

Clasificación de la agresividad costera de Recife en función del nivel de contaminación por cloruros

Bezerra-Pontes, R.¹, Barreto-Monteiro, E. C.², Almeida-de Oliveira, R.², Carvalho-de Paiva, S.²

Fecha de recepción: 17 de enero de 2011 – Fecha de aprobación: 15 de abril de 2011

RESUMEN

Frente a la exposición de la neblina salina, las estructuras de concreto pueden sufrir ataques de cloruros, provocando corrosión en las armaduras. Las piezas orientadas hacia los vientos dominantes se encuentran más susceptibles, especialmente aquellas que poseen gran superficie con relación al volumen, como es el caso de pilares y vigas. Los iones cloruro llegan a la superficie de las estructuras en distintos niveles de concentración, dependiendo de la distancia de su fuente generadora, en este caso, el mar. El presente trabajo tiene por objetivo evaluar el nivel de agresividad marina en la zona costera de la región metropolitana de Recife, en función de su distancia con relación al mar, midiendo el índice de depositación de cloruros por el método de la vela húmeda, teniendo como apoyo el monitoreo del ambiente. Los resultados indican que la depositación de cloruros disminuye, en una relación del tipo exponencial, a medida que existe un aumento de la distancia con relación al mar, y que la agresividad es significativa en hasta 400 metros de la costa marítima.

Palabras clave: atmósfera marina, corrosividad atmosférica, depositación de cloruros, vela húmeda.

Classification of onshore aggressiveness in Recife as a function of the chloride contamination level

ABSTRACT

On exposing concrete structures to saline mist, they can suffer chloride attack, which could cause reinforcement corrosion. The structures directly facing dominant winds are most susceptible, especially those with greater surface areas in relation to volume, as pillars and beams. The chloride ions reach the surface of structures at different levels of concentration, depending on the distance from their origin, in this case, the sea. The purpose of this research is to evaluate the level of marine aggressiveness, in the onshore zone of Recife-PE, as a function of distance from the sea, measuring the value of chloride deposition using the wet candle method, using environmental management as support. The results indicate that chloride deposition decreases, in exponential relation, when there is an increase in distance from the sea, and that aggressiveness is significant up to 400 m from the marine edge.

Keywords: atmospheric corrosivity, chloride deposition, marine atmosphere, wet candle.

¹ Associação Instituto de Tecnologia de Pernambuco, Unidade de Engenharia Civil, Recife, Pernambuco, Brasil. Correo electrónico: ronaldobpontes@yahoo.com.br

² Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Pernambuco, Brasil. Correos electrónicos: nana.monteiro@uol.com.br, romilde@unicap.br, spaiva@unicap.br

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1º de noviembre de 2011. Este artículo de investigación es parte de **Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán**, Vol. 15, No. 1, 2011, ISSN 1665-529X.

INTRODUCCIÓN

Pueden presentarse patologías cuando existen vulnerabilidades en el sistema acero/concreto, que necesitan ser adecuadas a la situación de exposición. En dicha acepción uno de los agentes más agresivos para las estructuras de concreto son los iones cloruro de la atmósfera marina, que se encuentran en suspensión en el aire. En la costa, las sales retiradas del mar por el oleaje y transportadas por el viento pueden recorrer grandes distancias y depositarse sobre el concreto en la forma de pequeñas gotas de agua.

Los iones de cloruro agreden al acero del concreto reforzado, atacando a la capa pasivante de manera puntual, corrosión ésta conocida con el nombre de picadura. Esta corrosión puede avanzar y provocar la ruptura puntual de la barra de acero (Andrade 1992). En las reacciones de ataque al acero, el producto final de la corrosión no consume cloruro, pudiendo este proceso acarrear grandes agresiones al acero, incluso para tenores bajos de iones de cloruro.

La acción agresiva tiene origen en la formación y en el transporte del aerosol marino, donde el viento ejerce un papel importantísimo (Spiel y Leew 1996). Los cloruros, parte integrante de este aerosol, son transportados por el desplazamiento de las masas de aire y se depositan en la superficie del concreto. A partir de este punto, se transportan para su interior por medio de mecanismos que involucran convección y difusión.

