

Estudo da Agressividade do Ar em Fortaleza/CE

INOVACON
COOPERCON-CE
SINDUSCON-CE
CIMENTO APODI
PEC/UFC

Novembro / 2016





SUMÁRIO

INTRODUÇÃO | **PÁG 09**

AGRESSIVIDADE E DURABILIDADE | **PÁG 11**

METODOLOGIA | **PÁG 17**

- Mapeamento
- Ensaio pelo método da vela úmida
- Determinação do teor de cloretos em corpos de prova de concreto
- Climatologia

RESULTADOS | **PÁG 35**

- Características Climatológicas
 - Direção predominante e velocidade do vento
 - Precipitação pluviométrica
 - Umidade Relativa
 - Temperatura
- Deposição de íons cloro no ar atmosférico pelo método da vela úmida
 - Comparação com outros estudos
- Penetração de cloreto em corpos de prova de concreto
- Discussão dos resultados

PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DA AGRESSIVIDADE AMBIENTAL DE FORTALEZA/CE | **PÁG 61**

- Proposta 01
- Proposta 02

CONSIDERAÇÕES FINAIS | **PÁG 83**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | **PÁG 87**

AUTORES | **PÁG 94**

PREFÁCIO



INTRODUÇÃO

As obras expostas ao ambiente marinho se deterioram mais cedo devido ao ambiente altamente agressivo, pois os íons cloro contidos na névoa salina se constituem na causa mais significativa das manifestações patológicas devido à sua agressividade às armaduras. Por isso, conhecer as características da região ou zona onde se vai construir é fundamental para se tomar precauções que visem à durabilidade das estruturas.

A NBR 6118 (ABNT, 2014) divide a agressividade ambiental em quatro níveis, variando de ambientes menos agressivos até ambientes altamente agressivos. Os limites de separação entre classes de agressividade ainda não foram estabelecidos na cidade de Fortaleza, pois para isto, dentre outros agentes agressivos, é necessário conhecer a concentração de íons de cloro presentes na atmosfera, bem como sua penetração nos concretos.

Reconhecendo a necessidade preeminente de definir as divisões das classes de agressividade ambiental, o INOVACON, COOPERCON-CE, SINDUSCON-CE, Companhia de Cimentos Apodi e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil (PEC) da Universidade Federal do Ceará (UFC) elaboraram este estudo que originou uma proposta de classificação da agressividade do ar atmosférico na cidade de Fortaleza, com o propósito de nortear os profissionais da área no desenvolvimento de projetos de estruturas em concreto armado, primando pela durabilidade das construções.

Boa leitura!



AGRESSIVIDADE
E DURABILIDADE

Agressividade e durabilidade

De acordo com Souza e Ripper (1998), a construção civil passou por um crescimento acelerado, o que provocou a necessidade de inovações que trouxeram, em si, a aceitação implícita de maiores riscos, dentre eles de maior deterioração. A progressão do desenvolvimento tecnológico aconteceu naturalmente, e, com ela, o aumento do conhecimento sobre estruturas e materiais. Apesar disto, algumas estruturas e materiais ainda tem desempenho insatisfatório, se confrontadas com as finalidades a que se propunham, passando por um processo de deterioração estrutural.

Segundo Helene (1992), a origem do problema pode ser dividida em cinco grandes etapas: planejamento, projeto, fabricação de materiais, execução e uso (operação e manutenção das obras). Os problemas patológicos só irão se manifestar após o início da execução, e ocorrer com mais intensidade na etapa de uso. Em relação às causas, este último autor elenca que os agentes causadores dos problemas patológicos podem ser vários: cargas, variação da umidade, variações térmicas intrínsecas e extrínsecas ao concreto, agentes biológicos, incompatibilidade de materiais, agentes atmosféricos, dentre outros.

Pontes (2006) cita que as obras expostas ao ambiente marinho se deterioram mais cedo devido ao ambiente altamente agressivo. Segundo Portella (2013), em ambiente marinho, os cloretos contidos na névoa salina se constituem na causa mais significativa das manifestações patológicas devido à sua agressividade às armaduras. O Brasil apresenta uma extensa costa marítima banhada pelo Oceano Atlântico, que segundo o IBGE (2014), possui uma extensão de 7367 km, com grandes cidades portuárias, dentre elas Fortaleza. Para o projeto de uma estrutura de concreto, de acordo com Silva (2011), a escolha da classe de agressividade ambiental é fator primordial na definição da classe de concreto a ser adotada (f_{ck}), do cobrimento nominal e na relação água/cimento.

As estruturas de concreto armado, segundo Pontes (2006), quando sujeitas a agentes agressivos, dentre eles os cloretos, tem sua vida útil diminuída, por este provocar a corrosão das armaduras, afetando significativamente a durabilidade destas estruturas, pois ocasionam consequências negativas para estabilidade, funcionalidade e estética das mesmas.

A agressividade do ambiente, em decorrência da quantidade de íons cloro, segundo Pontes (2006), pode desencadear e acelerar a corrosão de armaduras, e em função desta agressividade, novas exigências poderão ser impostas às estruturas de concreto. Portanto faz-se necessário a caracterização do nível de agressividade do local onde se irá construir.

Segundo Albuquerque e Otoch (2005), artigos datados da década de 1980 já alertavam para a agressividade ambiental de Fortaleza, indicando grande presença Segundo Albuquerque e Otoch (2005), artigos datados da década de 1980 já alertavam para a agressividade ambiental de Fortaleza, indicando grande presença de íons cloro, sulfatos e partículas sedimentáveis no ar atmosférico da cidade. Segundo Portella (2013), os limites de separação entre os ambientes marinho (classe de agressividade III da atual ABNT NBR 6118:2014) e urbano (classe de agressividade II da mesma norma) ainda não foram estabelecidos na cidade de Fortaleza. Portanto, a motivação deste trabalho se deu através da necessidade de se conhecer os níveis de concentração de íons de cloro em Fortaleza, pois tal conhecimento permitirá o desenvolvimento de projetos de estruturas em concreto armado tratando de forma preventiva o surgimento de corrosão da armadura pela ação de íons cloro, aumentando assim a vida útil destes concretos, primando portanto pela durabilidade das construções.

Assim, esta cartilha traz de forma resumida a metodologia utilizada e os resultados do mapeamento a agressividade do ar atmosférico da cidade de Fortaleza, avaliando o teor de deposição de íons cloro, atra-

vés do método da vela úmida, em relação à distância ao mar, bem como a penetração dos mesmos em corpos de prova de concreto. Por fim, foi proposto uma classificação da agressividade da cidade, conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Convém ressaltar que este estudo culminou na dissertação de mestrado da Arquiteta Ana Mara da Rocha Campos, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil (PEC) da Universidade Federal do Ceará (UFC).



METODOLOGIA

Metodologia

Mapeamento

A cidade de Fortaleza está situada no norte do Brasil, capital do estado do Ceará e tem características semelhantes às que ocorrem em todo o litoral do Brasil. O clima é quente, com temperatura anual média de 26,5 °C. A cidade está localizada no litoral e tem uma extensão de 34 quilômetros de costa marítima, com um total de 15 praias, todas estas, produtoras de íons cloro que ficam disseminados no ar atmosférico. Com a finalidade de classificar a cidade quanto à agressividade ambiental oriunda de íons cloro escolheram-se pontos para coleta de dados conforme os parâmetros: área de abrangência, época de coleta, número de coletores e locais de instalação do equipamento.

A localização dos pontos de coleta de dados pelo método da vela úmida foi determinada de forma que os pontos fossem distribuídos de forma homogênea pela cidade, com intuito de coletar dados na maior área possível. No entanto, houve uma concentração maior de pontos nas proximidades da faixa litorânea, haja vista que a revisão de literatura demonstrou que esta é a área com maior concentração de íons cloro.

A distribuição foi feita a partir da projeção de uma linha correspondente à margem da cidade com o mar, distanciando-se da orla de 50 m; 250 m; 500 m; 1000 m; 2000 m; 4000 m; 6000 m; e 8000 m.

Após a demarcação das linhas de projeção da margem foram traçadas 06 (seis) linhas perpendiculares, distantes entre si em média de 2500 m. O cruzamento das linhas de projeção da margem com as linhas perpendiculares deu origem a 48 pontos (Figura 1).

FIGURA 1 - MALHA DE PONTOS EM FORTALEZA.



Para este estudo foram excluídos três pontos da malha: dois por se situarem em área de risco, devido à dificuldade de acesso e periculosidade, e outro por

falta de autorização na área. No entanto, foi acrescentado mais um ponto fora da malha, para realização do ensaio em branco, totalizando 46 pontos. A cidade tem uma extensão territorial total de aproximadamente 313 km² e esta malha corresponde a aproximadamente 101 km² de área na cidade, ou seja, 32,26% da extensão territorial da cidade foi atendida com este estudo. Contudo, na área de estudo é onde ocorrem as principais construções em concreto armado da cidade.

A nomenclatura dos pontos se deu seguindo a sequência das linhas, em ordem crescente à medida que se distancia do mar, como segue:

- » Linha 01 – P01, P02, P03, P04, P05, P06, P07 e P08;
- » Linha 02 – P09, P10, P11, P12, P13, P14, P15 e P16;
- » Linha 03 – P17, P18, P19, P20, P21, P22, P23 e P24;
- » Linha 04 – P25, P26, P27, P28, P29, P30, P31 e P32;
- » Linha 05 – P33, P34, P35, P36, P37, P38 e P40;
- » Linha 06 – P41, P42, P43, P44, P45 e P46.

O ponto número 47 foi locado dentro do LMCC - Laboratório de Materiais de Construção Civil da UFC (Universidade Federal do Ceará) no campus do Pici, para a realização do ensaio em branco. Este ensaio é feito para servir de referência na determinação de íons cloro presente nas outras velas expostas na cidade.

Após a distribuição e locação dos pontos no mapa da cidade de Fortaleza/Ce passou-se para a fase de reconhecimento de campo através da visitação em cada ponto para verificação do local e da viabilidade de instalação das velas.

Concomitante à fase de reconhecimento de campo, iniciou-se a fase de obtenção de autorização para colocação da Vela Úmida por um período de um ano. Os pontos ficaram distribuídos em edificações com diversos tipos de usos diferentes, tais como: residências, condomínios residenciais, escolas públicas e privadas, empresas privadas, área do exército, área da marinha, dentre outros.

Ensaio pelo método da vela úmida

Velas úmidas (Figura 2) foram utilizadas para se determinar o teor de cloretos em suspensão e disseminados no ar atmosférico da cidade e foram fabricadas conforme a NBR 6211 (ABNT, 2001), que por sua vez está fundamentada na norma americana ASTM D512 – 89 (ASTM, 1989).

O princípio do método consiste na titulação de íon cloro absorvido na água contendo glicerol, com solução diluída de nitrato de mercúrio, na presença do indicador misto de difernilcarbazona e azul-de-bromo-fenol. O ponto de titulação é indicado pela formação do complexo mercúrio-difenilcarbazona, de cor azul-violeta. Os resultados são expressos em massa de cloreto por unidade de área e por unidade de tempo, calculados conforme a NBR 6112 (ABNT, 2001).

