A SEGURANÇA DAS OBRAS NO BRASIL DISCUTIDA SOB DIFERENTES PONTOS DE VISTA. TRAGA O SEU.
1° CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES
21 a 23 de maio de 2014 - Foz do Iguaçu - PR

AGRESSIVIDADE AO CONCRETO POR CLORETOS EM ZONA DE ATMOSFERA MARINHA NA CIDADE DE VITÓRIA

Borba Jr., J. C.[1], Calmon, J. L. [2], Meira, G. R.[3], Tristão, F. A.[2]

[1] Universidade Federal de São João Del Rei, Professor Assistente, Mestre. joseborba@ufsj.edu.br
[2] Universidade Federal do Espírito Santo, Professor Associado, Doutor
[3] Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Professor, Doutor.

RESUMO

A Zona de Atmosfera Marinha é a região do continente que apresenta concentração de cloretos no ar. Assim, ela se estende desde a linha costeira da praia até a distância aproximada de 500 metros do mar, formando uma região que é ao mesmo tempo muito habitada e agressiva ao concreto. Esse trabalho apresenta resultados de deposição de cloretos na Zona de Atmosfera Marinha e sua relação com a concentração de cloretos no concreto. Para isso, foram realizadas medidas de deposição de cloretos através do ensaio da Vela Úmida e expostos testemunhos de concretos com diferentes relações água/ cimento a 10, 120, 240 e 520 metros do mar. Os resultados mostram que a presença de cloretos na atmosfera decresce fortemente com a distância ao mar e a concentração de cloretos no concreto diminuem com a menor relação água/ cimento de seu traço.

Palavras chave: zona de atmosfera marinha, concreto, cloretos, deposição.

ABSTRACT

The Marine Atmosphere zone is the region of the continent which features concentration of chlorides in the air, so it extends from the coastline from the beach up to the approximate distance of 500 meters from the sea, forming a region that is at the same time very inhabited and aggressive to concrete. This paper presents results of deposition of chlorides in the Marine Atmosphere and its relation with the concentration of chlorides in concrete. To this end, measures were undertaken to deposition of chlorides through Wet Candle assay and exposed concrete testimonials with different water/cement ratios to 10, 120, 240 and 520 meters from the sea. The results show that the presence of chlorides in the atmosphere decreases strongly with the distance to the sea and the concentration of chlorides in concrete decrease with lower water/cement ratio of your dash.

Keywords: Atmospheric marine zone, concrete, chloride, deposition.

1. INTRODUÇÃO

Desde a publicação da NBR 6118 (ABNT, 2007)[1] em 2003 a durabilidade dos concretos passou a ser considerada de acordo com o local de exposição: zona rural, de agressividade fraca; zona urbana, de agressividade moderada; zona marinha ou industrial, de agressividade forte e zona de respingo de maré ou industrial, de agressividade muito forte.

No entanto, a região próxima ao mar, tratada pela Norma como zona marinha ou de respingo, pode ser dividida e cinco regiões (Swammy *et al.,* 1994): zona submersa, zona de flutuação de maré, zona de respingo, zona de *spray* e zona de solo ou Zona de Atmosfera Marinha (Figura 1). Essa última ocorre a partir da distância de 10 metros do mar e é caracterizada pela presença névoa salina no ar.

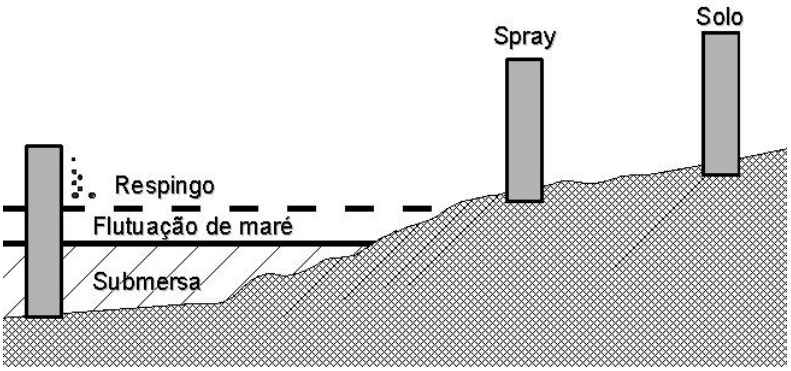


Figura 1: zonas marinhas de agressividade ao concreto.