La última revisión de la NBR 6118 (2007) que determina parámetros de proyecto para las estructuras de concreto, trae como una de las novedades principales la introducción de clases de agresividad ambiental. En total son cuatro niveles, que va desde ambientes menos agresivos hasta lugares con agresividad muy elevada, en una escala de I a IV. Son ellos los niveles de agresividad que van a definir, por ejemplo, cuál es el tipo de concreto a ser empleado, la relación agua/cemento adoptado, el cubrimiento nominal, además de exigencias referentes a la fisura. Las estructuras expuestas a la atmósfera marina se encuadran en las clases III, de manera indirecta, o IV, cuando llegan a recibir salpicaduras de la marea; no obstante, en la NBR 6118 (2007) no existen datos numéricos disponibles que caractericen cada clase, con relación al nivel de agresividad.

Los iones de cloruro alcanzan a la superficie de las estructuras a diferentes grados de concentración, subordinados a la distancia con relación a su fuente generadora que es el mar. De esta manera, las estructuras deben lidiar con diferentes niveles de

agresividad, en función del distanciamiento del mar. El comportamiento de las estructuras, cuando se distancian del mar, ha sido poco estudiado. No obstante, Brasil es un país con una amplia costa y con una respetable ocupación urbana en dicha región. Por consiguiente, evaluar el comportamiento de la agresividad de la atmósfera es de capital importancia para el ajuste del proyecto y de la ejecución de nuevas estructuras al medio, así como de la intervención en estructuras ya existentes.

Albuquerque y Otoch (2005) presentaron una propuesta para la elaboración del mapeo de la agresividad ambiental en la ciudad de Fortaleza y destacaron que la metrópolis precisa de un estudio particular que sirva de fundamentación para la clasificación del ambiente, según las prescripciones de la NBR 6118 (2007), y que con ello los cuidados allí indicados sean correctamente adoptados.

Meira (2004) llevó a cabo un estudio, colocando el aparato de la vela húmeda en cinco puntos de monitoreo (10, 100, 200, 500 y 1100 m), a lo largo de la costa de la ciudad de João Pessoa, durante el período comprendido entre noviembre /2001 – marzo/2002, y puso de relieve que el índice de depositación de cloruros, por el método de la ASTM G-140 (1996), luego de los doscientos metros iniciales, es menos acentuada, alcanzando valores mínimos de concentración, después del primer kilómetro de distancia con relación al mar. Se observó, incluso, que durante los meses de noviembre a diciembre, presentaron una tendencia a concentraciones mayores, por el hecho de que a partir de enero se produce un incremento gradual de las lluvias, lo que facilita la depositación de sales.

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Este trabajo tiene la finalidad de hacer un levantamiento de la agresividad ambiental, por medio de la deposición de cloruros, en el área costera en la Región Metropolitana de Recife, específicamente en el barrio de Boa Viagem, empleando el método de la vela húmeda, siguiendo los criterios de la NBR 6211 (2001) y teniendo como apoyo a la caracterización climatológica del ambiente.

Condiciones de Exposición

La elección de las distancias con relación al mar, para exposición del aparato de vela húmeda, se basó en estudios publicados sobre el tema, por Nunes *et al.* (2004), y Meira (2004), entre otros, así como el factor primordial, que fue la limitación de las áreas puestas a disposición para esta investigación.

El monitoreo se condujo a través de cinco estaciones, situadas a 7, 100, 160, 230 y 320 m con relación al mar.

La Figura 1 muestra, de manera esquemática, las áreas de exposición adoptadas y las Figuras 2 y 3 exponen una de las cinco estaciones de monitoreo.



Figura 1. Representación esquemática de la distribución de las zonas de exposición del aparato de la veda húmeda (earth.google.com, 2006).



Figura 2. 2.^a estación de monitoreo (100 m).



Figura 3. Detalle de la 2.^a estación de monitoreo.

Caracterización del Ambiente

La caracterización del ambiente estudiado se definió por medio de la dirección predominante y velocidad de los vientos, de la precipitación, de la humedad relativa, de la temperatura y de la insolación, obtenida por medio del Instituto Nacional de Meteorología – INMET en el 3er.Distrito de Meteorología – 3.^o DISME, localizado en Recife-PE.

Principio del Método. El ion cloruro resultante de la absorción en agua conteniendo glicerol se titula con una solución estándar de nitrato mercúrico en presencia del indicador mixto difenilcarbazona y azul de bromofenol. El punto final de la titulación se indica mediante la formación del complejo mercúrico difenilcarbazona, de color azul violeta, según la NBR 6211 (2001), como lo muestran las Figuras 4 y 5.



Figura 4. Indicador mixto difenilcarbazona y azul de bromofenol.



Figura 5. Punto final de la titulación (color azul violeta).

