

Evaluación de la penetración de cloruros en elementos de hormigón en la ciudad de Pelotas / RS

C. F. Ferreira^{1*} , C. M. Paliga¹ , A. S. Torres¹ 

*Autor de Contacto: carinafferreira@yahoo.com.br

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.266>

Recepción: 18/09/2017 | Aceptación: 26/03/2018 | Publicación: 30/04/2018

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo verificar la compatibilidad de un modelo de expectativa de vida útil existente con la penetración de cloruros en elementos de concreto expuestos en la ciudad de Pelotas / RS. Para hacer esto, los cuerpos de prueba fueron expuestos en diferentes partes de la ciudad por un período de 16 meses, aplicando la solución de nitrato de plata para determinar la profundidad de los cloruros. El modelo de Bob (1996) fue utilizado para la comparación y el análisis de los resultados. Se encontraron valores significativos de cloruro en los elementos y potencialidad de aplicación del modelo en describir el comportamiento de la profundidad de los cloruros a lo largo del tiempo, a pesar de las diferencias encontradas.

Palabras clave: conservación; estructuras de hormigón; cloruros; ensayo natural; modelos de previsión.

Citar como: C. F. Ferreira, C. M. Paliga, A. S. Torres (2018), “Evaluación de la penetración de cloruros en elementos de hormigón en la ciudad de Pelotas / RS”, Revista ALCONPAT, 8 (2), pp. 123 - 137, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i2.266>

¹ Universidade Federal de Pelotas, Brasil.

Información Legal

Revista ALCONPAT es una publicación cuatrimestral de la Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología y Recuperación de la Construcción, Internacional, A. C., Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Página Web: www.alconpat.org

Editor responsable: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de derechos al uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de Informática ALCONPAT, Ing. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antigua carretera a Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor.

Queda totalmente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización de la ALCONPAT Internacional A.C.

Cualquier discusión, incluyendo la réplica de los autores, se publicará en el primer número del año 2019 siempre y cuando la información se reciba antes del cierre del tercer número del año 2018.

Evaluation of the penetration of chlorides in concrete elements in the city of Pelotas / RS

ABSTRACT

This research aims to verify the compatibility of an existing predictive model of life with the penetration of chlorides in exposed concrete elements in the city of Pelotas / RS. To this end, the samples were exposed at different locations in the city for a period of 16 months and silver nitrate solution was applied to determine the depth of the chlorides. The Bob model (1996) was used for comparison and analysis of the results. Significant values of chloride were found in the elements and a great potential of the model applied when describing the behavior of the depth of chlorides over time, despite the differences found.

Keywords: conservation; concrete structures; chlorides; natural test; prediction models.

Avaliação da penetração de cloretos em elementos de concreto na cidade de Pelotas/RS

RESUMO

Esta pesquisa tem como objetivo verificar a compatibilidade de um modelo de previsão de vida útil existente com a penetração de cloretos em elementos de concreto expostos na cidade de Pelotas/RS. Para tanto, foram expostos corpos-de-prova em diferentes locais da cidade por um período de 16 meses, sendo aplicada a solução de nitrato de prata para determinação da profundidade de cloretos. Foi utilizado o modelo de Bob (1996), para comparação e análise dos resultados. Foram encontrados valores significativos de cloreto nos elementos e um potencial do modelo aplicado em descrever o comportamento da profundidade de cloretos ao longo do tempo, apesar das diferenças encontradas.

Palavras-chave: conservação; estruturas de concreto; cloretos; ensaio natural; modelos de previsão.

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material de amplio uso aplicado mundialmente en las construcciones, debido a ventajas como buena resistencia a la compresión, bajo costo y facilidad de producción. Esta última característica en conjunto con el desempeño está directamente ligada a la vida útil de la edificación, que puede ser definida como el período en el cual la estructura es capaz de garantizar no apenas su estabilidad, más todas las funciones para las cuales fue proyectada (Bertolini, 2010). La degradación de las estructuras de hormigón y su consecuente reducción de desempeño es un problema frecuente en el mundo. Los problemas de durabilidad en estas estructuras pueden ser causados por diversos factores que incluyen la falta de conocimiento del medio ambiente a la que estarán expuestas, especificaciones inadecuadas y/o mala ejecución.

El ambiente en que las estructuras estarán expuestas ejerce influencia directa en el comportamiento del material utilizado. En este sentido la década del 90 mostró que el hormigón como material de construcción es inestable a lo largo del tiempo, teniendo sus propiedades físicas y químicas alteradas en función de las características de sus componentes y de las respuestas de estos a las condicionantes del medio ambiente (Souza e Ripper, 2009).

La forma de deterioro que ha mostrado mayor incidencia y con los mayores perjuicios económicos en diversos países es la corrosión de armaduras (Carmona, 2005). Este mecanismo de deterioro es

consecuencia de la interacción del material con el medio, aliada o no a esfuerzos mecánicos (Gentil, 2003). Uno de los principales agentes agresivos que pueden generar este proceso de deterioro son los iones cloruro (Helene, 1997). La corrosión ocasionada debido a la penetración de estos iones al interior del hormigón es de naturaleza electroquímica, envolviendo una reacción anódica donde ocurre la oxidación del metal, y otra de naturaleza catódica, que ocurren simultáneamente. Para que ocurra la corrosión de las armaduras de acero, se hace necesario la presencia de cuatro elementos: el conductor que es la propia barra de acero, el electrolito (agua) para conducir los iones, el oxígeno que forma los productos de corrosión y una diferencia de potencial para la formación de dos áreas distintas (la de naturaleza anódica y catódica). Este último factor puede ser ocasionado por diferentes intensidades de compacidad del hormigón, diferencias de aireaciones, de humedad o de concentraciones salinas (Silva, 2006).

La frecuencia que está ocurriendo la corrosión de armaduras y los problemas asociados a esta evidencian la necesidad de buscar soluciones que contribuyan para minimizar este proceso de deterioro y su evolución en las estructuras de hormigón armado (Vieira, 2003). Modelos de previsión de vida útil desarrollan un importante papel tanto en el auxilio de estructuras ya existentes, evaluando el deterioro de éstas, cuanto en nuevas construcciones, colaborando en la etapa de proyecto, para que en conformidad con el ambiente en que serán expuestas, estas tengan la vida útil esperada. Es de fundamental importancia también, que la aplicación de los modelos de previsión de vida útil esté asociada con la degradación natural de la estructura, donde ocurre la real interacción de ésta con el medio en que está expuesta.

