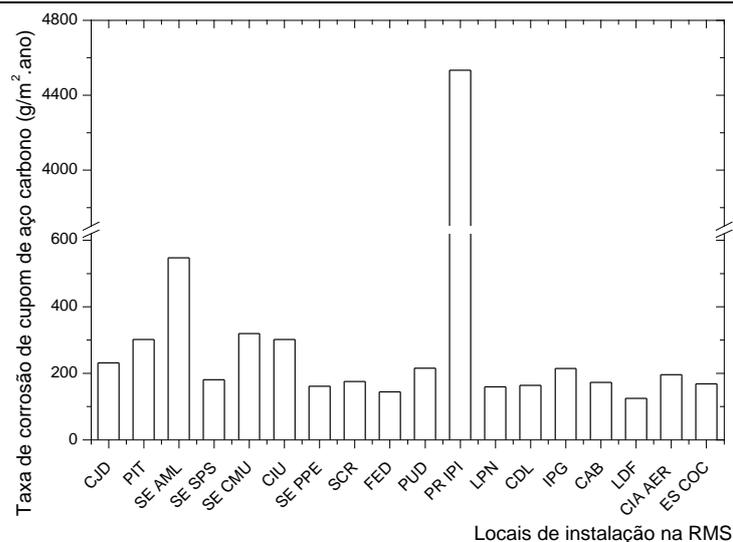
Tal como para as outras geometrias de materiais metálicos estudados quanto ao processo de corrosão, as ECA's Amaralina, Camaçari e Pituba, foram as estações com maiores taxas de corrosividade.

Em função da exposição dos cupons em aço carbono, a RMS foi classificada na categoria de corrosividade entre baixa e muito alta. Esta faixa de classificação foi maior do que a apresentada pelas placas do mesmo material metálico, em virtude da inclusão de ambientes menos agressivos (mais afastados da orla, como SE Lauro de Freitas e a estrada CIU ao aeroporto) e mais agressivos como o da praia de Ipitanga, onde os CP's estiveram, como comentado anteriormente, distantes a cerca de 60 m da zona de arrebentação marítima. Mas considerando-se as categorias de corrosividade para cada placa especificamente, foi possível observar que de uma forma geral estas obtiveram classificação com categorias maiores devido provavelmente à diferença na geometria dos mesmos. As placas metálicas possuem maior área superficial, estão dispostas a cerca de 30° em relação ao solo e, portanto, possuem maior local de sedimentação de material particulado. Isto favorece a manutenção de uma superfície mais úmida e por maior quantidade de tempo.

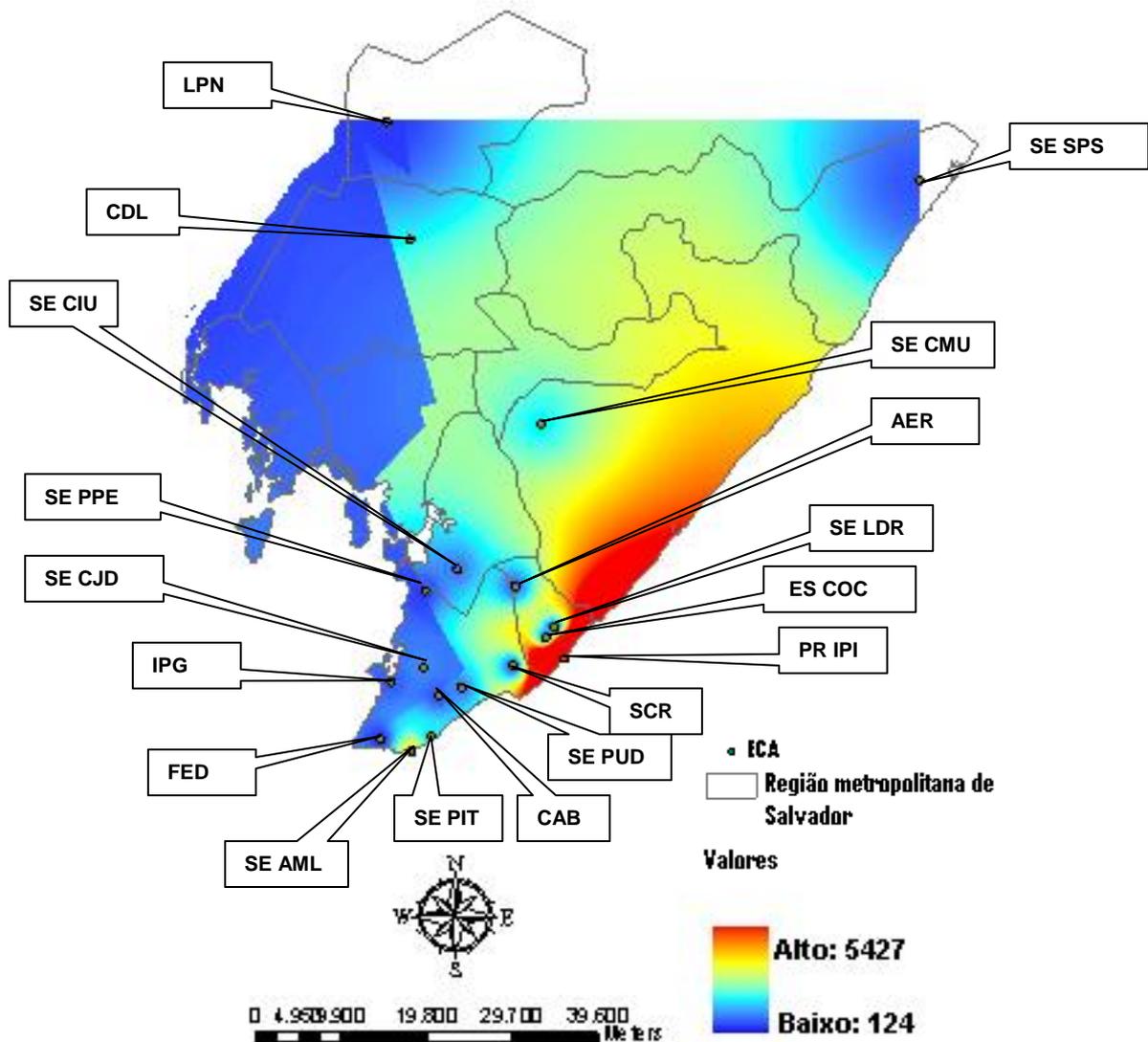
Para melhor visualização e considerando a extrapolação georreferencial, a região metropolitana de Salvador-BA foi mapeada, segundo a média da taxa de corrosão anual dos cupons de aço carbono em cada ECA, conforme Figura 36.

**Tabela 24.** Valores de taxa de corrosão, perda de massa e categoria da corrosividade atmosférica para os cupons de aço carbono instalados na RMS, entre setembro de 2008 e setembro de 2009.

ECA	Perda de massa (g)	Taxa de corrosão (g/m <sup>2</sup> .ano)	Categoria de corrosividade
CJD – SE CAJAZEIRAS 2	0,7202	231	C <sub>3</sub>
PIT – SE PITUBA	0,7894	301	C <sub>3</sub>
SE AML – SE AMARALINA	1,6816	547	C <sub>4</sub>
SE SPS – SE SAUÍPE	0,4961	180	C <sub>2</sub>
SE CMU – SE CAMAÇARI	0,9815	319	C <sub>3</sub>
CIU – SE COMPLEXO INDUSTRIAL I	0,6674	301	C <sub>3</sub>
SE PPE – SE PARIPE	0,5008	161	C <sub>2</sub>
SCR – SE SÃO CRISTÓVÃO	0,5399	175	C <sub>2</sub>
FED – SE FEDERAÇÃO	0,4977	144	C <sub>2</sub>
PUD – SE PITUAÇU	0,6667	215	C <sub>3</sub>
PR IPI – PRAIA DE IPITANGA	12,2973	4532	C <sub>5+</sub>
LPN – SE LAPINHA	0,4519	159	C <sub>2</sub>
CDL – SE CANDEAL	0,4632	163	C <sub>2</sub>
IPG – SE ITAPAGIPE	0,5741	214	C <sub>3</sub>
CAB – SE CENTRO ADMINISTRATIVO	0,5289	172	C <sub>2</sub>
LDF – SE LAURO DE FREITAS	0,3801	124	C <sub>2</sub>
CIA AER – ESTRADA CIU AO AEROPORTO	0,5641	195	C <sub>2</sub>
ES COC – ESTRADA DO COCO	0,4887	168	C <sub>2</sub>



**Figura 36.** Taxas de corrosão do metal aço carbono, na forma de cupom (cilindro) instalado nas ECAs na RMS, entre setembro de 2008 e setembro de 2009.



**Figura 37.** Mapa da média anual da taxa de corrosão ( $\text{g/m}^2\cdot\text{ano}$ ) dos cupons de aço carbono instalados na RMS, entre setembro de 2008 a setembro de 2009.

#### 4.1.6 Modelo matemático baseado em funções dose-resposta

Das Tabelas 20, 21, 22 e 23, foram extraídos os dados da corrosão dos CP's dos materiais metálicos trabalhados, medidos em função da perda de massa e do tempo de exposição nas ECA's 1 a 7, em meses.

No modelo matemático foi aplicado bilogaritmo aos dados experimentais de corrosão ( $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ ), em função dos 12 meses de exposição. Dos resultados foram obtidas, por meio do método dos mínimos quadrados, as constantes K e n, ou seja, a corrosividade inicial e a

ação passivadora da atmosfera, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 26, em conjunto com os dados experimentais, para o mesmo período de análise.