O aerossol marinho, por sua vez, é gerado através do da quebra de ondas do mar, que formam bolhas carregadas de sais e também pelo atrito do vento com a superfície da água (FITZGERALD, 1991; MCKAY *et al.,* 1994). Na primeira situação, porém, a formação de sais é maior. Na Zona de Atmosfera Marinha (ZAM), a presença de cloretos é responsável por até 15% da concentração de partículas na atmosfera (WU *et al.*, 2006).

Após ser formado, o aerossol é conduzido ao continente pela força do vento (FITZGERALD, 1991). Assim, a velocidade do vento é fator fundamental para a presença de cloretos na ZAM. Em estudo realizado no nordeste brasileiro, Meira *et al.* (2006) demonstraram que os ventos com velocidade acima de 3 m/s contribuem de forma mais acentuada à presença de cloretos na atmosfera.

Como esperado, a concentração de cloretos na atmosfera é maior quanto mais próximo do mar devido à dois fatores: a presença de obstáculos no caminho percorrido pelo vento e a

[1] A versão mais recente e que está em vigor é de 2007, porém os conceitos de durabilidade foram implementados em uma versão anterior da NBR 6118 de 2003.

deposição das partículas salinas maiores, que sofrem o efeito da força de gravidade já nas primeiras distâncias em relação ao mar (GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996). A Figura 2 mostra esse comportamento combinado: na zona costeira a inclinação da reta da função velocidade versus concentração é maior, enquanto que no continente essa mesma inclinação diminui com o distanciamento ao mar.

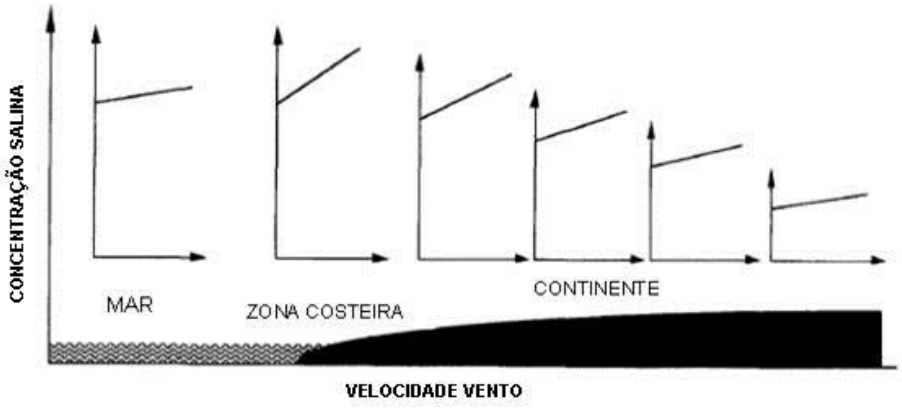


Figura 2 – Relação entre velocidade dos ventos, concentração salina e distância em relação ao mar. (GUSTAFSSON; FRANZÉN, 1996).

A presença de partículas de cloreto na atmosfera é um indicativo da agressividade às estruturas de concreto. O cloreto se deposita sobre as superfícies das estruturas e penetram no seu interior através de sua rede de poros. Dessa forma, inicia-se o transporte de cloretos no interior do concreto, podendo atingir sua armadura e causar danos estruturais (ANDRADE, 1992).

A concentração de cloretos no concreto, segundo Costa e Appleton (1999), cresce com a agressividade do ambiente e com o tempo. O mesmo autor ainda cita que concretos com maior relação água/ cimento têm maiores concentração de cloretos, devido às condições favoráveis de seu ingresso e transporte no interior da estrutura.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização ambiental

Devido à forte influência de fatores climáticos e ambientais na agressividade marinha, foi realizado um programa experimental para caracterizar a ZAM na cidade de Vitória.

Medidas de temperatura, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade e direção dos ventos foram obtidas através dos dados gerados pela Estação Automática do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) em Vitória e disponibilizados na rede mundial de

computadores. Os locais de exposição ficam a menos de 20 km da estação, dentro de sua zona de abrangência.

Para a determinação da deposição de cloretos na atmosfera, usou-se o método da Vela Úmida, conforme definido na norma ASTM G140 (ASTM, 2002). Esse ensaio consta de uma gaze com as pontas em contato com água deionizada dentro de um frasco de Erlenmeyer e enrolada em um tubo exposto ao ar. Os cloretos presentes na atmosfera se depositam na gaze e se transportam para a água por difusão iônica. Após 21 dias de exposição, esse líquido foi recolhido e levado para laboratório para determinação de cloreto por volumetria, com solução de Nitrato de Prata.