A partir de lo mencionado, este estudio tuvo como objetivo verificar la compatibilidad del modelo de previsión de vida útil, existente en la literatura, con la penetración de cloruros en elementos de hormigón, expuestos en ambiente urbano de la ciudad de Pelotas/RS.

2. PROCEDIMIENTO

La metodología de este trabajo se dividió en dos etapas. La primera se refiere al ensayo natural, a través de la exposición de probetas de hormigón en diferentes locales de la ciudad de Pelotas/RS. La segunda etapa se basa en la aplicación de un modelo de previsión de vida útil y posteriormente la comparación de los resultados con los valores encontrados en exposición natural de las muestras.

2.1 Ensayo natural

2.1.1 Exposición de las probetas

Para la realización de este trabajo fueron utilizados 60 probetas (10 x 20 cm) de hormigón, que fueron provistos por una constructora local como forma de simular un hormigón real utilizado na ciudad y su interacción con el ambiente. Las muestras fueron confeccionadas con relación agua/cemento de 0,6 cemento CP IV - 32 de marca Votoran (cemento más usual en la región) y resistencia a la compresión (f_{ck}) de 20MPa (valor mínimo considerado para un hormigón estructural de acuerdo NBR 6118).

La ciudad de Pelotas/RS se encuentra apartada aproximadamente a 60km de la región marítima, y está localizada a las márgenes del canal San Gonzalo que comunica las Lagunas de los Patos y Mirim. Así las muestras fueron expuestas en ambiente urbano con humedad relativa anual superior a 70% y desprotegidas de la acción del ambiente (temperatura y agua de lluvia), pudiendo ser clasificada como C3 según la NTF 4015 (Norma Técnica Fondonorma, 2012). Puntos estratégicos de la ciudad fueron determinados, debido a la mayor circulación de vehículos y mayor concentración de urbanizaciones. La elección de los locales que representan cada región fue influenciada por la facilidad de acceso, además de la disponibilidad de espacio físico debido al gran número de probetas que serían colocados en cada local. Así las probetas fueron divididas en cinco diferentes locales de la ciudad, siendo estos: urbanización centro, urbanización Porto, urbanización

Fragata y urbanización Tres Vendas (debido a su extensión, para esta última urbanización fueron escogidos dos locales para la exposición de las probetas). Así, fueron colocados 12 probetas en cada localidad. La Figura 1 presenta la localización de los diferentes puntos analizados.

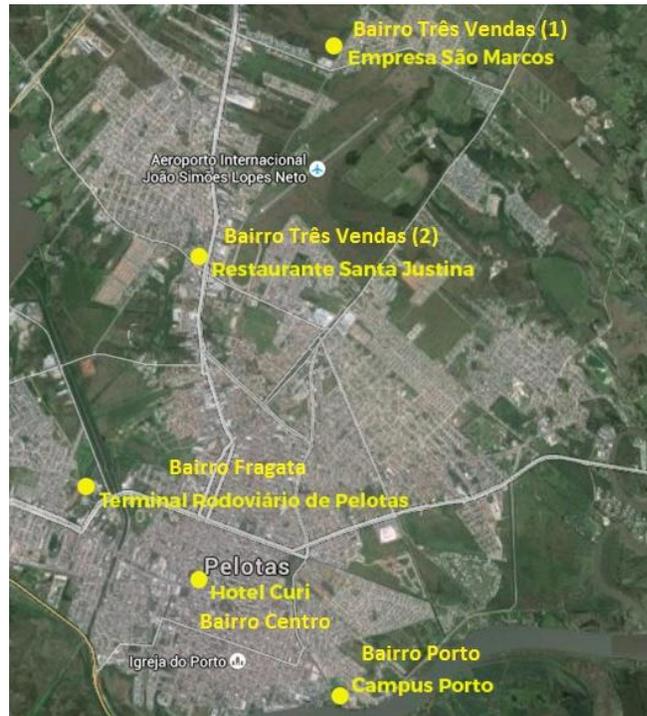


Figura 1. Mapeamiento de la localización de las probetas en la ciudad de Pelotas/RS. (Adaptado del Google earth).

La urbanización Tres Vendas se encuentra localizada en la zona norte de la ciudad. El primer lugar, presentado en las Figuras 2 y 3 se encuentra más apartado del área central, pero donde pasa todo el tráfico de desagüe de las alfarerías de la ciudad. Ya el segundo lugar de esta urbanización (Figuras 4 y 5) está situado en la parte más central donde ocurre el encuentro de dos de las principales avenidas, teniendo intenso tráfico alrededor.



Figura 2. Localización del primer ambiente de exposición de las muestras en la urbanización Tres Vendas (Adaptado del Google earth).



Figura 3. Primer local de exposición de la de urbanización Tres Vendas



Figura 4. Localización del según ambiente de exposición de las muestras en la urbanización Tres Vendas (Adaptado del Google earth).



Figura 5. Según local de exposición de la urbanización Tres Vendas

La urbanización Fragata, localizada en la zona oeste, es una de las más pobladas urbanizaciones de la ciudad y a pesar de su extensión fue elegida solamente un local para análisis, por ser de fácil acceso, siendo este el Terminal de pasajeros de la ciudad, ilustrado en las Figuras 6 y 7.



Figura 6. Localización del ambiente de exposición de las muestras urbanización Fragata (Adaptado del Google earth).



Figura 7. Local de exposición de la urbanización Fragata

El local de la urbanización Centro se localiza en la calle principal de la urbanización, siendo altamente poblada y de intenso tráfico, según muestran las Figuras 8 y 9.



Figura 8. Localización del ambiente de exposición De las muestras en la urbanización Centro (Adaptado del Google earth).



Figura 9. Local de exposición de la urbanización Centro

La contrario de otros locales, la urbanización Porto localizada al sur de la ciudad, las probetas fueron expuestas al borde del Canal San Gonzalo (Figuras 10 e 11).



Figura 10. Localización del ambiente de exposición de las muestras en la urbanización Porto (Adaptado del Google earth).



Figura 11. Local de exposición de la urbanización Porto

2.1.2 Ensayo de resistencia a la compresión

Para el ensayo de resistencia a la compresión de las muestras de cada localidad fue utilizada la prensa hidráulica de marca *Forney*, siendo este ejecutado según la NBR 5739 (ABNT, 2007). Ese ensayo fue hecho con tres cps de cada localidad a cada 4 meses, siendo realizado para la verificación de la resistencia, que debería ser al menos de 20 MPa y para apertura del cp para ejecución del ensayo colorimétrico. La evolución promedio de la resistencia a la compresión a lo largo del ensayo está presentada en la Tabla 1 donde se percibe que todas las probetas alcanzaron la resistencia mínima, siendo, entonces sometidas al ensayo colorimétrico. No fue realizado para este ensayo medidas de dispersión, debido al hecho de esta característica no ser foco del análisis.

