

**PROCESO DE CARBONATACION DE LOS CONCRETOS HIDRAULICOS PARA
PAVIMENTO RIGIDO**



RAFAEL ANTONIO CALVO AGÁMEZ

MARIO ALBERTO SIERRA LEAL

***TRABAJO DE MONOGRAFIA PARA OBTENER EL TÍTULO DE ESPECIALISTA
EN VIAS TERRESTRES***

UNIVERSIDAD DE CARTAGENA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DE VIAS TERRESTRES

VI COHORTE

CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.

MARZO 2015

**PROCESO DE CARBONATACION DE LOS CONCRETOS HIDRAULICOS PARA
PAVIMENTO RIGIDO**



CO - INVESTIGADORES

RAFAEL ANTONIO CALVO AGÁMEZ

MARIO ALBERTO SIERRA LEAL

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN:
INFRAESTRUCTURA DE VÍAS Y TRANSPORTE**

**LINEA DE INVESTIGACIÓN
CONSERVACIÓN Y GESTIÓN DE VÍAS**

**DIRECTOR
ING. RAMON TORRES ORTEGA MSC.**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACION EN INGENIERIA DE VIAS TERRESTRES**

**VI COHORTE
CARTAGENA DE INDIAS D. T. Y C.**

MARZO 2015

NOTAS DE ACEPTACION

EVALUADOR 1: _____

EVALUADOR 2: _____



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

DEDICATORIA

A Dios eternamente por ser mi guía incondicional, a mis padres

Luz Marina y Rafael por ser mí pilar, a mis hermanos

Luis y Miguel, a mi futuro hijo (a)

A todos os dedico este triunfo.

Rafael Calvo Agamez

A mi padre Mario Sierra Anaya (Q.E.P.D.) que siempre está conmigo,

A mi madre Martha Leal y hermanos Oscar y Juan Sierra

Que son el motor que alimenta mi vida

Un cariño especial para la Familia Sierra Anaya,

Sierra Palomares, Eljach Sierra y

Sierra Sierra por su apoyo, cariño y buen ejemplo,

Nunca sería posible este logro sin ustedes.

Mario Sierra Leal



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

AGRADECIMIENTOS

*A Dios por darme la sabiduría para culminar este Proyecto,
Al Ing. Ramón Torres O. Por su apoyo incondicional y grandes consejos,
A mis profesores de postgrado (Benavides, Cárdenas, Barboza, Eljaiek,
Quiñones, Castilla, Guardela, Sepúlveda,
Sánchez, Álvarez, Martínez, Naizara, Pinto, Castro,
Ortiz, Torres, García, Correa, Acosta) a mis
Amigos de Postgrado que les
Tengo un cariño que no tiene precio,
A toda la facultad de Ingeniería.
Infinitas gracias...*

Rafael Calvo Agamez / Mario Sierra Leal



TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	8
1. INTRODUCCION.....	9
2. OBJETIVOS.....	12
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	12
3. CARBONATACION DE LOS CONCRETOS HIDRAULICOS.....	13
3.1 FENOMENO DE LA CARBONATACION.....	13
3.2 TIPOS DE VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE CARBONATACION.....	15
3.2.1 Relación A/C.....	15
3.2.2 Porosidad.....	17
3.2.3 Humedad Relativa.....	17
3.2.4 Grado De Exposición.....	17
4. MODELOS MATEMATICOS RELEVANTES QUE SIRVEN PARA PREDECIR LA CARBONATACION.....	29
5. MEDIDAS DE PREVENCION Y CONTROL PARA MINIMIZAR RIESGOS DE LA CARBONATACION.....	39
6. CONCLUSIONES.....	47
7. REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS.....	50



LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Influencia de la relación a/c con la capa carbonatada.....	16
Figura 2 Influencia del contenido de cemento con Profundidad de carbonatación.	16
Figura 3 Progreso de la carbonatacion en estructura de ambiente urbano	25
Figura 4 Progreso de la carbonatacion en estructura de ambiente rural	25
Figura 5 Modelo esquemático de la Carbonatación	31
Figura 6 Entorno de Software Carbonación para hallar el frente de Carbonatación	34
Figura 7 Diagrama de flujo del modelo, para conceptualizar el método.	37
Figura 8 Probeta de ensayo con recubrimiento de buena calidad, w/c=0.8 y después de 23 días de exposición acelerada. El color morado es el área libre de carbonatación.....	40
Figura 9 Probeta de ensayo con recubrimiento de baja y regular calidad, w/c=0.8 y después de 23 días de exposición acelerada. El color morado es el área libre de carbonatación.	40
Figura 10 Micrografia a escale 0.01mm de la placa 1241 carril derecho calzada mixta	44
Figura 11 Puente mercado de Bazurto en la Ciudad de Cartagena	45



LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 Reacción química del hidróxido de calcio con el dióxido de carbono atmosférico en presencia de agua.....	14
Ecuación 2 Profundidad de Carbonatación	30
Ecuación 3 Calculo de coeficiente de carbonatación según modelo de concentraciones cementantes (Puzolanas)	32
Ecuación 4 Coeficiente de Carbonatación según modelo de Procesos Fisico-Quimicos del concreto	33
Ecuación 5 Modelo a encontrar de Vector	35
Ecuación 6 Optimizacion y restricciones	35
Ecuación 7 Solución Problema de Optimización.....	36
Ecuación 8 Vector de Normalización	36

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Proporción de materiales empleados para la elaboración del concreto	18
Tabla 2 Propiedades del concreto con relación A/C de 0.49 y 0.69 a 28días	19
Tabla 3 Resultados de avance del frente de carbonatación.....	20
Tabla 4 Ubicación y denominación de elementos estructurales	23
Tabla 5 densidad, absorción, porosidad, profundidad y constante de carbonatación	24



RESUMEN

El objetivo principal de esta monografía fue describir el proceso de carbonatación en los concretos hidráulicos para pavimento, y elaborar un documento guía que sirva para la prevención y control de este proceso, para lograr prolongar la vida útil de estas estructuras. Se analizaron las variables más importantes que intervienen en la problemática como son la Relación Agua Cemento, Porosidad, Humedad Relativa y Grado De Exposición, llegando a la conclusión que relaciones agua cemento por encima de 0.5 generan concretos muy porosos lo cual son más susceptibles a carbonatación, mientras que las otras dos variables son determinantes ya que se necesitan humedades relativas de 55% a 75% para que se de este fenómeno y la exposición de estas juega un rol fundamental porque las concentraciones de CO₂ en el ámbito rural y urbano son diferentes por lo tanto el frente de carbonatación a través del tiempo no será el mismo.

PALABRAS CLAVES: *Relación agua cemento, Humedad Relativa, carbonatación*



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

ABSTRACT

The main objective of this document was to describe the process of carbonation in hydraulic concrete paving, and develop a guide document that will serve for the prevention and control of this process, in order to prolong the life of these structures. The most important variables involved in the problem such as Water Cement Ratio, Porosity, Relative Humidity and Exhibition Grade evaluated, concluding that water cement ratios above 0.5 generate very porous concrete which are more susceptible to carbonation while the other two variables are crucial because relative humidities from 55% to 75% are needed for this phenomenon and exposure of these plays a fundamental role is because the concentrations of CO₂ in rural and urban areas are different for therefore the carbonation front over time will not be the same.

KEYWORDS: *Water Cement Ratio, Relative Humidity, Carbonation*



1. INTRODUCCION

El concreto como material estructural es el de mayor uso a nivel mundial por lo simple de su composición (cemento, agua, arena y triturado), manejabilidad, resistencia y duración. (Galan, 2011). Este posee capacidades de resistir esfuerzos a compresión y en combinación con el acero estructural forma una unión muy compacta que mejora su comportamiento a tensión, dando origen así al concreto reforzado, el cual con altos estándares de calidad en su diseño y construcción lo hace estructuralmente muy eficiente. Algunos ejemplos de estructuras donde se usa son las represas, autopistas, puentes, túneles, edificios, etc.

La demanda de concreto a nivel nacional ha crecido de manera significativa, según datos históricos de la empresa cementera ARGOS S.A., desde el año 2009 hasta el año 2012 se pasó de producir 5.2 millones de metros cúbicos de concreto a producir 8.5 millones de metros cúbicos, un incremento aproximado del 50% en 3 años. Ésta empresa tiene su campo de acción en Colombia, la costa oeste de los estados unidos y el caribe centro americano. (ARGOS S.A., 2013)

Sin embargo un parámetro muy importante en todo proyecto es la duración en el tiempo del mismo, la vida útil de las estructuras de concreto varía en función de su uso, el medio ambiente que la rodea, calidad de los materiales y técnicas de construcción utilizadas; Pero esta puede variar desde 20 hasta 100 años en condiciones ideales. La durabilidad del concreto se ve afectada entre otras cosas por factores internos de carácter químico como la reacción álcali-agregado y factores de carácter externo como la cloración, sulfatación y carbonatación. En este Documento se hizo referencia a la carbonatación que es el proceso en el cual el ambiente alcalino del concreto se va perdiendo gradualmente en el tiempo debido a la combinación de varios factores como lo son humedad, temperatura, ataque químico de CO₂ atmosférico, porosidad del concreto, relación agua /cemento, afectando sus propiedades mecánicas y dejando expuesto al acero de refuerzo al ataque de la corrosión. (Galan, 2011). Vale la pena dejar claro que es un proceso natural propio de la interacción



Química del concreto con el ambiente, que acompañado con malas prácticas de construcción y materiales de mala calidad se acelerara reduciendo la vida útil de las estructuras.