As velas utilizadas foram fabricadas e eram composta por um tubo de PVC envolvido com gaze cirúrgica e fixado a um frasco coletor de vidro por meio de uma tampa plástica. O tubo era de aproximadamente 2,5 cm de diâmetro, sobre o qual foi enrolada uma camada dupla de gaze cirúrgica. A área da superfície da gaze exposta à atmosfera foi de aproximadamente 100 cm² e foi determinada e expressa em metros quadrados (S). O tubo foi introduzido numa tampa plástica, ficando com uma altura de 15 cm acima desta. A tampa possuía dois furos localizados o mais próximo possível do tubo, pelos quais passavam as extremidades da gaze, que atingiam o fundo do frasco. O frasco coletor utilizado foi um Erlenmeyer de vidro, com aproximadamente 1000mL de capacidade, conforme Figura 3.

FIGURA 2 - VELA ÚMIDA

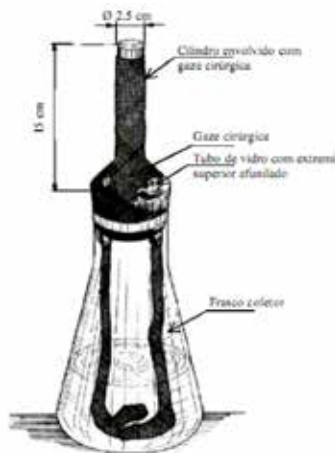


FIGURA 3 - VELA ÚMIDA FABRICADA NO LMCC



A vela foi preparada em local isento de contaminantes e com luvas de PVC, por isto, a preparação se deu em uma sala dentro no Laboratório de Materiais de Construção Civil – LMCC, da Universidade Federal do Ceará, no campus do Pici. Concomitante à fabricação das velas, fabricou-se os suportes metálicos para a colocação das velas, em atendimento a NBR 6211 (ABNT, 2001).

A vela foi protegida por meio de uma cobertura feita com uma chapa metálica de 50 cm x 50 cm, como também e ser colocada numa posição central e a uma distância de 20 cm do topo da cobertura. Após a fabricação das velas e suportes passou-se para a fase de instalação nos 46 pontos. O tipo de colocação do suporte variou de acordo com o local em que foi instalado, podendo ser em parede (Figura 4a e 4b) ou laje (Figura 5a e 5b).

FIGURA 4 - A) INSTALAÇÃO (P26). B) SUPORTE COLOCADO (P07)

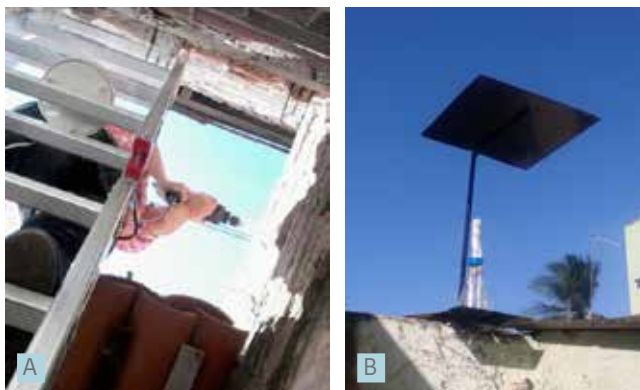


FIGURA 5 - A) VELA FIXADA COM ARAME (P25). B) VELA EM RECIPIENTE PLÁSTICO COM PEDRAS (P33)



Após a fase de instalação dos suportes e colocação das velas passou-se para a fase de troca das velas. Após um período de 30 dias iniciou-se novamente o processo de fabricação das 46 velas para ser feito a substituição no ponto de coleta de dados. O processo de coleta de dados se repetia mensalmente conforme Figura 6.

As velas foram trocadas a cada 30 (± 3) dias durante o período de doze meses, de outubro de 2015 a outubro de 2016, onde se retirava a vela que havia ficado exposta e colocava-se uma nova. A vela recolhida era levada para o LMCC-UFC, para a realização do ensaio de determinação de cloretos solúveis em água contida nas amostras, conforme os procedimentos normativos.

FIGURA 6 - CICLO MENSAL DE COLETA DE DADOS



Os reagentes que foram utilizados atenderam o disposto na NBR 6211 (ABNT, 2001), a fim de determinar o teor de cloretos. As soluções-padrão de nitrato de mercúrio, cloreto de sódio, indicador misto e hidróxido de sódio foram feitas no LABOSAN - Laboratório de Saneamento Ambiental da UFC, com o auxílio da equipe técnica do laboratório. O procedimento adotado para determinação do teor de cloretos esta apresentado na sequência de fotos da Figura 7 e descrito abaixo:

- » a) Retirou-se da gaze e recolheu-se todo o líquido do Erlenmeyer;
- » b) Lavou-se a gaze e juntou-se as águas de lavagem e adicionou-se água destilada até completar 900ml;
- » c) Retirou-se uma alíquota de 50ml e adicionou-se os reagentes na sequência que a norma descreve.
- » d) Titulou-se a alíquota com nitrato de mercúrio 0,0125M até obter a coloração violeta.

FIGURA 7 – PROCEDIMENTO DE ANÁLISE



De posse desses dados, utilizou-se a Equação (1) para calcular a massa de cloreto por unidade de área e por unidade de tempo, conforme NBR 6211 (ABNT, 2001).

$$\text{Cloreto} \left(\frac{\text{mg}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \right) = \frac{2(A - B) \cdot M \cdot 35,5 \cdot Vt}{V_a \cdot S \cdot t}$$

Onde:

- » A: volume gasto de solução-padrão de nitrato mercúrico com a alíquota, em mililitros;
- » B: volume gasto de solução-padrão de nitrato mercúrico com o branco, em mililitros;
- » M: concentração de solução-padrão de nitrato mercúrico, em molaridade;
- » VT: volume total da amostra após a diluição, em mililitros;
- » Va: volume de alíquota, em mililitros;
- » S: área da gaze exposta, em metros quadrados;
- » t: tempo de exposição, em dias.

Determinação do teor de cloretos em corpos de prova de concreto

A determinação do teor de cloretos, em relação à massa de cimento do concreto se deu pelo procedi-

mento descrito na NBR 14832 (ABNT, 2002). Corpos de prova (CPs) de concreto de f_{ck} de 30 MPa foram produzidos com dois tipos de cimento (CP II F32 e CP IV 32) e expostos ao meio ambiente na região da Praia do Futuro e da Praia de Iracema.

Foram escolhidos 12 pontos, dentro da malha de 46 pontos da Vela Úmida, para colocação dos CPs (Figura 8). Os pontos escolhidos correspondem a duas linhas, uma na Praia de Iracema (P01, P02, P03, P04, P05 e P06) e a outra na Praia do Futuro (P33, P34, P35, P36, P37 e P38) e ficavam localizados às mesmas distâncias do mar das velas úmidas colocadas nestas linhas.

FIGURA 8 - PONTOS DE EXPOSIÇÃO DOS CORPOS DE PROVA



Para a fabricação dos corpos de prova foi utilizado um traço de concreto já dosado no laboratório cujas características dos agregados e cimentos estão apresentados na Tabela 1.

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS E CIMENTOS

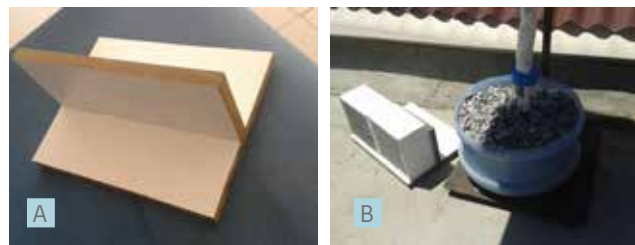
MATERIAL	MASSA ESPECÍFICA	DMC	MF
Areia	2,55	1,41	4,8
Brita	2,64	1,42	25
Cimento CP IV 32	2,82	-	-
Cimento CP II F 32	2,90	-	-

A moldagem dos corpos de provas que ficaram expostos aos cloretos foi realizada em fôrmas de madeira, com o auxílio de um vibrador mecânico de imersão, conforme as prescrições da ABNT NBR 5738:2008, e curados ao ar livre por 48h, em ambiente natural em laboratório, à temperatura ambiente, variando entre 26°C e 28°C. Foram moldados CPs cilíndricos também para controle da resistência à compressão.

Após as 48h, os corpos de prova prismáticos foram impermeabilizados em todas as faces com exceção de uma face que ficou exposta na direção do mar, com uma tinta formadora de uma película impermeável, que assegura proteção contra intempéries, inclusive maresia.

Os corpos de prova prismáticos foram colocados em um suporte fabricado com MDF naval de 25 mm de espessura (Figura 9a), para evitar que o bloco virasse, devido as grandes rajadas de vento durante o período de exposição, e expostos ao lado da vela úmida, com a face sem impermeabilização voltada para ao lado dos ventos predominantes (Figura 9b).

FIGURA 9 – A) SUPORTE PARA OS CPS. B) CPS PRISMÁTICOS COLOCADOS AO LADO DA VELA ÚMIDA



Após a exposição de seis meses os corpos de prova foram recolhidos para a primeira análise, tendo sido perfurados nas seguintes profundidades: da superfície do concreto (0mm) até 10mm, de 10mm a 20mm e de 20mm a 30mm. A massa de cada furo foi coletada em sacos plásticos (Figura 10), com posterior tampamentos dos furos com epóxi. Os CPs prismáticos foram devolvidos para os seus locais de origem onde estão expostos para outras análises.

FIGURA 10 - PROCESSO PARA RETIRADA DO PÓ



Após a coleta das amostras, seguiu-se o procedimento C descrito na NBR 14832 (ABNT, 2002) para determinação do teor de cloretos contido em cada amostra coletada. Este processo está apresentado na sequência de fotos da Figura 11.

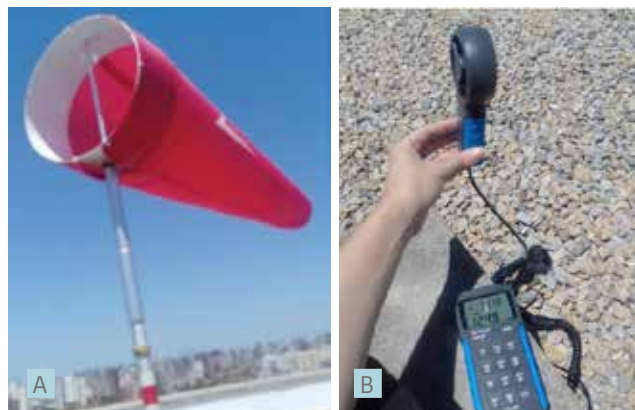
FIGURA 11 - PROCEDIMENTO C - ABNT NBR 14832/2002



Climatologia

As características climatológicas da região, durante o período de execução do projeto, foram fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), que corresponde à estação climatológica Fortaleza A305 (Latitude: -3.815701° / Longitude: -38.53792° / Altitude: 30m). Foram obtidos dados da direção e velocidade do vento, precipitação, umidade relativa e temperatura. No entanto, a direção e velocidade do vento também foram conferidas no local através da utilização de biruta (Figura 12a) e anemômetro (Figura 12b). Com base nestes resultados fez a análise dos resultados obtidos nos outros ensaios para verificar se houve alguma correlação.