Tabla 1. Resistencia a la compresión promedio de las probetas de hormigón

Local	Tiempo de exposición			
	4 meses	8 meses	12 meses	16 meses
Urbanización Fragata	27,44	32,17	34,05	35,47
Urbanización Centro	24,48	30,52	31,61	30,28
Urbanización Porto	26,99	33,22	32,34	32,87
Urbanización Tres Vendas 1	26,99	34,33	33,39	35,37
Urbanización Tres Vendas 2	28,65	33,99	30,85	35,7

Con el valor de la resistencia a la compresión de cada local se hizo el promedio por período, y basado en la NBR 6118 (ABNT, 2014) fue trazada la curva de evolución de esta característica a lo largo del tiempo para el tipo de cemento utilizado en las probetas (CP IV).

2.1.3 Medición de la profundidad de cloruros

Posterior al ensayo de las probetas, fue aplicado nitrato de plata en toda la cara recién fracturada. Cuando esta solución es rociada en la superficie del hormigón ocurre una reacción fotoquímica, donde en presencia de cloruros libres, ocurre la formación de un precipitado blanco de cloruro de plata y en la región sin cloruros o con cloruros combinados, hay formación de un precipitado marrón u óxido de plata (Real et al., 2015). El aspecto de las muestras posterior al procedimiento,

el frente de penetración de cloruros y la medición de su profundidad están representadas en la Figura 12 y 13.

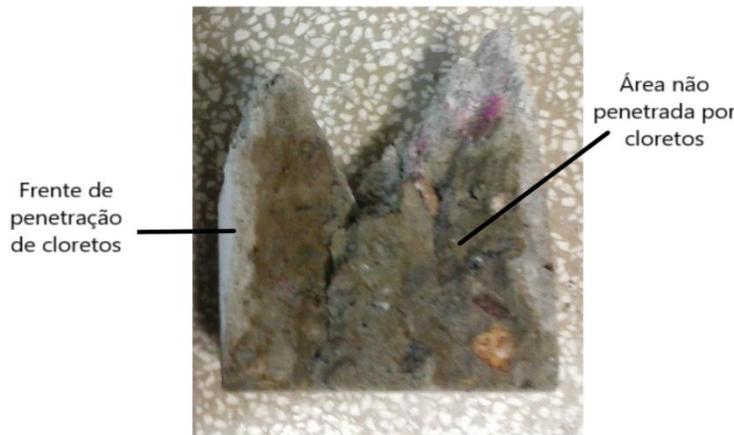


Figura 12. Ejemplo del frente de de cloruros de la muestra fracturada



Figura 13. Ejemplo de la medición de la penetración profundidad penetrada por fracturada

Posterior al riego del nitrato de plata se esperó aproximadamente 5 minutos hasta que la solución reaccione con el hormigón. Seguidamente fue realizada la medición, siendo hecha dos en cada probeta, resultando e6 6 valores de profundidad de cloruros por local de exposición. Para fines de previsión de profundidad de agentes agresivos a mayor profundidad posee mayor relevancia, por lo tanto, fue la medida utilizada para el análisis de los resultados.

2.1.4 Análisis estadística

Para la evaluación de la influencia de las variables del estudio en los datos de profundidad de cloruro obtenidos en ensayos, fue realizado el test de análisis de varianza (ANOVA) de dos vías. Por tanto, fue utilizado el programa computacional SPSS 20,0 (Statistical Package for Social Sciences for Windows). Para todos los análisis fue utilizado un nivel de significancia (α) de 5%, es decir que a partir de este valor las desviaciones serán consideradas no significativas presentando un nivel de confianza de 95%. Así puede descartarse la hipótesis de que los promedios son todos iguales a 5% caso el valor de “p” encontrado sea menor que este valor. Para ese análisis estadístico fueron consideradas como variables independientes el local de exposición de las muestras (urbanización Fragata, Centro, Porto, Tres Vendas 1 y Tres Vendas 2) y el tiempo en que estas quedarán expuestas (4, 8, 12 y 16 meses). Ya como variable dependiente se consideró la profundidad de penetración de cloruros.

2.1.5 Caracterización climática de la ciudad de Pelotas/RS

Fueron recolectadas informaciones para la caracterización de la atmósfera local con la intención de verificar la agresividad del ambiente de exposición de las muestras, siendo destacados como factores de mayor influencia la humedad relativa del aire, temperatura y precipitaciones. Es importante destacar que el monitoreo realizado fue del macro clima del ambiente de exposición de las muestras, en este caso la ciudad de Pelotas/RS. Tales datos fueron obtenidos a través del sitio electrónico de la Estación Agroclimatológica de Pelotas, localizada en Capao do Leao, que dispone de boletines diarios y mensuales de variables meteorológicas. Las Figuras 14, 15 y 16 muestran las precipitaciones acumuladas, los promedios de humedad relativa y la temperatura máxima y mínima en los meses para los 4 períodos estudiados (4 meses, referente a los meses de mayo a septiembre; de 4 a 8 meses, siendo de septiembre a enero; de 8 a 12 meses, referente de enero a mayo; y de 12 a 16 meses, donde fue analizado de mayo a septiembre). Para la aplicación del modelo de vida útil,

fueron utilizados datos de la humedad relativa y temperatura máxima y mínima diaria, siendo para esta última calculado el promedio. No fueron obtenidas informaciones referentes a la orientación de los vientos durante la época estudiada, debido a la dificultad de análisis de esta variable en relación a los diferentes locales de exposición.

