N° 10: Forma de etringita diferida como causa de deterioro prematuro del hormigón en grandes obras de Ingeniería Civil

Ing. Guillermo D. Di Pace
Consultor Internacional en Tecnología del Concreto y del Cemento

ANTECEDENTES

Keywords: hormigón, durabilidad, etringita-diferida.

En esta conferencia se analiza una de las principales causas del deterioro actual en grandes obras de hormigón: La formación de etringita diferida. Este fenómeno es debido al auto ataque de los sulfatos contenidos en el cemento y a los aluminatos del mismo provocando un virtual ataque de sulfatos que pone en riesgo la durabilidad de las estructuras de hormigón curadas a temperaturas superiores a 75 °C. Este fenómeno descubierto en 1995 está siendo intensamente estudiado para encontrar los remedios y soluciones más apropiados para asegurar vidas útiles reales compatibles con la vida de diseño, en un medio en que, por motivos de sustentabilidad, la vida útil de las grandes estructuras de hormigón debe ser necesariamente incrementada.

Como caso de aplicación se analiza la construcción del nuevo puente de acceso a Guayaquil, Ecuador, realizado con la técnica de puente segmental, mediante dovelas premoldeadas-pretensadas. Durante la construcción de este puente, en una de las dovelas se experimentó una elevación inusual en la temperatura de curado del hormigón, por lo que hubo que hacer un análisis pormenorizado del riesgo de aparición de etringita diferida en tales circunstancias. Se analizan sucintamente las investigaciones realizadas por el autor que llevaron a la decisión de la demolición y el reemplazo de la dovela observada, debido al alto riesgo de deterioro prematuro del puente por acción de etringita diferida.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de la ingeniería civil es llevar la mejor tecnología disponible a las obras, intentando lograr seguridad, durabilidad y eficiencia obteniendo así la sustentabilidad de la industria de la construcción. En el mundo se producen anualmente 2.500 millones de toneladas de Cemento Portland. Ello se traduce en aproximadamente 10.000 millones m3 de Hormigón, o sea: 2.500 millones de toneladas de cemento, 20.000 millones de toneladas de agregados, 100 millones de m3 de aditivos, 20.000 millones de m3 de agua de 1ra. Calidad (incluye agua agregada, curado, lavado, etc.) La única forma de obtener esto sin comprometer el medio ambiente es asegurar una larga vida útil a las estructuras de hormigón. En este aspecto, los puentes son muy susceptibles a deterioros prematuros en el hormigón que comprometen su vida útil. Como ejemplos de este problema se mencionan a continuación tres casos ocurridos recientemente:

- Puente Loncomilla - Chile, 2004, que colapsó luego de 6 meses de ser rehabilitado y abierto al tránsito.
- Puente y viaducto en Biloxi, Mississippi, 2005, destruido por el Huracán Katrina
- Paso a desnivel Av. Agustín Freire, Guayaquil, 2005, sufrió el desprendimiento de trozos de tableros luego de pocos meses de abierto al tránsito.

Sin embargo, esto no necesariamente debe ser así. La preocupación por la seguridad y durabilidad de las construcciones ha sido permanente dentro de la cultura humana y los ejemplos de obras de gran durabilidad son numerosos. Veamos algunos casos. Al final de su reinado (2200 A.C.), HAMMURABI de Babilonia editó sus disposiciones, escritas en varios ejemplares. De ellas se conservan versiones en caliza (British Museum) y diorita (Louvre). Se extractan a continuación las disposiciones concernientes a la construcción:

Art. 229.- Si un constructor construye una casa, pero su obra no es lo bastante resistente, y luego resulta que la casa se derrumba causando la muerte del propietario de la misma, el constructor

será condenado a muerte.

Art. 230.- Si el derrumbe causa la muerte del hijo del dueño, se condenará a muerte al hijo del constructor.

Art. 231.- Si el que muere es un esclavo del propietario, el constructor deberá indemnizarle con un esclavo del mismo valor.