Un antecedente claro de esto fue el resultado de un estudio realizado por el grupo de investigación de estructuras de la pontificia universidad javeriana en Colombia por Edgar Muñoz, y David Gómez basado en un inventario de puentes realizado por el INVIAS (Instituto Nacional de Vías) para 3 periodos comprendidos entre (1996-1997,2001-2002,2007-2008) siguiendo la metodología del SIPUCOL (Sistema de admiración de puentes de Colombia), concluyeron que del total de 1995 puentes analizados, el 67% están en buen estado, el 28% presentaban afectaciones en sus componentes (losas vehiculares, Vigas longitudinales, estribos, y pilas) relacionadas con procesos de carbonatación, sulfatación, descascaramiento del concreto, aceros expuestos a la corrosión, los cuales necesitan intervención para su conservación y el 4% están en riesgo de colapso. (Muñoz & Gomez, 2011).

Para garantizar la vida útil de estos proyectos y debido al elevado costo económico que implica las reparaciones de las estructuras afectadas por carbonatación, existe la necesidad de que los ingenieros consultores, constructores e interventores conozcan y comprendan este fenómeno.

Esta investigación por ser del tipo de prevención, preservación, y gestión de obras de infraestructura vial se enmarcó dentro de la línea de investigación en **CONSERVACIÓN Y GESTIÓN DE VIAS** perteneciente al grupo de investigación en **INFRAESTRUCTURA DE VÍAS Y TRANSPORTE** de la facultad de ingeniería de la Universidad de Cartagena.



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

Por último se concluyó que es un trabajo muy importante por la recopilación, procesamiento y presentación de la información, ya que se extrajeron los artículos más relevantes y confiables según los autores, brindando la oportunidad a constructores, consultores e interventores de tener una perspectiva acerca de la problemática y saber tomar decisiones acertadas que puedan garantizar la mitigación del efecto nocivo de la carbonatación en los concretos hidráulicos, para así prolongar la vida útil de estos.



2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Describir el Proceso de Carbonatación en los concretos hidráulicos para pavimento rígidos, por medio de información secundaria desde el punto de vista de su patología física, analizando la incidencia de variables como grado de exposición, porosidad, relación agua/cemento, entre otras para generar un documento guía de prevención y control desde la perspectiva de los autores.

2.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Correlacionar las variables tales como porosidad, grado de exposición, relación agua/cemento u otras que inciden en el proceso de carbonatación de los concretos hidráulicos.
- Conocer los modelos matemáticos más relevantes que sirven para predecir el avance de la carbonatación en los concretos hidráulicos.
- Describir las medidas de prevención y control que permitan minimizar los riesgos de carbonatación.



3. CARBONATAACION DE LOS CONCRETOS HIDRAULICOS

La carbonatación se caracteriza por ser un proceso físico-químico en la que una serie de reacciones químicas se producen en la presencia de dióxido de carbono (CO_2), que promueve la reducción del pH en el hormigón. El CO_2 penetra en el concreto a través de un mecanismo de difusión el cual se produce gradualmente, dando lugar a una capa carbonatada (llamada frente de carbonatación) que aumenta en espesor con el tiempo. (Silva, Neves, & Brito, Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete, 2013).

En otras palabras, La carbonatación es una reacción de neutralización en el que inicialmente el alto pH de la pasta de cemento (típicamente en un intervalo de 13-14) disminuye a un pH de 8,4 (Sullivan Green, Hime, & Dowding, 2007).

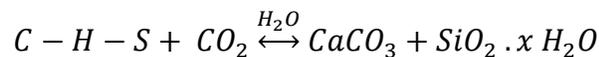
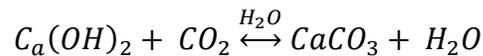
3.1 FENOMENO DE LA CARBONATAACION

La alta alcalinidad del hormigón, que funda la formación de una capa de óxidos pasivantes sobre el acero, es debida principalmente a la portlandita formada durante la hidratación de los compuestos anhidros del cemento y a los hidróxidos de sodio y potasio presentes. Estas sustancias sitúan el pH de la fase acuosa del hormigón contenido en los poros en valores entre 12,6 y 14, en la escala de pH. El descenso de la alcalinidad se produce principalmente por reacción de los compuestos de carácter básico de la fase acuosa del hormigón, hidróxidos de sodio, potasio y calcio, con dióxido de carbono (CO_2) y de azufre (SO_2), para formar carbonatos, sulfatos y agua donde el CO_2 se encuentra en mayor proporción en el aire que el SO_2 . (Galán, 2011).



Las moléculas de CO_2 penetran en el hormigón a través de los poros capilares no saturados de agua y posteriormente se disuelven en la fase acuosa contenida en ellos. Los iones CO_3^{2-} generados reaccionan con los iones Ca^{2+} presente formando carbonato cálcico (CaCO_3). Esta reacción se puede producir tanto con los iones Ca^{2+} de la portlandita como con los del gel de silicato cálcico hidratado (C-S-H). Las reacciones simplificadas se ven en la Ecuación 1.

Ecuación 1 Reacción química del hidróxido de calcio con el dióxido de carbono atmosférico en presencia de agua



(Sullivan, William, & Dowding, 2007) Dicen que durante la carbonatación componentes de hidróxido de calcio (CaOH_2) de la pasta de cemento reaccionan con el ácido carbónico leve creado cuando el gas dióxido de carbono (CO_2) se disuelve en el agua atrapada en los poros del hormigón. El hidróxido de calcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (con alto pH) pasa a carbonato de calcio CaCO_3 , el cual tiene un pH más neutral. (ARGOS, 2012)

La carbonatación es un fenómeno totalmente natural que ataca a toda masa de concreto, causando su mismo efecto no importa si es concreto estructural o concreto hidráulico para pavimento, por eso el fenómeno en esta monografía se trata en ciertas citas de forma general, lo que puede variar el efecto de la carbonatación son variables físicas que están asociadas al proceso como la porosidad, relación agua cemento, humedad relativa, grado de exposición, entre otras.



También podrían intervenir variables químicas en el proceso de la carbonatación tales como composición de la pasta del cemento o adiciones como uso de puzolanas, cenizas volantes o humo de sílice, pero que no han sido tenidas en cuenta en esta monografía.

3.2 TIPOS DE VARIABLES QUE INTERVIENEN EN EL PROCESO DE CARBONATACION

3.2.1 Relación A/C

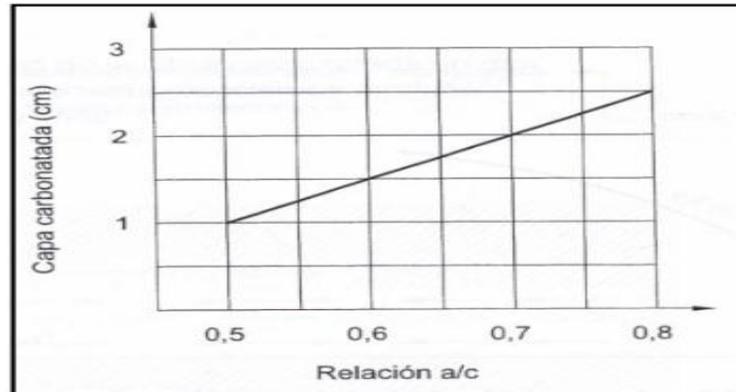
Se considera el parámetro más importante en la resistencia de los concretos hidráulicos debido a que la resistencia del concreto completamente compactado es inversamente proporcional a su relación agua /cemento (ARGOS, 2013). Relaciones de A/C por encima de 0.5 pueden proporcionar resistencias bajas y ser susceptibles a ser atacados por agentes externos, y relaciones A/C menores de 0.45 contribuyen a resistencias significativas a la compresión y mejor desempeño de la estructura a agentes que se encuentran en el medio ambiente que afectan la durabilidad. (Osorio, 2010).

La razón de que al tener relaciones A/C muy altas favorecen al proceso de carbonatación es que se aumenta la permeabilidad de los hormigones. La figura 1 Explica el comportamiento de esta relación; por el contrario, un aumento en la dosificación del cemento dificultaría el proceso como se ve en la Figura 2. (Pérez Méndez, 2010)



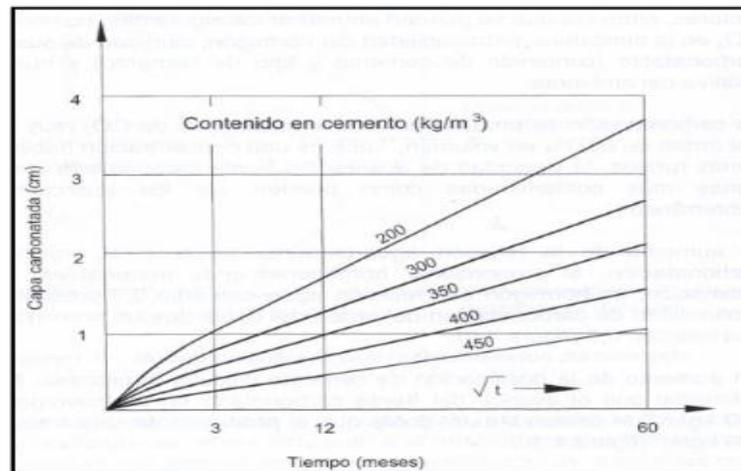
*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

Figura 1 Influencia de la relación a/c con la capa carbonatada



Fuente: (Pérez Méndez, 2010)

Figura 2 Influencia del contenido de cemento con Profundidad de carbonatación.