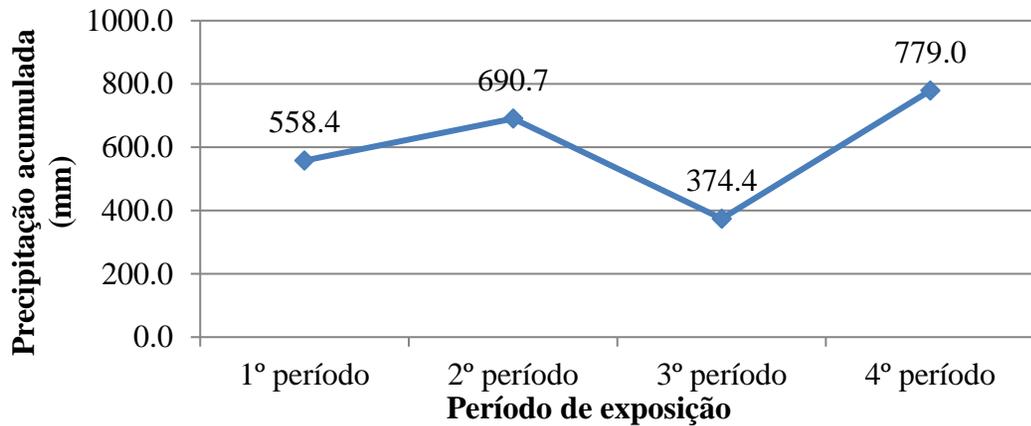


Figura 14. Precipitaciones acumuladas para cada período de exposición de las muestras

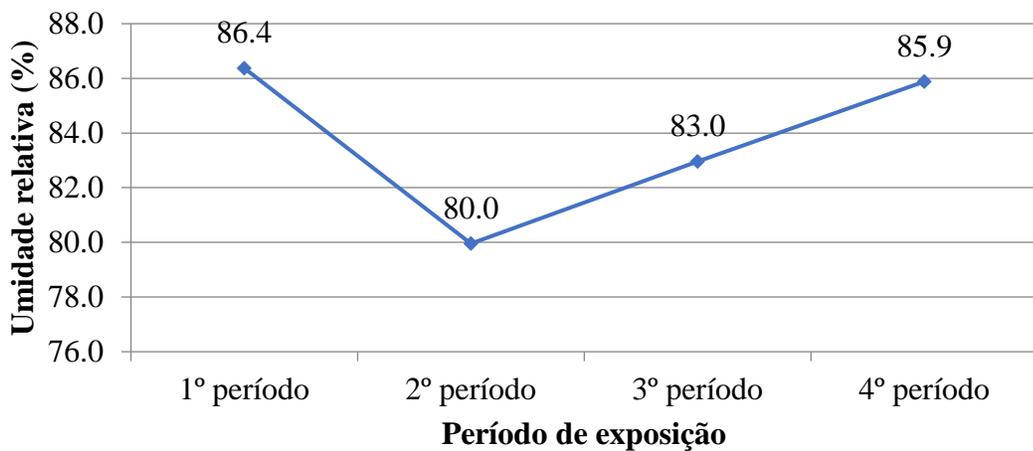


Figura 15. Humedad relativa promedio para cada período de exposición de las muestras

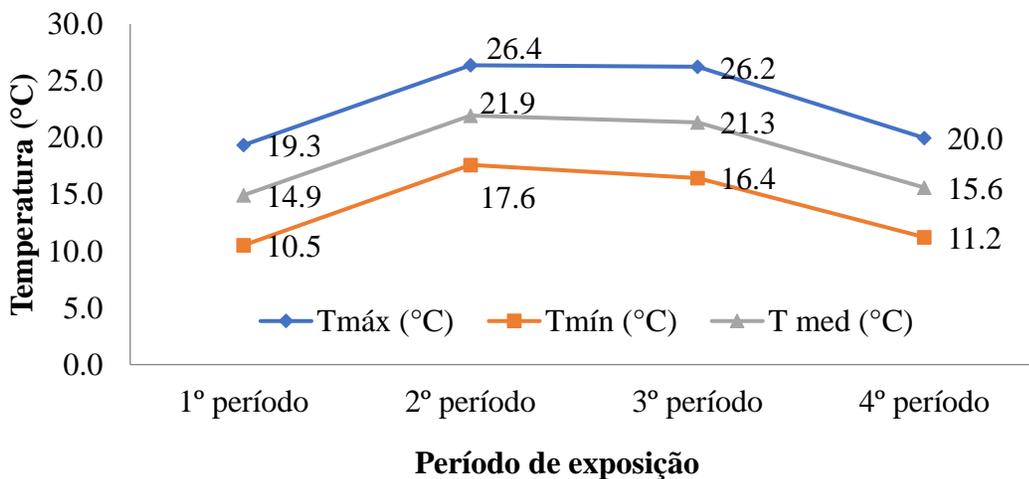


Figura 16. Temperatura promedio en cada período de exposición de las muestras

2.2 Modelo de previsión de vida útil

Para el análisis de cloruros en estructuras de hormigón, fue seleccionado el modelo de Bob (1996), ya que la estimación hecha por este método es realizada en términos de profundidad recorrida por el contaminante, en vez de hacer el análisis en términos de concentración, como gran parte de los modelos para análisis de cloruros. Bob (1996) presentó inicialmente, un modelo usado en el análisis de la profundidad de carbonatación de estructuras y posteriores verificaciones basadas en datos experimentales de larga duración observó que la ecuación (1) podría ser utilizada para el modelaje del proceso de penetración de cloruros (Andrade, 2001). Este modelo considera propiedades del hormigón, como resistencia a la compresión, y características ambientales, como temperatura y humedad relativa.

$$x_m = 150 \left(\frac{ck_1k_2d}{f_c} \right) \sqrt{t} \quad (1)$$

Donde:

x_m = profundidad promedio de penetración de cloruros (mm);

f_c = resistencia a la compresión del hormigón (N/mm²);

c = capacidad de fijación de los cloruros en función del tipo de cemento;

k_1 = coeficiente de influencia de la temperatura;

k_2 = coeficiente de influencia de la humedad relativa;

t = tiempo (años);

d = relación entre la concentración crítica y la concentración superficial de cloruros en la estructura.

Para la aplicación de este modelo fueron utilizadas la temperatura promedio y humedad relativa diaria de la ciudad de Pelotas/RS durante el período de exposición de las muestras, así como la resistencia a la compresión (f_{ck}) promedio diario del hormigón obtenida a través de la curva de evolución de esta característica. Ya los parámetros c , k_1 , k_2 están presentados en la Tabla 2. El modelo fue aplicado para diferentes valores del parámetro d , como forma de analizar diferentes concentraciones críticas y superficiales de cloruros en la estructura, ya que esta variable representa la relación entre las dos concentraciones.

Tabla 2. Parámetros relacionados con el modelo de Bob, 1996 (Andrade, 2011)

Parámetro k_1		Parámetro c		Parámetro k_2		Parámetro d	
k_1	T(°C)	c	(%) adiciones en el cemento	k_2	UR (%)	D	r
0,67	0 a 5	1	0	0,75	50	2	0 a 19
0,75	5 a 15	0,9	15	1	85	1	20
1	15 a 25	0,75	30	0,75	100	0,5	50
1,25	25 a 35	0,67	50	-	-	0,33	65
1,5	35 a 45	-	-	-	-	0,16	85

3. RESULTADOS

3.1 Profundidad de cloruros por el método de ensayo natural

Las máximas profundidades de penetración de cloruros para los diferentes locales de exposición y los diferentes tiempos están presentadas en la Figura 17.