FIGURA 12 - A) VERIFICAÇÃO COM BIRUTA (P29). B) VERIFICAÇÃO COM ANEMÔMETRO (P29)





RESULTADOS

Resultados

Características Climatológicas

DIREÇÃO PREDOMINANTE E VELOCIDADE DO VENTO

Os resultados referentes à direção predominante e velocidade média do vento, estão apresentados na Tabela 2.

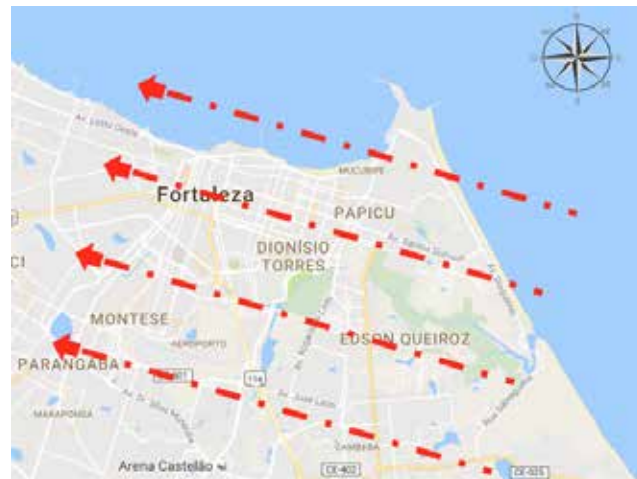
TABELA 2 - DIREÇÃO E VELOCIDADE DOS VENTOS

	NOV 2015	DEZ 2015	JAN 2016	FEV 2016	MAR 2016	ABR 2106
Velocidade do vento (m/s)	4,1	3,6	2,9	3,1	3,1	3,1
Direção predominante do vento	E/SE	E/SE	E/SE	E/SE	E/SE	E/SE
	MAI 2016	JUN 2016	JUL 2016	AGO 2016	SET 2016	OUT 2106
Velocidade do vento (m/s)	3,2	3,7	3,9	4,3	4,5	4,1
Direção predominante do vento	E/SE	SE/E	SE/E	E/SE	E/SE	SE/E

E - Leste | SE - Sudeste

Durante o período de estudo, segundo as informações do INMET, a direção dos ventos apresentou-se predominantemente entre as direções E (Leste) e SE (Sudeste), o que foi verificado e confirmado através da utilização da biruta e bússola nos pontos de coleta de dados. Considerando o direcionamento predominante dos ventos verificou-se que estes adentram a cidade de Fortaleza, pela região onde se situa a Praia do Futuro, posteriormente seguindo para a Praia de Iracema e saindo no sentido da cidade de Caucaia, conforme Figura 13.

FIGURA 13 - DIREÇÃO PREDOMINANTE DOS VENTOS NA CIDADE DE FORTALEZA



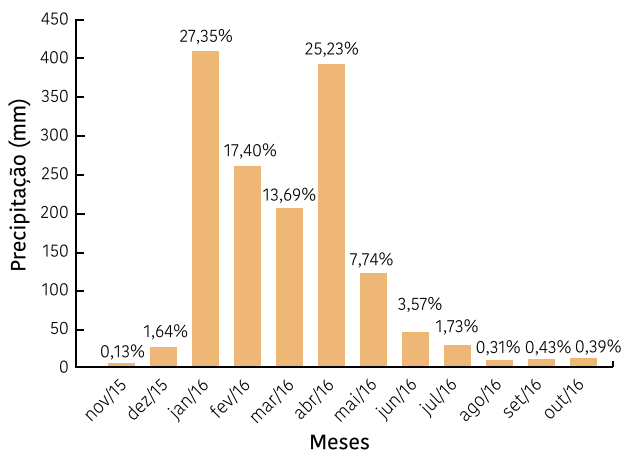
A velocidade do vento contribui para a concentração salina no aerossol marinho, e desenvolve influência preponderante, com efeito acentuado quando ultrapassa o patamar de 3 m/s (BORBA JÚNIOR, 2011).

No caso de Fortaleza verifica-se que a velocidade média do vento variou entre 2,9 m/s e 4,1 m/s durante o período de estudo, segundo os dados do INMET. Com a verificação feita no local, percebeu-se que os pontos situados na Praia do Futuro apresentaram velocidades bem superiores a média fornecida pelo INMET, obtendo-se valores de até 12,49 m/s, equivalente à 44,96 Km/h.

PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA

Os valores de precipitação pluviométrica total mensal obtidos no período examinado encontram-se no Gráfico 1.

GRÁFICO 1 - PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA NO PERÍODO

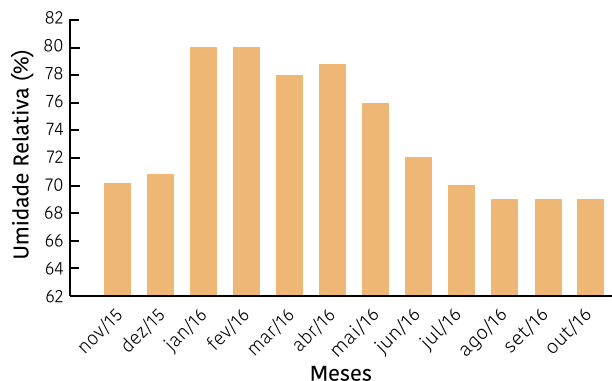


O total anual médio de precipitação no período do estudo é de cerca de 1500mm. Segundo Guedes et al (2005), usualmente a precipitação em Fortaleza concentra-se no trimestre de março a maio, quando ocorre mais de 50% do total anual. Percebeu-se que a maior concentração de chuvas se deu nos meses de janeiro à abril de 2016, chegando ao valor médio de 410,3mm no mês de janeiro de 2016, na sequência abril (378,5 mm) e fevereiro (261,0mm). Verificou-se que no período de janeiro à abril de 2016 ocorreu 83,67% da precipitação total do período do estudo.

UMIDADE RELATIVA

Os valores médios mensais do período de estudo estão apresentados no Gráfico 2. Observa-se que os valores médios mensais variaram entre 70% e 80%, apresentando os maiores valores para os meses de maior ocorrência de chuvas.

GRÁFICO 2 - UMIDADE RELATIVA DO AR NO PERÍODO

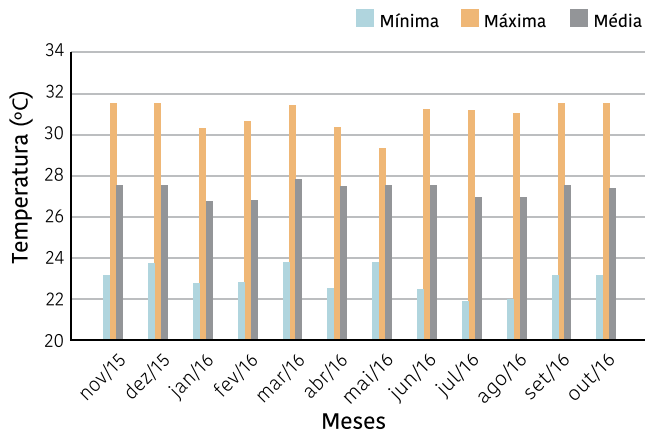


A umidade relativa do ar está diretamente ligada ao processo de transporte de cloretos no concreto, bem como ao processo corrosivo do aço no concreto.

TEMPERATURA

As temperaturas, mínima, média e máxima obtidos para o período de exposição das velas úmidas, segundo INMET, estão apresentadas no Gráfico 3.

GRÁFICO 3 – TEMPERATURA NO PERÍODO



Segundo Portella (2013), a temperatura média do ar em Fortaleza situa-se na faixa de 23°C a 32°C, com média entre 26°C e 28°C. Verificou-se que para o período de estudo as temperaturas variaram dentro dos

limites esperados. Segundo Vitali (2013), a velocidade de transporte de cloretos no concreto é agilizada pelas altas temperaturas, pois o aumento da temperatura aumenta o teor de cloretos livres na água dos poros.

Deposição de íons cloro no ar atmosférico pelo método da vela úmida

Os resultados obtidos na determinação do teor de íons cloro no período de outubro de 2015 à outubro de 2016, em miligrama por metro quadrado por dia de exposição [$\text{mg}/(\text{m}^2.\text{d})$], estão apresentados nos gráficos 4 à 15.