Art. 232.- Si destruye propiedad, tendrá que pagar todo lo que se destruyó. Es más, por no haber construido la casa con las debidas condiciones de resistencia, provocando el derrumbe, se verá obligado a reedificarla de su propio peculio.

Art. 233.- Si un constructor construye una casa y aunque no la haya terminado todavía, si parece que las paredes puedan caerse deberá reconstruirlas a su costo.

Otro ejemplo es el de Vitruvio, Ingeniero y Arquitecto romano (88 al 26 AC) que sirvió a Julio Cesar diseñando sus Ingenios de Guerra. Escribió un Tratado de Arquitectura en 10 tomos, donde define al CEMENTO ROMANO como 2 partes de cal + 1 parte de cenizas volantes de Pozzuoli. Aquí se utiliza por primera vez el término CONCRETUS.

Con esta tecnología los romanos realizaron obras espectaculares que llegan hasta nuestros días como ser el Panteón, el Coliseo, los Acueductos y la Vía Apia. Es necesario aguzar el ingenio e incrementar los conocimientos tecnológicos para lograr aumentar la durabilidad de todas las obras de Ingeniería civil. Por ejemplo, en el campo de la vivienda económica el Ing. Baglietto en su conferencia de incorporación como Miembro de Número de la Academia Nacional de Ingeniería, el 15 de septiembre del 2005, postuló que en la Argentina de hoy hay un déficit de aproximadamente 4.000.000 de viviendas compuesto de un déficit en la construcción de viviendas nuevas de 1.500.000 y de 2.500.000 en la refacción y ampliación. Además de los importantes recursos económicos necesarios para reducir este déficit en un plazo acotado, el mejor argumento técnico que se puede promover es el aumento drástico en la vida útil de las viviendas.

En este campo el autor, en la Mesa redonda: "La calidad de la vivienda: Certificación ISO, Investigación ,

realizada en FEMATEC - BATIMAT 2004, postuló la posibilidad de construir viviendas económicas con una vida útil asegurada de 200 años. Este objetivo es alcanzable si se elige al hormigón como material constitutivo de esta vivienda económica. Como evidencia de la factibilidad de este objetivo se cita el Proyecto de Investigación CONCRETE TECHNOLOGY FOR DURABILITY AND SUSTAINABILITY, dirigido por P. K. Mehta, Profesor Emérito de la Universidad de California en Berkeley cuyo propósito es diseñar un hormigón adecuado para vivienda económica con 200 años de vida útil garantizada.

Esta vivienda debe considerar tres aspectos importantes: Estructura de hormigón, Cerramientos principales de hormigón y Eficiencia energética.

Obviamente este mismo criterio debe ser aplicado a las grandes obras de Ingeniería Civil, que consumen grandes sumas de dinero y que deben tener una vida útil asegurada lo más prolongada posible. Para asegurar una vida útil prolongada se deben conocer a fondo todas las causas que afectan la durabilidad del hormigón.

En lo que sigue se analizará el caso de una de las formas actuales de ataque por sulfatos, la formación de etringita diferida y su efecto deletéreo en una obra de gran envergadura que se construye en la actualidad: el nuevo puente de acceso a la ciudad de Guayaquil, Ecuador.

2. PRINCIPALES CAUSAS DE FALLAS EN EL HORMIGÓN ARMADO

Las principales causas de fallas en el hormigón armado son:

- Corrosión de armaduras
- Ataque por sulfatos
- Reactividad Álcali-Sílice (RAS)
- Congelación y Deshielo
- Ataque ácido

El Ataque por Sulfatos es tal vez la patología más estudiada en el hormigón ya que se la identificó inclusive a fines del siglo XIX. Consiste en la formación de sales de sulfoaluminato, producto de la presencia de sulfatos en el medioambiente agresivo que se combinan con los aluminatos presentes en el cemento Portland. En presencia de agua, los sulfoaluminatos aumentan hasta 8

veces su volumen y generan presiones de hasta 70 MPa a la tracción, lo que no puede ser tomado por la resistencia de la matriz cementante, provocando la rotura progresiva del hormigón. Los sulfoaluminatos se encuentran también en estado natural. En particular su hallazgo en una zona cercana a la localidad de Ettringen, Alemania en el 1900, motivó que de ahí en adelante a estas sales se las conozca técnicamente como etringita. Para que este fenómeno ocurra obviamente debe darse la concomitancia de un ambiente agresivo con altos contenidos de sulfatos y un cemento con alto contenido de aluminatos, además de la presencia de humedad.