**Tabela 25. Valores da corrosividade (K) previstos para o aço carbono exposto por, aproximadamente, 12 meses nas ECA's 1 a 7.**

ECA	k	n	r	P(12)/g Previsto	Experimental (g)	Desvio Padrão
1 - CJD – SE CAJAZEIRAS 2	0,6010	0,9573	0,9954	6,49	6,76	0,19
2 - CIU – SE COMP. IND. I	2,6600	0,6353	0,9992	12,90	12,75	0,10
3 - SE PPE – SE PARIPE	0,4009	1,1766	0,9888	7,46	8,09	0,44
4 – SE PIT – SE PITUBA	2,0350	0,4814	0,9997	6,73	6,39	0,24
5 - SE SPS – SE SAUÍPE	0,5418	1,0731	0,9985	7,80	8,44	0,45
6 - SE CMU – SE CAMAÇARI	1,4776	0,9128	0,9890	14,28	13,45	0,58
7 - SE AML – SE AMARALINA	2,9075	0,5900	0,9884	12,60	12,60	0,00

Nota. Os valores da constante “n” exprimem o efeito passivador do ambiente, em conjunto com os dados experimentais para o mesmo período, com respectivos desvios-padrões e os coeficientes de correlação linear da curva.

A constante K, também foi determinada em função dos teores de poluentes atmosféricos para cada ECA (reunidos nas Tabela 14 e Tabela 15, respectivamente), por meio do tratamento estatístico por correlação linear múltipla. Os resultados obtidos forneceram um novo K', conforme Tabela 27.

**Tabela 26. Tratamento dos dados de poluentes atmosféricos por correlação linear múltipla para o aço carbono.**

ECA	P(12) calculado	[K'₁]	[K'₂]
1 - CJD – SE CAJAZEIRAS 2	6,49	10,4	8,12
2 - CIU – SE COMP. IND. I	12,90	11,24	12,89
3 - SE PPE – SE PARIPE	7,46	8,53	7,37
4 – SE PIT – SE PITUBA	6,73	6,35	8,47
5 - SE SPS – SE SAUÍPE	7,80	7,75	7,36
6 - SE CMU – SE CAMAÇARI	14,28	12,79	12,89
7 - SE AML – SE AMARALINA	17,38	12,49	12,06
<b>Correlação</b>		<b>0,8</b>	<b>0,7</b>

Para o cálculo de K' de melhor correlação com a corrosividade inicial (K), calculada pela lei bilogarítmica, foram atribuídas três variáveis independentes (Cl⁻; SO₂ e M.P.) e com interações binárias destas, obteve-se K'.

$$K1 = 4,4494 - 0,2515.[Cl^-] + 0,0060.[Cl^-].[SO_2] - 0,0002 [Cl^-].[MP] + 0,0030 [Cl^-].[MP] \quad (35)$$

$$K2 = -15,4180 - 0,0059.[Cl^-] + 0,7875.[SO_2] \quad (36)$$

Analisando-se a Tabela 27, e os coeficientes de correlação gerados entre a perda de massa obtida experimentalmente e a calculada pela função dose-resposta para os diferentes metais, utilizando o K1 e K2, notou-se que a expressão de K' com a melhor correlação (r) foi a produzida com os dados na Equação (35 e 36) e, por isso, foi utilizada na predição da corrosão do aço carbono em função do tempo para as ECA's 1 a 7.

Considerando-se a sazonalidade de Salvador foi possível obter, como exemplo de aplicação, uma vez que esta função é pontual, uma suposição do desempenho quanto a perda de massa de uma estrutura de aço carbono com 224,27 g de massa exposta na região da ECA 7, Amaralina, em 5 anos de exposição, conforme as Equações 37 e 38.

$$C = (4,4494 - 0,2515.[281] + 0,0060.[281].[37] - 0,0002[281].[369] + 0,0030[37].[369]) \times (5)^{0,5900} \quad (37)$$

$$C = 45 \text{ g} \quad (38)$$

Pode-se, também, predizer o tempo de duração para que o material com a característica do corpo de prova perdesse a metade de sua massa inicial, conforme a Equação (39). Sendo K igual a 17,38 e C igual a 112,135, concluiu-se a um tempo aproximado de 23 anos.

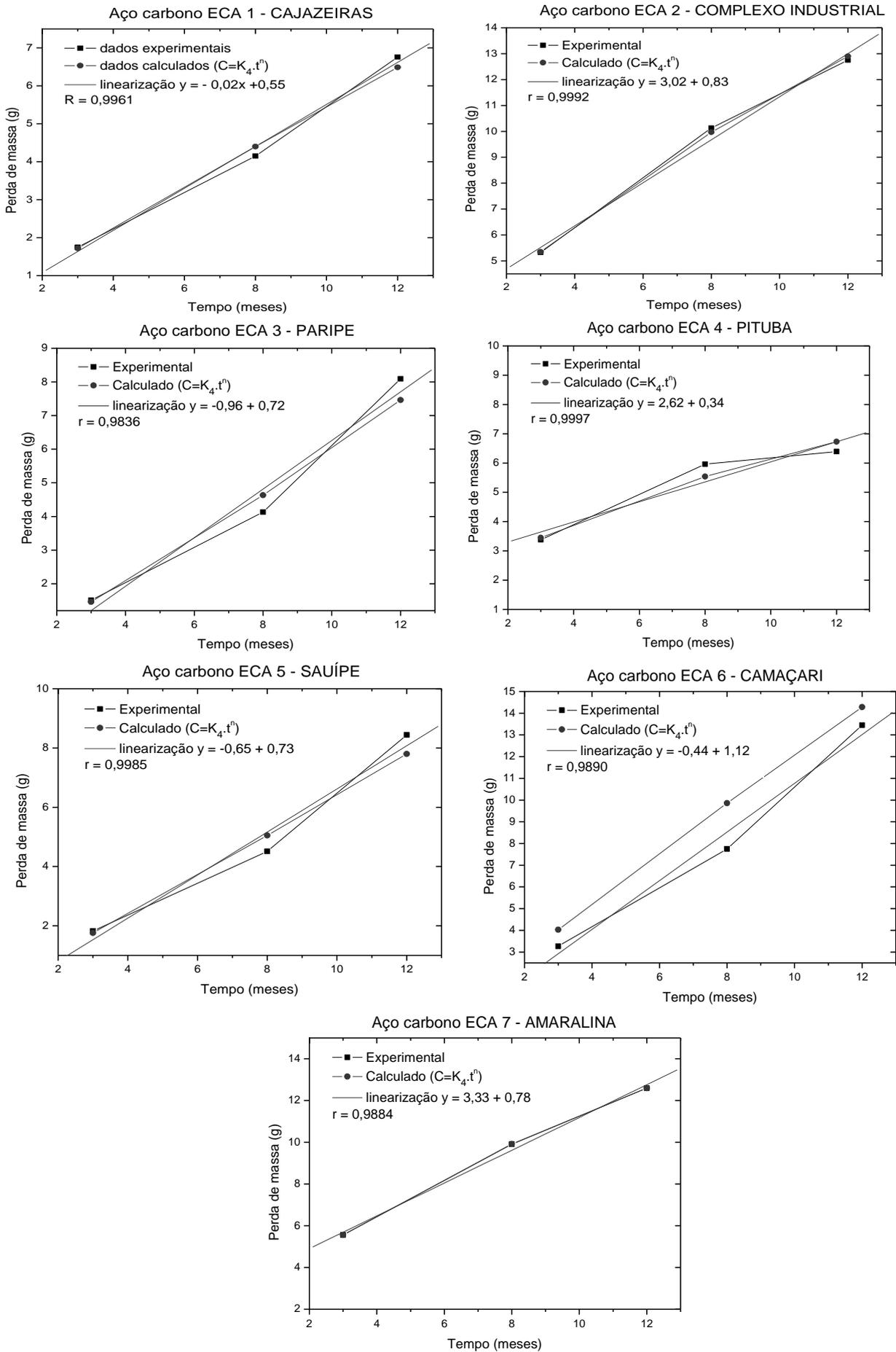
$$t = (C/K)^{(1/n)} \quad (39)$$

É importante salientar que esta predição foi estimada considerando uma perda de massa como consequência de corrosão generalizada, desta forma, deve-se analisar também a corrosão por placas. Esta corrosão como já foi citado anteriormente, é localizada em regiões da superfície metálica e não em toda a sua extensão, formando placas com escavações que com o tempo podem provocar uma fissura ou buraco, inutilizando assim o material.

Considerando esta análise, pode se calcular a vida útil deste material em termos de estudo de profundidade destas cavidades formadas nas placas. Como exemplo, em cerca de 20 pontos analisados, foram encontradas profundidades de ataque entre 290 µm e 540 µm. A espessura média das placas foi de 1900 µm.

Considerando o valor máximo de 540  $\mu\text{m}$  de profundidade de cavidade encontrada em uma placa de 1900  $\mu\text{m}$  de aço carbono em 1 ano, conclui-se que o tempo de vida útil para esta placa seja de 3 anos e meio.

As curvas resultantes ao metal aço carbono, exposto nas ECA's 1 a 7, encontram-se mostradas na Figura 38.



**Figura 38.** Gráficos representando a função dose-resposta desenvolvida para o aço carbono exposto nas ECA's 1 a 7.

## Aço Galvanizado

Conforme citado anteriormente, das Tabelas 20, 21, 22 e 23, foram extraídos os dados da corrosão dos CP's dos materiais metálicos trabalhados, medidos em função da perda de massa e do tempo de exposição nas ECA's 1 a 7, em meses.

No modelo matemático foi aplicado bilogarítmo aos dados experimentais de corrosão ( $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ ), em função dos 12 meses de exposição. Dos resultados, foram obtidas, por meio do método dos mínimos quadrados, as constantes K e n, ou seja, a corrosividade inicial e a ação passivadora da atmosfera, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 27, em conjunto com os dados experimentais, para o mesmo período de análise.

**Tabela 27. Valores da corrosividade (K) previstos para o aço-galvanizado exposto por, aproximadamente, 12 meses nas ECA's 1 a 7.**

ECA	k	n	r	P(12)/g Previsto	Experimental (g)	Desvio Padrão
1 - CJD – SE CAJAZEIRAS 2	0,120	0,4934	0,9490	0,41	0,38	0,02
2 - CIU – SE COMP. IND. I	0,046	0,8928	0,9873	0,42	0,40	0,02
3 - SE PPE – SE PARIPE	0,080	0,5879	0,9850	0,35	0,33	0,01
4 – SE PIT – SE PITUBA	0,062	0,9074	0,9579	0,59	0,53	0,04
5 - SE SPS – SE SAUÍPE	0,038	1,0957	0,9531	0,58	0,51	0,05
6 - SE CMU – SE CAMAÇARI	0,063	0,6297	0,9234	0,30	0,27	0,02
7 - SE AML – SE AMARALINA	2,997	-1,0352	0,9191	0,23	0,17	0,04

A constante K foi determinada em função dos teores de poluentes atmosféricos para cada ECA por meio do tratamento estatístico por correlação linear múltipla. Os resultados obtidos forneceram um novo K', conforme Tabela 28.

