

Alvaro Daniel López Closs (1); Carlos Rodrigo Velázquez Doldan (2); Luis Alberto Lavigne Bueno (3)

(1) Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, closs0880@hotmail.com

(2) Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, zedrigovelazquez@hotmail.com

(3) Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, luislavigne@hotmail.com

RESUMEN

La inspección y el mantenimiento de puentes es una materia de gran importancia en lo que respecta al buen estado de las rutas, ya que son éstos los que permiten darle continuidad a las vías en lugares en donde existen cierto tipo de obstáculos, por ejemplo ríos, arroyos. El principal agente de deterioro de las estructuras de hormigón en nuestro medio es la carbonatación, a menudo poco atendida, pero que juega un papel importante para la conservación de dichos elementos. De tal manera, este trabajo se realiza para tener una noción del estado actual de algunos puentes ubicados en ciertos tramos de rutas en la red vial nacional.

La metodología utilizada involucra un examen visual de campo, pruebas de carbonatación in situ y ensayos destructivos y no destructivos para determinar la calidad del hormigón y el coeficiente de difusión de la penetración de carbonatación en las estructuras que fueron encontradas con mayor deterioro.

ABSTRACT

EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN PUENTES CARRETEROS

Inspection and maintenance of bridges is a matter of great importance regarding the good condition of the roads, since it is these that give continuity to allow roads in places where there are certain obstacles, such as rivers, streams. The principal agent of deterioration of concrete structures in our environment is carbonation, often poorly attended, but plays an important role in the conservation of these elements. Thus, this work is done to get a sense of the current state of some bridges in certain stretches of roads in the national road network.

The methodology involves a visual field examination, testing carbonation in situ and destructive and nondestructive tests to determine the quality of the concrete and the diffusion coefficient of the penetration of carbonation in the structures that were found more deterioration.

EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN PUENTES CARRETEROS

RESUMEN

Una infraestructura vial adecuada es fundamental para el desarrollo socio económico del país. En un contexto geográfico como el paraguayo, con una parte de su población ubicada en áreas rurales, las carreteras toman importancia para la integración e interconexión del país. Por esta razón, entre otras, es muy importante que el sistema nacional de carreteras permanezca en buenas condiciones de transitabilidad, a fin de que el transporte se efectúe en forma eficiente y seguro.

En muchos casos, los puentes son el componente más vulnerable de una carretera y, aplicando una metáfora, una cadena no está más fuerte que su eslabón más débil; los puentes frecuentemente son los elementos que influyen en que la continuidad del servicio de transporte se efectúe en forma permanente y segura, favoreciendo en general un apropiado funcionamiento del Sistema Nacional de Carreteras del país.

La condición de los puentes de la Red Vial del Paraguay varía considerablemente. Muchas estructuras con más de cincuenta años de uso, generalmente sufren daños por falta de un mantenimiento adecuado, más que por su antigüedad. Algunas de las estructuras presentan un estado crítico con respecto a su estabilidad estructural y capacidad de carga y, en esas condiciones, la seguridad del tránsito asume altos niveles de incertidumbre asociados a riesgos crecientes.

Los puentes además, se ven afectados, entre otros aspectos, por las sobre cargas, influencia del ambiente, fenómenos naturales como inundaciones, lo que origina su deterioro.

PATOLOGÍA

La patología de las construcciones como la del hormigón armado, envuelve un campo de evaluaciones multidisciplinarias para el estudio de los orígenes del problema, con sus más diversos mecanismos de acción y manifestación.

EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN PUENTES CARRETEROS

Para que un síntoma en una estructura sea considerado patológico debe comprometer algunas de las exigencias de construcción, sea la capacidad mecánica, funcional o estética. En ese sentido, se observa que existe una fuerte relación entre la patología y el desempeño de la edificación, en la medida en que su evaluación es dependiente del comportamiento de la estructura en uso. El análisis de la patología es función de dos aspectos esenciales: tiempo y condiciones de exposición, lo que la asocia a los conceptos de durabilidad, vida útil y desempeño.