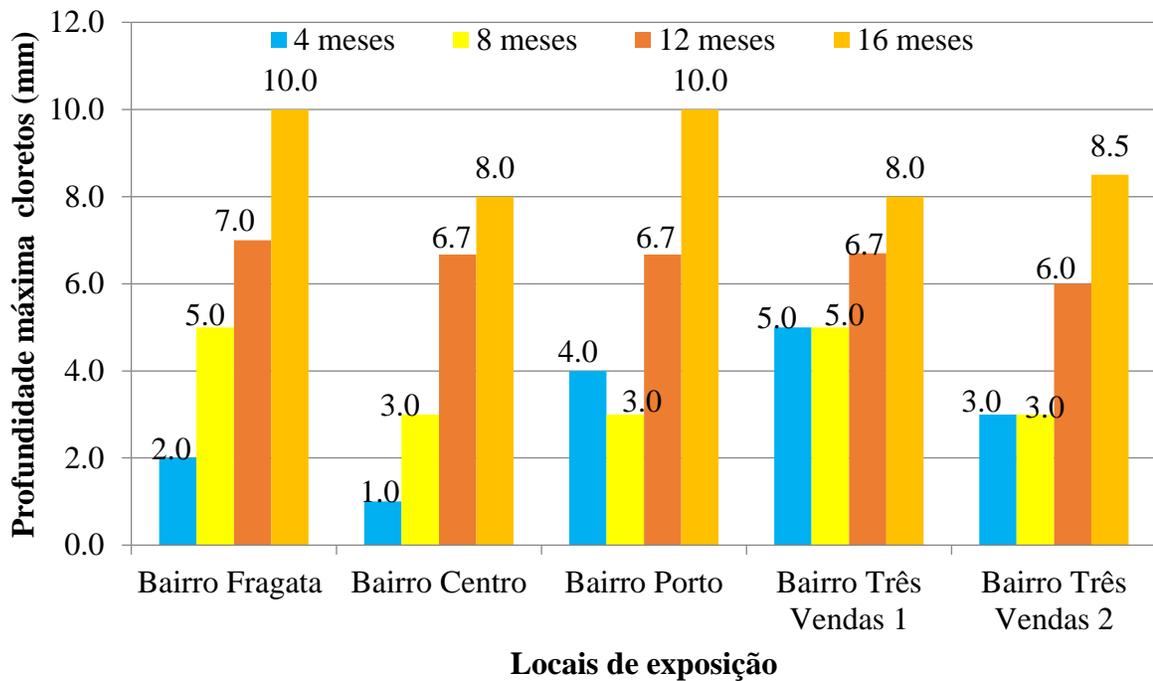


Figura 17. Profundidad de penetración de cloruros para cada localidad y tiempo de exposición

Evaluando los datos, se observa, conforme lo esperado una tendencia de aumento del frente de cloruros entre la primera y la última medición para todas las localidades. Se observa que, a mayor profundidad de penetración de cloruros posterior a los 16 meses de exposición en ambiente urbano, fueron encontradas en la urbanización Fragata y Porto, siendo de 10mm. Ese valor fue sorprendente, pues no se creía que serían encontrados cloruros libres, dentro de la ciudad de Pelotas, visto que es una ciudad apartada del ambiente marítimo. Así mismo tiempo se sabe que la laguna dos Patos, que circunda la ciudad, posee períodos en el año que cambia el estado del agua de dulce para salada, pudiendo ser una explicación para la aparición en hormigones, siendo importante resaltar también que en períodos de baja pluviosidad fueron encontrados valores elevados de cloruros en algunos puntos desde la laguna Mirim hasta la laguna dos Patos (Souza, 2015) y valores de cloruro sobre lo establecido por el CONAMA para agua dulce en puntos del canal de prolongación de la Avenida Bento Gonçalves (Santos et al., 2012). Se puede decir así, que hay un indicativo de que los cloruros forman parte de la atmósfera de la ciudad de Pelotas/RS, donde la menor profundidad encontrada para este mismo tiempo de exposición fue de 8mm, para la urbanización Centro y para las muestras 1 de urbanización Tres Vendas.

A través de ANOVA de dos vías fue posible confirmar la influencia de la variable tiempo en la profundidad de cloruros y se constató que la variable local y la interacción entre estas variables no influyó. A partir de este análisis se verifica que toda la ciudad de Pelotas/RS tiene el mismo comportamiento en cuanto a la penetración de cloruros, no interfiriendo a cambio entre urbanizaciones, apenas en tiempo de exposición. Analizando aisladamente como forma de verificar cuales variables difieren entre sí, relativamente la profundidad de cloruros se encontró que el tiempo interfiere significativamente en los resultados de exposición frente a la penetración de cloruros. El análisis de la variable independiente “local”, indicó diferencia significativa del primer local de la urbanización Tres Vendas con relación a los locales Porto y Tres Vendas 2, indicada por $p \leq 0,05$. Para los demás locales no fue encontrada diferencia significativa, aceptándose la hipótesis de promedios iguales entre estos y las profundidades de cloruros, siendo importante resaltar que los resultados tienen un nivel de confianza de 95%.

3.2 Aplicación del modelo de Bob (1996)

La aplicación del modelo de previsión de vida útil para penetración de cloruros fué realizada apenas para los locales que presentaron diferencia significativa en el análisis estadístico de los datos, siendo para el primero y segundo local de la urbanización Tres Vendas y urbanización Porto. Las Figuras 18, 19 y 20 presentan la comparación entre los resultados encontrados con la aplicación del modelo y del ensayo natural, para los diferentes valores de d.