Os locais de exposição foram escolhidos de acordo com a disponibilidade de terrenos, a proximidade do mar e a falta de obstáculos para melhores resultados. Dessa forma, ficaram definidos dois locais de exposição e quatro pontos: a praia de Manguinhos, com um ponto a 10 metros do mar e o Aeroporto de Vitória, com pontos a 120, 240 e 520 metros do mar. A Figura 3 mostra a localização dos pontos.



Figura 3: locais de exposição em Vitória.

2.2 Concentração de cloretos em concreto

Os mesmos pontos de exposição definidos para a vela úmida foram utilizados para a exposição natural de testemunhos de concreto. Com exceção do ponto a 10 metros do mar, na praia de Manguinhos, por não haver autorização do proprietário do terreno.

Foram compostos três traços de concreto, modificando a relação água/ cimento: 0,55 (T55), o máximo permitido por Norma; 0,65 (T65), para caracterizar um concreto mais pobre e 0,45 (T45) para avaliar um concreto de melhor desempenho. Os traços de concreto podem ser vistos na Tabela 1. Os concretos foram confeccionados com cimento CPIII40, areia natural de rio lavada com D_{max} de 2,4 mm e brita granítica de D_{max} 19 mm.

Para fins de caracterização dos concretos no estado endurecido, foram feitas as determinações de resistência à compressão axial, absorção, resistência à tração diametral e penetração de íons cloretos.

Tabela 1: traços de concreto obtidos na pesquisa.

Concreto	a/c	Consumo de cimento (kg/m³)	Teor de argamassa	Teor de aditivo (massa)	Traço (massa)
T45	0,45	352,7	45,6%	0,23%	1:1,84:3,40:0,45
T55	0,55	363,1	45,0%	-	1:1,83:3,46:0,55
T65	0,65	322,0	49,7%	-	1:2,47:3,44:0,65

Após 10 meses de exposição natural, foi feita a determinação da concentração de cloretos no concreto. Para tal, os concretos expostos foram recolhidos e levados ao laboratório para retirada da amostra através da perfuração controlada de camadas de concreto. A determinação de cloretos foi feita através do método da titulação potenciométrica, descrita pela norma ASTM C1152 (ASTM, 2003). A Figura 4 mostra a exposição simultânea da vela úmida e dos testemunhos de concreto.

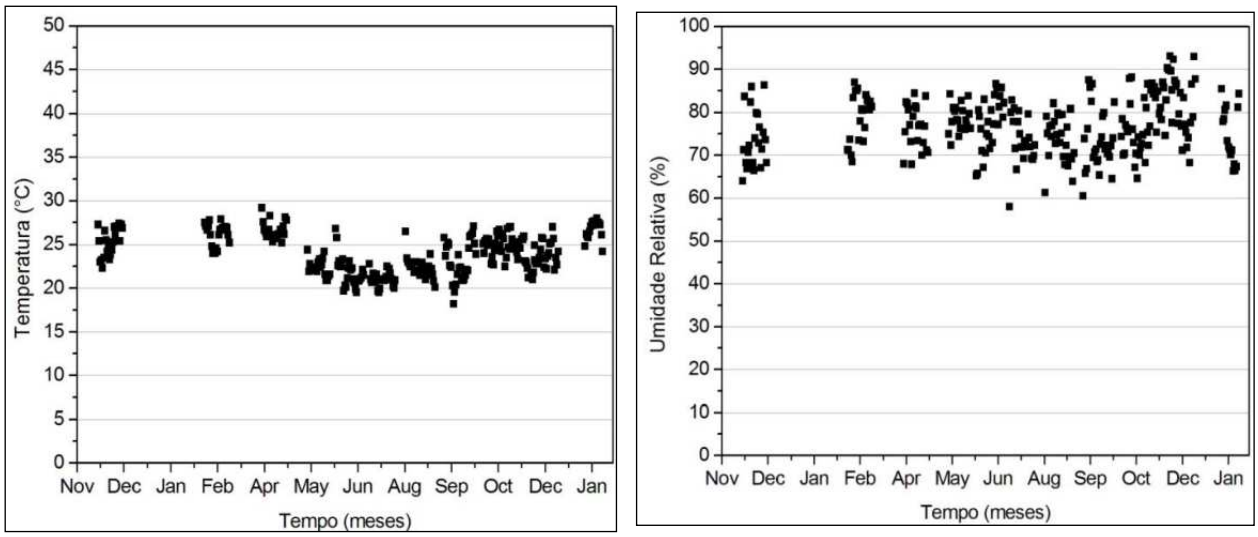


Figura 4: exposição dos concretos e da vela úmida.