Fuente: (Pérez Méndez, 2010)



3.2.2 Porosidad

Ocurre cuando el concreto cambia de estado manejable y empieza a endurecerse, entonces los ingredientes más pesados tienden a asentarse en el fondo mientras que los ingredientes más livianos flotan arriba. El agua siendo el más liviana sube, entonces se evapora y se exprime en todas las direcciones. Como el agua ocupa espacios de la mezcla, esta deja muchos huecos entrecruzados en todas las direcciones, estos espacios huecos se atan entre si creando lo que se llama porosidad. (Lopez, 2004)

3.2.3 Humedad Relativa

La humedad relativa es la relación porcentual entre la cantidad de vapor de agua que tiene el aire y el máximo que podría contener a una temperatura y presión determinada. (INSTITUTO DE HIDROLOGIA, METEOROLOGIA Y ESTUDIOS AMBIENTALES, 2005)

3.2.4 Grado De Exposición

Es el medio al que está sometida la estructura y está directamente correlacionado a la durabilidad y buenas prácticas de construcción. Entre los diferentes grados de exposición tenemos ambientes marinos, acción de congelación y descongelación del hielo, fuertes vientos, exposición a sustancias químicas entre otros.

El estudio denominado “Carbonatación de concreto en atmosfera natural y Cámara de carbonatación acelerada” evaluó la relación A/C en los concretos hidráulicos para saber su



Influencia en el problema de carbonatación. El procedimiento experimental se basó en lo siguiente: materiales de agregados de la región (Península de Yucatán), arena de mar lavada proveniente de un banco de materiales de Sabancuy, Campeche y cemento Portland tipo I. (Chavez, Reyes, Perez, Corvo, & Osorno, 2010)

Con estos materiales se construyeron 12 vigas de concreto simple con dimensiones de (15 x 15x 60 cm) de las cuales la mitad con una relación A/C de 0.49 y la otra mitad con 0.69. Ver Tabla 1.

Las vigas de concreto se elaboraron con la proporción de materiales que se muestra en la siguiente tabla. Vale aclarar que previo a esto los autores del estudio hicieron los ensayos de absorción a los agregados, humedad, permeabilidad, consolidación y granulometría de acuerdo a las normas mexicanas NMX C-111.

Tabla 1 Proporción de materiales empleados para la elaboración del concreto

Contenido en Kg/cm³	Mezcla con Relación a/c= 0.49	Mezcla con Relación a/c = 0.69
Cemento	50 Kg	50 Kg
Arena	155.73 Kg	150.74 Kg
Grava	302.54 Kg	318.53 Kg
Agua	24.55 Kg	34.75 Kg

Fuente: (Chavez, Reyes, Perez, Corvo, & Osorno, 2010)



Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos

para pavimento rígido.

De las 6 muestras con A/C de 0.49 y 0.69 tres se colocaron con un grado de exposición marino, en el Centro Regional de Investigaciones Pesqueras (CRIP) ubicado en la costa de la ciudad de San Francisco y 3 en una cámara de carbonatación acelerada. Las muestras sometidas a la cámara se les incorporo 100 veces más el contenido de CO₂ para tener anticipadamente datos de frente de carbonatación. Se recalca que el procedimiento experimental duro 12 meses.

Luego de terminar la prueba se hizo un corte trasversal a la muestra y se aplicó la prueba de fenolftaleína para determinar si el espécimen estaba carbonatado. Se hicieron varias mediciones de cada muestra y se sacó promedio para cada relación A/C de las viguetas. (Chavez, Reyes, Perez, Corvo, & Osorno, 2010) Los resultados obtenidos se representan en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2 Propiedades del concreto con relación A/C de 0.49 y 0.69 a 28días

MEZCLA	RELACIÓN a/c =0.49				RELACIÓN a/c =0.69			
	f'c(Kg/cm ²)	Contenido de Aire (%)	Absorción (%)	Porosidad (%)	f'c(Kg/cm ²)	Contenido de Aire (%)	Absorción (%)	Porosidad (%)
1	281	3.5	9.8	25.6	190	3.3	12.1	31.5
2	295	2.9	8.0	21.3	210	3.0	11	29.0
3	266	3.1	8.8	23.5	185	2.9	10.7	27.8
Promedio	280.67	3.17	8.87	23.47	195	3.07	11.27	29.43

Fuente: (Chavez, Reyes, Perez, Corvo, & Osorno, 2010)



Tabla 3 Resultados de avance del frente de carbonatación

ESTACION	TIEMPO DE EXPOSICION (AÑO)	MEZCLA REL.A/C=0.69				MEZCLA REL.A/C=0.49			
		CARA EXPUESTA		CARA RESGUARDADA		CARA EXPUESTA		CARA RESGUARDADA	
		eco2(mm)	K(mm/año)	eco2(mm)	K(mm/año)	eco2(mm)	K(mm/año)	eco2(mm)	K(mm/año)
CRIP	0.25	10	20	4	8	5	10	3	6
	0.50	18	25.46	8	11.31	10	14.14	5	7.07
	0.75	30	34.64	20	23.09	18	20.79	15	17.32
	1.00	40	40	30	30	24	24	20	20
CCA	0.25	40	80	35	70	20	40	17	34
	0.50	60	84.85	56	79.20	35	49.5	32	45.25
	0.75	75	86.60	72	83.14	45	51.96	43	49.65
	1.00	75	75	75	75	60	60	58	58

Fuente: (Chavez, Reyes, Perez, Corvo, & Osorno, 2010)

Se concluyó de este estudio que la relación A/C de 0.49 presenta mejores propiedades físico-mecánicas debido a que tiene menor absorción de agua y porosidad lo cual no permite tan fácil el avance del CO₂ con en mezclas de relación A/C que son más porosas.

También se observa en la tabla 3 de frentes de carbonatación que las relaciones de A/C de 0.69 son carbonatadas más rápida en un año y es debido a que su relación es alta y contiene mucha agua en la mezcla lo que deja la mezcla más porosa y más propensa a la carbonatación. Por otra parte en la cámara de carbonatación se mantuvieron sensores para controlar las humedades relativas, temperaturas ideales para acelerar el proceso pero de igual forma se vio que la cara que está más expuesta a los agentes involucrados en el fenómeno natural de carbonatación es la que más se deteriora.

Con esto se puede decir que la relación A/C influye en la porosidad de una mezcla y que entre más porosa más fácil se carbonatará, y esta carbonatación depende de la humedad



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

Relativa del sitio ya que hay condiciones ideales para que se de este fenómeno, según este estudio son desde 60-75%, entonces teniendo todas estas situaciones entra en juego el grado de exposición de la mezcla y dependiendo como este colocada hay ambientes agresivos que interfieran en ella y muchas veces hay caras o zonas de la mezcla que sufren un deterioro más acelerado respecto a otras.

Se llega a la conclusión que si existe una correlación de estas variables y que algunas influirán más que otras dependiendo al aporte que tenga cada una en las mezclas de concretos hidráulicos. Pero siempre que se presente el fenómeno de carbonatación por lo menos se puede estimar que mínimo estas 4 variables están interactuando de cierta forma en la problemática.

Por otra parte La Universidad Nacional del Sur en La Argentina desarrollo estudios de los problemas de carbonatación en estructuras de concreto en dos tipos de ambientes; rural y urbano. Este estudio fue desarrollado por los investigadores Priano y Leñas patentado en la revista “International Journal of Innovation and Applied Studies” en el 2013.

Evaluaron dos estructuras de concreto de 42 y 60 años, ubicada una en un ambiente rural y otra en ambiente urbano. El ambiente urbano lo clasificaron como un contenido de CO₂ considerable originado por la combustión del parque automotor de la ciudad y áreas completamente pobladas con diferentes grados de contaminación que dependen del control implementado por el gobierno de ese sector. El ambiente rural es libre de contaminantes químicos agresivos a los concretos hidráulicos, donde no existen fábricas, industrias pesadas, grandes zonas urbanas, proximidad al litoral marítimo en un radio de 5km a la redonda.



La obra emplazada en el ambiente urbano correspondió a una estructura de hormigón armado construida en 1968 diseñada con dos subsuelos, planta baja y nueve pisos, en la ciudad de Bahía Blanca en Argentina. El proyecto apenas se construyó la estructura se canceló y en 2012 se reanudaron las obras. La estructura de ambiente rural corresponde a 7 puentes construidos en la década de los 50 en una zona denominada “Bajo san José” de la Ciudad Bahía Blanca, donde en el año del 2006 se llevó a cabo un relevamiento del hormigón de pilas, vigas, capa de rodadura y estribos. (Priano & Señas, 2013)

Luego de tener las dos unidades a comparar con muestras de los concretos de obra se realizaron ensayos de densidad, desgaste, absorción, porosidad según la norma ASTM C542-97. Con fenolftaleína en solución alcohólica al 1% se midió la profundidad de la carbonatación de cada una de estas. La Tabla 4 muestra los elementos comparados de las estructuras de ambiente rural y urbano y La Tabla 5 muestra el coeficiente de carbonatación que tuvo cada una de estas.