**Tabela 28.** Tratamento dos dados de poluentes atmosféricos por correlação linear múltipla para o aço galvanizado.

ECA	P(12) calculado	[K´ <sub>1</sub> ]	[K´ <sub>2</sub> ]
1 - CJD – SE CAJAZEIRAS 2	0,41	0,36	0,42
2 - CIU – SE COMP. IND. I	0,42	0,40	0,41
3 - SE PPE – SE PARIPE	0,35	0,46	0,40
4 – SE PIT – SE PITUBA	0,59	0,60	0,59
5 - SE SPS – SE SAUÍPE	0,58	0,50	0,41
6 - SE CMU – SE CAMAÇARI	0,30	0,33	0,41
7 - SE AML – SE AMARALINA	0,23	0,23	0,23
<b>Correlação</b>		<b>0,9</b>	<b>0,8</b>

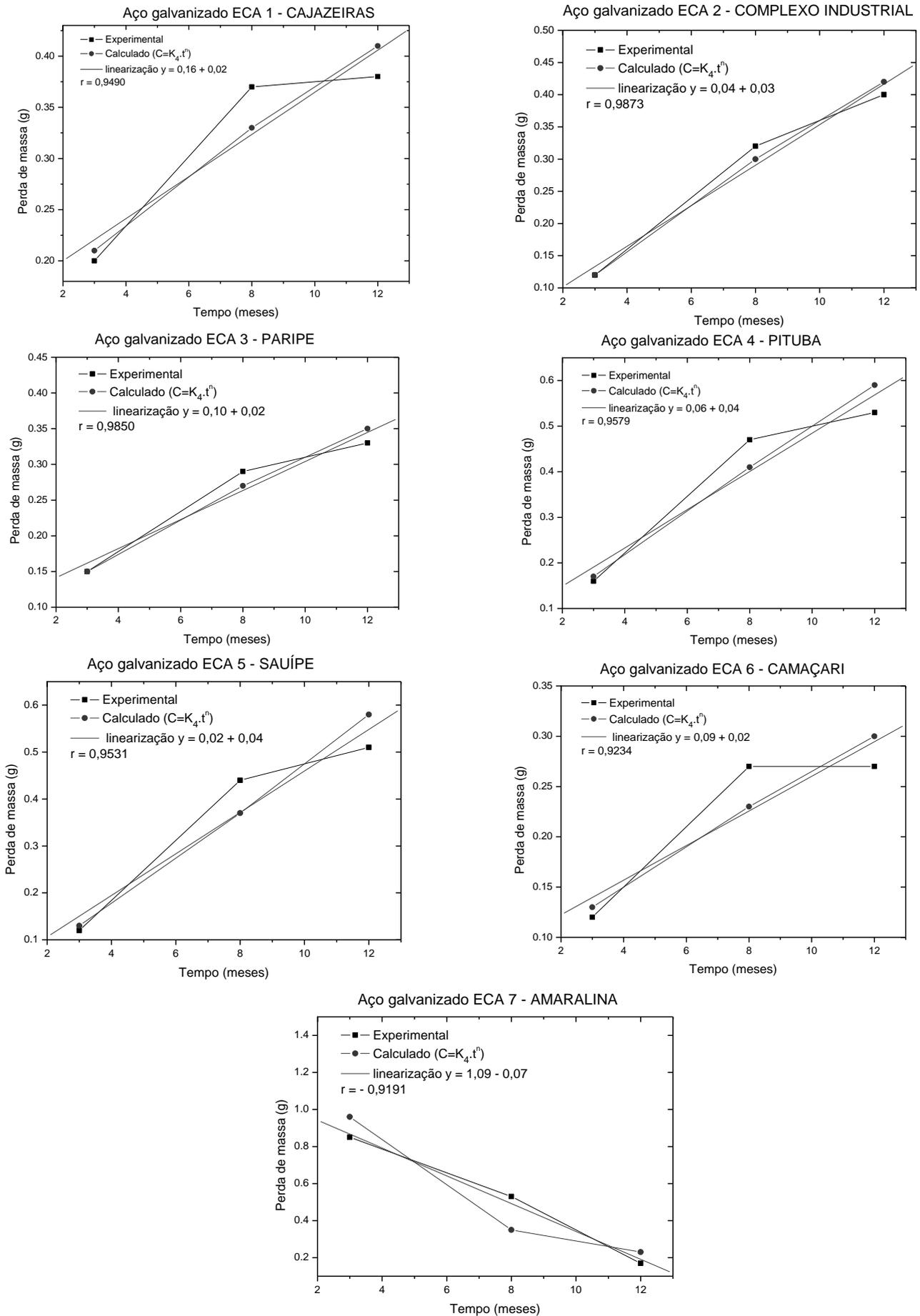
Pelos coeficientes de correlação gerados entre a perda de massa obtida experimentalmente e a calculada pela função dose-resposta para o aço galvanizado, utilizando o K1 e K2 (ambos apresentados na Tabela 28), notou-se que a expressão de K' com melhor correlação (r) foi o K1 o qual foi demonstrado na Equação (40 e 41) e, por isso, foi utilizada na predição da corrosão do aço galvanizado em função do tempo para as ECA's 1 a 7.

$$K_1 = 0,6759 + 0,0050 \cdot [Cl] + 0,0007 \cdot [SO_2] - 0,0051 \cdot [MP] \quad (40)$$

$$C = K' \cdot t^n \text{ então}$$

$$C = (0,6759 + 0,0050 \cdot [Cl] + 0,0007 \cdot [SO_2] - 0,0051 \cdot [MP]) \cdot t^n \quad (41)$$

As curvas resultantes ao metal aço galvanizado, exposto em ambas as ECA's 1 a 7, encontram-se na Figura 39.



**Figura 39.** Gráficos representando a função dose-resposta desenvolvida para o aço galvanizado exposto nas ECA's 1 a 7.

## Alumínio

Das Tabelas 20, 21, 22 e 23, foram extraídos, também, os dados da corrosão dos CP's dos materiais metálicos trabalhados, medidos em função da perda de massa e do tempo de exposição nas ECA's 1 a 7, em meses.

No modelo matemático foi aplicado bilogarítmo aos dados experimentais de corrosão ( $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ ), em função dos 12 meses de exposição. Dos resultados foram obtidas, por meio do método dos mínimos quadrados, as constantes K e n, ou seja, a corrosividade inicial e a ação passivadora da atmosfera, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 29, em conjunto com os dados experimentais, para o mesmo período de análise.

**Tabela 29. Valores da corrosividade (K) previstos para o alumínio exposto por aproximadamente 12 meses nas ECA's 1 a 7. Valores da constante "n" que exprime o efeito passivador do ambiente, em conjunto com os dados experimentais para o mesmo período, com respectivos desvios-padrão e coeficientes de correlação linear da curva.**

ALUMÍNIO						
ECA	k	n	r	P(12)/g Previsto	Experimental (g)	Desvio Padrão
1	0,135	0,2105	0,8322	0,23	0,25	0,02
2	0,113	0,3150	0,9532	0,25	0,24	0,00
3	0,141	0,1159	0,9019	0,23	0,23	0,03
4	0,146	0,1558	0,8684	0,21	0,23	0,01
5	0,144	0,0737	0,9849	0,20	0,17	0,00
6	0,107	0,3216	0,9967	0,24	0,24	0,00
7	0,110	0,3731	0,9387	0,28	0,30	0,02

A constante K foi determinada em função dos teores de poluentes atmosféricos para cada ECA por meio do tratamento estatístico por correlação linear múltipla. Os resultados obtidos forneceram um novo K', conforme Tabela 30.

**Tabela 30. Tratamento dos dados de poluentes atmosféricos por correlação linear múltipla para o alumínio.**

ECA	LOCAL	P(12) calculado	[K'₁]	[K'₂]
1	CJD	0,23	0,23	0,22
2	CIU	0,25	0,23	0,23
3	PPE	0,23	0,23	0,21
4	PIT	0,21	0,21	0,23
5	SPS	0,20	0,20	0,21
6	CMU	0,24	0,24	0,23
7	AML	0,28	0,28	0,27
<b>Correlação</b>			<b>0,9</b>	<b>0,8</b>