3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

3.1 Estudo climático

A temperatura e a umidade relativa do ar (UR) apresentaram comportamento cíclico durante os meses de exposição, conforme perfil climático da região. As médias diárias de temperatura se apresentaram mais altas entre dezembro de 2007 até abril de 2008, sempre acima de 25 °C. Entre maio e outubro, há um período frio, com temperaturas médias entre 20 °C e 25 °C, seguido de uma nova estação quente (Figura 5a). A UR média se encontra entre 60 e 90%, o que caracteriza o clima úmido de Vitória. A UR mais alta foi encontrada no mês de novembro, chegando a ultrapassar os 90%, enquanto que os valores mais baixos se encontram no mês de julho, com valores diários de UR na casa dos 60% (Figura 5b).



(a) (b)

Figura 5: temperatura média (a) e umidade relativa do ar (b) obtidas no período de estudo.

Sobre o regime dos ventos, eles se apresentara fracos, com velocidade entre 1 e 3 m/s. Nos meses de dezembro de 2007 e setembro e outubro de 2008, ocorreram os picos das médias de ventos registradas, acima de 3 m/s, porém nunca maior que 4m/s o que ainda os caracteriza como fracos. Já sobre a direção dos ventos, há uma predominância dos ventos entre as direções norte e nordeste.

Devido à exposição ser feita em dois terrenos diferentes – Manguinhos e Aeroporto – a ocorrência de ventos provenientes do mar muda com o local de exposição. Nota-se que os ventos com velocidade acima de 3 m/s compõem uma baixa proporção em relação ao total. Sobre os ventos marinhos, os de Manguinhos são sempre mais freqüentes que o terreno do Aeroporto (Tabela 2).

Tabela 2: proporção de ventos com velocidade acima de 3 m/s e dos ventos provenientes do mar, em Manguinhos e no Aeroporto.

	Ocorrência de ventos		
	V ≥ 3 m/s	**Marinhos – Mang.**	**Marinhos - Aero**
Mar/08	11,1%	50,5%	38,6%
Abr/08	10,4%	52,0%	34,3%
Mai/08	6,3%	41,3%	43,6%
Jun/08	11,2%	41,5%	35,4%
Jul/08	14,2%	50,6%	40,3%
Ago/08	20,0%	55,3%	34,8%
Set/08	26,3%	65,4%	47,0%
Out/08	30,2%	67,5%	40,9%
Nov/08	16,1%	67,7%	47,4%
Dez/08	10,7%	62,7%	50,5%

3.2 Deposição de cloretos

A deposição de cloretos medida no período de estudo pode ser vista na Figura 6. Os meses com maior velocidade de ventos foram os que apresentaram também a maior deposição. Devido aos ventos fracos, não foram observados valores altos de deposição em nenhum ponto. Em relação à distância ao mar, foi apresentado o mesmo comportamento de outros estudos (Meira *et al*., 2006; Gustafsson e Franzén, 1996), com alta concentração nos pontos mais próximos ao mar, forte queda a partir dos 200 metros e baixíssima concentração aos 500 metros.

A Tabela 1 mostra os valores de deposição de cloretos média e a deposição acumulada de cloretos para cada ponto de exposição. Os valores indicam uma baixa oferta de cloretos na atmosfera na região de Vitória, que pode ser explicado pela baixa intensidade dos ventos. A deposição média é calculada pela média aritmética dos valores de deposição de cada mês. A deposição acumulada é a soma mês a mês de todos os valores de deposição, multiplicados pelo tempo de exposição de 30 dias.