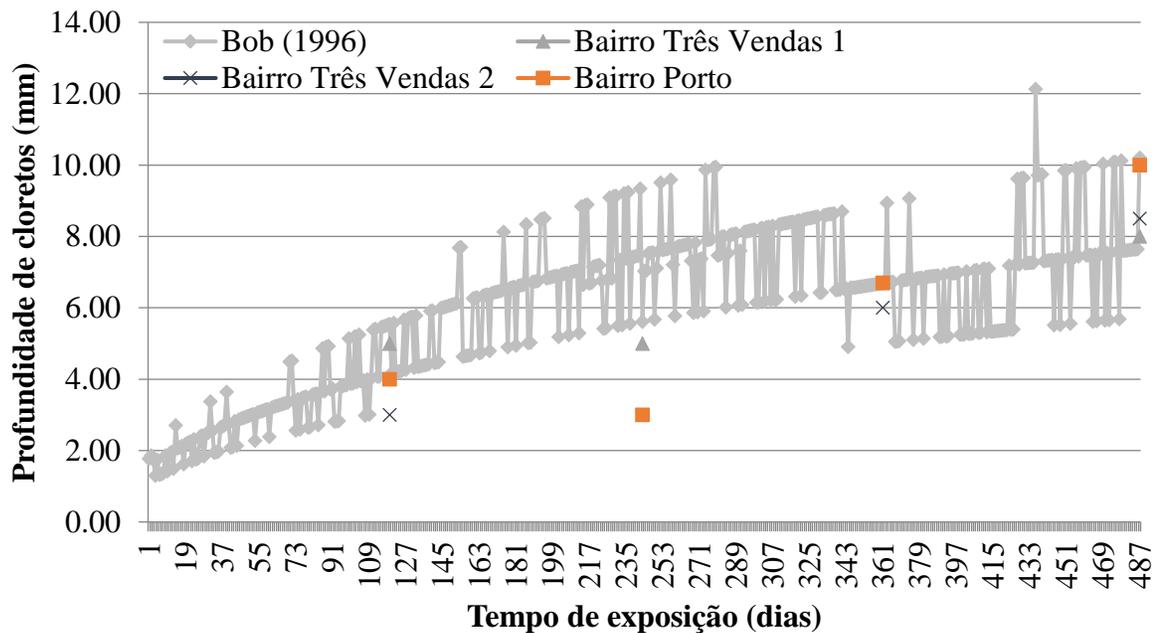


Figura 18. Modelo de Bob (1996) con parámetro d = 2

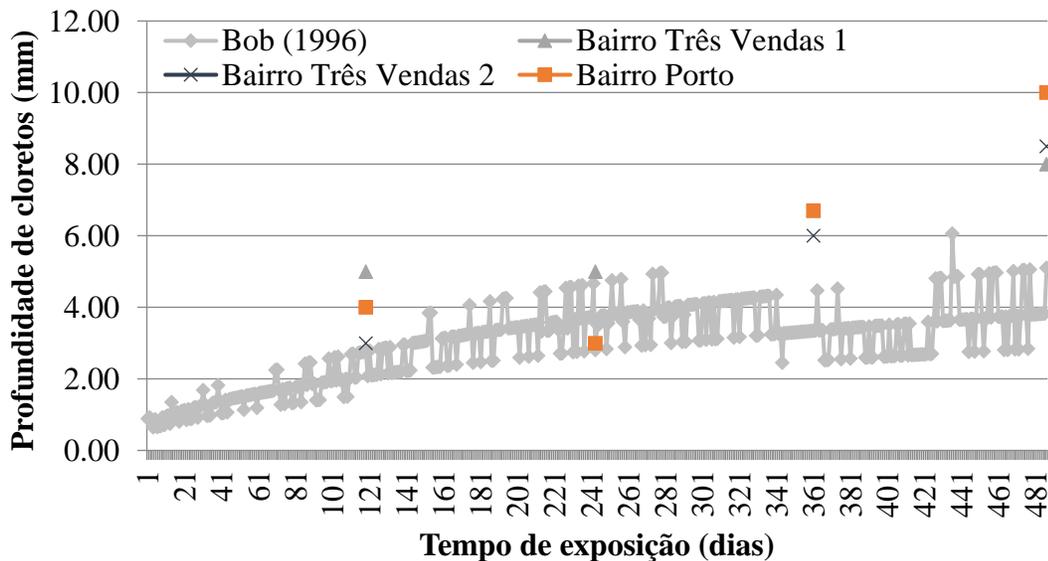


Figura 19. Modelo de Bob (1996) con parámetro d = 1

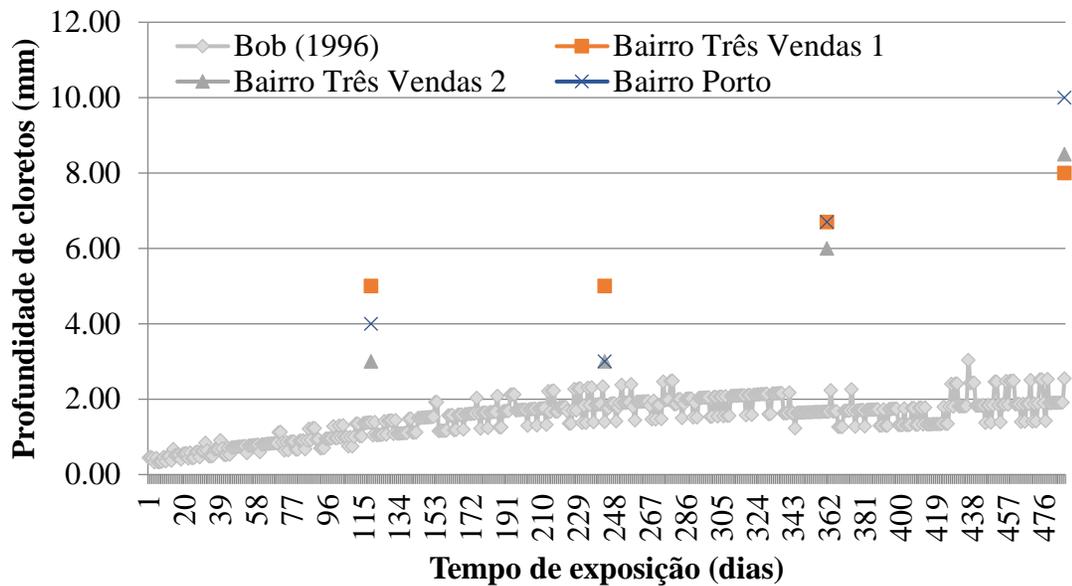


Figura 20. Modelo de Bob (1996) con parámetro $d = 0,5$

Se observa que para todas las localidades el modelo que mejor se adapta a los valores encontrados en el ensayo natural fue con el parámetro $d = 2$, es decir con la relación entre concentración crítica y concentración superficial de cloruros en la estructura entre 0 y 19. Se percibe también que para el 2° período ninguno de los locales tuvo sus valores descritos por el modelo aplicado, al contrario de los otros períodos de exposición.