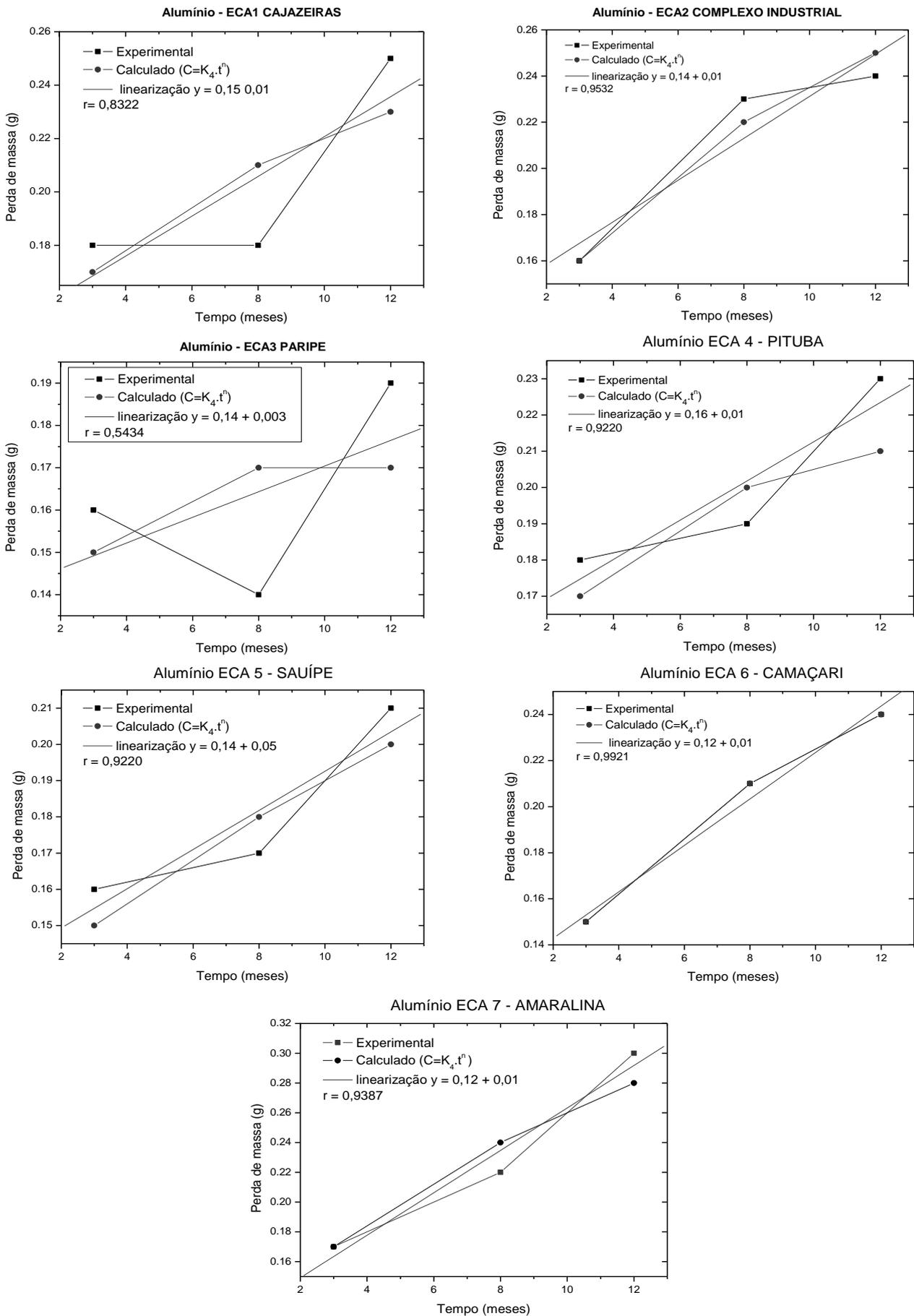
Analisando-se a Tabela 30 e os coeficientes de correlação gerados entre a perda de massa obtida experimentalmente e a calculada pela função dose-resposta para os diferentes metais, utilizando o  $K_1$  e  $K_2$ , nota-se que a expressão de  $K'$  com melhor correlação ( $r$ ) foi o  $K_1$  demonstrado na Equações (45 e 46) e, por isso, foi utilizada na predição da corrosão do alumínio em função do tempo para as ECA's 1 a 7.

$$K_1 = 0,13353 - 0,0007 \cdot [Cl] + 0,0013 \cdot [SO_2] + 0,0008 \cdot [MP] \quad (45)$$

$C = K' \cdot t^n$ , então

$$C = (0,13353 - 0,0007 \cdot [Cl] + 0,0013 \cdot [SO_2] + 0,0008 \cdot [PS]) \cdot t^n \quad (46)$$

As curvas resultantes ao metal aço galvanizado, exposto em ambas as ECA's 1 a 7, encontram-se na Figura 40.



**Figura 40. Gráficos representando a função dose-resposta desenvolvida para o alumínio exposto nas ECA's 1 a 7.**

## Cobre

Das Tabelas 20, 21, 22 e 23, foram extraídos os dados da corrosão dos CP's dos materiais metálicos trabalhados, medidos em função da perda de massa e do tempo de exposição nas ECA's 1 a 7, em meses.

No modelo matemático foi aplicado bilogarítmo aos dados experimentais de corrosão ( $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ ), em função dos 12 meses de exposição. Dos resultados foram obtidas, por meio do método dos mínimos quadrados, as constantes K e n, ou seja, a corrosividade inicial e a ação passivadora da atmosfera, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 31, em conjunto com os dados experimentais, para o mesmo período de análise.

**Tabela 31. Valores da corrosividade (K) previstos para o cobre exposto por aproximadamente 12 meses nas ECA's 1 a 7. Valores da constante "n" que exprime o efeito passivador do ambiente, em conjunto com os dados experimentais para o mesmo período, com respectivos desvios-padrão e coeficientes de correlação linear da curva.**

COBRE						
ECA	k	n	r	P(12)/g Previsto	Experimental (g)	Desvio Padrão
1	0,080	0,3660	0,9995	0,20	0,20	0,00
2	0,220	0,3544	0,9688	0,53	0,51	0,01
3	0,046	0,4186	0,9369	0,13	0,12	0,01
4	0,336	0,2673	0,9996	0,65	0,65	0,00
5	0,119	0,2326	0,8860	0,21	0,20	0,01
6	0,052	0,4617	0,9397	0,16	0,18	0,01
7	0,554	0,3047	0,9583	1,18	1,13	0,04

A constante K foi determinada em função dos teores de poluentes atmosféricos para cada ECA por meio do tratamento estatístico por correlação linear múltipla. Os resultados obtidos forneceram um novo K', conforme Tabela 32.

**Tabela 32. Tratamento dos dados de poluentes atmosféricos por correlação linear múltipla para o alumínio.**

ECA	LOCAL	P(12) calculado	[K <sub>1</sub> ']	[K <sub>2</sub> ']
1	CJD	0,23	0,23	0,23
2	CIU	0,25	0,23	0,24
3	PPE	0,23	0,21	0,22
4	PIT	0,21	0,20	0,21
5	SPS	0,20	0,20	0,21
6	CMU	0,24	0,24	0,25
7	AML	0,28	0,28	0,28
<b>Correlação</b>			<b>0,9</b>	<b>0,9</b>

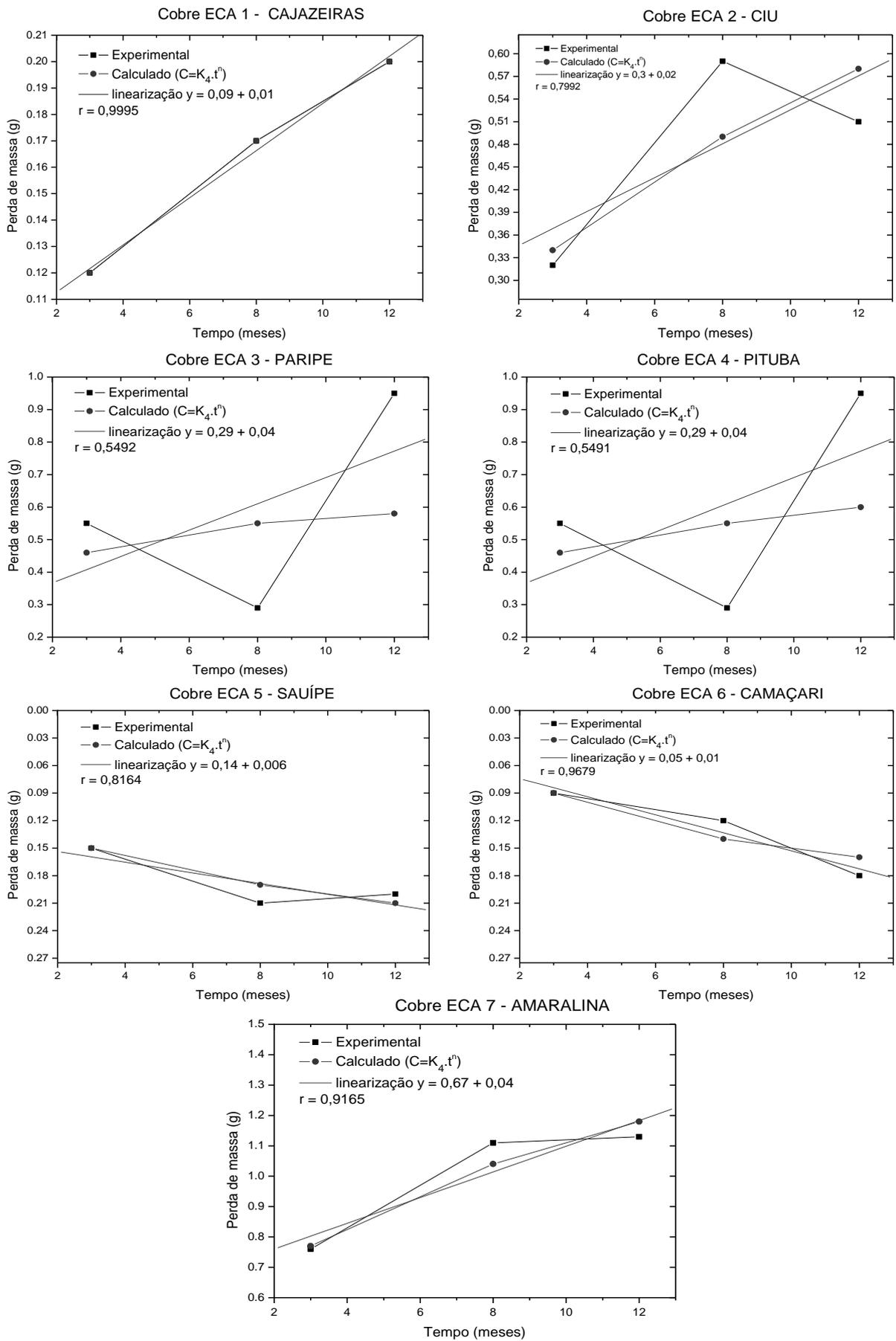
Analisando-se a Tabela 32, e os coeficientes de correlação gerados entre a perda de massa obtida experimentalmente e a calculada pela função dose-resposta para os diferentes metais, utilizando o K<sub>1</sub> e K<sub>2</sub>, nota-se que para ambos a correlação (r) é a mesma, desta forma foi escolhido a expressão de K<sub>1</sub> como foi demonstrado nas Equações (44 e 45), sendo estas utilizadas na predição da corrosão do aço galvanizado em função do tempo para as ECA's 1 a 7.

$$K_1 = - 0,0726 + 0,0032[Cl^-] + 0,0101[SO_2] \quad (50)$$

$C = K' \cdot t^n$ , então

$$C = (-0,0726 + 0,0032[Cl^-] + 0,0101[SO_2]) \cdot t^n \quad (51)$$

As curvas resultantes ao metal aço galvanizado, exposto em ambas as ECA's 1 a 7, encontram-se ilustradas na Figura 41.