DESEMPEÑO

El desempeño de un material es entendido como su comportamiento relacionado al uso, que puede ser: desempeño mecánico, acústico, estético, químico, entre otros. En otras palabras es la capacidad del material de cumplir con la función que se le asigna.

Ejemplificando, el cemento PZ tiene un mayor desempeño frente al cemento Tipo I, en el caso de las fundaciones que están en contacto con suelos agresivos, porque la puzzolana es una adición activa que reacciona con los compuestos hidratados del cemento, Ca(OH)_2 , disminuyendo su disponibilidad para la reacción de los agentes agresivos y confiere al hormigón una elevada densidad disminuyendo su porosidad, haciéndolo más compacto, aumentando así su resistencia química.

VIDA ÚTIL

Una de las definiciones de vida útil más aceptada es la de ASTM E 632-82, según la cual vida útil es el "período de tiempo después de la construcción durante el cual todas las propiedades esenciales alcanzan o superan el valor mínimo aceptable con un mantenimiento rutinario", aunque han sido propuestas diversas definiciones semejantes. La vida útil es la cuantificación de la durabilidad la cual considera que es solamente una cualidad de la estructura. En esta línea, la vida útil residual es el tiempo de vida que queda a partir de la inspección de acuerdo con una predicción de vida útil.

EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN PUENTES CARRETEROS

DURABILIDAD

El concepto de durabilidad del proyecto de construcción debe abarcar una estrategia que considere todas las fases de desarrollo de las obras (Proyecto, Ejecución, Uso y Mantenimiento) y todos los mecanismos de agresión que ésta pueda sufrir. Intuitivamente, debe estar presente el factor tiempo, pues el mecanismo de deterioro actúa de forma gradual, a lo largo de la vida de las estructuras.

La norma ASTM E 32 “Standard Recommended Practice for Developing Short-Term Accelerated Tests for Prediction of the Service Life of Building Components and materials”, define la durabilidad de forma genérica, como la capacidad de mantener en servicio un producto, componente, conjunto o construcción durante un tiempo especificado.

POROSIDAD DEL HORMIGÓN

La pasta de cemento fresco es una red de partículas de cemento en agua, pero una vez que la pasta ha fraguado, su volumen aparente o bruto permanece aproximadamente constante. En cualquier etapa de hidratación la pasta endurecida consta de hidratos de varios compuestos, denominados colectivamente como gel de cristales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, algunos componentes menores, cemento no hidratado y residuos de los espacios rellenos de agua en la pasta fresca. Estos huecos se denominan poros capilares. Por lo tanto, en una pasta deshidratada hay dos clases distintas de poros que se representan en forma esquemática.

Poros capilares

Los poros capilares representan la parte del volumen bruto que no ha sido llenado por los productos de hidratación. Puesto que en estos productos ocupan más del doble del volumen de la fase original sólida (es decir, el cemento), el volumen del sistema capilar se reduce a medida que avanza la hidratación.

EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN PUENTES CARRETEROS

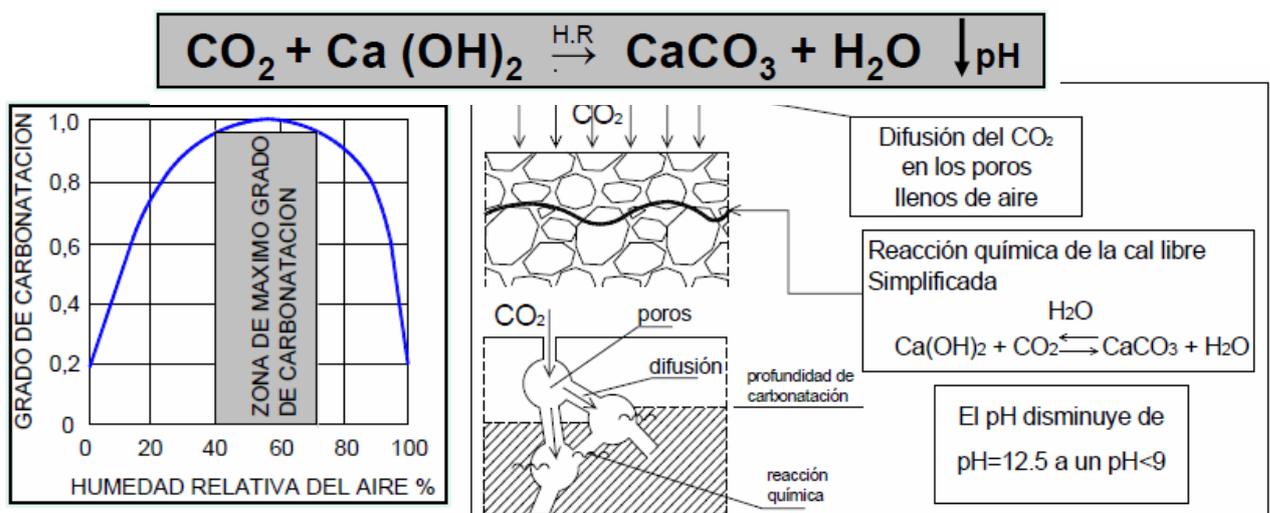
Por lo tanto, la porosidad capilar de la pasta depende tanto de la relación agua/cemento de la mezcla como del grado de hidratación.

Poros del gel

Consideremos aquí el gel en sí mismo. Del hecho de que puede tener grandes cantidades de agua evaporable, podemos concluir que el gel es poroso, pero sus poros son realmente espacios intersticiales interconectados en las partículas de gel. Por esta razón, la presión del vapor y la movilidad del agua absorbida son diferentes a las propiedades correspondientes del agua libre. La cantidad de agua reversible indica directamente la porosidad del gel. Los poros del gel ocupan alrededor de un 28% del volumen total del gel, considerado como sólido el material que se ha dejado secar en la forma acostumbrada.

Carbonatación

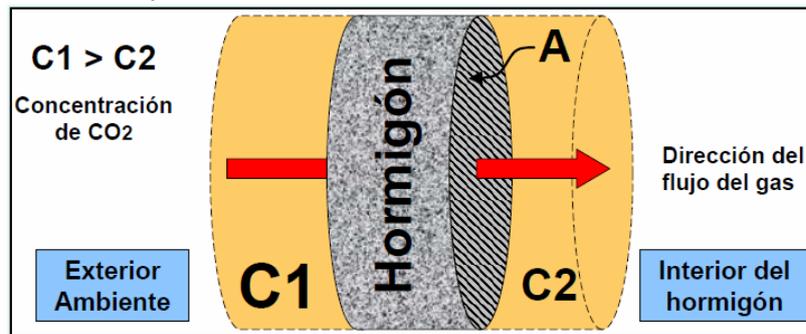
El CO₂ penetra por los poros del hormigón, reaccionando con los compuestos alcalinos de la fase acuosa, reduce el pH provocando la despasivación de las armaduras, si hay disponibilidad de humedad y oxígeno empieza la corrosión generalizada.



EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN Puentes Carreteros

Difusión

La difusión es el proceso por el cual un líquido o gas puede penetrar en un medio poroso debido a la acción de un gradiente de concentración entre el elemento que difunde y el material por el cual difunde.



En muchos fenómenos, la difusión ocurre en régimen transitorio, donde el flujo y la concentración varían con el tiempo.

En muchos fenómenos, la difusión ocurre en régimen transitorio, donde el flujo y la concentración varían con el tiempo.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial C}{\partial x} \right) \quad \text{Ecuación Diferencial de la difusión}$$

Coeficiente de difusión independiente a la concentración, por tanto independiente a la profundidad.