Analizando aisladamente cada local para la mejor curva encontrada, y basados en los parámetros de entrada del modelo, se puede decir que para la urbanización Tres Vendas 1, para el primer período (profundidad de 5mm), se encontró el valor más próximo de 4,92mm a los 71 días de exposición, con temperatura promedio de 16,4°C y humedad relativa de 85%. Para el 2° período (profundidad de 5mm) fue también encontrado el valor aproximado de 4,92 mm de profundidad para 188 días de exposición, temperatura promedio de 24,9°C y humedad relativa de 88%. En el 3° período (profundidad 6,7mm), se encontró 6,69mm a los 340 días de exposición, con temperatura promedio de 16,1°C y humedad relativa de 85,8% y 6,71mm a los 342 días, temperatura promedio de 12°C y humedad relativa de 83,8%. Ya para el 4° período (profundidad de 8mm), se encontró 7,65mm para 486 días de exposición, temperatura promedio de 17,1°C y humedad relativa de 76%. Para la urbanización Tres Vendas 2, en el primer período donde la profundidad encontrada en el ensayo natural fue de 3mm, al aplicar el modelo se encontró exactamente ese valor a los 47 días de exposición, temperatura promedio de 16,95°C y humedad relativa de 95,20%. En el 2° período donde la profundidad del ensayo natural fue la misma, el valor más próximo encontrado por el modelo fue de 3,93mm con 120 días de exposición, temperatura promedio de 15,7°C y humedad relativa de 86,50%. Para el 3° período se encontró el mismo valor del ensayo natural (profundidad de 6mm), para 273 días de exposición, temperatura promedio de 25°C y humedad relativa de 86,3%. Para el último período (profundidad de 8,5mm), se obtuvo con el modelo la profundidad de 8,81mm a los 363 días de exposición con temperatura promedio de 16°C y humedad relativa de 82,30%.

Finalmente, para la urbanización Porto en el 1° período el valor de 4mm fue encontrado en el ensayo natural, en cuanto en el modelo fue obtenido 3,99mm a los 83 días de exposición con temperatura promedio de 17,9°C y humedad relativa de 90,80%. En el segundo período, esta urbanización tuvo el mismo comportamiento de la urbanización Tres Vendas 1, en cuanto el 3° período el valor encontrado fue el mismo para la urbanización Tres Vendas 2. Para el 4° período (profundidad de

10mm), por el modelo se encontró el valor aproximado de 10,02mm para 469 días de exposición, temperatura promedio de 16,9°C y humedad relativa de 83,50%.

Haciendo una evaluación de forma general, para la ciudad de Pelotas/RS, el modelo de Bob (1996) fue aplicado para cada período de exposición dos probetas. Fue utilizado como humedad relativa de 85%, debido a la humedad de todos los períodos ser cercana a ese valor. Para la temperatura, como ocurre una gran variación diaria, fueron utilizadas las temperaturas máximas y mínimas de cada período. En cuanto a la resistencia a la compresión fue utilizado el promedio de todos los locales en cada período. El resultado está presentado en la Tabla 3 y en la Figura 21.

Tabla 3 – Comparación de los resultados del ensayo natural con el modelo de Bob, 1996

Tiempo de exposición (meses)	Profundidad cloruros (mm)				
	Tres Vendas 1	Tres Vendas 2	Porto	Bob (1996)	
				Bob Tmax	Bob Tmin
4	5	3	4	4,8	5,76
8	5	3	3	5,01	5,61
12	6,7	6	6,7	6,19	6,93
16	8	8,5	10	7,65	9,17

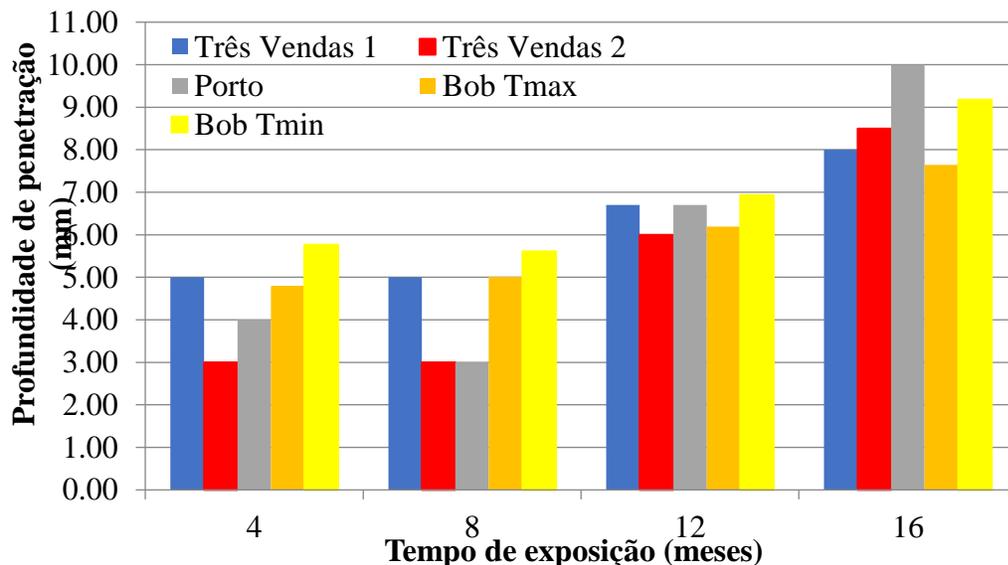


Figura 21. Comparación de los resultados del ensayo natural con el modelo de Bob (1996)

Haciendo un análisis de los resultados, el período que se mostró más próximo del modelo de Bob (1996), para ambas temperaturas fue de 12 meses, quedando cercano de los valores encontrados para la urbanización Porto y Tres Vendas 1 usando la temperatura mínima, y de la urbanización Tres Vendas 2 utilizando la temperatura máxima. Para el período de 4 meses, los valores encontrados se aproximarán solamente de la profundidad encontrada en la urbanización Tres Vendas 1, siendo el más próximo el resultado encontrado utilizando la temperatura máxima. Mientras que para 8 meses el modelo resultó en un valor muy próximo a la urbanización Tres Vendas 1 también para la temperatura máxima. Posterior al período de 16 meses, independientemente de la temperatura, fueron obtenidos con el modelo resultados menores del obtenido para el ensayo natural, donde el valor encontrado con la mayor temperatura se aproximó al de urbanización Tres Vendas 1, y la mayor profundidad (9,17mm) fue encontrada con la menor

temperatura. Esta diferencia puede ser debido a la gran variación de temperatura diaria de la ciudad de Pelotas/RS, como también por el hecho del modelo considerar solamente ciertos valores de humedad relativa (50%, 85% y 100%), siendo que la humedad para todos los períodos se encuentra entre los valores de 85 y 100%.