**Figura 41. Gráficos representando a função dose-resposta desenvolvida para o alumínio exposto nas ECA's 1 a 7.**

De uma forma geral as funções dose resposta obtiveram bons valores de correlação linear, podendo-se atribuir às mesmas a capacidade de auxiliar na predição do desempenho dos metais ao longo de tempos extrapolados de exposição nas atmosferas locais.

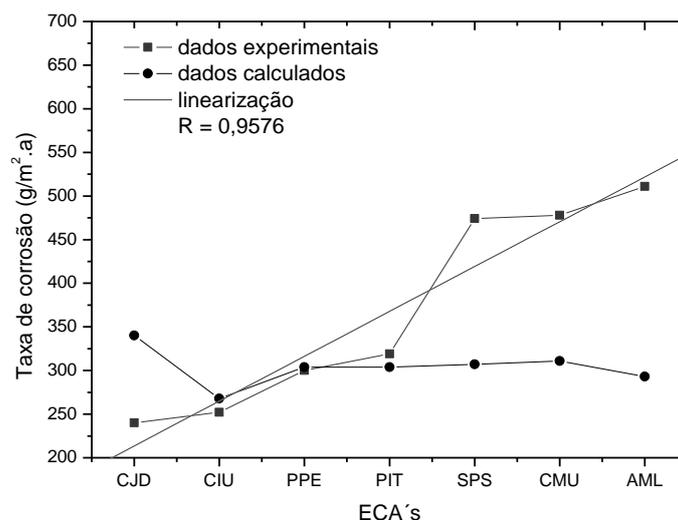
### 3.1.8 Modelo matemático baseado em funções redes neurais

O modelo de rede neural artificial, conforme descrito anteriormente, foi utilizado para a predição da vida útil do aço-carbono, aço galvanizado, do alumínio e do cobre, submetidos ao intemperismo natural na região metropolitana de Salvador-BA para o primeiro ano de exposição.

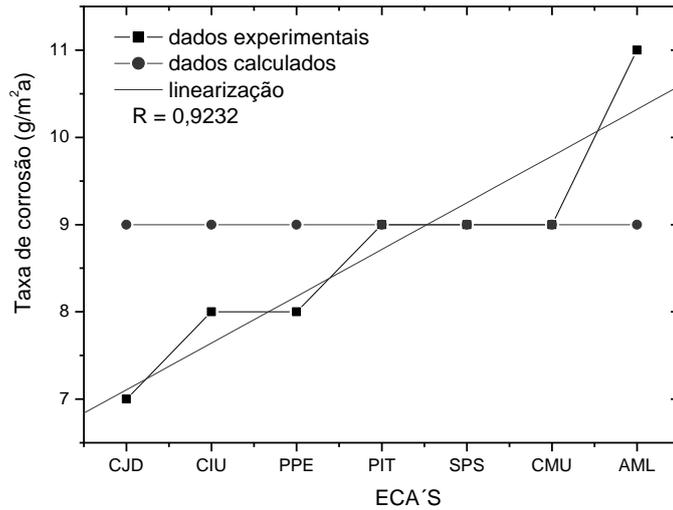
#### Simulação da taxa de corrosão pelas redes neurais

O conjunto de dados foi proveniente de um total de 28 CP's de aço carbono, alumínio, aço galvanizado e cobre que foram expostos em diferentes períodos nas ECA's da RMS. Foram considerados os dados de concentração de poluentes e de partículas sedimentáveis, bem como os da taxa de corrosão de cada CP.

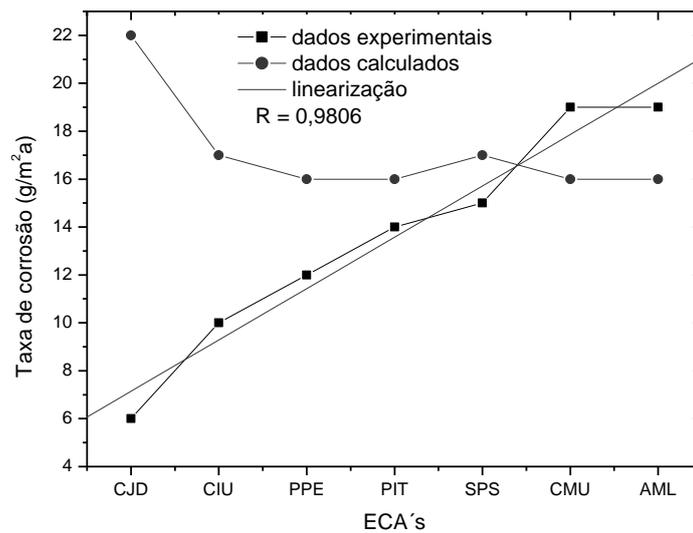
Os resultados dos treinamentos da rede para os metais aço carbono, alumínio, aço galvanizado e cobre estão apresentados nos gráficos de correlação entre as taxas de corrosão calculadas e as taxas obtidas experimentalmente nas Figuras 42 a 45, para ilustração.



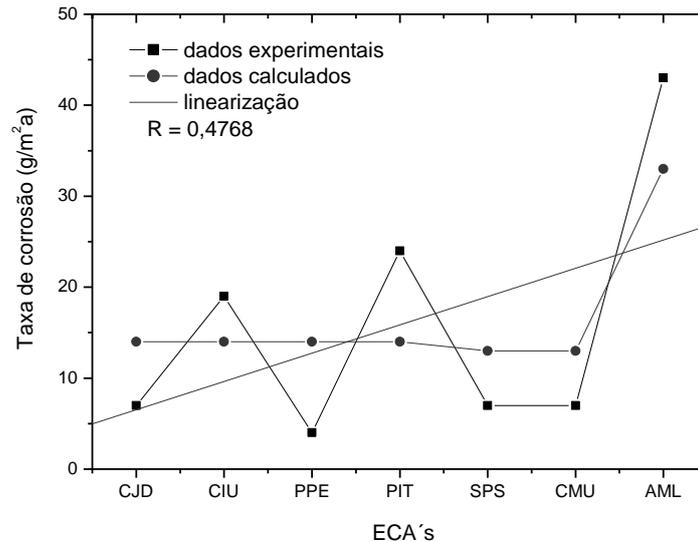
**Figura 42. Comparação entre os valores de taxa de corrosão (g) experimental e os valores calculados pela rede neural do aço carbono das ECA's 1 a 7 da RMS.**



**Figura 43.** Comparação entre os valores de taxa de corrosão (g) experimental e os valores calculados pela rede neural do alumínio das ECA's 1 a 7 da RMS.



**Figura 44.** Comparação entre os valores de taxa de corrosão (g) experimental e os valores calculados pela rede neural do aço galvanizado das ECA's 1 a 7 da RMS.



**Figura 45. Comparação entre os valores de taxa de corrosão (g) experimental e os valores calculados pela rede neural do cobre das ECA's 1 a 7 da RMS.**

O efeito passivante do ambiente não foi observado no primeiro ano (na maioria das vezes ele é perceptível a partir do segundo ano [83,102]), desta forma não foi possível fazer uma predição da taxa de corrosão e sim, apenas, uma estimativa da taxa considerando as correlações entre os resultados de taxa de corrosão experimentais e os calculados pela rede.

Portanto, foram realizadas, por enquanto, apenas estimativas da taxa de corrosão ao final de um ano com o intuito de avaliar a qualidade da rede neural treinada com os dados das 28 amostras.

As Tabelas 33, 34, 35 e 36 ilustram a relação entre os resultados experimentais das taxas de corrosão e os resultados das taxas calculados pelas redes neurais dos metais alumínio, cobre, aço galvanizado e aço carbono. Assim como suas respectivas classificações de corrosividade [102].

**Tabela 33. Relação da taxa de corrosão experimental ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) e os calculados pela redes neurais ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) referentes ao aço carbono.**

<b>ECA</b>	<b>Dados experimentais</b>	<b>Classificação</b>	<b>Dados Calculados</b>	<b>Classificação</b>
CJD	240	C3	340	C3
CIU	252	C3	268	C3
PPE	300	C3	304	C3
PIT	319	C3	304	C3
SPS	474	C4	307	C3
CMU	478	C4	311	C3
AML	511	C4	293	C3

**Tabela 34. Relação da taxa de corrosão experimental ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) e os calculados pela redes neurais ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) referentes ao cobre.**

<b>ECA</b>	<b>Dados experimentais</b>	<b>Classificação</b>	<b>Dados Calculados</b>	<b>Classificação</b>
CJD	7	C2	14	C4
CIU	19	C3	14	C4
PPE	4	C3	14	C4
PIT	24	C3	14	C4
SPS	7	C4	13	C4
CMU	7	C4	13	C4
AML	43	C5	33	C5

**Tabela 35. Relação da taxa de corrosão experimental ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) e os calculados pela redes neurais ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) referentes ao aço galvanizado.**

<b>ECA</b>	<b>Dados experimentais</b>	<b>Classificação</b>	<b>Dados Calculados</b>	<b>Classificação</b>
CJD	6	C3	22	C4
CIU	10	C3	17	C4
PPE	12	C3	16	C4
PIT	14	C3	16	C4
SPS	15	C3	17	C4
CMU	19	C4	16	C4
AML	19	C4	16	C4

**Tabela 36. Relação da taxa de corrosão experimental ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) e os calculados pela redes neurais ( $\text{g/m}^2.\text{a}$ ) referentes ao alumínio.**

<b>ECA</b>	<b>Dados experimentais</b>	<b>Classificação</b>	<b>Dados Calculados</b>	<b>Classificação</b>
CJD	7	C5	9	C5
CIU	8	C5	9	C5
PPE	8	C5	9	C5
PIT	9	C5	9	C5
SPS	9	C5	9	C5
CMU	9	C5	9	C5
AML	11	C5+	9	C5

De acordo com as Tabelas 33, 34, 35 e 36, observou-se que houve uma diferença entre as classificações estabelecidas para os valores experimentais e os valores calculados, com exceção para o alumínio. Uma razão para este fato pode ser entendida pelos valores de média e desvio padrão de cada metal ao final de um ano nas 7 ECAs monitoradas, apresentados na Tabela 37. Observou-se que o alumínio apresentou o menor desvio padrão, sem variação na classificação. Já com relação aos outros metais, os limites definidos com um desvio padrão para mais ou para menos, situam-se em classificações diferentes, fato este que pode explicar a dificuldade em se obter resultados mais coerentes com as redes neurais artificiais com o limitado volume de dados disponíveis. Outra

explicação para o fato da diferença entre os resultados experimentais e os resultados calculados pela rede seria no caso por exemplo do cobre, que apresentou nas ECA's CIU, AML e PIT, resultados muito diferentes das outras estações, o que prejudicou a capacidade da rede de se ajustar a estas diferenças.