RESULTADOS

Condiciones Ambientales

En la Tabla 1, se presentan las condiciones ambientales en los doce meses de estudio (ago./2005 a jul./2006).

Tabla 1. Resumen de los datos climatológicos en el período del estudio.

Mes/año	Dirección predominante del viento		Velocidad del viento (m/s)	Precipitaciones (mm)	Humedad relativa (%)	Temperatura (°C)	Insolación (h)
	1. ^a	2. ^a					
Ago'05	SE	Calmo	2,0	290,8	84	24,2	181,1
Sept'05	SE	E	2,7	45,3	77	25,2	234,3
Oct'05	SE	E	2,7	59,7	74	26,0	277,4
Nov'05	E	SE	2,8	8,2	71	26,9	270,7
Dic'05	E	SE	2,7	174,2	73	26,7	241,1
Ene'06	E	SE	2,8	12,3	71	27,1	259,5
Feb'06	E	NE	2,3	32,4	71	27,7	221,9
Mar'06	NE	E	2,1	156,8	75	27,6	258,3
Abr'06	E	Calmo/NE	1,7	322,8	81	26,6	194,1
May'06	SE	S	1,8	338,1	86	25,8	192,3
Jun'06	SE	S	2,2	431,4	84	25,0	137,3
Jul'06	SE	S	2,2	222,5	82	24,5	201,5

Comportamiento del Aerosol Marino

Efecto de la distancia con relación al mar. La disminución en la depositación de cloruros, en cada estación de monitoreo, a medida que existe un distanciamiento del mar, se comportó de manera evidente, conforme la Tabla 2 y la Figura 6.

El modelo que se ajustó mejor a los resultados obtenidos fue el exponencial del tipo $y = ae^{bx}$, donde y es la deposición de cloruros del aerosol marino, y x es la distancia con relación al mar (Figura 6).

El modelo ajustado ($y = ae^{bx} \cdot \varepsilon$) se alineó por medio del transformador cartesiano

$\ln y = \ln a + bx$, donde:

a) $\ln y = Y$;

b) $x = X$;

c) $\ln a = \beta_0$;

d) $b = \beta_1$.

En consecuencia, el modelo de referencia quedó definido como $Y = \beta_0 + \beta_1 X + \ln \varepsilon$, y para retrocálculo, $a = e^{\beta_0}$ y $b = \beta_1$. Los parámetros del modelo fueron estimados utilizando el método de los mínimos cuadrados (Montgomery *et al.* 2001).

El análisis de variancia (Tabla 3) muestra que el test fue significativo, existe regresión y el modelo conduce a 92% (R^2) de variabilidad en Y , teniendo como ecuación de regresión $Y = 6,44 - 0,01X$.

Tabla 2. Depositación de cloruros en el período del estudio.

Distancia al mar (m)	Concentración de cloruros (mg/m ² .día)						
	Ago'05	Sept'05	Oct'05	Nov'05	Dic'05	Ene'06	
7	1050,39	678,04	484,41	332,60	394,94	386,03	
100	406,14	370,10	355,91	469,41	403,15	353,50	
160	151,00	127,59	111,30	155,94	146,35	178,23	
230	46,74	36,09	31,66	52,22	41,47	36,41	
320	53,13	42,89	39,18	49,66	41,73	37,75	
Distancia al mar (m)	Feb'06	Mar'06	Abr'06	May'06	Jun'06	Jul'06	Promedio (ago'05-jul'06)
7	271,70	202,34	220,17	695,32	1210,85	1108,47	586,27
100	129,68	178,16	162,38	108,06	372,23	256,44	297,10
160	71,79	51,72	68,06	53,82	196,42	119,58	119,32
230	23,58	17,24	17,20	25,29	62,59	39,67	35,85
320	33,26	20,38	18,48	26,75	41,14	26,10	35,87