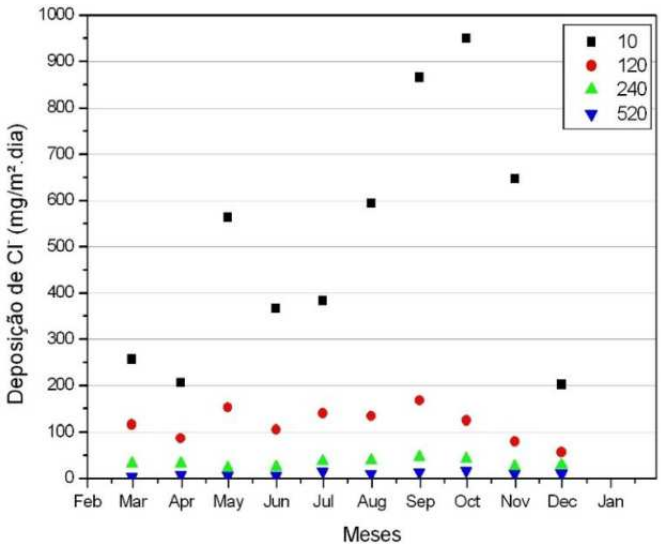


Figura 6: deposição de cloretos durante o período de estudo.

Tabela 1: deposição média e deposição acumulada em cada ponto de exposição.

Distância ao mar (m)	Deposição média (mg/m².dia)	Deposição acumulada (g/m²)
10	502,08	165,69
65	62,16	20,51
120	116,65	38,49
240	32,60	10,76
520	9,40	3,10

3.3 Caracterização dos concretos

Os resultados da caracterização do concreto no estado endurecido são vistos na Tabela 4. A resistência mecânica – tração e compressão – aumentou com a diminuição da relação água/cimento, devido à maior porosidade dos concretos com teor de água elevado.

Os valores de absorção apresentaram comportamento imprevisto. O concreto C65, com maior teor de água, apresentou o menor valor de absorção por imersão. Esse fato pode ser atribuído ao maior teor de argamassa desse concreto, que, apesar de não diminuir a porosidade total do concreto, pode ter causado um fechamento do caminho que compõe a rede de poros.

O ensaio de penetração de íons cloretos, realizado aos 90 dias de idade, apresentou valores de penetrabilidade moderada a muito baixa. Mais uma vez, a maior porosidade dos concretos com elevada relação a/c prevaleceu no comportamento dos resultados.

Tabela 4: caracterização dos concretos utilizados na pesquisa.

Determinações	**Traço**	**Valores**	**Método de ensaio**
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	C45	47,4	NBR NM 101
	C55	34,5	
	C65	26,4	
Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias (MPa)	C45	4,0	NBR 7222
	C55	3,6	
	C65	3,1	
Absorção por imersão (%)	C45	3,47	NBR 9778
	C55	4,69	
	C65	2,23	
Penetração de íons cloretos (C)	C45	540,5[1]	ASTM C 1202
	C55	1609,5[2]	
	C65	2469,5[3]	

1 – penetrabilidade muito baixa
2 – penetrabilidade baixa
3 – penetrabilidade moderada

3.4 Concentração de cloretos em concreto

Os resultados de concentração de cloretos no interior do concreto foram obtidos através de perfis, vistos nas Figuras de 7 a 9. Os perfis de cloretos têm por característica o aumento de concentração até atingir um pico, próximo da superfície, após o qual os valores decrescem. Os perfis obtidos apresentam valores de concentração muito próximos, devido ao pouco tempo de exposição e à baixa oferta de cloretos na atmosfera nos pontos localizados no Aeroporto.

Nos concretos C45 e C55 é observada uma tendência da diminuição da concentração de cloretos com o afastamento do mar. Os concretos expostos a 520 metros ainda sobre os

concretos mais compactos, é possível notar que o pico da concentração de cloretos ocorre entre 5,5 mm e 10,5 mm da face exterior do concreto. Alguns estudos mostram que a tendência é que o pico se desloque ao interior do concreto com o passar do tempo (COSTA; APPLETON, 1999; MEIRA et al, 2007). Apesar dos resultados obtidos, é necessário considerar o pouco tempo de exposição dos concretos antes de estabelecer um comportamento.

O concreto C65, devido à sua maior porosidade e interação com o meio, apresentou picos de concentração aos 10,5 mm e com valores semelhantes para as duas distâncias ao mar. Entre 0 e 10,5 mm, a interação com o meio prevaleceu e a concentração de cloretos não apresentou um comportamento adequado. Na parte mais interior do concreto – a partir do pico de concentração – a maior proximidade do mar não gerou uma maior concentração de cloretos, com valores bem semelhantes aos 120 e 520 metros.