**Tabela 37. Valores da média, desvio padrão e as variações do desvio padrão dos metais aço carbono, alumínio, cobre e aço galvanizado.**

Metais	Média (X)	Desvio Padrão ( $\sigma$ )	$X - \sigma$	Classificação $X - \sigma$	$X + \sigma$	Classificação $X + \sigma$
aço carbono	368	116	252	C3	484	C4
alumínio	9	1	8	C5	10	C5
cobre	16	14	2	C2	30	C5
aço galvanizado	14	5	9	C3	19	C4

Em geral, foi observada boa concordância entre os dados experimentais e as curvas obtidas das redes neurais no intervalo de aproximadamente 12 meses, demonstrando desta forma a grande capacidade da rede artificial em aprender a estimar taxas de corrosão a partir de um conjunto de dados relativos à RMS.

É importante enfatizar que o modelo com redes neurais para determinação da corrosividade do ambiente levou em consideração o comportamento dos metais em diferentes locais na região metropolitana de Salvador-BA, e não somente o comportamento do metal em uma única estação.

Na Tabela 38, está apresentado um resumo gráfico ilustrativo do desempenho dos metais aço carbono, aço galvanizado, cobre e alumínio frente à corrosividade atmosférica das ECA's de acordo com suas respectivas categorias considerando também os resultados das redes neurais [102].

**Tabela 38. Quadro resumo da classificação qualitativa das ECA's, em função dos parâmetros ambientais e da corrosividade atmosférica dos metais.**

Parâmetros sob análise		Estações de corrosão atmosférica - ECA's																	
		CJD		CIU		PPE		PIT		SPS		CMU		AML		CSPS		PSG	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9									
<b>CORROSIVIDADE</b>	Superfície úmida	t	t <sub>4</sub>																
	Taxa de cloretos	B	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>2</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>1</sub>	
	Taxa de sulfatação	A	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>1</sub>												
	Índice de Brooks	I <sub>d</sub>	C <sub>5</sub>																
	Corrosividade Ambiental	R	U	R	M	R	U	MI	M	R	U	MI	M	R	U	MI	M	R	
	Material particulado, DDDG	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>4</sub>	----	----	----	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>1</sub>	
	Distância do mar, Km	2,9	7	1,7	0,5	2,9	20	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	
<b>Agressividade ambiental sobre os metais em cada ECA</b>																			
<b>AMBIENTAL</b>	Alumínio	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>							
	Aço Carbono	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>							
	Aço Galvanizado	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>							
	Cobre	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>3</sub>							
<b>Taxa de corrosividade Experimental E - por perda de massa; calculada pela rede neural, N - índices de 1 a 5 da corrosividade</b>																			
<b>DA</b>	Alumínio	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	E <sub>5</sub>	
		N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	N <sub>5</sub>	
	Aço Carbono	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	
		N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>3</sub>
Aço Galvanizado	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>3</sub>	
	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	
<b>RMS</b>	Cobre	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>																
		N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	N <sub>4</sub>	
Cupons em Aço Carbono	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>						
<b>CATEGORIAS DE CORROSIVIDADE ATMOSFÉRICA PARA ECA's - AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL E QUALITATIVA</b>																			
Muito baixa																			
Baixa																			
Média																			
Alta																			
Muito Alta																			
<p>ECA's - CJD</p> <p>ECA's - PSG, SPS</p> <p>ECA's - CIU, CMU e PPE</p> <p>ECA's - AML, PIT, CSPS</p>																			
<p>Legenda: R, rural, U, urbano, M, marinho, MI, marinho industrial e CF, termo genérico equivalente aos índices de corrente de fuga sobre os isoladores das redes instaladas.</p>																			

## 5 CONCLUSÃO

---

Quanto à presença de contaminantes, os teores de cloretos possibilitaram classificar as regiões entre marinho industrial, marinho, urbano e rural. Observou-se que nas ECA's 7 e 4, os teores de cloretos foram mais expressivos, e nas ECA's 6 e 2 os teores de sulfato foram maiores.

Houve contrariedade à solubilidade do íon cloreto, porque no período de estiagem a sua concentração foi menor. Tal fato foi atribuído à uma maior intensidade de ventos e chuvas esporádicas e não contínuas. Observou-se também que as ECA's Pituba e Amaralina se destacaram em relação às outras estações por terem maiores concentrações de cloreto. Isto foi explicado devido à sua proximidade à praia. Os maiores valores em concentração foram equivalentes às menores distâncias da orla.

As ECA's de Camaçari (CMU), Complexo Industrial (CIU) e Amaralina (AML), obtiveram maiores concentrações de  $SO_2$  em relação às outras estações. Este comportamento se deu pela presença de indústrias próximas às estações de Camaçari e do Complexo Industrial e proximidade da orla marítima, respectivamente.

Em relação às condutividades das soluções contendo as partículas sedimentáveis (P.S.) coletadas nas ECA's, notou-se que a ECA de Amaralina apresentou os maiores valores (369  $\mu S/cm$  contra um valor médio geral de 72,8  $\mu S/cm$ ) em relação às outras estações pelo fato desta estar próxima ao mar. Também, foi possível notar que, de uma forma geral, a precipitação não teve grandes influências nas taxas de deposição de sedimentos atmosféricos. A classificação da agressividade ambiental, para as ECA's ficou entre leve a muito pesada.

Em relação às taxas de corrosão do aço carbono, alumínio, aço galvanizado e cobre nas ECA's instaladas na RMS, os metais com melhor desempenho foram o cobre e o alumínio (metais mais utilizados pelos setores de geração, distribuição e transmissão de energia, em função de sua condutividade elétrica), devido as suas menores taxas de corrosão.

Os cilindros de aço carbono (cupons) expostos na Praia de Ipitanga obtiveram a maior perda de massa, conseqüentemente, a maior taxa de corrosão entre as demais

estações. Esta ECA está a cerca de 60 m da zona de arrebentação do mar. Tal como para a outra geometria do aço carbono estudado quanto ao processo de corrosão, as ECA's Amaralina, Camaçari e Pituba, foram as estações com maiores taxas de corrosividade.

De uma forma geral pelas funções dose resposta foram obtidos bons coeficientes de correlação linear, desta forma foi possível afirmar que estas funções poderão ser utilizados para prever o comportamento dos metais analisados a longo prazo na atmosfera. De acordo com a função dose resposta obtida pelo aço carbono, foi possível concluir que para se perder a metade da massa inicial de uma placa de aço carbono de 224,27 g é necessário cerca de 23 anos. E, com o estudo de profundidade de cavidades conseqüentes de corrosão por placas do aço carbono, concluiu-se que a vida útil de uma placa de 1900 µm de espessura foi de 3 anos e meio, considerando que neste período seriam formadas cavidades que perfurariam totalmente a placa.

Foi observada boa concordância entre os dados experimentais e as curvas obtidas das redes neurais no intervalo de aproximadamente 12 meses, demonstrando a capacidade da rede artificial em aprender a estimar taxas de corrosão a partir de um conjunto de dados relativos à RMS. Houve uma diferença entre as classificações estabelecidas para os valores experimentais e os valores calculados pelas redes neurais, com exceção para o alumínio. A explicação para este fato foi de que os limites definidos com um desvio padrão para mais ou para menos, situaram-se em classificações diferentes, fato este que pôde explicar a dificuldade em se obter resultados mais coerentes com as redes neurais artificiais com o limitado volume de dados disponíveis. Outra explicação para o fato da diferença entre os resultados experimentais e os resultados calculados pela rede seria no caso por exemplo do cobre, que apresentou nas ECA's CIU, AML e PIT, resultados muito diferentes das outras estações, o que prejudicou a capacidade da rede de se ajustar a estas diferenças.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

---

Estudos de corrosão atmosférica por um período maior de tempo, para maior degradação e análise aprofundada dos produtos de corrosão da superfície do alumínio, cobre e aço galvanizado.

Pela possibilidade de ataque ao substrato do aço galvanizado com uma espessura de revestimento de zinco não eficiente, recomenda-se trabalhos futuros com CPs de aço galvanizado com diferentes espessuras de revestimento.