Tabla 4 Ubicación y denominación de elementos estructurales

Ambiente	Muestra	Ubicación
Urbano	C1	columna zunchada subsuelo
	C2	columna zunchada subsuelo
	C3	columna interna
	C4	columna interna
	C5	columna interna
	C6	columna interna
	L7	losa con acumulación de agua
	L8	losa central
	L9	losa cercana perímetro externo
	L10	losa cercana perímetro externo
Rural	P1	Pila Puente 4
	P2	Estribo Puente 2
	P3	Tablero Puente 3
	P4	Viga Puente 4
	PV	Estribo Puente Viejo

Fuente: (Priano & Señas, 2013)



Tabla 5 densidad, absorción, porosidad, profundidad y constante de carbonatación

Ambiente	Muestra	Densidad (g/cm³)	Absorción (%)	Porosidad (%)	Xc (mm)	Kc (mm/año 0.5)
Urbano	C1	2.39	7.1	18.5	45	6.94
	C2	2.38	7.4	19.3	40	6.17
	C3	2.35	6.8	18.1	31	4.63
	C4	2.37	6.5	16.9	38	5.86
	C5	2.44	5.3	13.5	30	4.63
	C6	2.45	6.1	15.2	28	4.32
	L7	2.43	3.7	11.3	15	2.31
	L8	2.37	5.7	13.8	22	3.39
	L9	2.43	4.1	11.8	20	3.09
	L10	2.39	4.6	12.5	19	2.93
Rural	P1	2.32	13.1	27	31	4
	P2	2.23	10.7	21.8	10	1.29
	P3	0.224	9.6	20.1	11	1.42
	P4	2.3	11.7	23.9	22	2.84
	PV	2.42	7.8	17.4	5	0.56

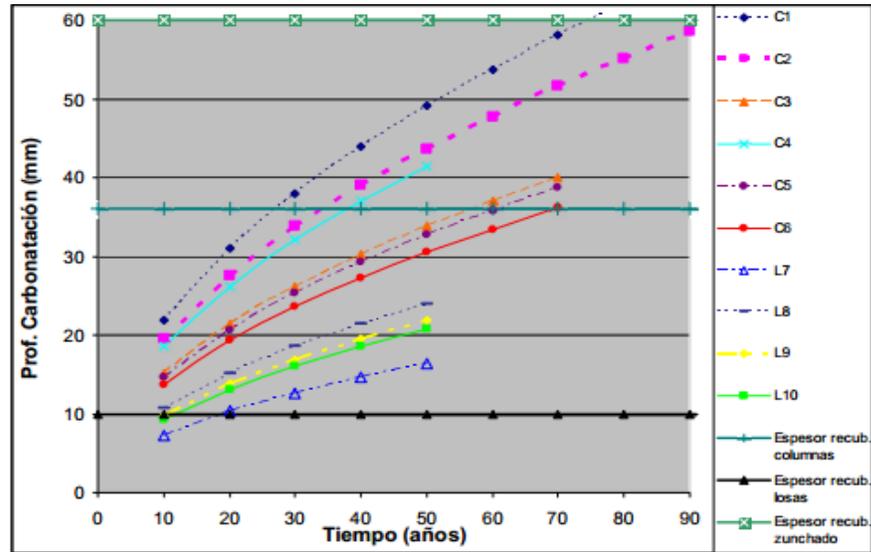
Fuente: (Priano & Señas, 2013)

Para la Tabla 5 se utilizó un modelo de predicción de la carbonatación a través del tiempo de vida de las estructuras vs profundidad de carbonatación y así mismo sacar las conclusiones mismas de este estudio. La figura muestra la estructura de ambiente urbano y el segundo la de ambiente rural.



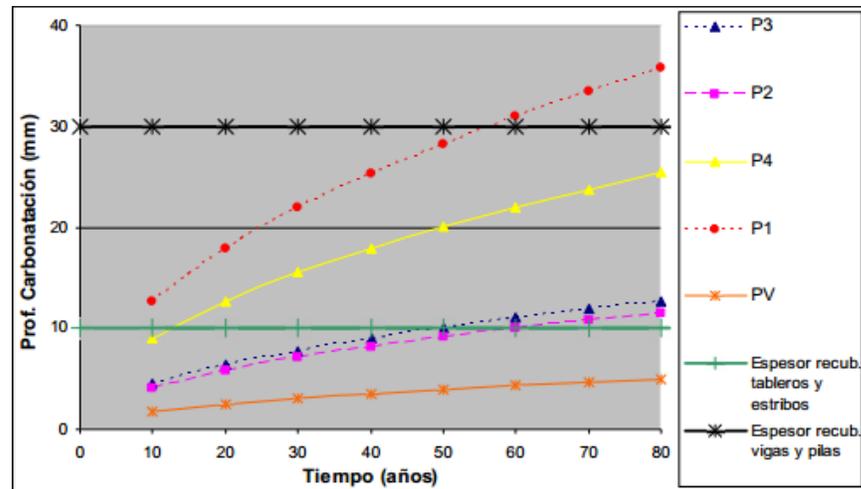
*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

Figura 3 Progreso de la carbonatacion en estructura de ambiente urbano



Fuente: (Priano & Señas, 2013)

Figura 4 Progreso de la carbonatacion en estructura de ambiente rural



Fuente: (Priano & Señas, 2013)



La figura 3 reflejó que el frente de carbonatación depende claramente de del recubrimiento que tenga el elemento estructural; como es el caso de las losas, con recubrimientos de 10 centímetros su comportamiento de profundidad de carbonatación a través del tiempo es lento alrededor de 3mm por año, casi lineal pero a los 12 años de vida presenta problemas por inicio de carbonatación. En columnas interiores que tienen grandes constantes de carbonatación, el fenómeno se da más tardío y es debido a los recubrimientos altos que tiene las columnas que son de 60 centímetros, esto permite a las columnas en estar sin peligro de carbonatación durante 44 años de servicio, entonces según el modelo los elementos C3-C4 pueden permanecer pasivos durante más de 60 años, algo similar sucede con las columnas del subsuelo que a pesar de tener mayor velocidad de carbonatación duraran alrededor de 70 a 90 años en perder su pasividad debido a la carbonatación. (Priano & Señas, 2013)

De la Figura 4, se resaltó que el puente más viejo que corresponde al elemento PV en la tabla 2, presenta menor velocidad de carbonatación y los autores asocian este resultado a la buena calidad del hormigón en especial la del recubrimiento lo cual arrojó un valor muy bajo de constante de carbonatación.

Los elementos P2 y P3 del puente 3 que corresponden al tablero y estribo respectivamente, presentaron velocidades de carbonatación bajas con penetración de 1.5 mm por año y debido a eso a partir de los 50 años de servicio empiezan a ser susceptibles al fenómeno de carbonatación, a pesar de tener 10 centímetros de recubrimiento. Mientras que en la pila del puente 4 que corresponde al elemento P1 las velocidades de carbonatación y constante de carbonatación fueron muy altas, el frente de carbonatación arrojó valores 4mm de profundidad por año, pero conserva el mismo periodo de vida de servicio en estado pasivo de 50 años al igual que las losas y es debido a su gran espesor en recubrimiento.



Los autores concluyen que la pila del puente 4 esta resguardada a las aguas lluvias y expuesta solamente a la humedad del ambiente, de tal manera que en los tiempos en que permanece seco, son más prolongados permitiendo mayor penetración de CO₂, mientras que el tablero está expuesto a lluvias y radiación solar se obtuvieron menores velocidades de carbonatación respecto a los elementos de la parte inferior del puente. (Priano & Señas, 2013)

Se concluyó que dos elementos a pensar de estar en ambientes distintos como lo fue el rural y urbano, fueron afectados por la carbonatación y que se debe al insuficiente recubrimiento, mala compactación en obras, diseños inadecuados y/o falta de mantenimiento. Los elementos expuestos solo a la humedad del ambiente presentaron mayor penetración de CO₂ y Los concretos reforzados con porosidad mayor del 20% permiten rápidamente el proceso corrosivo en ambientes no agresivos; de ahí que el ensayo de porosidad es importante para proyectar la vida de servicio útil de los concretos hidráulicos.

El último estudio tomó estructuras viejas y predijo el frente de carbonatación en ambientes rurales y urbanos a través de ensayos realizados según especificaciones de ASTM C542-97 para hacer regresiones lineales y ver el avance que tuvo la problemática en el transcurso del tiempo. Mientras el primero en solo un año hizo un análisis de la profundidad de carbonatación gracias a mecanismos que permiten acelerar el proceso como son las cámaras de carbonatación teniendo en cuenta las especificaciones NMX C-111. , llegando misma conclusión que fue hallar el frente de carbonatación y decir cuáles son las variables que más inciden en este fenómeno uno más que otro le da mayor porcentaje de incidencia que a otras, pero la relación A/C, porosidad, humedad relativa y grado de exposición siempre estarán presentes por lo mínimo para hacer un análisis.



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

En otras palabras cuando se deja constante una de estas variables para analizar el proceso de carbonatación hay otras que serán detonantes, ejemplo construir mezclas de la misma relación A/C para analizar la carbonatación no garantiza tener la misma porosidad ya que depende procesos constructivos, compactación y otros. Aun así teniendo estas dos últimas mencionadas de manera constante para estudiar el fenómeno, el grado de exposición y humedad relativa hacen un aporte diferente que inciden en la problemática, demostrando que son variables que están totalmente correlacionadas a la carbonatación.