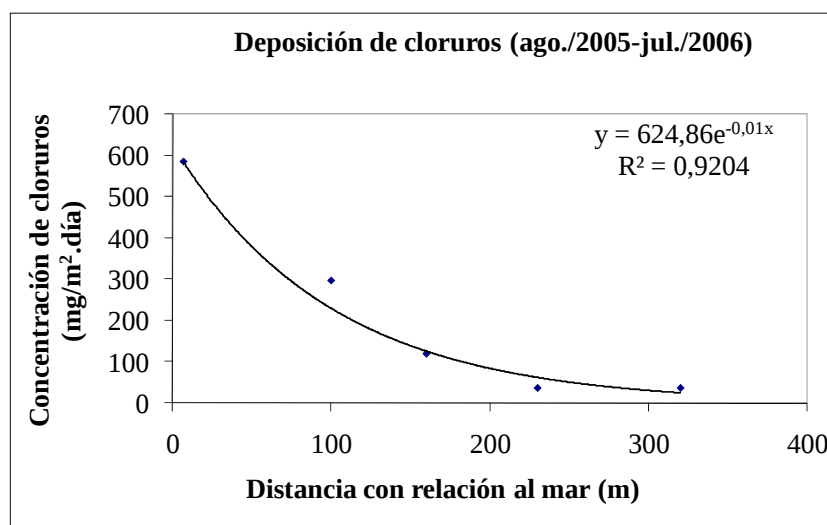


Figura 6. Relación entre la deposición promedio de cloruros y la distancia con relación al mar, en el período comprendido entre ago./2005 a jul./2006.

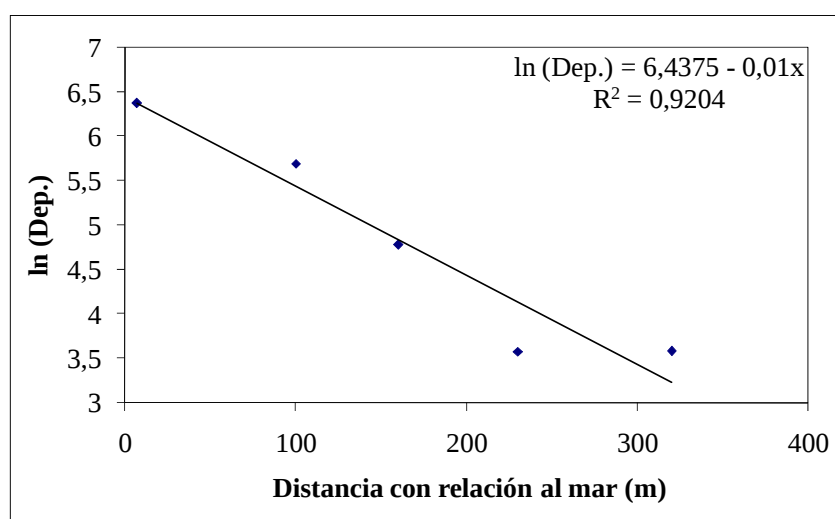
Tabla 3. Análisis de variancia.

	G.L.	S.Q.	M.Q.	F
Regresión	1	5,7574	5,7574	34,70
Residuo	3	0,4977	0,1659	--
Total	4	6,2551	--	--

En la Figura 7 se muestra el modelo linearizado, y en la Tabla 4, se realiza una predicción del modelo.

A partir de la Tabla 2 y de la Figura 6, se observa que, con el incremento de la distancia al mar, existe una disminución de la concentración de cloruros en la atmósfera; no obstante, en la 5.^a estación de monitoreo,

esta concentración fue superior a la de la 4.^a estación, en nueve de los doce meses de estudio. Este comportamiento puede ser explicado por el hecho de que existe una canalización en la dirección al viento, condición no existente en las demás estaciones de monitoreo. En la Figura 8 se muestra esta canalización.

**Figura 7.** Modelo linearizado.**Tabla 4.** Predicción del modelo.

Distancia al mar (m)	Deposición de cloruros (mg/m ² .día)
7	584,06
100	230,44
160	126,47
230	62,80
320	25,53
400	11,47
500	4,22
600	1,55
700	0,57
800	0,21
900	0,08
1000	0,03
1100	0,01
1200	0,004
1300	0,001
1400	0,0005
1500	0,0002