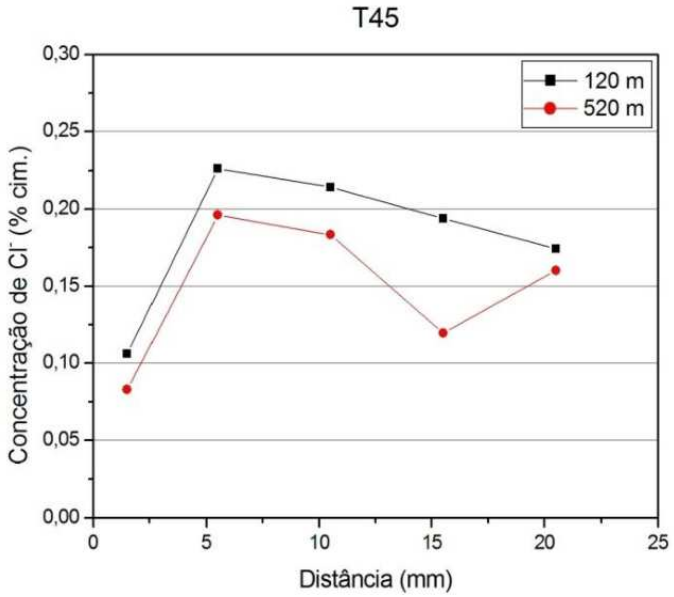


Figura 7: perfis de cloreto em concreto, T45.

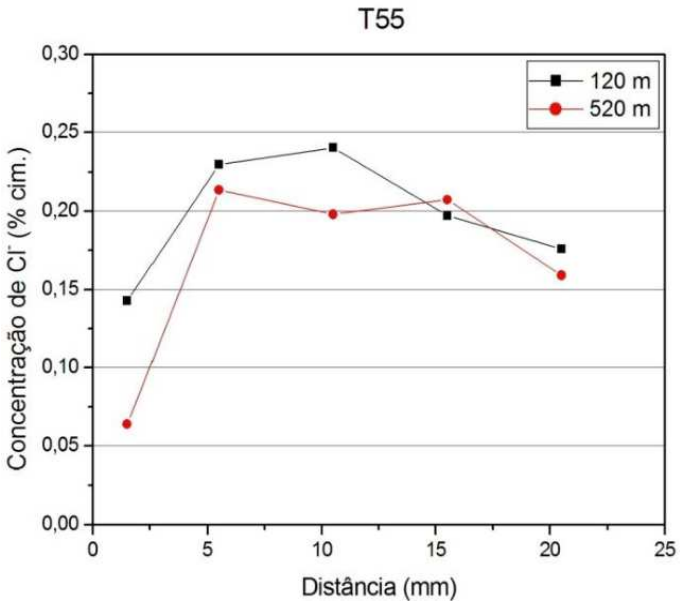


Figura 8: perfis de cloreto em concreto, T55.

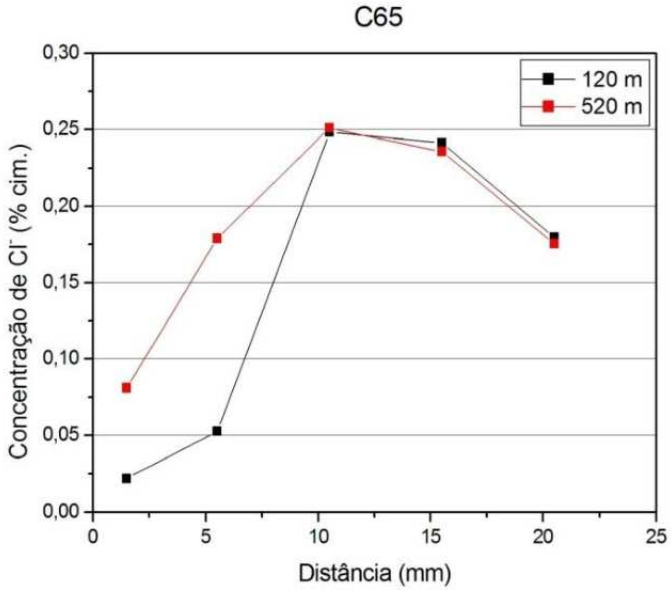


Figura 9: perfis de cloretos em concreto, C65.