4. MODELOS MATEMATICOS RELEVANTES QUE SIRVEN PARA PREDECIR LA CARBONATACION

La carbonatación natural es generalmente muy lenta, del orden de 0,04 % en volumen de CO₂, de forma que en determinados hormigones muy densos los efectos de este fenómeno pueden no aparecer hasta pasados varios años o decenios desde su puesta en servicio. La lentitud del proceso ha llevado a algunos investigadores a realizar estudios acelerados utilizando porcentajes de CO₂ mayores que el atmosférico para intentar predecir su comportamiento a largo plazo. A la vista de los resultados obtenidos, la correlación entre los ensayos acelerados y los naturales no está Clara en todos los casos, por lo que los mecanismos de reacción parecen ser diferentes según cuál sea la concentración de CO₂. Verbeck en 1958 apuntó como posible causa de las diferencias entre las carbonataciones a diferentes concentraciones de CO₂, la influencia indirecta que puede ejercer la concentración de CO en la humedad interior del hormigón. Según Verbeck, altas concentraciones de CO₂ pueden aumentar la humedad interna del hormigón debido a la mayor velocidad de reacción y evolución del agua; a bajas concentraciones de CO₂ la humedad interna no aumenta por encima de la humedad exterior.

En general, se acepta que a concentraciones por debajo del 3-4 % de CO₂ el proceso es similar al que ocurre al carbonatar en el aire o en ambientes naturales. Existen algunos estudios que describen la correspondencia en las profundidades de carbonatación en ensayos naturales y acelerados con bajas concentraciones de CO₂. Ho et al. En 1987 comprobaron que la profundidad de carbonatación de probetas carbonatadas al 4% durante una semana era similar a la de probetas carbonatadas en ambiente de laboratorio a lo largo de un año. En 2003 Sanjuán et al. Concluyeron que realizar ensayos de 7-15 días de carbonatación al 4-5 % de CO₂ es un procedimiento adecuado para calcular velocidades de carbonatación, ya que se obtiene aproximadamente la misma profundidad que al cabo de un año al natural. (Galán, 2011)



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

El modelo matemático de Rodríguez, Aperador y Vera autores colombianos y chileno el último, se basaron en los fundamentos de Tutti para predecir la vida de servicio de los refuerzos de acero. Tutti consideraba en su modelo la combinación de la carbonatación y los iones de cloruro, diciendo que el fenómeno se dividía en dos periodos: el primero es una iniciación que finaliza con el inicio de la corrosión y el segundo por un periodo de propagación activa. (Rodríguez, Aperador, & Vera, 2012). La difusión del dióxido de carbono en el concreto es un proceso en estado estable, en donde la profundidad de carbonatación x puede ser descrita mediante la ecuación 2:

Ecuación 2 Profundidad de Carbonatación

$$x = A\sqrt{t}$$

Fuente: (Rodríguez, Aperador, & Vera, 2012).

Dónde:

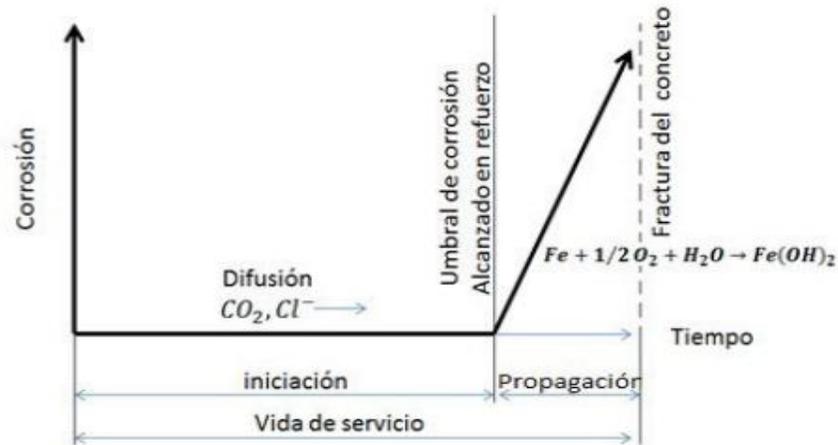
t : tiempo medido en años

A : Coeficiente de Carbonatación

Teniendo este principio se desarrolló un software para estimar el coeficiente de carbonatación mediante dos modelos matemáticos para si luego llegar al frente de carbonatación en un determinado tiempo. La figura 5 muestra el modelo conceptual de la corrosión de refuerzo en concretos reforzados.



Figura 5 Modelo esquemático de la Carbonatación



Fuente: (Rodríguez, Aperador, & Vera, 2012).

El primer modelo matemático se basó en **concentraciones cementantes (Puzolanas) y condiciones ambientales**. Este tiene principios fundamentales que dicen: que la tasa de carbonatación depende de la humedad relativa del concreto, que están entre 50% y 75%, la velocidad de carbonatación depende de la concentración de CO₂ que está en 0.03% en zonas rurales y 0.4 % en zonas urbanas, la carbonatación crece al aumentar la relación agua cemento debido a la porosidad, pero también se ha encontrado que disminuir mucho el contenido de cemento amplifica la carbonatación debido a que baja la reserva alcalina y contempla que los materiales puzolanicos pueden tener o no propiedades cementantes por si mismos los cuales deben ser molidos e hidratados para adquirir esta propiedad y reaccionar químicamente con los hidróxidos de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos que poseen propiedades aglutinantes. Como resultado de la reacción puzolanica el concreto adquiere mayor resistencia mecánica y menor permeabilidad pero menor cantidad de hidróxido de calcio, aun así esta es suficiente para mantener alto pH. (Rodríguez, Aperador, & Vera, 2012)



Entonces a partir de las anteriores reacciones y de los compuestos que intervienen en el proceso de fabricación del concreto se propuso la siguiente ecuación que es una aproximación del cálculo del coeficiente de carbonatación A, de acuerdo a la concentración de ceniza volante como material puzolánico. Ver ecuación 3

Ecuación 3 Calculo de coeficiente de carbonatación según modelo de concentraciones cementantes (Puzolanas)

$$A = \sqrt{\frac{81.78 \times RH^{-0.386} \times T^{0.435} \times (w/b - 0.309) \times V_{CO_2}}{0.31 \times W_{Ce} \times (1 - 4.48 \times FA_{\%} \times SiO_{2\%})}}$$

Fuente: (Rodríguez, Aperador, & Vera, 2012).

Donde RH es la humedad relativa, T es la temperatura ambiente, w/b es la relación cemento agregado, V_{CO_2} es la concentración de CO₂, W_{Ce} es la masa de cemento por unidad de volumen de concreto, $FA_{\%}$ es la concentración de ceniza volante y $SiO_{2\%}$ es el porcentaje de dióxido de sílice.

El segundo modelo matemático se basa en *los procesos físico-químicos en la carbonatación del concreto*. Sigue exactamente el modelo matemático planteado por Papadakis que presenta y modela los procesos en la carbonatación del concreto; estos procesos incluyen la difusión de CO₂ en su fase gaseosa en los poros del concreto. El modelo lleva un sistema muy complejo no lineal de ecuaciones diferenciales en espacio y tiempo, y debe ser resuelto numéricamente para las concentraciones desconocidas de los materiales involucrados. En este modelo se da concordancia en la dependencia de la profundidad de carbonatación con el tiempo, con la relación agua cemento, con la concentración atmosférica de CO₂, temperatura ambiente y humedad relativa. La ecuación 4 estima el coeficiente de carbonatación según Papadakis.



Ecuación 4 Coeficiente de Carbonatación según modelo de Procesos Fisico-Químicos del concreto

$$A = \sqrt{\frac{2 \times D_{eCO_2}^C \times [CO_2]^0}{[Ca(OH_2)]^0 + 3 \times [CSH]^0 + 3 \times [C_3S]^0 + 2[C_2S]^0}}$$

Fuente: (Rodríguez, Aperador, & Vera, 2012).