GRÁFICO 4 - DEPOSIÇÃO DO TEOR DE CLORETOS CICLO 01 - NOVEMBRO DE 2015



GRÁFICO 5 - DEPOSIÇÃO DO TEOR DE CLORETOS
CICLO 02 - DEZEMBRO DE 2015

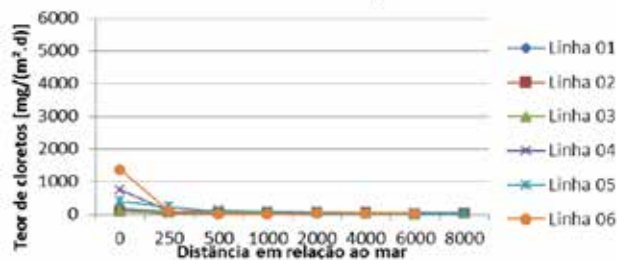


GRÁFICO 6 - DEPOSIÇÃO DO TEOR DE CLORETOS
CICLO 03 - JANEIRO DE 2016

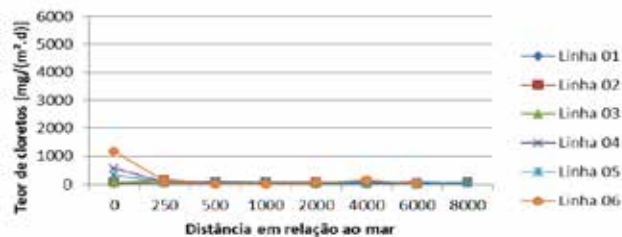


GRÁFICO 7 - DEPOSIÇÃO DO TEOR DE CLORETOS
CICLO 04 - FEVEREIRO DE 2016

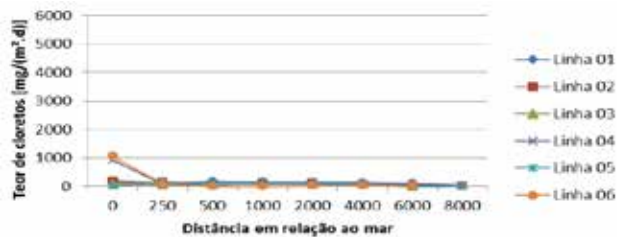


GRÁFICO 8 - DEPOSIÇÃO DO TEOR DE CLORETOS
CICLO 05 - MARÇO DE 2016



GRÁFICO 9 - DEPOSIÇÃO DO TEOR DE CLORETOS
CICLO 06 - ABRIL DE 2016

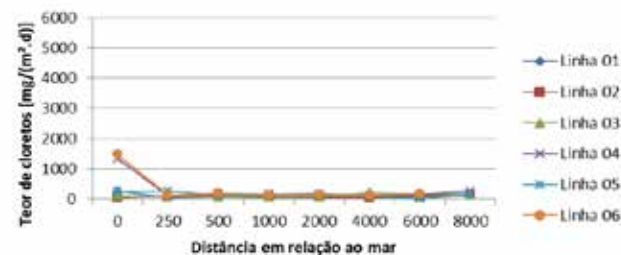


GRÁFICO 10 - DEPOSIÇÃO DO TEOR DE CLORETOS
CICLO 07 - MAIO DE 2016

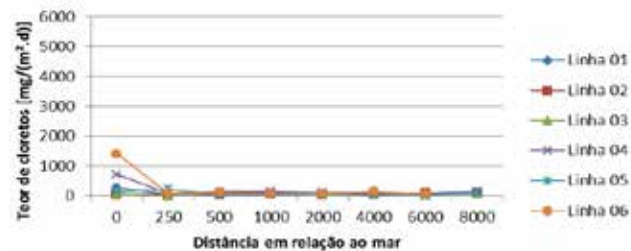


GRÁFICO 11 - DEPOSIÇÃO DO TEOR DE CLORETOS
CICLO 08 - JUNHO DE 2016

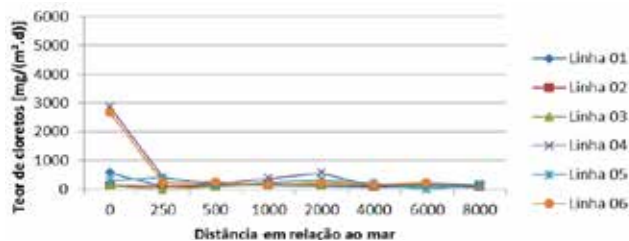


GRÁFICO 12 - DEPOSIÇÃO DO TEOR DE CLORETOS
CICLO 09 - JULHO DE 2016



GRÁFICO 13 - DEPOSIÇÃO DO TEOR DE CLORETOS
CICLO 10 - AGOSTO DE 2016

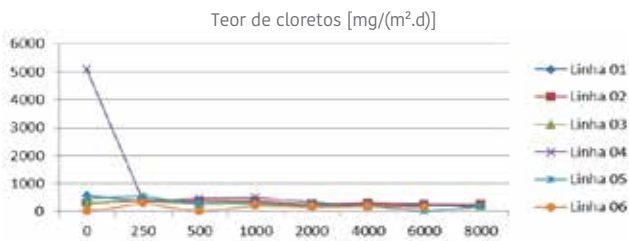


GRÁFICO 14 - DEPOSIÇÃO DO TEOR DE CLORETOS
CICLO 11 - SETEMBRO DE 2016

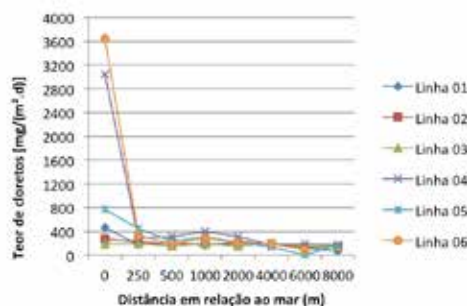
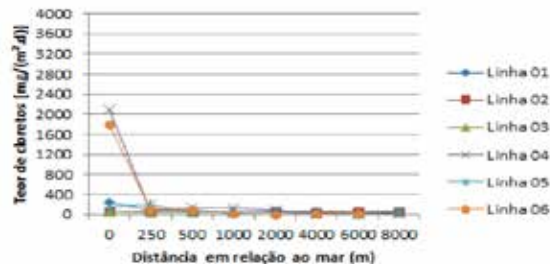


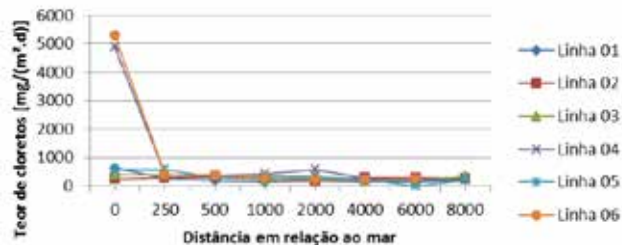
GRÁFICO 15 - DEPOSIÇÃO DO TEOR DE CLORETOS
CICLO 12 - OUTUBRO DE 2016



Verificou-se a diminuição da concentração de íons cloro no ar atmosférico à medida que a localização do ponto de coleta de dados estava mais distante do mar, coerente com os trabalhos de Portella (2013), Meira e Padaratz (2002), Pontes (2006), dentre outros. Este comportamento foi verificado independentemente do mês de exposição da vela.

Percebeu-se uma disparidade entre os resultados da Praia de Iracema (correspondente as linhas 01, 02 e 03) em relação à Praia do Futuro (correspondente as linhas 04, 05 e 06), sendo que esta última apresentou resultados muito mais elevados. O Gráfico 16 apresenta a maior concentração encontrada durante o período de estudo para em todas as linhas para todas as distâncias.

GRÁFICO 16 - MAIOR CONCENTRAÇÃO DO TEOR DE CLORETOS



O maior valor de concentração de íons cloro encontrado durante o período de exposição na Praia de Iracema (632,91 mg/(m².d)) ocorreu em Julho de 2016 (ciclo 09), época de grande velocidade dos ventos. Contudo, este teor 8,35 vezes menor que o encontrado para a região da Praia do Futuro na mesma época (5285,06 mg/(m².d)), o qual também foi o maior valor encontrado para a região.

Atribui-se essa diferença de concentração ao direcionamento predominante dos ventos haja vista que os ventos adentram a cidade pelo lado da Praia do Futuro, trazendo toda a carga de aerossol marinho e

depois que segue para a Praia de Iracema. No entanto, a partir de 500 metros do mar, observa-se que os resultados da região da Praia do Futuro e da Praia de Iracema se assemelham.

Outra característica observada foi à diferença de concentração nos primeiros metros do mar em relação aos meses de exposição. Essas diferenças de concentração estão apresentadas nos Gráfico 17 e Gráfico 18, exemplificando as linhas 01 e 04.

GRÁFICO 17 - DIFERENÇA DE CONCENTRAÇÃO DA LINHA 01 EM RELAÇÃO AOS MESES DE ESTUDO - PRAIA DE IRACEMA

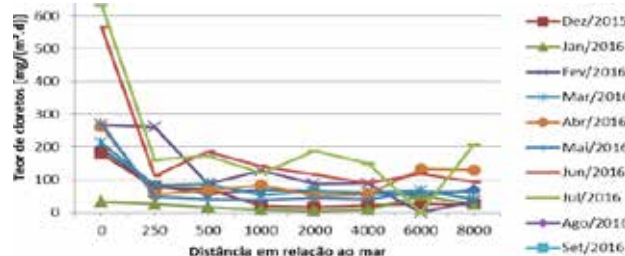
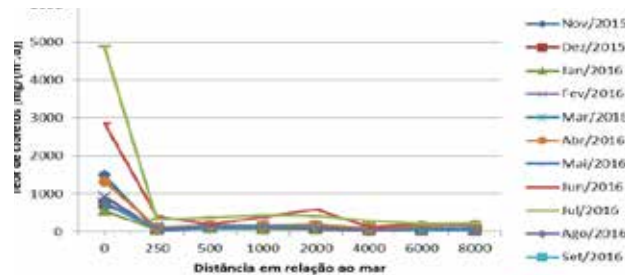


GRÁFICO 18 - DIFERENÇA DE CONCENTRAÇÃO DA LINHA 04 EM RELAÇÃO AOS MESES DE ESTUDO - PRAIA DO FUTURO



Percebeu-se que de novembro de 2015 à maio de 2016 os valores tiveram uma variação pequena, e a partir de junho de 2016 esses valores começaram a subir consideravelmente, o que foi atribuído ao período de maior intensidade e velocidade de ventos. A diferença se apresentou de forma mais evidente e com maior variação na Praia do Futuro, onde se verificou, por exemplo, que a mínima concentração encontrada no P25 (50 m do mar) da linha 04 (Praia do Futuro) foi de 550,48 mg/(m².d) e a máxima 5069,51mg/(m².d), ou seja, a máxima foi maior 9,21 vezes em relação à mínima.

COMPARAÇÃO COM OUTROS ESTUDOS

Ao se comparar os resultados deste trabalho com os de estudos anteriores realizados na cidade de Fortaleza/CE percebe-se que, nos demais trabalhos, a Praia do Futuro também apresenta resultados superiores aos da Praia de Iracema para qualquer distância estudada, conforme Tabela 3.

Nas últimas décadas alguns estudos que mediram o teor de íons cloro no ar atmosférico foram realizados na região costeira do Brasil, dentre os quais destacam-se os contidos na Tabela 4. Ao se comparar os resultados obtidos neste estudo com os resultados destas outras cidades citadas (Tabela 5), pôde-se perceber que de forma geral o comportamento da salinidade na Praia do Futuro na cidade de Fortaleza é superior ao das outras cidades.

TABELA 3 - COMPARATIVO COM RESULTADOS ANTERIORES

CIDADE	FORTALEZA / CE							
	Próprio Autor				Portella (2013)			
Fonte	Próprio Autor				Portella (2013)			
Pontos	46				4			
Período	out/2015 à out/2016				ago/2011 à jul/2012			
Local	Praia do Futuro		Praia de Iracema		Praia do Futuro			
DIST. (m)	Média	Maior	Média	Maior	Média	Média	Média	Média
15	-	-	-	-	-	-	-	3502
50	1498,77	5285,0	195,63	632,91	-	-	-	-
100	-	-	-	-	670	484,35	144,14	-
250	204,23	291,98	93,02	140,62	-	-	130,68	-
300	-	-	-	-	499	208,08	125,31	-
400	-	-	-	-	-	-	116,84	-
500	143,83	181,33	99,33	125,4	-	-	-	-
740	-	-	-	-	281	151,16	-	-
880	-	-	-	-	-	-	83,49	-
1000	147,40	206,14	105,94	119,22	162	112,93	76,76	23,6
1460	-	-	-	-	-	-	55,63	-
2000	127,73	202,69	93,23	104,21	-	-	-	-
4000	95,6	112,82	77,87	106,7	-	-	-	31,5
6000	64,12	74,97	77,55	80,66	-	-	-	-
8000	73,45	73,45	80,08	102,52	-	-	-	-

TABELA 4 - RESUMO DOS ESTUDOS NO BRASIL

CÓD.	CIDADE	REFERÊNCIA	PONTOS	PERÍODO
A	São Luís MA	Sica (2006)	15	2002 à 2005
B	Fortaleza CE	Albuquerque e Otoch (2005)	4	Ago/1990 à Out/1991
C	Fortaleza CE	Portella (2013)	4	Ago/2011 à Jul/2012
D	João Pessoa PB	Meira e Padaratz (2002)	5	Nov/2001 à Mar/2002
E	Recife PE	Pontes (2006)	5	Ago/2005 à Jan/2006
F	Maceió AL	Alves (2007)	25	Out/2006 e Nov/2006
G	Salvador BA	Costa (2001)	9	Ago/2000 à Jan/2001
H	Salvador BA	VilasBoas (2013)	20	Out/2010 à Nov/2011
I	Vitória ES	Borba Jr (2011)	5	Nov/2007 e Fev/2008
J	São Franc. do Sul SC	Vitalle (2013)	6	Jan/2011 à Mai/2012
K	Florianópolis SC	Garcia (2008)	6	Nov/2006 à Nov/2007

Até os primeiros 60 metros de distância do mar, a Praia do Futuro apresenta a maior média de concentração em relação as outras cidades (1498,77 mg/(m².d)). Em contrapartida, na Praia de Iracema, o valor médio (195,63 mg/(m².d)) é inferior Macéio e São



Francisco do Sul, o que demonstra a diferença no comportamento dentro da mesma cidade, e enfatiza que a direção predominante e velocidade dos ventos influenciam diretamente na quantidade de deposição de íons cloro.