3.5 Concentração média de cloretos no concreto e sua relação com a deposição de cloretos na atmosfera.

Os cloretos presentes na atmosfera se depositam na superfície das estruturas de concreto. Com o acúmulo dessa deposição e pelo efeito de difusão iônica, os cloretos se deslocam para o interior do concreto, formando os perfis vistos no item anterior. Dessa forma, quanto maior a

deposição acumulada, maior é a quantidade de cloretos no concreto. Meira et al. (2007) relaciona esses dois parâmetros através da Equação 1:

$$C_{tot} = C_{tot0} + k_{d.}\sqrt{D_{ac}} \qquad (1)$$

Onde:

Ctot – Concentração média de cloretos no concreto (% massa cimento);

$Ctot_0$ – Concentração inicial de cloretos no concreto (% massa cimento);

k_d – coeficiente que depende do material e do ambiente;

D_{ac} – Deposição acumulada de cloretos (g/m2).

Nesse estudo, a adequação da Equação de Meira aos parâmetros locais está apresentada na Tabela 5. Cabe esclarecer que esse comportamento foi obtido a partir de dados de apenas dois pontos de exposição, o que empobrece a análise. Além da pouquíssima quantidade de dados, os valores de C_{tot0} foram considerados como 0,05 % em relação à massa de cimento.

Os valores da Tabela 5 mostram um crescimento do coeficiente k_d com o aumento da relação água/ cimento. A maior porosidade dos concretos com maior teor de água de amassamento facilita a entrada de cloretos no interior do concreto. A exceção desse comportamento é o concreto C65, que sofreu com a maior interação com o meio e o efeito de lavagem, reduzindo seus valores de C_{tot}.

Tabela 5: valores da Equação de Meira de deposição acumulada versus concentração média.

	C_{tot0} (% cim.)	k_d	Função
T45	0,05	0,02401	$C_{tot} = 0{,}05 + 0{,}02401\sqrt{D_{ac}}$
T55	0,05	0,02699	$C_{tot} = 0{,}05 + 0{,}02699\sqrt{D_{ac}}$
T65	0,05	0,02045	$C_{tot} = 0{,}05 + 0{,}02045\sqrt{D_{ac}}$

A figura 10 mostra o gráfico da extrapolação das funções da Tabela 5 para valores de deposição acumulada além das obtidas no período de estudo. As linhas verticais traçadas no gráfico mostram a interseção da deposição acumulada aos 10 m e 120 m, durante o período de estudo, com as curvas de C_{tot} em função de D_{ac} para cada tipo de concreto.

Com isso, pode-se presumir que a concentração média aos 10 m, após os 10 meses de exposição seria de cerca de 0,4 % em relação à massa de cimento. Esse valor nos remete a um ambiente demasiadamente agressivo, comparando com os dados obtidos em Meira *et al.* (2007). Aos 120 metros, a diferença entre o valor obtido experimentalmente e o obtido através da equação é de 8,7% e 10,2% para os concretos C45 e C55, respectivamente.

Pode-se dizer que as equações da Tabela 5 são adequadas para valores médios de deposição, mas não são satisfatórias quando a oferta de cloretos na atmosfera é maior.

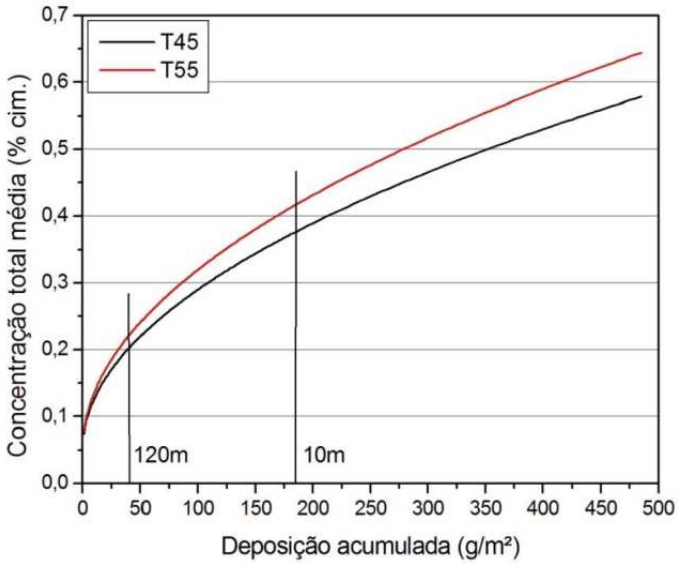


Figura 10: concentração média de cloretos no concreto em função da deposição acumulada de cloretos na atmosfera.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A região de estudo apresentou clima tipicamente tropical litorâneo, com temperaturas chegando até 35ºC no verão e alta umidade relativa do ar. Durante o período de estudo, os ventos se mostraram fracos, com velocidades médias mensais entre 1,0 e 3,0 m/s. Os ventos provenientes do mar foram maiores na região de Manguinhos do que no Aeroporto.