La solución de la ecuación será:

$$e_{CO_2} = k_{CO_2} \cdot \sqrt{t} \quad \text{Segunda Ley de Fick}$$

e_{CO_2} Profundidad de penetración del CO_2 (mm)

k_{CO_2} Constante que depende de las características del H°

t Tiempo (años)

**EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN
PUENTES CARRETEROS**

SISTEMA UTILIZADO

A fin de realizar la inspección de los puentes en forma sistemática se han elaborado planillas de relevamientos, las cuales hemos dividido en hojas de acuerdo al siguiente esquema:

Hoja 1: Identificación del puente y determinación de su tipología y morfología. Esta planilla se completa solamente con la inspección inicial o cuando los datos puedan presentar cambios a raíz de ensanchamientos, reconstrucciones o cualquier otro motivo que produzca una modificación de dichos datos.

Hoja 2: Relevamiento de las condiciones generales y el estado del puente (losas, vigas, pilas, estribos), tipo y estado de los accesos, equipamientos como cordones, barandas, sistema de drenaje, juntas de dilatación, aparatos de apoyo, canal de protección.

Hoja 3: Relevamiento de la profundidad de carbonatación en los distintos elementos de los puentes.

ENSAYO DE CARBONATACION

La comprobación más corriente utilizada por los ingenieros es a través de indicadores de pH a base de Fenolftaleína o Timolftaleína (Bucher, 1989). La figura muestra una escala gráfica de colores en función del pH para los indicadores utilizados con más frecuencia.

Reactivo	Valores de pH													
Timolftaleína														
Fenolftaleína														
	∠ 14	∠ 13	∠ 12	∠ 11	∠ 10	∠ 9	∠ 8	∠ 7	∠ 6	∠ 5	∠ 4	∠ 3	∠ 2	∠ 1

EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN PUENTES CARRETEROS

ESCLEROMETRÍA

Es un procedimiento para determinar el índice de rebote en el concreto endurecido mediante el empleo del dispositivo conocido como esclerómetro o martillo de rebote; determinación que sirve para evaluar la uniformidad superficial del concreto en el sitio o para delimitar zonas o aéreas de diferentes resistencias o al concreto deteriorado en las estructuras así como para indicar cambios en las características del concreto a través del tiempo, tal como aquellas causadas por la hidratación del cemento.

VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE ULTRASONIDO

Los materiales que se ensayan con este método son heterogéneos, como la madera y el hormigón; se excluyen los metales, ya que provocan una serie de irregularidades que afectan los resultados obtenidos.

Así el equipo hace posible conocer el hormigón en las siguientes cualidades: homogeneidad, la presencia de fisuras, los huecos, los cambios en hormigón debidos a diferentes causas como ataques del fuego y bioquímicos, así como también la calidad del hormigón.