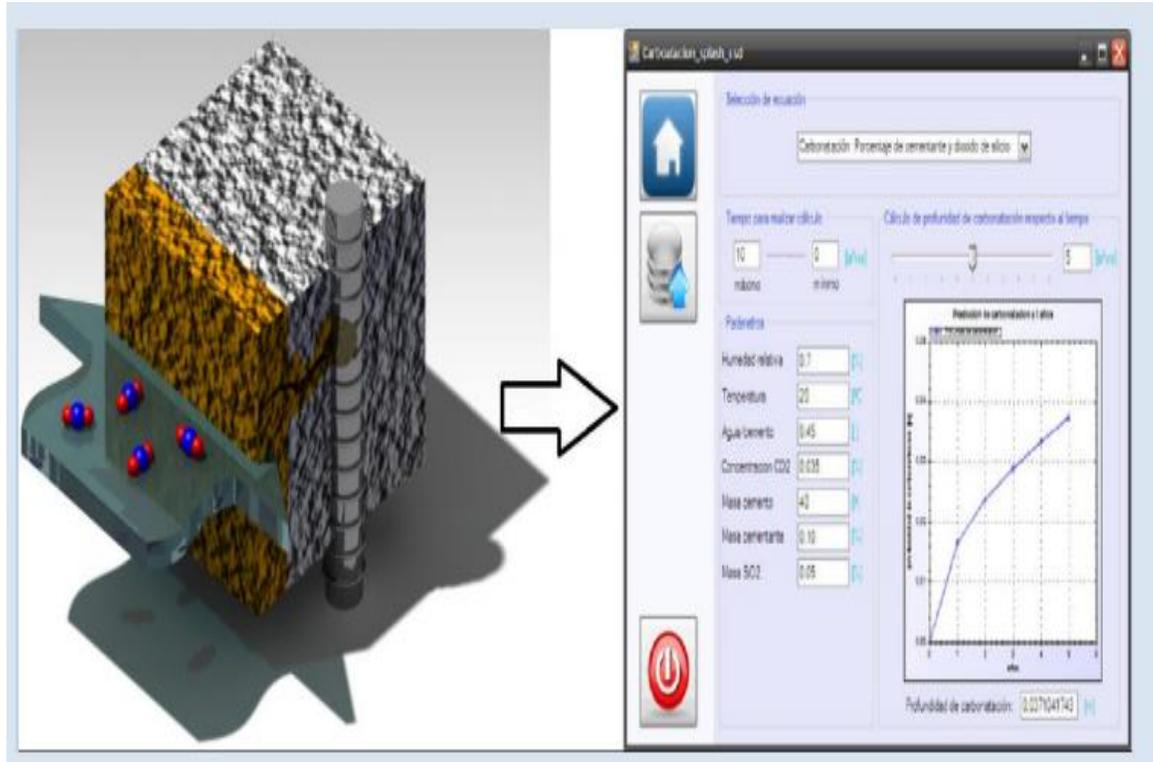
Donde $2 \times D_{eCO_2}^C \times [CO_2]^0$ hace referencia a la constante de difusividad efectiva de CO₂, $[CO_2]^0$ representa la concentración de CO₂ en la superficie $X=0$, $[Ca(OH_2)]^0$, $[CSH]^0$, $[C_3S]^0$, $[C_2S]^0$ representan la concentración de hidróxido de calcio, geles de silicato de calcio, trisilicatos de calcio y disilicatos de calcio respectivamente.

Estos modelos matemáticos sirvieron para la estimación del coeficiente de carbonatación, entonces los autores Rodríguez, Aperador y Vera realizaron un software programado llamado Software Carbonación bajo la plataforma libre Sharp Develop, el cual es un entorno de desarrollo integrado libre de C#, que usa el complemento libre para generación de graficas ZedGraph en 2D. Ver Figura 6



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

Figura 6 Entorno de Software Carbonación para hallar el frente de Carbonatación



Fuente: (Rodríguez, Aperador, & Vera, 2012).

En la figura anterior se muestra que al abrir la pantalla del programa se pide introducir el modelo de la ecuaciones es decir escoger alguno de los dos métodos mencionados anteriormente, ya sea el modelo de Papadakis y de concentraciones cementantes, luego se procede a introducir las variables que pide el modelo ya sea relación agua-cemento temperatura etc., este simultáneamente realiza una gráfica del frente de carbonatación respecto al tiempo en metros.

También existen otros modelos matemáticos que sirven para la predicción de la carbonatación como es el *Modelo De Predicción De Carbonatación Mediante Un Vector De Regresión Soporte*. Este estudio se basó en un modelo de regresión mediante vectores



(SVR: support vector regression y SVM: support vector machine, los cuales son modelos de regresión) para predecir la profundidad (frente) de carbonatación teniendo en cuenta la relación agua cemento, el consumo de cemento y el tiempo de servicio usando datos históricos reales de carbonatación para observar la exactitud del modelo en comparación con los modelos de redes neuronales artificiales (ANN). (Xiang, 2009)

El modelo fue a primera vista llamado mejor que la ANN debido al uso del principio de minimización del riesgo estructural formulando funciones de costo, Así mismo encontrando una función(Ver Ecuación 5) la cual su desviación de un objetivo de determina muestra sea el de todos los datos utilizados como el conjunto de los datos entrenamiento; Donde intervienen el peso del vector, una función característica y un término de sesgo, con el problema de dos variables (ξ y ξ^*) las cuales son de holgura y representan la distancia de los valores reales con los valores límites para la condición ε , formando un problema variacional. La formulación de La Ecuación 6 es para restringir las variables ξ y ξ^*) si no la función de minimización no sería factible, La constante C es la función de costo midiendo el riesgo empírico, se introduce una función de perdida para asegurar que no haya desviación más pequeña que ε y si se da que sea penalizada linealmente. (Xiang, 2009)

Ecuación 5 Modelo a encontrar de Vector

$$f(x) = w * \varphi(x) + b$$

Fuente: (Xiang, 2009)

Ecuación 6 Optimizacion y restricciones

$$\min \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{n=1}^{cl} (\xi_i + \xi_i^*)$$



$$\left\{ \begin{array}{ll} y_i - w\varphi(x) - b \leq \varepsilon + \xi_i & \xi_i \geq 0 \\ w\varphi(x) + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^* & \xi_i^* \geq 0 \end{array} \right\}$$

$$L(\xi) = \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ si } |\xi| \leq \varepsilon \\ |\xi| - \varepsilon \text{ para el caso contrario} \end{array} \right\}$$

Fuente: (Xiang, 2009)

Con este modelo de optimización se obtiene el SPV descrito por la función de la ecuación 7 encontrada al resolver el problema.

Ecuación 7 Solución Problema de Optimización

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) K(x_i, x) + b$$

Fuente: (Xiang, 2009)

Donde los parámetros α no tienen valores de cero. K es la función de kernel, usando la base radial gaussiana de la función de kernel (RBF).

Los datos de la relación agua cemento, consumo de cemento y el tiempo de servicio se introduce como valores normalizados en una serie para el vector según se muestra en la Ecuación 8.

Ecuación 8 Vector de Normalización

$$V = \{v_1, \dots, v_j, \dots, v_n\} \rightarrow V' = \{v'_1, \dots, v'_j, \dots, v'_n\}$$



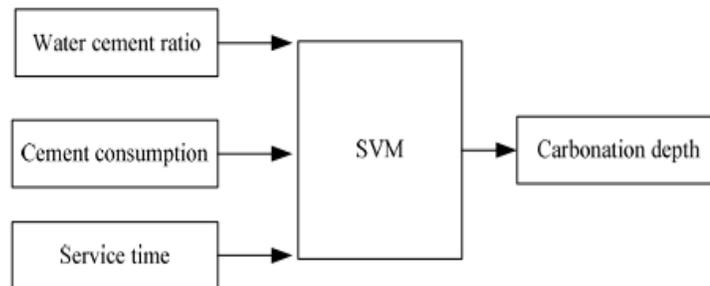
*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

$$v'_1 = \frac{v_j}{\max_{i=1} (v_i)}$$

Fuente: (Xiang, 2009)

La Figura 8 muestra el resumen conceptual del modelo para predecir el frente de carbonatación, se introducen valores de relación agua cemento, contenido de cemento y tiempo de servicio, luego pasa por el modelo de maximización que es conocido Support Vector Machine (SVM) donde interfieren la serie de ecuaciones mencionadas anteriormente y así llegar a un valor de frente de carbonatación.

Figura 7 Diagrama de flujo del modelo, para conceptualizar el método.



Fuente: (Xiang, 2009)

La importancia de estos modelos es que agilizan el comportamiento del fenómeno de carbonatación y a través de ellos se puede hacer proyecciones para estimar el frente de carbonatación a un determinado tiempo de servicio, mientras que la no existencia de estos modelos llevaría a esperar muchos años para ver el avance y profundidad de este fenómeno.



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

Por último se resalta que estos modelos sirven para predecir el frente de carbonatación mas no dicen exactamente el valor de profundidad y avance, los valores son muy cercanos a los reales pero son confiables, esto es debido a la confiabilidad que se ha reflejado en campo a través del pasar de los años.



5. MEDIDAS DE PREVENCIÓN Y CONTROL PARA MINIMIZAR RIESGOS DE LA CARBONATACIÓN

Los mecanismos de prevención ayudan a mitigar el proceso de carbonatación e incluso adecuadas técnicas de construcción pueden ayudar a brindar mejor durabilidad a los concretos hidráulicos.

Existen métodos desde los más sencillos hasta los más complejos como el diseño de recubrimientos específicos, pinturas de protección, métodos adecuados de compactación de concretos entre otros, pero la implementación de estas técnicas o métodos de prevención dependen de la economía del proyecto o de la circunstancia en que se exponga la estructura.

La conservación de las estructuras de concretos hidráulicos empieza desde la planificación, escogiendo las mejores técnicas, luego la construcción que se basa en utilizar las herramienta adecuadas y por último la preservación que trata de hacer los mantenimientos adecuados para que no decaiga la estructura y se deteriore a través del tiempo.

Un método de protección contra la carbonatación son las pinturas “VINIL-ACRILICAS”, investigadores de la Universidad Autónoma de Yucatán de México se enfocaron en estudiar el desempeño de los recubrimientos del concreto como una alternativa para evitar la carbonatación de los elementos de este material y, por lo tanto la corrosión del refuerzo. Varios tipos de pinturas Vinil-Acrílicas y uno de Acrílica fueron aplicadas en probetas de concreto para monitorear el avance de la carbonatación. Las probetas de concreto fueron cilíndricas y se colaron usando tres relaciones agua/cemento. Después de pintados los cilindros fueron carbonatados en una cámara de carbonatación a un 4% de CO₂ y 60% de humedad relativa. Los resultados mostraron que las pinturas Vinil-Acrílicas y Acrílicas de



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

Buena calidad redujeron satisfactoriamente la velocidad de carbonatación de los especímenes de concreto (Figura.6); pinturas Vinil-Acrílicas y Acrílicas de baja y regular calidad no redujeron la velocidad de carbonatación (Figura. 7) (Moreno, Solis-Carcaño, & Arias-Palma, 2008).