A deposição de cloretos sofreu com a fraca ocorrência dos ventos de maior velocidade apresentando valores altos apenas nos meses de setembro e outubro, quando ocorrem os picos de vento. Sobre o efeito da distância ao mar, foi possível estabelecer uma relação exponencial negativa entre os dois parâmetros, mostrando a diminuição na concentração de cloretos com o afastamento da costa.

Os concretos utilizados na pesquisa tiveram desempenho aos esforços mecânicos melhor com a diminuição da relação água/cimento. De forma semelhante, os concretos mais compactos apresentaram maior resistência à penetrabilidade de cloretos.

A concentração de cloretos no concreto apresentou a presença de duas zonas distintas: uma zona de pele, exterior ao concreto, que interage com o meio e outra zona interna, onde a concentração de cloretos diminui conforme se penetra no interior do concreto. A zona de pele é maior para concretos com maior relação a/c, devido à maior interação desses concretos com o meio. O efeito da distância ao mar na concentração de cloretos também pode ser notado, principalmente nos concretos mais compactos.

A deposição acumulada de cloretos contribuiu para a concentração de cloretos no concreto. A equação de Meira (2007) foi utilizada como ferramenta para estabelecer essa relação. Porém, o pouco tempo de exposição somado à exposição dos concretos em locais afastados do mar prejudicaram a adequação da Equação de Meira ao ambiente de estudo, retornando valores de concentração elevados. Essa concentração empiricamente elevada sugere um cenário de agressividade demasiada, fato que não se justifica tomando em conta os valores de deposição de cloretos obtidos ao longo do estudo.

5. REFERÊNCIAS

American Society for Testing and Materials (ASTM). **Standard test method for determining atmospheric chloride deposition rate by wet candle method**. ASTM G-140. v.03.02., 2002.

American Society for Testing and Materials (ASTM). **Standard test method for acid-soluble chloride in mortar and concrete**. ASTM C-1152. v.04.02., 2003.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armadura.** Trad: Antonio Carmona Filho & Paulo Helene. Pini: São Paulo, 1992.

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). **Projeto de estruturas de concreto** - Procedimento. NBR 6118. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

COSTA, A.; APPLETON, J. Chloride penetration into concrete in marine environment – part II: prediction of long term chloride penetration. **Materials and Structures**, v.32, p.354-359, 1999.

FITZGERALD, J.W. Marine aerosols: a review. **Atmospheric Environment**, v. 25A, N.3/4, p. 533-545, 1991.

GUSTAFSSON, M.E.R.; FRANZÉN, L.G. Dry deposition and concentration of marine aerosols in a coastal area, SW Sweden. **Atmospheric Environment**, v. 30, n. 6, p. 977-989, 1996.

McKAY, W. A.; GARLAND, J. A; LIVESLEY, D.; HALLIWELL, C. M.; WALKER, M. I. The Characteristics of the shore-line sea spray aerosol and the landward transfer of radionuclides discharged to coastal sea water. **Atmospheric Environment,** v. 28, n 20 p 3299-3309, 1994.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, M. C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; BORBA JR., J. C. Measurements and modeling of marine salt transportation and deposition in a tropical region in Brazil. **Atmospheric Environment,** 40, 2006, p. 5596-5607.

MEIRA, G. R.; ANDRADE, M. C.; PADARATZ, I. J.; ALONSO, M. C.; 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,** 29, 2007, p. 667-676.

SWAMY, R.N.; HAMADA, H.; LAIW, J. C. A critical evaluation of chloride penetration into concrete in marine environment. **International Conference on Corrosion and Corrosion Protection of Steel in Concrete.** Sheffield: Sheffield Academic Press, 1994. p. 404-419.

WU, D.; TIE, X.; DENG, X. Chemical characterizations of soluble aerosols in southern China. **Chemosphere.** 64, 2006, p. 749-757.