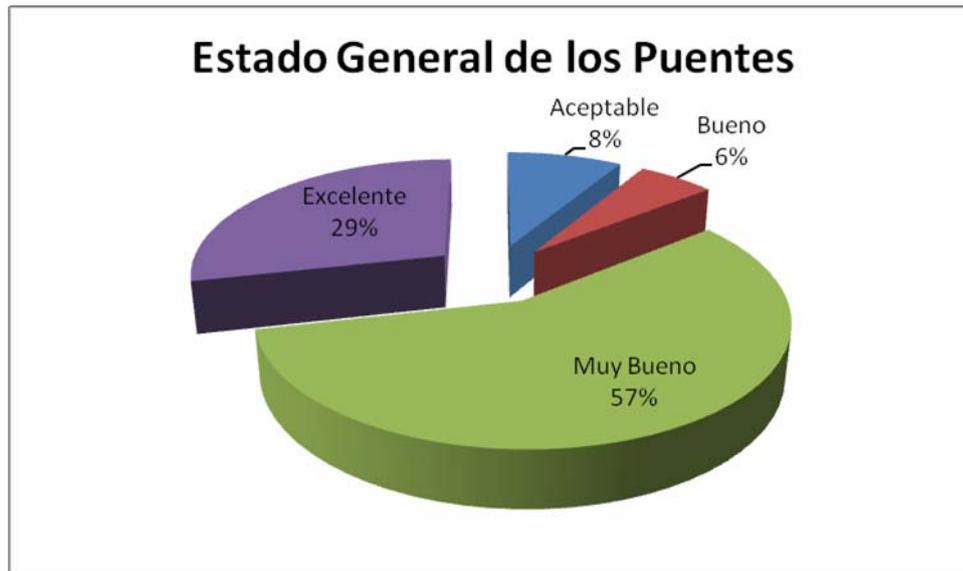
EXTRACCIÓN DE PROBETAS TESTIGO Y ENSAYO DE COMPRESIÓN SIMPLE

Relación Altura/Diámetro	2	1,75	1,5	1,25	1,1	1
Factor de corrección	1	0,98	0,96	0,94	0,90	0,80

RESULTADOS OBTENIDOS

El gráfico a continuación representa el estado de los puentes, resultantes de la inspección visual:

EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN Puentes CARRETEROS



A partir de estos resultados fueron hechos ensayos en los puentes en peores condiciones, que son los del Arroyo San Lorenzo sobre la Avda. Eusebio Ayala y el puente sobre el Arroyo Y´Akaroyá en la ciudad de Caacupé.

ANÁLISIS ECONÓMICO

Los presupuestos a continuación se realizaron en base a los precios unitarios de cada rubro descrito en el Capítulo VIII y computando la superficie afectada en cada puente analizado. El material de reparación escogido fue el Hormigón Aditivado.

En cada puente se realizó un análisis actual y uno a futuro, a cinco años. Para el análisis a futuro se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos:

- 1- La profundidad de carbonatación;
- 2- La tasa de inflación.

Para el análisis de la tasa de inflación, se tuvo en cuenta la inflación de los últimos 8 años, tomando el promedio de ellas y aplicando la siguiente fórmula de ajuste de precios:

EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN PUENTES CARRETEROS

$$C = c.(1+i)^n$$

Donde:

c: Capital

i: Tasa de interes correspondiente a un período de tiempo

n: Número de períodos de tiempo

C: Monto

PRESUPUESTOS

Arroyo: San Lorenzo (lado ciclovía). Monto Actual

Total General(Gs)	116,825,938
--------------------------	--------------------

Arroyo: San Lorenzo (lado ciclovía). Monto a 5 años

Total General(Gs)	400,913,416
--------------------------	--------------------

Arroyo: San Lorenzo (lado bomberos). Monto Actual

Total General(Gs)	87,531,022
--------------------------	-------------------

Arroyo: San Lorenzo (lado bomberos). Monto a 5 años

Total General(Gs)	171,902,579
--------------------------	--------------------

Arroyo: Y Akaro´ysá. Monto Actual

Total General(Gs)	500,051,432
--------------------------	--------------------

Arroyo: Y Akaro´ysá. Monto Actual

Total General(Gs)	1,158,958,750
--------------------------	----------------------

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN PUENTES CARRETEROS

PUENTE SOBRE A° SAN LORENZO (lado ciclovia)

En este puente fue encontrado un alto grado de carbonatación en las vigas, superando el recubrimiento de las mismas; comprometiendo la estructura y su funcionalidad.

Dada su situación, el cual sirve para vencer un obstáculo en una de las principales arterias para acceder a la ciudad de Asunción desde San Lorenzo, acarreando consigo un gran número de vehículos de pequeño y gran porte, se recomienda su intervención rápida; si bien la diferencia en el costo de reparación en la actualidad y de aquí a 5 años no sea representativa, 284.087.478 Gs, si lo será que la estructura se vea más deteriorada y represente un riesgo para la seguridad de los transeúntes y tengan que ser improvisadas o saturadas otras vías.

PUENTE SOBRE A° SAN LORENZO (lado bomberos)

Este puente presenta características similares que el anterior, en las zonas que corresponden al ensanchamiento, en donde la diferencia en costo de reparación es de 84.371.557 Gs.