Dentre os valores obtidos nos outros trabalhos, o maior valor encontrado para esta distância, até então, tinha sido em São Francisco do Sul/SC (590,77 mg/(m².d)) o que nos mostra que a Praia do Futuro em Fortaleza é 153,69% mais agressiva que esta cidade, conforme Tabela 5.

TABELA 5 – COMPARATIVO DA MÉDIA COM OUTRAS CIDADES

	FORTALEZA CE		D	E	F	G	H	I	J	K
	P. FUT.	P. IRAC.								
Dist. (m)	Média									
0-10	-	-	540,7	554,4	-	-	-	513,5	-	1096
11-40	-	-	-	-	740,4	-	1150,2	-	-	-
41-60	1498,7	195,63	-	-	402,5	-	-	-	590,7	-
61-100	-	-	125,2	393,0	230,5	46,2	950,8	54,83	63,51	11,5
101-150	-	-	-	-	-	21,1	225,2	125,1	-	-
151-200	-	-	13,89	145,0	-	-	562,5	-	34,1	21,1
201-250	204,2	93,02	-	40,76	64,87	-	-	43,21	-	-
251-300	-	-	-	-	-	-	303,9	-	-	-
301-500	143,83	99,33	11,74	44,06	77,09	-	156,8	-	20,14	15
501-750	-	-	-	-	46,23	4,2	108,7	5,46	16,22	6,5
751-1000	147,41	105,94	-	-	139,7	2,9	-	-	-	23,7
1001-2000	127,73	93,23	5,95	-	97,47	2,6	99,1	-	9,56	-
2001-3000	-	-	-	-	72,58	4,6	103,4	-	-	-
3001-4000	95,6	77,87	-	-	-	-	-	-	-	-
4001-6000	64,12	77,55	-	-	73,66	-	-	-	-	-
6001-8000	73,45	80,08	-	-	-	-	-	-	-	-

Quando se analisa na faixa de 201 à 250 metros percebe-se que tanto a Praia de Iracema quanto a do Futuro se mantem superiores a todas as outras cidades, sendo que a Praia do Futuro se apresenta 214,83% mais agressiva que o maior valor encontrado para esta distância, de 64,87 mg/(m².d) em Maceió/AL.

Ao se distanciar do mar percebe-se uma considerável redução na concentração de íons cloro em todas as cidades, no entanto para a faixa dos 751 à 1000, a Praia do Futuro continua apresentando valores superiores a todas as outras cidades, com 147,41 mg/(m².d), seguida de Maceió com 139,75 mg/(m².d) e seguida pela Praia de Iracema com 105,94 mg/(m².d). Verificou-se ainda que a partir dos 2000 metros há poucos dados de medição, no entanto, para os valores encontrados percebe-se que não há uma variação grande em função do aumento da distância.

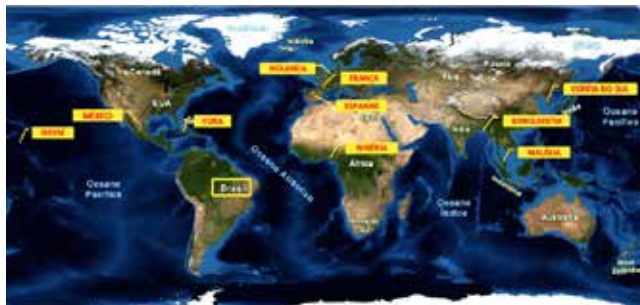
TABELA 6 - COMPARATIVO DE AGRESSIVIDADE

CIDADES	FORTALEZA-CE		MAIOR AGRESSIVIDADE/ DIST.	PRAIA DO FUTURO	PRAIA DE IRACEMA
	P. DO FUT.	P. DE IRAC.			
Distâncias (m)	Cloreto (mg/m ² .dia)	Cloreto (mg/m ² .dia)	Cloreto (mg/m ² .dia)	% mais agressivo	% mais agressivo
41-60	1498,77	195,63	S. Franc do Sul/SC 590,77	153,69%	-66,88%
201-250	204,23	93,02	Maceió/AL 64,87	214,83%	43,39%
301-500	143,83	99,33	Salvador/BA 156,86	-8,30%	-36,67%
751-1000	147,41	105,94	Maceió/AL 139,75	5,48%	-24,19%
1001-2000	127,73	93,23	Salvador/BA 99,10	28,89%	-5,92%
4001-6000	64,12	77,55	Maceió/AL 73,66	-12,95%	-5,28

Analisando os dados de forma geral, dentre as cidades estudadas, verifica-se que após Fortaleza, as cidades de Salvador/BA e Maceió/AL podem ser consideradas as mais agressivas.

Verificou-se também alguns estudos similares que foram feitos em outros países, dos quais pode-se destacar os seguintes, conforme Figura 14 e Tabela 7.

FIGURA 14 - PAÍSES COM ESTUDOS SIMILARES



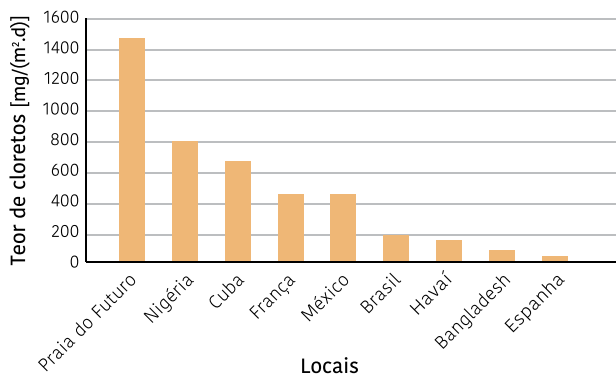
PAÍS	CONTINENTE	REFERÊNCIA	PERÍODO
França	Europa	Despiau at al (1991)	Mai/Out 1990, Mai/1991
Malásia	Ásia	Mustafa and Yosof (1994)	Jan/1991 à Dez/1991
Bangladesh	Ásia	Khandaker, Hossain and Easa (2011)	Abr/2000 à Set/2000
Coreia do Sul	Ásia	Lee and Moon (2005)	Set/200? à Ago/200?
Havai	América	Suzuki (2011)	Ago/2003 à Fev/2004
Cuba	América	Castañeda et al (2012)	Set/2007 à Ago/2008
México	América	Castañeda et al (2012)	Set/2007 à Ago/2008

TABELA 7 - RESUMO DOS ESTUDOS INTERNACIONAIS

PAÍS	CONTINENTE	REFERÊNCIA	PERÍODO
Nigéria	África	Ambler and Bain (1995)	Mai/1953 à Fev/1954
Espanha	Europa	Morcillo et al (2000)	Ago/1994 à Abr/1995
Holanda	Europa	Ten Harkel (1997)	1983 à 1994

Apesar destes países terem realizado estudos parecidos, nem todos utilizaram o mesmo procedimento, o que inviabiliza uma comparação mais exata. Contudo, nos países que adotaram a mesma metodologia, os resultados são demonstrados de formas diferentes. Então se agrupou os resultados que foram fornecidos em forma de média, no Gráfico 19 e os que apresentaram os resultados máximos no Gráfico 20.

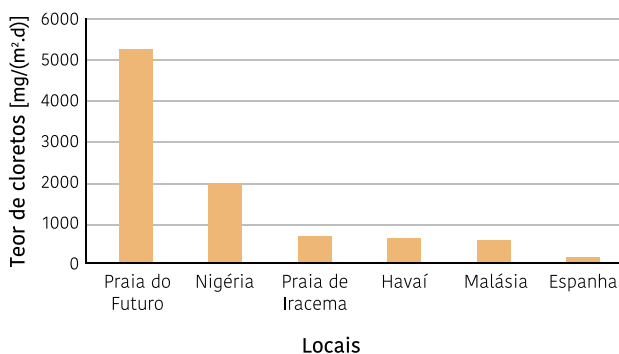
GRÁFICO 19 - CONCENTRAÇÃO MÉDIA EM ALGUNS LOCAIS



Considerando as agressividades médias encontradas, observa-se que a Praia do Futuro é 87,34% mais agressiva que a Nigéria, segunda colocada, e é 5149,63% mais agressivo que a Espanha, último colocado. Já à Praia de Iracema é menos agressiva que a Nigéria, Cuba, França e México, ficando com o resultado muito próximo ao encontrado no Havaí e bem superior a Bangladesh (237,71%) e Espanha (432,53%).

Ao se considerar a concentração máxima de cloretos medida, a Praia do Futuro ainda apresenta-se como a região mais agressiva, com mais que o dobro de tores de cloretos da segunda colocada, a Nigéria. A Praia de Iracema apresenta-se na quinta colocação.

GRÁFICO 20 - CONCENTRAÇÃO MÁXIMA EM ALGUNS LOCAIS



PENETRAÇÃO DE CLORETO EM CORPOS-DE-PROVA DE CONCRETO

Os resultados do ensaio de penetração de cloreto nos corpos de prova de concreto estão apresentados na Tabela 8.

TABELA 8 - TEOR DE CLORETOS EM PERCENTUAL EM RELAÇÃO À MASSA DE CIMENTO

PONTO	DISTÂNCIA AO MAR	CIMENTO CP II F 32			CIMENTO CP IV		
		1 CM	2 CM	3 CM	1 CM	2 CM	3 CM
P01	50 m	0,02	0,00	0,02	0,01	0,02	0,00
P02	250 m	0,03	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01
P03	500 m	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
P04	1000 m	0,01	0,01	0,01	0,00	0,10	0,01
P05	2000 m	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
P06	4000 m	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
P33	50 m	0,02	0,03	0,02	0,00	0,01	0,03
P34	250 m	0,01	0,01	0,03	0,06	0,01	0,02
P35	500 m	0,05	0,03	0,02	0,03	0,03	0,05
P36	1000 m	0,03	0,07	0,03	0,07	0,00	0,04
P37	2000 m	0,03	0,01	0,02	0,00	0,02	0,03
P38	4000 m	0,03	0,01	0,05	0,01	0,07	0,00

Verificou-se que os resultados obtidos foram bem baixos, distantes do valor limite imposto pela NBR 12655 (ABNT, 2006), que aponta um teor máximo de íons cloreto sobre a massa de cimento do concreto endurecido de 0,40% para concreto armado exposto a cloretos. No entanto, apesar de se verificar que para um período de 6 meses de exposição não houve uma penetração de cloretos que fosse significativa, já foi possível verificar um comportamento diferenciado dos valores da Praia do Futuro para os da Praia de Iracema, sendo os primeiros levemente maiores, o que entra em concordância com os resultados encontrados no ensaio da vela úmida.