Figura 8 Probeta de ensayo con recubrimiento de buena calidad, $w/c=0.8$ y después de 23 días de exposición acelerada. El color morado es el área libre de carbonatación.



Fuente: (Moreno, Solis-Carcaño, & Arias Palma, Desempeño de las pinturas Vinil-Acrílicas contra la carbonatacion del concreto, 2008)

Figura 9 Probeta de ensayo con recubrimiento de baja y regular calidad, $w/c=0.8$ y después de 23 días de exposición acelerada. El color morado es el área libre de carbonatación.



Fuente: (Moreno, Solis-Carcaño, & Arias Palma, Desempeño de las pinturas Vinil-Acrílicas contra la carbonatacion del concreto, 2008)



Este estudio mostro el potencial que tiene los recubrimientos de pinturas contra el avance de la carbonatación, la diferencia de usar pinturas de buena calidad contra el uso de pinturas de baja y regular calidad quedo evidenciado en los resultados. Las pinturas de Vinil-Acrílicas y Acrílicas redujeron en un 80 % o más la profundidad de carbonatación en comparación con las probetas de control. Se necesita mucha investigación sobre el tema, pero estos productos muestran los beneficios que pueden traer a la industria de la construcción como protección contra la carbonatación.

Otros antecedentes que son importantes a la hora de preservar las estructuras sobre la carbonatación son los productos comerciales. Sikagard-760 W elastocolor es un producto de SIKA que sirve de revestimiento, funciona como una capa contra los agentes externos que atacan los concretos hidráulicos (SIKA, 2013).

Este producto es una pintura de protección frente a la carbonatación, que se utiliza en morteros y concretos expuestos a ambientes agresivos, sus ventajas son que tiene alta resistencia a la difusión el CO₂, permeable al vapor de agua, excelente resistencia a la intemperie y al envejecimiento, impermeable al agua lluvia y fácil de usar. Su apariencia es de color blanco y gris, su espesor de capa es de 60 micras por capa lo máximo que se puede usar en una capa es 120 micras, en ambientes marinos se aplica 2 capas y puro, mientras que en condiciones normales 1 capa y diluido en 5 % de agua. Este producto se puede aplicar mediante una brocha, rodillo de pelo corto o por proyección de equipos. Como recomendación de SIKA la segunda capa de aplicación se hace en sentido perpendicular a la primera para lograr una mayor capacidad. (SIKA, 2007).

Como todo producto aplicable este tiene sus limitaciones y son: no se puede aplicar cuando se esperen lluvias, en concretos menores a 28 días de edad, con humedad relativa del aire superior al 80 % y temperaturas menores a 8 °C o debajo del rocío. (SIKA, 2007).



Esta es una prueba de cómo ha evolucionado el mundo de la construcción respecto al problema de carbonatación y ha implementado diferentes técnicas o soluciones para mitigar dicho problema como la implementación de pinturas que actúan de revestimiento a estructuras de concretos hidráulicos.

Otras técnicas empleadas para preservar la duración de los concretos hidráulicos son los recubrimientos anti-carbonatación; este es usado efectivamente para detener el dióxido de carbono. Incluso en Europa hay métodos estandarizados para evaluar la resistencia del dióxido de carbono de un recubrimiento, estas pruebas miden el coeficiente de difusión del CO₂ de un material. Estas pruebas han demostrado que en los concretos reforzados de alta calidad se puede añadir protección al acero en una cantidad igual a muchos centímetros de recubrimiento de concreto. Para estas técnicas es fundamental dejar claro que no todos los recubrimientos resisten el dióxido de carbono, muchos recubrimientos elastoméricos impermeables al agua no forman una barrera efectiva para el CO₂ entonces el uso de tal recubrimiento puede en efecto acelerar la carbonatación secando el concreto a tal grado que permita el ingreso más rápido del CO₂. De manera similar, los selladores penetrantes con frecuencia se usan erróneamente para proteger contra la carbonatación. Los materiales a base de silicón tales como los silanos y los siloxanos son repelentes del agua, pero no evitan que entre el dióxido de carbono a los poros del concreto y al secar el concreto pueden aumentar la rapidez de carbonatación. (INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO A.C, 2004)

Por otra parte el factor antrópico es fundamental en la durabilidad de los concretos hidráulicos, puesto que a la hora de construir obras en concreto se requiere de la experiencia adecuada para ejecutar dichas técnicas. Como es el caso de vibrar el concreto para que quede bien compacto, y es que no solo tiene sus ventajas en cuanto a resistencia sino también se correlaciona directamente con la durabilidad; una de sus ventajas son que disminuyen la segregación, elimina aire acumulado durante el vaciado del hormigón entre



Otras y lo más importante para combatir la carbonatación reduce los poros del concreto dándole uniformidad y haciéndolo menos propensos al frente de carbonatación. Para esto como se mencionó anteriormente se debe tener experiencia ya que no todos los concretos se pueden vibrar; ejemplo: los que tienen asentamientos mayores a 12 cm ya que se podría producir segregación, además saber que en caso de vibradores de inmersión el diámetro de la aguja no debe ser mayor a $1/3$ del espesor de los agregados, manejar frecuencias entre 9000 y 12000 rpm, en caso de losas para pavimento se debe introducir el vibrador en posición vertical en periodos de 5 a 15 segundos en un mismo punto que no llegue hasta el fondo y no compactar capas con espesores mayores a 50 cm. (Olate, 2005)

Ahora bien el descuido y falta de mantenimiento de las obras realizadas en concretos hidráulicos puede traer serias consecuencias que llevan la mayor parte de veces a demolición de las obras que es casi imposible adecuarlas nuevamente para garantizar su buen uso debido a los elevados costos de reconstrucción.

Un ejemplo clave a nivel nacional es el Sistema De Transporte Masivo en Barranquilla (TRANSMETRO) las losas de pavimento has sido víctimas del fenómeno de carbonatación, la universidad de Cartagena se encargó del estudio y realizo las pruebas pertinentes para encontrar la causa del deterioro de las losas de pavimento en el tramo #1 en la calle murillo de la mencionada ciudad.

El tramo tenía alrededor de 3.8 km se tomó un muestra de 12 núcleos donde 11 de ellos tenían problemas de carbonatación según los resultados petrográficos, que se corroboraron con la prueba de fenolftaleína. La máxima profundidad de carbonatación fue de 10.1 mm presentando daños de tipo desprendimiento y malla reticular con envejecimiento prematuro.



Para estimar el coeficiente de carbonatación de basaron en la segunda ley de Fick, que para un periodo de 20 años el frente de carbonatación es 6.23mm y la losa más carbonatada del muestreo para los próximos 20 años arrojo un coeficiente de 20.20mm lo cual indico que hay zonas en estado totalmente críticas que requieren mantenimiento o cambio inmediato de losas. Además se halló en las pruebas que la porosidad era alta lo cual se presentaron valores de exudación muy altos alrededor del 9.7 % indicando muchos microporos y capilares que ayudan a acelerar el proceso de la carbonatación. (UNIVERSIDAD DE CARTAGENA, 2013)Ver figura 10.

Figura 10 Micrografia a escale 0.01mm de la placa 1241 carril derecho calzada mixta



Fuente: (UNIVERSIDAD DE CARTAGENA, 2013)

Se observa en la imagen anterior que la muestra es muy porosa siendo muy susceptible a penetración de la carbonatación que en tan solo 5 años que fue puesto en servicio el sistema de Trasnmetro en Barranquilla presenta fallas no despreciables, existen otras causas también que contribuyen al deterioro y desgaste como pulimiento superficial de losas debido al gran volumen de sedimentos arenosos de origen aluvial y eólico que se encontraron sobre las calzadas, esorrentía superficial en la zona ya que aledaño al sector se encontró la cuenca Don Juan, pero todo fue condescendiente con la problemática de la carbonatación.



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

En el ámbito local se encontró otro gran antecedente del fenómeno de carbonatación; en el mercado de Bazurto, el puente que se demolió para dar lugar a la nueva solución vial del proyecto de TRASCARIBE que fue la construcción de una glorieta, presentó problemas de carbonatación y es que el estado por medio de TRASCARIBE solicitó a la UNIVERSIDAD DE CARTAGENA que se encargara de los estudios pertinentes del puente. (Figura 11).

Figura 11 Puente mercado de Bazurto en la Ciudad de Cartagena



Fuente: (El Universal, 2013)

La estructura que se ve la foto anterior que tenía más de 35 años de haber sido construida nunca tuvo mantenimiento y es que la razón por la cual se mandó a hacer el estudio era para preservarlo y adecuarlo para el nuevo proyecto de TRASCARIBE pero los costos oscilaban en 17 mil millones de pesos mientras que la construcción de la glorieta, estaciones y demás estructuras del diseño estaban en 20 mil millones de pesos.