Comparação entre o método gravimétrico utilizado neste trabalho para se obter a taxa de corrosão com o método de impedância, e desta forma comparar os resultados.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

1. “Corrosion costs and preventive strategies in the United States of America”. In: <http://www.NACE.org>.
2. COELHO, J. F. P., “A nova ABRACO”. In: <http://www.abraco.org.br>.
3. GENTIL, V.; Corrosão. 4.<sup>a</sup> edição, Ed. LTC: Rio de Janeiro, 2003, 53 p.
4. VIANA R. O.; O programa de corrosão atmosférica desenvolvido pelo CENPES. Boletim técnico PETROBRAS, V. 23, n. 1, p. 39-47, 1980.
5. PORTELLA, K. F.; LACERDA, L. A. de; CAMARGOS, J. V. de; *et al.*; Pesquisa e desenvolvimento de metodologias para estudo de corrosão em usinas termelétricas a diesel/gás. *Relatório Técnico LACTEC 19742, ELETRONORTE/ANEEL*, 60 2006.
6. SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, Recuperação e Reforço de Estruturas de Concreto**. Ed. Pini, São Paulo, 1998.
7. SICA, C. Y.; **Mapeamento da corrosividade atmosférica de São Luiz – MA e a correlação das variáveis ambientais que influenciaram na degradação dos materiais metálicos**. Curitiba 2006. 128 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná.
8. <http://www.emtursa.ba.gov.br/Template.asp?nivel=00010006&identidade=12>, acessada em Março de 2008; ABNT NBR 14643; *Corrosão atmosférica, classificação da corrosividade de atmosferas*, Rio de Janeiro, 2001
9. BARTON, K. Protection Against Atmospheric Corrosion. Theories and Methods, translation: Jonh R. Duncan, Nottingham University, Ed John Wiley & Sons, 1976.
10. RODRÍGUEZ, J. J. S.; HERNÁNDEZ, F. X. S.; GONZÁLEZ, J. E. G. The effect of environmental and meteorological variables on atmospheric corrosion of carbon steel, cooper, zinc and aluminium in a limited geographic zone with different types of environment. *Corrosion Science (In Press)*, V. 44, p. 0-0, 2002.
11. RODRÍGUEZ, J. J. S.; HERNÁNDEZ, F. J. S.; GONZÁLEZ, J. E. G. Mathematical and electrochemical characterization of the layer of corrosion products on carbon steel in various environments. *Corrosion Science*, V. 44, p. 2597-2610, 2002.
12. LEUENBERGER-MINGER, A. U.; BUCHMANN. B.; FALLER. M.; RICHNER. P.; ZÖBELI. M. Dose – response functions for weathering steel, copper and zinc obtained from a four-year exponsure programme in Switzerland. *Corrosion Scince*, V. 44, p. 675-687, 2002.

13. FELIU, S.; MORCILLO, M.; FELIU, S. JR. The prediction of atmospheric corrosion from meteorological and pollution parameters-II. Long-term forECAs. *Corrosion Science*, V. 34, p. 415-422, 1993.
14. KUCERA, V. Dose-response functions as a basic for assessment of acceptable levels. Swedish Corrosion Institute, Kraeftriket 23, SE - 104 05, November 2002 Stockholm, Sweden.
15. HAAGENRUD, S. **Factors Causing Degradation**: Part II. In: Guide and Bibliography to Service Life and Durability Research for Buildings and Components. CIB, Rotterdam, March 2004. p.1.2-104. (CIB Publication 295).
16. <http://www.corr-institute.se/ICP-Materials>, acessado em setembro de 2010; The International Co-operative Programme on Effects on Materials.
17. ROBERGE, P. R.; KLASSEN, R. D.; HABERECHE, P. D. Atmospheric corrosivity modeling - a review. **Materials & Design**, V. 23, p. 321-330, 2002.
18. PINTOS, S.; QUEIPO, N. V.; RINCON, O. T.; RINCON, A.; MORCILLO, M. Artificial neural network modelling of atmospheric corrosion in the MICAT project. **Corrosion Science**, V. 42, p. 35-52, 2000.
19. HELENE, PAULO R. L. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: Editora Pini – Instituto de pesquisas Tecnológicas IPT, 1986. 47p.
20. WOLYNEC, S.; WEXLER, S. B.; FENILI, C. *Manual de Proteção Contra Corrosão Durante o Transporte e Armazenamento*, São Paulo, 2 ed.. Cap 1, 1992.
21. J-ATTWOOD, S. C. J. Corrosion and coatings. *Journal of the Oil and Colour Chemist's Association*, v. 75, n. 4, p. 128-137, 1992.
22. MAYNE, J. E. O. **The mechanism of the inhibition of the corrosion of iron and steel by means of paint**. Official Digest, Fed. Soc. Pint Technol., v. 24, p. 127-136, 1952
23. VERA, R.; ROSALES, B. M.; TAPIA, C. Effect of the exposure angle in the corrosion rate of plane carbon steel in a marine atmosphere. *Corrosion Science*, V. 45, p. 321-337, 2003.
24. RODRÍGUEZ, J. J. S.; HERNÁNDEZ, F. J. S.; GONZÁLEZ, J. E. G. XRD and SEM studies of the layer of corrosion products for carbon steel in various different environment in the province of las palmas (The canary islands, spain). *Corrosion Science*, V. 44, p. 2425-2438, 2002.
25. OH, S. J.; COOK, D. C.; TOWNSEND, H. E. Atmospheric corrosion of different steels in marine, rural and industrial environments. *Corrosion Science*, V. 41, p. 1687-1702, 1999.
26. CORVO, F.; BETANCOURT, N.; MENDOZA, A. The influence of airborne salinity on the atmospheric corrosion of steel. *Corrosion Science*, V. 37, n. 12 12, p. 1889-1901, 1995.

27. CLARK, G. L.; HAWLEY, G. G.; **Encyclopedia of Chemistry, Ions**. Rinhold Publishing Corp., New York, NY, p. 46, 1957.
28. FERREIRA, L. A. [et al]. Curso de formação de operadores de refinaria: química aplicada, corrosão / C977 – Curitiba : PETROBRAS : UnicenP, 2002.
29. (www.redetec.org.br) - Rede de Tecnologia do Rio de Janeiro – (Jornal do Comércio – 26/03/2008).
30. KAJIMOTO, Z. P.; ALMEIDA, L. N.; SIQUEIRA, F. J. S. *Corrosão Atmosférica de Metais no Estado de São Paulo*JVT, Boletim 57, p.85, São Paulo, 1991.
31. ALMEIDA, N. L.; PANOSSIAN, Z. *Corrosão Atmosférica 17 anos* ,WT, Boletim 2538, p. 130, São Paulo, 1999.
32. KENNY, E. D.; GRYNGLAS, M.; CLARO, Z. M. P. T.; PINTO, J. A. Q.; SILVA, M. K. ; SILVA, J. R. A.; KONISHI, R.; WANDERLEY, V. G.; CAVALCANTI, E. H.; MARCONDES, L., PANOSSIAN, Z.; ABOUD, J. E.; ARAÚJO, M. M.; FRAGATA, F. L.; ALMEIDA, M. J. B. S. *Corrosão Atmosférica do Aço Patinável em Atmosferas Brasileiras*. In; CONGRESSO BRASILEIRO DE CORROSÃO, 1995, Rio de Janeiro. Anais...Rio de Janeiro; ABRACO, 1995, v. 1, p. 1- 16.
33. VIANNA R. O. **O programa de corrosão atmosférica desenvolvido pelo CENPES**. Boletim Técnico PETROBRÁS, v. 23, n. 1, p. 39-47, 1980.
34. SILVA, J.M.; PORTELLA, K.F.; DALLEDONE, E.; D'ALKAINE, C.V. **Exposição de materiais metálicos em estações atmosféricas no Paraná. Parte I – Dois anos de experiência**. In: Congresso Iberoamericano de corrosão e proteção, v. 1, n. 3, Rio de Janeiro: p.471, 1989.
35. FELIU, S.; MORCILLO, M.; CHICO, B. **Effect of Distance From Sea on Atmospheric Corrosion Rate**. Corrosion, v. 55, n. 9, 1999.
36. COSTA, E. A. L. **Determinação do Potencial de Agressão dos Sais Marinhos Sobre as Argamassas de Revestimento na Região Metropolitana de Salvador**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2001.(dist. Mar).
37. VILASBOAS, J. M. L. **Durabilidade das Edificações de Concreto Armado em Salvador: 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 Bahia, Salvador, 2004.

38. JAEGERMANN, C. **Effect of Water-Cement Ratio and Curing on Chloride Penetration into Concrete Exposed to Mediterranean Sea Climate.** ACI Materials Journal, 1990.
39. PIAZOLA, J.; DESPIAU, S. **Contribution of Marine Aerosols in the Particle Size Distribution Observed in Mediterranean Coastal Zone.** Atmospheric Environment, v. 18, 1997.
40. SPIEL, D. E.; LEEUW, G. **Formation and Production of Sea Spray Aerosol.** J. Aerosol Sci, v. 27, s1, 1996.
41. 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.
42. 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.
43. FITZGERALD, J. W. **Marine Aerosols: a Review:** Atmospheric Environment, v. 25A, n. 3 / 4, 1991.
44. 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.
45. CASCUDO, O. O controle da corrosão de armaduras de concreto. São Paulo: PINI, 1997.
46. GENTIL, V.; Corrosão. 4ª ed., LTC-Livros Técnicos e Científicos S.A.: Rio de Janeiro, 2003, 341 p.
47. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D 1141 – 90: standard specification for substitute ocean water. Philadelphia, 1990, 6p.
48. SINGH, D. D. N.; YADAV, S.; SAHA, S. J. K.; **Role of climatic conditions on corrosion characteristics,** Corros. Sci. 50 (2008) 93–110.
49. 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.
50. 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.