PROPOSTA DE
CLASSIFICAÇÃO
DA AGRESSIVIDADE
AMBIENTAL
DE FORTALEZA

Proposta de classificação da agressividade ambiental de Fortaleza

A NBR 6118 (ABNT, 2014) apresenta as classes de agressividade ambiental, que variam da classe I (Fraca) à classe IV (Muito forte), conforme apresentado, de forma resumida, na Tabela 9.

TABELA 9 - CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL

CLASSE DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL	AGRESSIVIDADE	CLASSIFICAÇÃO GERAL DO TIPO DE AMBIENTE PARA EFEITO DE PROJETO	RISCO DE DETERIORAÇÃO DA ESTRUTURA
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana	Pequeno
III	Forte	Marinha	Grande
		Industrial	
IV	Muito Forte	Industrial	Elevado
		Respingo de Maré	

Fonte: Adaptada da ABNT 6118(2014)

Tendo em vista os resultados obtidos no estudo, procedeu-se à elaboração da classificação da agressividade da cidade de Fortaleza utilizando-se duas metodologias: a primeira considerando-se apenas o teor de cloretos no ar atmosférico medido pelo método da vela úmida, conforme metodologia de Vilasboas (2013); e a segunda relacionando-se o teor de cloretos no ar atmosférico com a penetração de cloretos no concreto, utilizando-se a metodologia de Meira (2010) e a 2ª Lei de Fick. As duas abordagens estão detalhadas a seguir.

Proposta 01

O trabalho realizado por Vilasboas (2013), em Salvador/BA, sugeriu uma classificação dos ambientes relacionando a classificação por contaminação de cloretos apresentada na NBR 14643 (ABNT, 2014) - Corrosão atmosférica - Classificação da corrosividade de atmosferas com as classes de agressividade apresentadas na NBR 6118 (ABNT,2014) - Projeto de estruturas de concreto — Procedimento., conforme apresentado no Tabela 10.

TABELA 10 – CLASSIFICAÇÃO DAS CLASSES DE AGRESSIVIDADE

ABNT NBR 6118/2014			ABNT NBR 14643/2001	
Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Risco de deterioração da Estrutura	Classificação de contaminação da atmosfera por Cl ⁻	Teor de cloretos (mg/(m ² .d))
I	Fraca	Insignificante	B0	0 < B < 3 mg/(m ² .d)
			B1	3 < B < 60 mg/(m ² .d)
II	Moderada	Pequeno	B2	60 < B < 300 mg/(m ² .d)
III	Forte	Grande	B3	300 < B < 1500 mg/(m ² .d)
IV	Muito Forte	Elevado	-	B > 1500 mg/(m ² .d)

Fonte: Adaptada de Vilasboas (2013)

Para este trabalho procedeu-se a classificação dos diversos ambientes pesquisados em termos de contaminação de cloreto, agressividade e risco de deterioração da estrutura, considerando os valores obtidos nos ensaios pelo método da vela úmida e o que dispõe a NBR 14643 (ABNT, 2001) e a NBR 6118 (ABNT, 2014).

Para esta análise foram considerados dois valores obtidos durante todo o período do estudo: os valores médios e os valores máximos. Assim, classificou-se os pontos de medição deste estudo, de acordo com os parâmetros da Tabela 03, considerando os valores médios (Figura 15) e os valores máximos (Figura 16).

FIGURA 15 - MAPA ESQUEMÁTICO DAS ZONAS DE AGRESSIVIDADE (VALORES MÉDIOS)



- CLASSE IV - MUITO FORTE
- CLASSE III - FORTE
- CLASSE II - MODERADA
- CLASSE I - FRACA

Verificou-se com o mapeamento da concentração média (Figura 15) que a cidade demonstra-se, em sua maioria, dentro da classe de agressividade II (Moderada), apresentando-se na Classe III (Forte), em apenas um ponto de medição na Praia de Iracema (ponto 01) e outro na Praia do Futuro (ponto 33), e como Classe IV (Muito Forte), em dois pontos da Praia do Futuro (pontos 25 e 41).

FIGURA 16 - MAPA ESQUEMÁTICO DAS ZONAS DE AGRESSIVIDADE (VALORES MÁXIMOS)



- CLASSE IV - MUITO FORTE
- CLASSE III - FORTE
- CLASSE II - MODERADA
- CLASSE I - FRACA

Ao se analisar os valores máximos percebe-se uma grande diferença no comportamento da agressividade na cidade, pois verifica-se que os primeiros pontos de coleta (os mais próximos do mar) da Praia do Futuro se apresentam como classe IV (Muito Forte) e os primeiros da Praia de Iracema como classe III (Forte). Ao se adentrar a cidade (se afastar do mar) percebe-se que a classe III (Forte) se apresenta na maioria dos pontos entre 1000 m e 2000 m em relação ao mar, e posteriormente passa-se para a classe II (Moderada). No entanto, os pontos 14 (4000m) e 24 (8000m) se apresentaram como classe III (Forte).

Mesmo considerando os valores máximos, percebeu-se que a classificação dos pontos de medição muda em função do período do ano. Por exemplo: ao se considerar os valores máximos de deposição de cloretos obtidos até maio de 2016, percebe-se que a cidade como um todo se caracteriza como classe II (Moderada), conforme Figura 17a. Sabe-se que neste período não se teve grande incidência de ventos fortes, no entanto nos meses seguintes (de junho a outubro), período com a maior incidência de ventos, tem-se o elevado aumento na concentração (Figura 17b).

FIGURA 17 - A) CONCENTRAÇÃO DE CLORETO DE OUT/2015 À MAI/2016. B) CONCENTRAÇÃO DE CLORETO DE JUN/2016 À OUT/2016





Considerando que as estruturas ficarão expostas a todos os períodos do ano, sofrendo todas as influências da variação de ventos, temperatura, umidade, dentre outros, propôs-se uma classificação das zonas de agressividade da cidade a partir dos valores máximos de concentração de íons cloro, encontrados no períodos de estudo. Assim, segundo este método, tem-se a classificação descrita a seguir.

Para os primeiros 250m da Praia do Futuro sugere-se a classe IV – Muito Forte, seguida da Classe III – Forte até 3000m de distância em relação ao mar, finalizando com Classe II – Moderada, até aproximadamente os 9000m. Para a Praia de Iracema se propõem que seja considerada Classe III – Forte, até os 3000m de distância em relação ao mar, com exceção da região da Linha 1, onde pode ser considerado até

os 1000m, e após, toda a região atrás da Praia de Iracema pode ser considerada como classe II – Moderada, até aproximadamente os 9000m de distância, à exceção da região do entorno dos pontos de medição 14 e 24, que são classificados como Classe III-Forte. O mapa apresentado na Figura 18 compila a classificação anteriormente descrita.

FIGURA 18 – PROPOSTA FINAL PARA CLASSIFICAÇÃO DAS ZONAS DE AGRESSIVIDADE EM FORTALEZA/CE, SEGUNDO METODOLOGIA DE VILASBOAS (2013)



- CLASSE IV - MUITO FORTE
- CLASSE III - FORTE
- CLASSE II - MODERADA
- CLASSE I - FRACA

Proposta 02

Segundo Meira (2010), uma maneira de estabelecer relações entre a taxa de deposição de cloretos sobre a vela úmida com o desempenho de estruturas de concreto é através de análise de vida útil. Para Cabral (2000), a segunda lei de Fick, apresentada na Equação 2, pode ser utilizada para prever a vida útil de um elemento de concreto armado. A penetração de agentes agressivos para o interior do concreto pode ser modelada, segundo este mesmo autor, por outras formulações, no entanto a segunda lei de Fick é a mais empregada devido à sua extrema simplicidade de resolução matemática e pela sua consagração quando comparada a outras.

$$\frac{C_x - C_0}{C_s - C_0} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D_{\text{ef}}t}}\right)$$

Onde:

- » C_x – Concentração dos cloretos na profundidade x , no tempo t ;
- » C_0 – Concentração inicial de cloretos no interior do concreto, considerado zero;
- » C_s – Concentração de cloretos na superfície do concreto;

- » X – profundidade considerada;
- » D_{ef} – Coeficiente efetivo de difusão;
- » t – duração de tempo considerado;
- » erf – função erro de Gauss.

Para se utilizar a Equação 2 na determinação da classificação da agressividade ambiental da cidade de Fortaleza, utilizou-se a seguinte sequência:

1) CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO DE CLORETOS NA SUPERFÍCIE DO CONCRETO (C_s)

Para calcular este parâmetro utilizou-se a equação da concentração máxima de cloreto na interface entre as zonas de convecção e de difusão ($C_{\text{máx}}$) apresentada por Meira (2010), apresentada na Equação 3. Tendo em vista que essa interface entre as zonas de convecção e difusão ocorre a poucos milímetros da superfície do concreto, considerou-se $C_{\text{máx}}$ igual a C_s .

$$C_{\text{máx}} = C_0 + K_{C_{\text{máx}}}\sqrt{D_{ac}}$$

Onde:

- » $C_{\text{máx}}$ – concentração máxima de cloreto na interface entre as zonas de convecção e de difusão, utilizado como C_s na equação 2;

- » C_0 – Concentração inicial de cloretos no interior do concreto, considerado zero;
- » $K_{cm\acute{a}x}$ – É um coeficiente dependente do ambiente e material utilizado no concreto, que para o presente estudo utilizou-se 0,027 para o cimento CP IV, dado este fornecido por Meira (2016), e o valor de 0,021 para o cimento CP II F, dado de Meira (2010);
- » D_{ac} – É a deposição acumulada de cloretos medidos pelo método da vela úmida. Para o cálculo deste parâmetro utilizou-se os dados coletados no ensaio da vela úmida no período de estudo (12 meses). Dividiu-se a cidade em duas regiões: a primeira chamou-se de Praia de Iracema, correspondendo aos dados das Linha 1, 2 e 3 (P01 a P24), e a segunda chamou-se de Praia do Futuro, correspondendo aos dados da Linha 4, 5 e 6 (P25 a P46).

2) DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE EFETIVO DE DIFUSÃO (D_{EF}) PARA OS CONCRETOS PRODUZIDOS COM CP II F E CP IV

O coeficiente de difusão de cloretos no concreto foi calculado conforme modelo matemático proposto por Pereira (2001). Para a autora a penetração de cloretos depende do coeficiente de difusão, e este é governado pela relação água/cimento, pelo tipo de cimento, pela presença de adições minerais, pela temperatura e pelo tempo de exposição. A autora também

utilizou em seus ensaios os cimentos CP IV e CP II F.