4. CONCLUSIONES

Primeramente, al observar los resultados encontrados en el ensayo natural para la penetración de cloruros se aprecia una tendencia de aumento entre la primera medición hecha posterior a los 4 meses de exposición y la última posterior a 16 meses para todos los locales analizados.

Los valores obtenidos para la penetración de cloruros demuestran que la ciudad de Pelotas/RS, a pesar de ser apartada del ambiente marítimo, favorece el avance de este agente agresivo para el interior del hormigón debido a elevada humedad y variaciones de temperatura que llegan a ciclos de humectación/secado del hormigón, facilitando la absorción y avance de cloruros al interior de la estructura. Analizando el mayor (10mm para las urbanizaciones Fragata y Porto) el menor (8mm para Tres Vendas 1) valor de profundidad de cloruros para un tiempo de exposición de 16 meses, se encontró una variación de aproximadamente 20%.

Con el uso del análisis estadístico se confirmó que la variable tiempo interfirió significativamente en los resultados de exposición frente a la penetración de cloruros y se constató que en cambio entre urbanizaciones y la interacción entre los locales y el tiempo no influyó. A través del test de comparaciones múltiples fue encontrada una diferencia significativa entre el local Tres Vendas 1 con los locales Porto y Tres Vendas 2.

Al aplicar el modelo de previsión de vida útil de Bob (1996) para analizar la penetración de cloruros, fue posible percibir que para todos los locales la opción que mejor se adecuó a los valores encontrados en el ensayo natural fue utilizando el parámetro $d = 2$, es decir con la relación entre la concentración crítica y la concentración superficial de cloruros en la estructura variando de 0 a 19. Analizando los locales aisladamente y cada período de exposición, se percibe que dependiendo de los valores de las variables de entrada (tiempo, temperatura y humedad relativa) fueron encontrados valores aproximados de profundidad a lo largo del tiempo para todas las localidades. Por tanto, al aplicar el modelo de previsión de forma general para la ciudad de Pelotas, se observó que los valores obtenidos se aproximaron de los datos tomados del ensayo natural para los 12 meses de exposición para las urbanizaciones Tres Vendas 1 y Porto, utilizando la temperatura mínima, y de la urbanización Tres Vendas 2 para la temperatura máxima. Para los tiempos de 4 y 8 meses el modelo presentó valores muy próximos a la urbanización Tres Vendas 1.

Se concluyó que el modelo de Bob (1996) presentó diferencias entre los valores obtenidos con su aplicación y los datos del ensayo natural, probablemente debido a la gran variación de temperatura diaria de la ciudad de Pelotas y el hecho del modelo considerar solamente ciertos valores de humedad relativa (50%, 85% y 100%) siendo que la humedad en la ciudad en cuestión, para todos los períodos, se encuentra entre los valores de 85 y 100%. Por ello el modelo aplicado con todo y la diferencia encontrada, presentó buena adherencia a los datos observados mostrando ser adecuado para algunas situaciones, demostrando potencial en describir el comportamiento de la profundidad de cloruros a lo largo del tiempo para la ciudad de Pelotas, siendo necesarios algunos ajustes en los parámetros de entrada.

Así con el indicativo de la presencia de cloruros en la ciudad analizada y el potencial demostrado por el método estudiado es importante para trabajos futuros la verificación de la concentración de cloruros en el ambiente de exposición y la comprobación de la profundidad de cloruros en el hormigón a través de otras formas que complementen el ensayo colorimétrico, para que sea posible su refinamiento de las variables aplicadas en el modelo y su mejor aplicación.

5. AGRADECIMIENTOS

A la Constructora Schumman por la donación de las probetas para la realización de esta pesquisa y al Laboratorio de Materiales y Técnicas Constructivas da Engenharia Civil de la UFPel por toda la ayuda y disponibilidad durante el desarrollo de este estudio.

6. REFERENCIAS

- Andrade, J. J. O. (2001), “*Contribuição a previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: Iniciação por cloretos*”. Tese de Doutorado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.277.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2007). *NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014). *NBR 6118: Projeto e execução de obras de concreto armado – Procedimento*. Rio de Janeiro.
- Bertolini, L. (2010) “*Materiais de construção: patologia, reabilitação, prevenção*”. Tradução Leda Maria Marques Dias Beck, São Paulo, Oficina de Textos, p.414.
- Bob, C. (1996), “*Probabilistic assessment of reinforcement corrosion in existing structures*”. In: International conference: concrete repair, rehabilitation and protection. Proceedings, Dundee, pp.17-28.
- Carmona, T. G. (2005), “*Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação*”. Dissertação de Mestrado em engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, p.103.
- Estação Agroclimatológica de Pelotas. “*Boletim Agroclimatológico*”. Disponível em <<http://agromet.cpact.embrapa.br/estacao/boletim.php>> Acessado em: 15.jan.2016.
- Gentil, V. (2003), “*Corrosão*”, Rio de Janeiro, LTC, p.341.
- Helene, P. (1997) “*Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto*”. Ambiente Construído, São Paulo, v.1, n.2, pp.47-57.
- Norma Técnica Fondonorma (2012). *NTF 4015 – Concreto. Durabilidad*. Santiago de León de Caracas.
- Real, L. V., et al. (2015), “*Método colorimétrico por aspersão de nitrato de prata para avaliação da penetração de cloretos em concreto: estado da arte*”. Revista Alconpat, v.5, nº2, pp.149 – 159. DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v5i2.84>
- Santos, F. S., et al. (2012), “*Estudo das características físico - químicas da água do Canal Prolongamento da Av. Bento Gonçalves – Pelotas – RS*”. In: Congresso norte nordeste de pesquisa e inovação. Anais. Palmas.
- Silva, F. G. S. (2006), “*Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*”. Tese de Doutorado em Ciência e Engenharia dos Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, p.236.
- Souza, M. F. (2015), “*Qualidade da água do canal São Gonçalo RS/Brasil – uma avaliação hidroquímica e considerando seus usos múltiplos*”. Dissertação de Mestrado em recursos hídricos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, p.105.
- Souza, V., Ripper, T. (2009), “*Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto*”, São Paulo, Pini, p.255.
- Vieira, F. M. P. (2013), “*Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa*”. Tese de Doutorado em engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.242.