Se recomienda su intervención en breve, aunque solo sea el ensanchamiento el área comprometida, esto provocará trastornos y cortes en al menos un carril de la vía.

PUENTE SOBRE A° Y AKAROYSÁ

Este puente está en estado crítico. La carbonatación superó el recubrimiento en losas y vigas, provocando el desprendimiento de este y la corrosión en forma generalizada y totalmente destructiva de las armaduras de las losas. Aparte de estos puntos, el puente presenta una familia de fisuras de cortante, siendo esto muy grave para la sustentabilidad del mismo; de acuerdo a los resultados obtenidos y los ensayos hechos, los cuales nos dieron la pauta de que el hormigón en las vigas es de mala calidad, razón por la cual aparecen estas fisuras.

EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN PUENTES CARRETEROS

Desde el punto de vista del presupuesto, la diferencia es muy importante, 658.907.317 Gs.

Se recomienda su intervención inmediata por verse muy comprometida su estructura, teniendo en cuenta el alto tránsito de camiones pesados (por estar ubicado en una ruta internacional), ómnibus, vehículos particulares, etc., y no poseer una ruta alternativa provisoria.

Si no se interviene rápidamente este puente, tendrá que volver a hacerse un análisis para su restauración, caso contrario debe presupuestarse uno nuevo, el cual hoy en día está costando aproximadamente 38.000.000 Gs/ml; significando esta suma para un puente de esta longitud la suma de aproximadamente 988.000.000 Gs, suma que incrementada a un valor futuro es apenas superior a la de reparación a 5 años.

De todas formas como se había mencionado anteriormente el puente debe ser intervenido de manera inmediata, siendo la comparación de precios entre la reparación inmediata, a 5 años o un puente nuevo meramente anecdótico.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Diego Fúster, Jorge Machuca, Amilcar Villasanti. **Diseño, Construcción, Manual de Operación y Aplicación de una Cámara de Ensayo Acelerado de Carbonatación en la FIUNA** – 2.008.
- Aníbal Gómez, Hugo Miranda, Yuji Yoshizaki. **Patologías de Puentes de H°A°** - 1.998.
- Eric Martínez, Moisés Ferloni Noguera, Santiago Haquín. **Evaluación del Desempeño de los Materiales de Reparación para Estructuras de Hormigón Armado** - 2.007.
- Ministério dos Transportes, Departamento Nacional de Estradas de Rodagem. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Inspeção de Obras de Arte Especiais** - 1.994

**EVALUACIÓN DE LA CARBONATACIÓN Y SU INFLUENCIA EN LA DURABILIDAD EN
PUENTES CARRETEROS**

- Hugo Barrera V., Horacio Pérez G., Román Sandoval. **La Carbonatación en edificios de Santiago.**
- Paulo Helene, Fernanda Pereira. **Manual de Rehabilitación de Estructuras de Hormigón, Reparación, Refuerzo y Protección.**
- Calavera J., (1996), **Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado Tomo II**, INTEMAC, Madrid.
- Calleja J., (1966), **Corrosión de armaduras en los hormigones armados y pretensados.**
- Jiménez Montoya P., García A., Moran F., (2000), **Hormigón Armado**, Gustavo Gili, Barcelona.
- Neville, **Propiedades del Concreto** – 1995.
- Universidad Nacional de Colombia, Ministerio de transporte e Instituto Nacional de Vías – República de Colombia, **Manual para la inspección visual de puentes y pontones** – 2006.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones – República del Perú, **Guía para inspección de puentes** – 2006.
- David Revuelta Crespo, José Pedro Gutiérrez Jiménez, **II Jornadas de Investigación en Construcción (Instituto de Ciencias de la Construcción "Eduardo Torroja", Madrid, 22-24 mayo 2008): Actas de las Jornadas. G.1. Calidad y seguridad: Seguridad estructural, pp. 1337-1349., 2008.**