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

Los estudios de patología arrojaron que las vigas presentaban Carbonatación, cloruros y sulfatos probablemente causados por la exposición permanente a gases provenientes de los vehículos, registrando grados de severidad moderada y muy severa. Además esta carbonatación había alcanzado profundidades cercanas al recubrimiento en algunas zonas dejando vulnerable el acero de refuerzo para su oxidación. En otras zonas se encontró penetraciones entre el 30% y 60% del recubrimiento pudiéndose alcanzar el 100% en los próximos 4 o 5 años si las condiciones prevalecían. (El Universal, 2013).

Esta es una muestra de cómo se vive a diario sin percatarse de los problemas de carbonatación que poseen las estructuras y es indispensable siempre hacer mantenimiento de estas y no fatigarlas hasta el punto que se considere 100% recambio de esta como fue el caso del puente de Bazurto.

Una obra sostenible es aquella que es capaz de ser mantenida a través del tiempo para cumplir su vida útil, donde la inversión es amortizada por la durabilidad de esta, pero solo se puede llevar a cabo implementando todas las técnicas anteriormente mencionadas desde el punto de vista de planeación, construcción y mantenimiento.



6. CONCLUSIONES

- El proceso de Carbonatación es un fenómeno natural que ataca a cualquier estructura de concreto ya sea pavimentos hidráulicos, estructuras verticales como edificios y estructuras continuas como puentes, ya que el CO₂ encuentra en el ambiente en concentración de 0.03% y tendrá tendencia a introducirse en los poros del concreto.
- Se concluye que las variables A/C, La porosidad, La Humedad Relativa y el grado exposición están directamente relacionadas entre sí y son las que más intervienen en la Carbonatación; ya que las relaciones A/C muy altas (> 0.5) tienen mayor contenido de agua lo cual hace que la mezcla sea más porosa, y por ende es más carbonatarle, ligado a esto existen condiciones ideales para que se dé el fenómeno que son humedades relativas que oscilan entre 55%-75% pero el grado de exposición es determinante en la durabilidad ya que un concreto hidráulico expuesto a ambientes marinos tendrá consecuencias diferentes a otro que no está, porque luego que el frente de carbonatación avance hasta el acero la corrosión se dará más rápida en el que está expuesto al mar.
- La concentración de CO₂ que se encuentra en el ambiente rural no es la misma que en el urbano, en los centros urbanos hay concentraciones del 0.4 % y en zonas rurales del 0.03 % esto es debido a que en la ciudad las industrias y el parque automotor generan más emisión de gases y combustiones haciendo que las estructuras en concretos hidráulicos presenten mayor frente de carbonatación en unidad de tiempo.
- Los modelos matemáticos calculan y predicen el frente de carbonatación en cualquier periodo de tiempo lo cual es de gran ayuda ya que este es un proceso muy lento que tarda mucho tiempo en manifestarse, entre los modelos matemáticos



(vector de regresión y software carbonation) se encontraron variables comunes como relación A/C, contenido de cemento entre otras que son las fundamentales en la esencia de la problemática. Se recomienda que para la utilización e interpretación de estos modelos debe hacerse de manera racional ya que estos fueron obtenidos bajo condiciones particulares de cada lugar y materiales utilizados.

-
- El trabajo realizado por la universidad Militar Nueva Granada de Colombia y la Universidad Pontificia Valparaíso de Chile logró sistematizar mediante un software el modelo matemático para predecir la carbonatación siendo un poco mas amplio que el modelo de vector de regresión, a pesar de que ambos llegan al mismo objetivo, el primero introdujo más variables y permitía hallar el frente carbonatado en concretos con adiciones puzolánicas lo cual es una ventaja porque abarca más variables que se encuentran en el ámbito de la Ingeniería.
- El factor antrópico es fundamental en la durabilidad de los concretos hidráulicos, en el caso del vibrado es fundamental para la compactación del concreto ya que reduce la porosidad y lo hace más resistente al frente de carbonatación. Para vibradores de inmersión el diámetro de la aguja para losas de concreto hidráulico se recomienda que no sea mayor de 1/3 del espesor de los agregados, el vibrador entre de manera vertical, las frecuencias deben ser de 9000 a 12000 rpm, no durar más de 15 en un mismo punto, no introducir la aguja hasta el fondo y lo mas importantes saber cuáles son los concretos que se pueden vibrar ya que estos dependen del asentamiento y una mala utilización podrá producir segregación.
- SIKagard-760 W elastocolor es un producto comercial de SIKA que sirve de revestimiento, funciona como una capa contra los agentes externos que atacan los concretos hidráulicos. Se recomienda que no se aplique cuando se esperen lluvias, en concretos menores a 28 días de edad, con humedad relativa del aire superior al 80 % y temperaturas menores a 8 °C o debajo del rocío.



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

- Las pinturas VINIL - ACRILICAS de alta calidad han demostrado ser muy efectivas, reduciendo hasta en un 80 % La Profundidad de Carbonatación. Se necesita mucha investigación sobre el tema, pero estos productos muestran los beneficios que pueden traer a la industria de la construcción como protección contra la carbonatación. Además se deja a futuras investigaciones conocer cómo afectan los aditivos (retardantes y acelerantes) en el proceso de carbonatación.



7. REFERENCIA BIBLIOGRAFICAS

- ARGOS. (27 de Junio de 2012). *360° en concreto*. Recuperado el 23 de Mayo de 2014, de 360° en concreto: <http://360gradosblog.com/index.php/carbonatacion-del-concreto-como-detectarla/#sthash.YmHmh7b5.dpuf>
- ARGOS. (28 de Junio de 2013). *360° EN CONCRETO*. Recuperado el 8 de Octubre de 2014, de <http://360gradosblog.com/index.php/resistencia-mecanica-del-concreto-y-resistencia-a-la-compresion/>
- ARGOS S.A. (21 de Febrero de 2013). *reporte integrado 2012*. Recuperado el 20 de Abril de 2014, de <http://argos.co/documento-interes>
- Chavez, E., Reyes, J., Perez, T., Corvo, F., & Osorno, B. (2010). Carbonatacion De Concreto En Atmosfera Natural Y Camara De Carbonatacion Acelerada. *Cenic*.
- El Universal. (23 de ENERO de 2013). *“Loma” de Bazurto será demolida: Transcribete*. Recuperado el 29 de Marzo de 2014, de <http://www.eluniversal.com.co/cartagena/local/loma-de-bazurto-sera-demolida-transcribete-105926>
- Galán, I. (2011). *Carbonatación del Hormigón: Combinación de CO₂ con las fases hidratadas del cemento y frente de cambio de pH*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Instituto De Hidrologia, Meteorologia Y Estudios Ambientales. (2005). *Sistema de Informacion del Medio Ambiente*. Bogota.
- Instituto Mexicano Del Cemento Y Del Concreto A.C. (2004). *www.imcyc.com*. Recuperado el 13 de Febrero de 2015, de <http://www.imcyc.com/revista/2000/nov2000/reparacion.htm#>
- Lopez, J. (ENERO de 2004). Porosidad Del Concreto. Guatemala



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

- Moreno, E., Solis-Carcaño, R., & Arias Palma, C. (2008). Desempeño de las pinturas Vinil-Acrílicas contra la carbonatación del concreto. *redalyc*, 31-39.
- Muñoz, E., & Gomez, D. (2011). Análisis de la evolución de los daños en los puentes de Colombia. *Revista Ingeniería de Construcción RIC*, 37-62.
- Olate, C. (2005). *www.melon.cl*. Recuperado el 13 de Febrero de 2015, de <http://www.melon.cl/documents/10157/c6882077-a06e-45b6-be71-602e3c558835>
- Osorio, J. (2010). Hidratación Del Concreto: Agua De Curado Y Agua De Mezclado. *Concretos-Cementos Argos-Blog Sobre Concreto*.
- Pérez Méndez, L. (2010). *Vida útil residual de estructuras de Hormigón Armado afectadas por corrosión*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Priano, C., & Señas, S. (2013). Carbonation of concrete structures located in urban and rural environment. *International Journal of Innovation and Applied Studies*, 6-15.
- Rodríguez, G., Aperador, W., & Vera, R. (2012). Software Para El Cálculo De La Velocidad De Deterioro De Los Hormigones Sometidos A Carbonatación. *Rev. Latinam. Metal. Mat*, 45-54.
- SIKA. (2007). Sikagard -670 W Elastocolor Revestimiento de protección para hormigón. *SIKA*, 497-501.
- SIKA. (2013). La Reparación y Protección del Hormigón Armado con Sika De Acuerdo con las Normas Europeas UNE-EN 1504. *Innovation & Consistency*, 1-52.
- Silva, A., Neves, R., & Brito, J. (2013). Statistical modelling of carbonation in reinforced concrete. *ELSEVIER*, 73-81.
- Sullivan Green, L., Hime, W., & Dowding, C. (2007). Accelerated protocol for measurement of carbonation through a crack surface. *ELSEVIER*, 916-923.



*Proceso de Carbonatación de los concretos hidráulicos
para pavimento rígido.*

Universidad De Cartagena. (2013). *Estudio De Actualizacion Y Verificacion De La Estructura Del Pavimento Superficial Y Estructural Sobre El Tramo N° 1 De Transmetro, Comprendido Entre Cra 14 (Soledad) Y Cra 5s (Barranquilla), Del Departamento De Atlantico.* Barranquilla.

Xiang, R. (2009). Prediction Of Concrete Carbonation Depth Based On Support Vector Regression. *Third Internology Applicationnational Symposium On Intelligent Information Tec*, 173-175.