Os valores obtidos para os coeficientes de difusão efetivo foram:

- » $3,520 \cdot 10^{-9}$ cm^2/s , para concretos produzidos com o CP II F;
- » $1,964 \cdot 10^{-9}$ cm^2/s , para concretos produzidos com o CP IV.

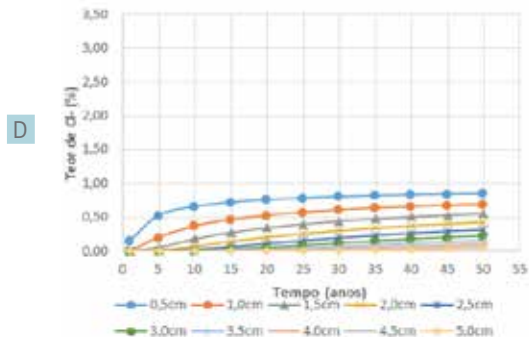
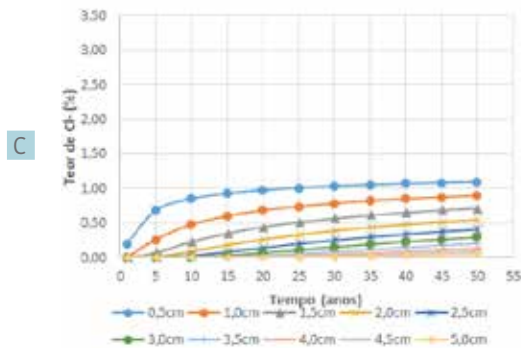
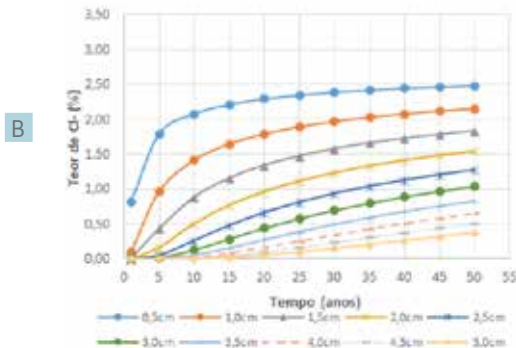
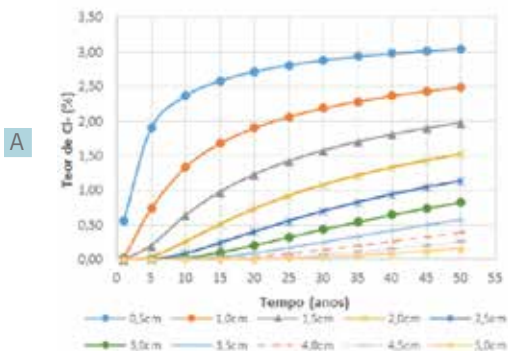
3) CÁLCULO DO TEOR DE CLORETOS NO CONCRETO (C_x) NA PROFUNDIDADE X E NO TEMPO T

Utilizando-se a equação 2 calculou-se a concentração de cloretos nas profundidades (x) de 0,5cm, 1,0cm, 1,5cm, 2,0cm, 2,5cm, 3,0cm, 3,5cm, 4,0cm, 4,5cm e 5,0cm no período de tempo (t) de 1, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 anos, para cada distância do mar avaliada (50, 250, 500, 1000, 2000, 4000, 6000 e 8000 metros) e para cada tipo de concreto com cimento utilizado (CP II F e CP IV). Este exercício resultou em 32 gráficos, dos quais, por motivos de limitação de espaço para esta cartilha, apresenta-se abaixo apenas 4 (para a distância de 50 m em relação ao mar com os cimentos CP II F e CP IV) (Gráficos 12a, 12b, 12c e 12d).

Conforme os Gráficos 21 verifica-se que o teor de cloretos no interior do concreto aumenta com o tempo e diminui à medida em que se aumenta a profundidade no concreto. Pode-se observar também que o teor de cloretos no concreto da Praia do Futuro é bem superior ao do concreto da Praia de Iracema. Perce-

beu-se também que a concentração de cloretos aumenta de forma muito elevada nos primeiros anos, para os primeiros centímetros de profundidade, e com o passar do tempo, o teor de íons cloro passa a aumentar muito pouco.

GRÁFICO 21 - PROFUNDIDADE DE PENETRAÇÃO DO TEOR DE ÍONS CLORO (%) POR TEMPO (ANOS) PARA A DISTÂNCIA DE 50M EM RELAÇÃO AO MAR. A) PRAIA DO FUTURO – CP IV; B) PRAIA DO FUTURO – CP IIF; C) PRAIA DE IRACEMA – CP IV; D) PRAIA DE IRACEMA – CP IIF



É sabido que o tempo de vida útil mínimo para estruturas de concreto é 50 anos (ABNT NBR 15575:2013), bem como que o teor limite de cloretos no concreto para que se inicie a corrosão de armaduras é de 0,40% da massa cimento (ABNT NBR 12655:2015). Assim, determinou-se as profundidades em que este teor de 0,40% é atingido aos 50 anos, os quais estão apresentados na Tabela 11.

TABELA 11- PROFUNDIDADE EM QUE O TEOR DE 0,40% DE CLORETO É ATINGIDO AOS 50 ANOS

DISTÂNCIA (M)	PROFUNDIDADE (CM)			
	PRAIA DO FUTURO		PRAIA DE IRACEMA	
	CP IV	CP II F	CP IV	CP II F
50	4,22	5,56	2,49	2,67
250	2,57	2,78	2,09	2,08
500	2,33	2,43	1,96	1,91
1000	2,37	2,48	1,89	1,81
2000	2,32	2,42	1,78	1,81
4000	1,86	1,77	1,80	1,69
6000	1,91	1,84	1,90	1,81
8000	1,91	1,84	1,40	1,61

Verifica-se que à medida que se afasta do mar a profundidade em que os íons cloreto encontram-se a 0,40% diminui, tanto para o cimento CP IV quanto para o CP II F. Este comportamento é percebido tanto na região da Praia do Futuro quanto na região da Praia de Iracema. Observa-se ainda que, na região da Praia do Futuro, com o cimento CP II F, na distância de 50 metros em relação ao mar, a penetração de íons cloreto chega a 5,56cm, logo, o cobrimento máximo de 5,0cm para viga/pilar e de 4,5cm para vigas, indicado na NBR 6118 (ABNT, 2014) para classe de agressividade IV, não seria suficiente e uma estrutura nestas condições não atenderia a previsão de vida útil de 50 anos.

Os dados da Tabela 11 foram colocados graficamente, modelando-se matematicamente o seu comportamento. Os gráficos da relação profundidade por distância e tipo de cimento para a Praia do Futuro e para a Praia de Iracema estão apresentados no Gráfico 22 e no Gráfico 23, respectivamente.

GRÁFICO 22 - RELAÇÃO PROFUNDIDADE E DISTÂNCIA AO MAR PARA A REGIÃO DA PRAIA DO FUTURO

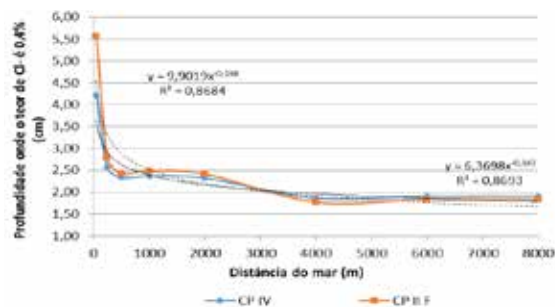
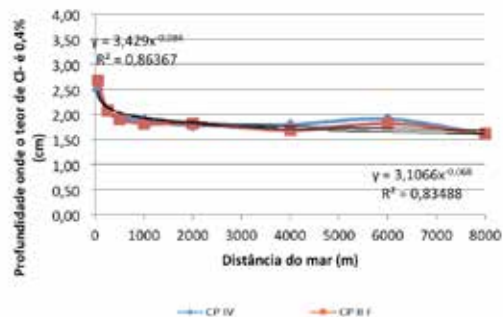


GRÁFICO 23 - RELAÇÃO PROFUNDIDADE E DISTÂNCIA AO MAR PARA A REGIÃO DA PRAIA DE IRACEMA



Com as equações oriundas destes gráficos, foi possível definir a distância do mar em que a profundidade de cobertura apresenta o teor de íons cloro de 0,40% em 50 anos, tanto para os concretos com CP II F, quanto com CP IV. Fez-se uma correlação dos resultados encontrados com as prescrições da NBR 6118 (ABNT, 2014), a qual define um cobrimento nominal para classe de agressividade III de 40mm para viga/pilar e 35mm para lajes. Partindo desta premissa calculou-se, por meio das equações dos Gráficos 14 e 15, as distâncias necessárias para que em 50 anos o teor de íons cloro máximo (0,40%) atingissem esses cobrimentos. Assim, pôde-se definir a distância limite para a classe de agressividade III, e conseqüentemente para as classes adjacentes (classe II e classe IV). Os resultados estão na Tabela 12 e esquematicamente nas Figuras 19 e 20, para as regiões da Praia do Futuro e da Praia de Iracema, respectivamente.

TABELA 12- DIVISÃO DAS CLASSES DE AGRESSIVIDADE AMBIENTAL POR DISTÂNCIA

REGIÃO	TIPO DE CIMENTO	CLASSE DE AGRESSIVIDADE			
		I	II	III	IV
Praia do Futuro	CP IIF	-	1045m-8000m	191m-1045m	0m-191m
	CP IV	-	726m-8000m	68m-726mm	0m-68m
Praia de Iracema	CP IIF	-	36m-8000m	1m-43m	0m-1m
	CP IV	-	24m-8000m	0m-24m	-

FIGURA 19 - DESENHO ESQUEMÁTICO DAS DIVISÕES DAS CLASSES PARA A REGIÃO DA PRAIA DO FUTURO

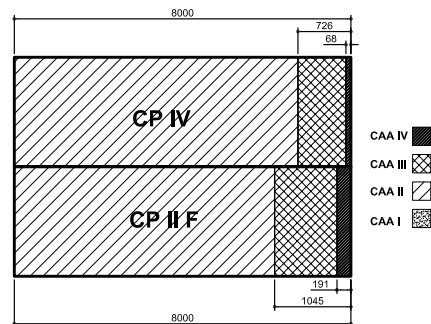
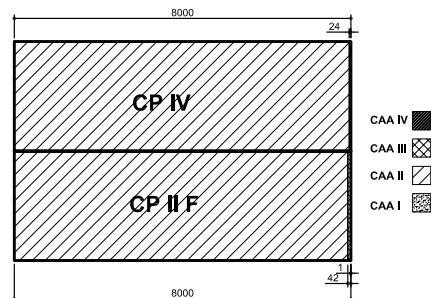


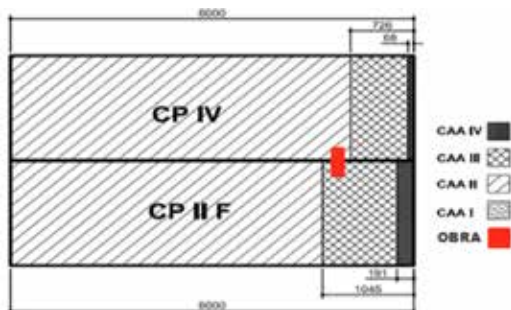
FIGURA 20 - DESENHO ESQUEMÁTICO DAS DIVISÕES DAS CLASSES PARA A REGIÃO DA PRAIA DE IRACEMA



Verifica-se com estes resultados que a delimitação da classe de agressividade ambiental vai variar não apenas em função da região da cidade mas também em função dos tipos e características dos materiais utilizados na estrutura. Como exemplo, uma estrutura a ser construída na região da Praia do Futuro, a 900 m de distância do mar (Figura 21), se ela for construída

com um concreto utilizando cimento CP IV, ela estará situada na zona de agressividade classe II (Moderada), podendo utilizar cobrimentos de 25 mm para lajes e 30 mm para vigas e pilares. No entanto, se a mesma for construída com concreto que utilizou o cimento CP II F, a mesma estará situada na zona de agressividade classe III (Forte), devendo utilizar cobrimentos de 35 mm para lajes e 40 mm para vigas e pilares.