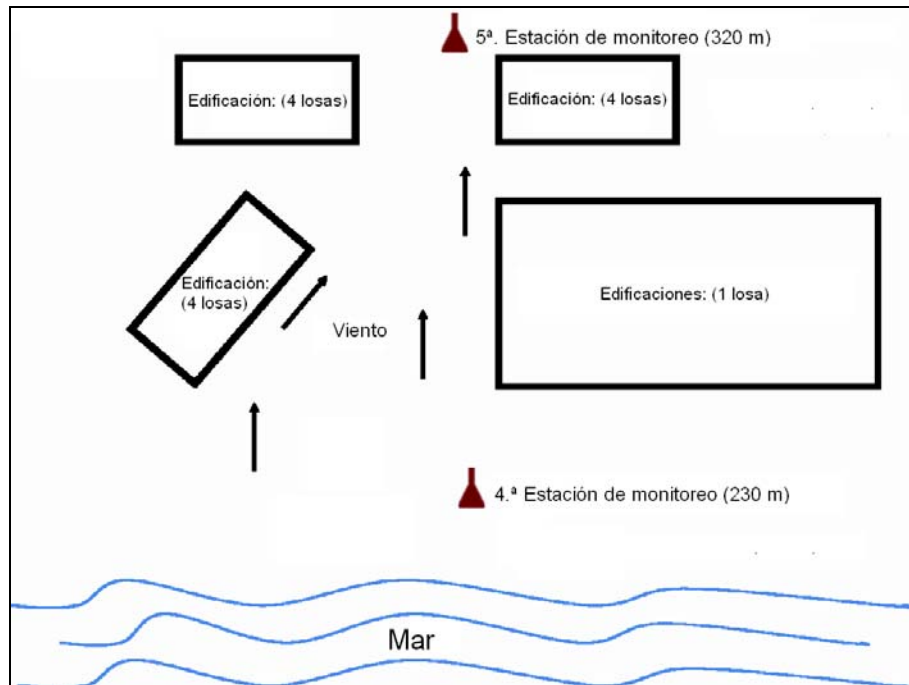


Figura 8. Esquema de la canalización del viento en la 5.ª Estación de monitoreo.

CONSIDERACIONES FINALES

Se levantaron las siguientes consideraciones, con relación al comportamiento de la neblina salina (Pontes 2006):

- a) la depositación de cloruros disminuye a medida que existe un distanciamiento con relación al mar, en una relación exponencial, del tipo $y = ae^{-bx}$, donde, y es la depositación de cloruros, expresada en

$mg/m^2.día$, y x es la distancia con relación al mar;

- b) en la zona de agresividad marina existen distintos niveles de agresividad con el distanciamiento del mar;
- c) la depositación de cloruros, conforme la predicción del modelo, se da, de forma significativa, en los primeros 400 m y alcanza valores ínfimos a partir de los 700 m del mar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albuquerque A. T., Otoch S. (2005). *Proposta de classificação da agressividade do ambiente na cidade de Fortaleza*. En "Congresso Brasileiro do Concreto", 47 ed. Recife, Brasil.

Andrade M. C. (1992). *Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras*. Tradução e adaptação Antônio Carmona e Paulo Helene. São Paulo, Brasil: Pini.

ASTM G-140. (1996). *Standard test method for determining atmospheric chloride deposition rate by wet candle method*. "Annual Book of ASTM Standards". American Society for Testing and Materials. Philadelphia, USA.

Earth.google.com. Net, nov. (2006). Disponível em: <<http://earth.google.com/.htm>>. Acesso em: 10 nov. 2006.

Meira G. R. (2004). *Agressividade por cloretos em zona de atmosfera marinha frente ao problema da corrosão em estruturas de concreto armado*. Tese de doutorado em engenharia civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil.

Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. (2001). *Introduction to linear regression analysis*. New York, John Wiley & Sons.

NBR 6118. (2007). *Projeto de estruturas de concreto: procedimento*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Brasil.

NBR 6211. (2001). *Corrosão atmosférica - determinação de cloretos na atmosfera pelo método da vela úmida: método de ensaio*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, Brasil.

Nunes J. L. O., Guimarães A. T. C., Silveira B. P., Guimarães D. L. C., Oliveira M. T., Rodrigues N. D. (2004). *Zona de névoa: Intensidade do ataque de cloretos em função da distância do concreto em relação à água do mar*. En “Congresso Brasileiro do Concreto”, 46 ed. III-Obras de Saneamento em Concreto. Florianópolis, Brasil, 1-11.

Pontes R. B. (2006). *Disseminação de íons cloreto na orla marítima do bairro de Boa Viagem*. Dissertação de Mestrado em engenharia civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil.

Spiel, D. E.; Leew, G. 1996. *Formation and production of sea spray aerosols*, J. Aerosol Sci., 27, (1), pp: S65-S66.

Este documento debe citarse como:

Bezerra-Pontes, R., Barreto-Monteiro, E. C., Almeida-de Oliveira, R., Carvalho-de Paiva, S. (2011). **Clasificación de la agresividad costera de Recife en función del nivel de contaminación por cloruros**. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 15-1, pp 19.26, ISSN: 1665-529-X.