51. KUCERA, V.; MATTSON, E.. **Corrosion Mechanism**, editado por MANSFELD, F. Ed. Marcel Dekker Inc., New York, U.S.A., 1987, p.211-220.
52. VERGÉS, G. R.; **Estudo do desempenho de sistemas de pintura para materiais das redes de distribuição de energia elétrica situadas em regiões litorâneas**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, 2005.
53. BARTON, K. Protection Against Atmospheric Corrosion. Theories and Methods, translation: Jonh R. Duncan, Nottingham University, Ed John Wiley & Sons, 1976.
54. MORCILLO, M.; ALMEIDA, E.; ROSALES, B.; URUCHURTU, J.; MARROCOS, M.; Corrosión y protección de metales en las atmósferas de iberoamerica: programa CYTED. Gráficas Salué: Madrid, 1998, 816 p.
55. JONES, D. A.; Principles and Prevention of Corrosion, 2<sup>a</sup> ed., Department of Chemical and Metallurgical Engineering, University of Nevada, Reno, 1996, 600p.
56. 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.
57. Uhlig H. The corrosion handbook. New York, USA: John Wiley & Sons Inc.; 1978
58. 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.
59. VELEVA L., ACOSTA M., MERAZ E., “Atmospheric corrosion of zinc induced by runoff”, *Corrosion Science*, n. 51, pp. 2055-2062, 2009.
60. PANCHENKOY. M., STREKALOV P.V., “Protect Metals”, n. 41, pp. 557-567, 2005.
61. WILCOX, G.D., GABE, D.R., “Electrodeposited Zinc alloy coatings”, *Corrosion Science*, v. 35, n. 5-8, pp. 1251-1258, 1993.
62. RICKETT, B. I.; PAYER, J. H.; *J. Electrochem. Soc.*, 142, 3713 (1995).
63. PERSSON, D.; LEYGRAF, C.; *J. Electrochem. Soc.*, 142, 1459 (1995).
64. VELEVA L., QUINTANA P., RAMANAUSKAS R., POMES R., MALDONADO L., *ELECTROCHIM. Acta* 41 (1996) 1641.
65. NÚÑEZ L., REGUERA E., CORVO F., GONZÁLEZ E., VAZQUEZ C., ‘Corrosion of copper in seawater and its aerosols in a tropical island’, *Corrosion Science*, n. 47, pp. 461-484, 2005.
66. STEIGER M., DANNECKER W., in: R. Sneathlage (ED.) Jahresberiche Steinzerfall: Steinkonservierung, Ernst & Sohn, Berlin, 1995, pp. 115-128.

67. JESUS A. C. N., MAGNABOSCO R., COSTA I., “ Estudo da Influência do teor de cloreto de sódio na resistência à corrosão de tubos da liga de cobre ASTM C12200 (99,9% Cu-0,015-0,040%P)”, 17<sup>o</sup> Congresso Brasileiro de Engenharia e ciências dos materiais, 2006.
68. FELIU S., MORCILLO M., FELIU S. Jr., *Corros. Sci.* 34 (1993) 403.
69. VERNON W.H.J., *Trans. Faraday. Sot.* 1931, 27 255; 1931, 27, 582.
70. BROWN, P. W.; MASTERS, L. W.; **Factors affecting the corrosion of metals in the atmosphere, in Atmospheric Corrosion**, Proc. Conf Hollywood, FL, 5-10 October, 1980. WILEY, J.; Sons, Inc., Somerset, NJ, 1982.
71. FITZGERALD K.P., NAIRN J., ATRENS A., *Corros. Sci.* 40 (1998) 2029, and references therein.
72. NASSAU K., Gallagher P. K., MILLER A. E., and T. E. Graedel, *Corros. Sci.*, 27, 669 (1987).
73. METIKOS-HUKOVIC, M., BASIC, R. GRUBAC, Z. J. **Appl. Electrochem.**, V. 24, p. 772-778, 1994.
74. METIKOS-HUKOVIC, M., BASIC, R. GRUBAC, Z. J. **Appl. Electrochem.**, V. 28, p. 433-439, 1998.
75. WOO – JIN LEE, SU – IL PYUN, *Electrochimica Acta*, V. 44, n 23, p. 4041 1999.
76. HURLEN, T., HAUG, A. T. **Electrochimica Acta**, V. 29, N 8, P. 1113-1138, 1984.
77. MONTICELLI, C., BRUNORO, G., FRIGNANI, A. **Corrosion Science**, V. 32, N. 7, P. 693-705, 1991.
78. HOLZLE, L. R. B.; **Comportamento eletroquímico do alumínio em misturas etilenoglicol-água. Efeito da adição de agentes quilantes.** Porto Alegre 2005. 119 f. Tese (doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
79. HAAGERUND, S. E.; Environmental characterization including equipment for monitoring. CIB W80/RILEM 140-PSL. Subgroup 2 Report. Norwegian Institute for Air Research, Norway, 1997.
80. RINCON, O. T. Tratamiento mediante una red neuronal artificial de los datos de corrosion atmosferica obtenidos: programa CYTED. Seccion B-8 , p. 661- 677. Madrid: Graficas Salue, 1998.
81. PINTOS, S.; QUEIPO, N. V.; RINCON, O. T.; RINCON, A.; MORCILLO, M. Artificial neural network modelling of atmospheric corrosion in the MICAT project. **Corrosion Science**, V. 42, p. 35-52, 2000.
82. HELLIWELL, I; TUREGA, M.; COTTIS, R. Neural networks for corrosion data reduction. In: *Corrosion 96*, Denver, USA. p. 739, 1996.

83. ROBERGE, P. R.; KLASSEN, R. D.; HABERECHE, P. D. Atmospheric corrosivity modeling - a review. **Materials & Design**, V. 23, p. 321-330, 2002.
84. AZEVEDO, F.M.; BRASIL, L.M. e de OLIVEIRA R.C.L. **Redes Neurais Com Aplicacoes em Sistemas Especialistas**. Florianopolis: Bookstore, 2000.
85. 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.
86. ARONOFF S. (1989) *Geographic Information Systems: A Management Perspective*. Ottawa: WDL Publications.
87. <http://www.coficpolo.com.br>, acessada em junho de 2010.
88. PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. *Manual de engenharia química*. Tradução: Horácio Macedo; Luiza M. Barboza e Paulo Emídio de F. Barbosa. 5ª ed, Guanabara dois S.A.: Rio de Janeiro, 1980, cap. 3, p. 50.
89. <http://padogeo.com/cont-climatologia-br.html>, acessado em 12 de outubro de 2010.
90. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6211: determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida. Rio de Janeiro, 2001, 6 p.
91. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6921: sulfatação total na atmosfera – determinação da taxa pelo método da vela de dióxido de chumbo. Rio de Janeiro, 2002, 7 p.
92. SHARIATI, M. R. *et al.* Providing the Pollution Map in South West Provinces of Iran Based on DDG Method. IEEE Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific Dailan, 2005.
93. VOSLOO, W. L. *et al.* Insulator Pollution Monitoring Program for Namibia, 2007.
94. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6209: materiais metálicos não revestidos – ensaio não acelerado de corrosão atmosférica. Rio de Janeiro, 1986, 5 p.
95. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6210: preparo, limpeza e avaliação da taxa de corrosão de corpos de prova em ensaios de corrosão atmosférica. Rio de Janeiro, 1982, 16 p.
96. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A 239-95: Standard Practice for Locating the Thinnest Spot in a Zinc (Galvanized) Coating on Iron or Steel Articles. 2009, 4 p.
97. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G 1-90: Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. 1990, 7 p.

98. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. ISO 9223: corrosion of metal and alloys - classification of corrosivity of atmospheres. Genebra, 1992, 18 p. 127.
99. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. ISO 9224: corrosion of metal and alloys – guiding values for the corrosivity categories. Genebra, 1992, 5 p.
100. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. ISO 9225: corrosion of metal and alloys - corrosivity of atmospheres - methods of measurement of pollution. Genebra, 1992, 10 p.
101. INTERNATIONAL ORGANIZATION OF STANDARDIZATION. ISO 9226: corrosion of metal and alloys - corrosivity of atmospheres - determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity. Genebra, 1992, 4 p.
102. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14643: corrosão atmosférica – classificação da corrosividade de atmosferas. Rio de Janeiro, 2001, 11 p.
103. SANTOS, L. K. S.; Treinamento em ArcView GIS 8.3 básico. Curitiba 2005, 141 p. Apostila do Curso de Especialização em Geoprocessamento – Universidade Federal do Paraná, CIEG – Centro integrado de estudos em geoprocessamento.
104. LIBOS, C. M. I. P.; Ph.D. Tese, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, 2002.
105. <http://www7.cptec.inpe.br/noticias/faces/noticias.jsp>. Acessado em 28 de dezembro de 2009.
106. [http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/monitoramento\\_brasil.shtml](http://clima1.cptec.inpe.br/~rclima1/monitoramento_brasil.shtml), acessada em julho de 2010.
107. ARAGÃO, M. R. da S.; BARRETO, A. B.; CORREIA, M. de F.; ARAÚJO, H. A., **Variabilidade sazonal e horária da chuva na cidade de Salvador, Bahia**. IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, estado da Bahia, Brasil.
108. BARRETO, A. B.; SILVA ARAGÃO, M. R.; CORREIA, M. F.; SANTOS, A. H. M. (2008). *Uma investigação sobre eventos de chuva intensa na cidade de Salvador, Bahia*. Trabalho aceito para apresentação no XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Estado de São Paulo, Brasil.
109. ENERGIA EÓLICA: INVENTÁRIO / TECNOLOGIA. Vol. II e V. Fontes Energéticas Brasileiras, CHESF, 1987.
110. ATLAS DO POTENCIAL EÓLICO DA BAHIA. Projeto de pesquisa e desenvolvimento, COELBA / ANNEL, 2001.
111. PORTELLA, K. F.; PIAZZA, F.; INONE, P. C.; RIBEIRO JÚNIOR, S.; CABUSSÚ, M. S.; CERQUEIRA, D. P.; CHAVES, C. S. S. **Efeitos da poluição atmosférica (litorânea e**

- industrial) em isoladores da rede elétrica da região metropolitana de salvador.** *Quim. Nova*, Vol. 31, No. 2, 340-348, 2008.
112. KENNY, E. D.; CRUZ, O. M.; SILVA, J. M.; SICA, Y. C.; RAVAGLIO, M.; MENDES, P. R.; MENDES, J. C.; Relatório técnico LACTEC, 2005.
113. HEALTH CANADA. Inorganic Fluorides – PSL1. Ottawa: Health Canada Publications, 1993. <http://www.hc-sc.gc.ca/index-eng.php>. Acessado em 10 de dezembro de 2009.
114. MARLENE, F.; HAMA, P. FORNARO, A.; **Avaliação do nível da vulnerabilidade do solo devido à presença de termelétrica a carvão (Figueira, PR- Brasil).** *Quim. Nova*, Vol. 26, No. 4, 479-483, 2003.
115. JOUKOSKI A.; MEDEIROS B. L.; BARON O.; HENKE S. L.; PIAZZA F.; LACERDA. L. A. ; 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.** *Relatório Final LACTEC, COELBA, ANEEL*, 0047-022/2007.
116. Normas técnicas COPEL – Materiais de transmissão padrão – NTC 87 – 0310 a 0312, 1993.