FIGURA 21 – SITUAÇÃO HIPOTÉTICA NA PRAIA DO FUTURO



Esta diferença está relacionada principalmente devido às características distintas dos cimentos, onde o concreto produzido com o CP IV se apresentará com menor porosidade se comparado ao concreto produzido com o CP IIF. Logo, para esta obra, se construída com cimento CP II F precisará atender requisitos para classe de agressividade III (Forte), com maiores cobrimentos nominais para as armaduras, gerando mais custos para a construção, enquanto que se construída com CP IV, precisará atender requisitos para a classe de agressividade II (Moderada), reduzindo o valor global da obra.

No entanto, para propor uma classificação das zonas de agressividade ambiental para a cidade por inteira, levou-se em consideração as distâncias encontradas para os concretos produzidos com o cimento CP II F, haja vista que as mesmas também contemplam o concreto com cimento CP IV, e o no caso inverso, se adotada as distâncias para o concreto com o cimento CP IV, não atenderia aos requisitos para o concreto com o cimento CP II F. A proposta de classificação das zonas de agressividade ambiental para a cidade de Fortaleza, baseada na 2ª lei de Fick, está apresentada na Figura 22.

FIGURA 22 - PROPOSTA DE CLASSIFICAÇÃO DAS ZONAS DE AGRESSIVIDADE SEGUNDO A 2ª LEI DE FICK.





CONSIDERAÇÕES
FINAIS

Considerações Finais

Confirmou-se, com os resultados deste estudo, a alta agressividade do ar atmosférico da cidade de Fortaleza, no que diz respeito a concentração de íons cloro. Verificou-se ainda que na cidade, o comportamento da agressividade é diferente, primordialmente em função da direção dos ventos. Os valores de deposição de cloretos da região da Praia do Futuro foram os mais elevados quando se comparado aos de outras cidades brasileiras e estrangeiras, confirmando portanto que a região é altamente agressiva, o que requer diretrizes construtivas especiais para manter a durabilidade das construções nesta área.

Verificou-se também que a taxa de deposição de íons cloro tem um decréscimo exponencial, à medida que se afastam do mar, e que a partir de 500 m a 1000 m estes teores são similares para as duas regiões da cidade de estudo.

Com base nos resultados obtidos, a região da Praia do Futuro apresenta as classes de agressividade IV (Muito Forte), III (Forte) e II (Moderada), enquanto que a região da Praia de Iracema tem-se apenas as classes III (Muito Forte) e II (Moderada).



REFERÊNCIAS
BIBLIOGRÁFICAS

Referências Bibliográficas

ALBUQUERQUE, A. T.; OTOCH, S. Proposta de classificação da agressividade do ambiente na cidade de Fortaleza. In: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 47. 2005, Olinda. Anais... Olinda: IBRACON, 2005. p. 743-748

AMBLER, H.R.; BAIN, A.A.J. Corrosion of metals in the tropics. *Journal of Applied Chemistry*. p.437-467, 1955.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). ASTM D512-89: Standard test methods for chloride ion in water, USA, 1989.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14832: Cimento Portland e clínquer - Determinação de cloreto pelo método do íon seletivo. Rio de Janeiro, 2002.

_____. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2008.

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

_____. NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

BORBA JUNIOR, J. C. Agressividade ambiental em zona de atmosfera marinha: estudo da deposição de cloretos e sua concentração em concretos na região sudeste. 2011. 150 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, Vitória, 2011.

CABRAL, A. E. B. Avaliação dos sistemas de reparo utilizados em estruturas atacadas por cloretos através da resistência de polarização. 2000. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

CÁNOVAS, Manuel Fernandes. *Patologia e Terapia do Concreto Armado*. São Paulo: PINI, 1988.

CASTAÑEDA et al. Atmospheric Corrosion of Reinforced Concrete Steel in Tropical Coastal Regions. *Engineering Journal*. Volume 17 Issue 2. 2012

CIB W80/RILEM 175-SLM. Prediction of service life of building materials and components. In: Conseil International du Bâtiment pour la Recherche L'étude et la Documentation e Réunion Internationale des Laboratoires D'essais et de Recherches sur les Matériaux et les Constructions, Rotterdam, 1983. p. 98.

DESPIAU, S., COUGNENC, S. and FRESH, F. Marine and atmospheric aerosol measurements on the Mediterranean Coast. Laboratoire d'Océanographie Physique de Toulon, La Garde cedex, *Journal of Aerosol Science*., Vol. 22, Suppl. I, p. S645-S648, 1991.

HELENE, P. R. L. Manual para reparo, reforço e proteção das estruturas de concreto. São Paulo: PINI, 1992.

KHANDAKER, M. A., HOSSAIN e EASA, S. M. Spatial

distribution of marine salts in coastal region using wet candle sensors. Dept. of Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Disponível em <http://teen.ibge.gov.br/mao-na-roda/posicao-e-extensao>. Acessado em 25/09/2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais climatológicas. Brasília, DF, 2016

LEE, J. S.; MOON, H. Y. Salinity distribution of seashore concrete structures in Korea. *Building and Environment*. v. 41.p.1447-1453. 2006.

MEIRA, G. R.; PADARATZ, I. J. Efeito do distanciamento em relação ao mar na agressividade por cloretos. In: 44º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. Anais... Belo Horizonte, IBRACON, 2002.

MEIRA, G.R.; ANDRADE, C.; ALONSO, C.; PADARADTZ, I. J.; BORBA JR, J. C. Chloride penetration into concrete structures in the marine atmosphere zone – relationship between deposition of chlorides on the wet candle and chlorides accumulated into concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 29, p. 667-676, 2007.

MORCILLO, M.; CHICO, B.; MARIACA, L. OTERO, E. Salinity in marine atmospheric corrosion: its dependence on the wind regime existing in the site. *Corrosion Science*, v. 42, p. 91-104, 2000.

MUSTAFA, M. A.; YOSOF, K. M.. Atmospheric chloride penetration into concrete in semi-tropical marine environment. Department of Civil & Structural Engineering, Universiti Kebangsaan Malaysia 43600 UKM Bangi, West Malaysia. *Cement and Concrete Rematch*,

v. 24, n. 4, p. 661-670, 1994.

PONTES, Ronaldo B. Disseminação de íons cloreto na orla marítima do bairro de Boa Viagem, Recife-PE. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco, 2006.

PORTELLA, Caio S. A. Avaliação da durabilidade de concretos produzidos segundo a ABNT NBR 6118:2007 e expostos aos cloretos disseminados em névoa salina na Praia do Futuro, em Fortaleza-Ce. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

ROQUE, J. A.; MORENO JR, A. L. Considerações sobre vida útil do concreto. In: 1º Encontro Nacional de Pesquisa Projeto e Produção em Concreto pré-moldado. São Carlos (SP), 2005.

SICA, Y. C. Mapeamento da corrosividade atmosférica de São Luís – MA e a correlação das variáveis ambientais que influenciaram na degradação dos materiais metálicos. 2006. 145 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Ciências dos Materiais) – Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2006.

SILVA, Felipe A. S. Avaliação de teor de íons cloreto no ar atmosférico da praia do futuro em Fortaleza/Ce. 2011. 59f. Monografia – Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

SOUZA, Vicente Custódio; RIPPER, Thomaz. Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto. São Paulo: PINI, 1998.

TEN HARKEL, M. J. The effects of particle-size distri-

bution and chloride depletion of sea-salt aerosols on estimating atmospheric deposition at a coastal site. 1997. Atmospheric Environment. v. l. 31, n. 3, p. 417-427, Great Britain. 1997.

VILASBOAS, J. M. L. Estudo dos mecanismos de transporte de cloretos no concreto, suas inter-relações e influência na durabilidade de edificações na cidade do Salvador-BA. 2013. 323 pg. Tese (Doutorado em Energia e Ambiente) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia – UFBA, Salvador, 2013.

VITALI, M. R. V. Efeito do distanciamento ao mar da contaminação do concreto por cloretos. 2013. 208 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2013.

AUTORES



**ANTÔNIO EDUARDO
BEZERRA CABRAL**

Possui graduação em Eng. Civil pela Universidade Federal do Ceará (1997), mestrado em Engenharia Civil (Construção Civil) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (2000), doutorado em Ciências da Engenharia

Ambiental pela Universidade de São Paulo (2007), com estágio no exterior (University of Technology, Sydney - Austrália) e estágio de pós-doutorado na Universitat Politècnica de Catalunya (UPC-Barcelonatech), Barcelona, Espanha (2012). Atualmente é professor Adjunto IV do Departamento de Engenharia Estrutural e Construção Civil (DEECC) da Universidade Federal do Ceará (UFC). Atua no ensino de graduação em Engenharia Civil da UFC e no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil (PEC) da UFC, além de participar e coordenar vários projetos de pesquisa e de extensão. Tem experiência na área de Construção Civil, atuando principalmente nos seguintes temas: diagnóstico de patologias em edificações, reparo e reforço do concreto armado, concretos e argamassas especiais e gestão de resíduos sólidos da construção civil.



**ANA MARA DA
ROCHA CAMPOS**

Possui graduação em Arquitetura e Urbanismo pela Universidade da Amazônia (2009) e mestrado em Construção Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil (PEC)

da Universidade Federal do Ceará. Atua no ensino técnico de segurança do trabalho nas disciplinas de Desenho Técnico e Segurança na Construção Civil. Tem experiência na área da Construção Civil, atuando em acompanhamento de obras públicas municipais, no monitoramento de obras do Fundo Nacional de Desenvolvimento da Educação - FNDE e no monitoramento de agressividade ambiental de estruturas de concreto armado, além de experiência na área de Arquitetura, com elaboração de projetos arquitetônicos, de paisagismo e de interiores.