Todos los códigos de edificación protegen respecto de este agresivo, limitando los contenidos de aluminato de los cementos que pueden ser utilizados en contacto con sulfatos, o mediante el uso de cementos con adiciones inhibidoras de esta reacción. Se ha generado así un tipo especial de cementos Portland, llamados en Argentina (norma IRAM 50001) ARS (altamente resistente a los sulfatos) o MRS (moderadamente resistente a los sulfatos) a ser usados en función del porcentaje de sulfatos en el medio ambiente de la obra. Si bien este tema se consideraba como totalmente estudiado y cerrado a principios de la década del 90, se detectó en EEUU el deterioro prematuro de grandes cantidades de durmientes de hormigón para ferrocarriles, recientemente colocados e incluso antes de ser colocados en contacto con el terreno. Realizadas las investigaciones del caso se descubrió que la agresión efectivamente era un ataque por sulfatos pero, curiosamente, los sulfatos no provenían del medioambiente sino que había sido un auto ataque por sulfatos internos. Se descubrió así una novedosa forma de ataque por sulfatos que para diferirla de la clásica se la denomino Formación de Etringita Diferida.

3. ETRINGITA DIFERIDA

La Etringita Diferida es el compuesto que se forma por la reacción de sulfatos contenidos en el hormigón o en el medio ambiente con los aluminatos presentes en el cemento.

$$6CO.A12O3.3CaSO4.32H2O$$

El autor considera que la aparición en la escena mundial de etringita diferida a principios de la década del 90 esta originada en la tendencia actual de los fabricantes de cementos Portland que buscan clinkers con mayor actividad inicial (alto contenido de silicato tricálcico y de aluminatos) y una mayor finura de molienda. En curado a temperatura normal no se manifiesta la formación de etringita diferida pero numerosos trabajos realizados hasta la fecha demuestran que, si durante el curado de los primeros días del hormigón se alcanzan temperaturas elevadas, superiores a 65 °C (curado por vapor, clima cálido, hormigón masivo), parte del sulfato que se coloca como yeso para limitar la velocidad de hidratación de los aluminatos, se absorbe en la matriz sílico calcáreo hidratada, siendo retenido por esta mientras la temperatura se mantenga elevada. Con el correr del tiempo, al disminuir la temperatura que buscará asintóticamente la temperatura media anual del sitio de emplazamiento de las obras, parte del sulfato absorbido precipitará y estará disponible para reaccionar con el exceso de aluminatos que pudiera tener el cemento. Si en esas condiciones se verifica la existencia de cemento Portland con un contenido medio o elevado de aluminatos, fisuras preexistentes en el hormigón y humedad, se cumplen todas las condiciones para tener un grave deterioro prematuro del hormigón por formación de etringita diferida. Esto no es una anécdota mas, sino que es un grave riesgo a las estructuras de hormigón que se construyen hoy día. A título de ejemplo, el Estado de Texas (EEUU) registra decenas de miles de puentes con durabilidad afectada prematuramente y las causas más comunes de deterioro son corrosión de armaduras, reacción álcali-sílice y formación de etringita diferida. Asimismo se demostró que cuando ocurre la concomitancia de dos o más ataques, el deterioro se potencia fuertemente.

4. MECÁNICA DE FRACTURA DEL HORMIGON

La Mecánica de Fractura es una ciencia desarrollada desde mediados del siglo XX, que toma en cuenta no solo el estado tensional de los elementos, sino también la existencia de fisuras y microfisuras.

El autor estuvo recientemente involucrado en el proyecto de investigación No. 0-4085 "Preventing Premature Concrete Deterioration due to ASR / DEF in New Concrete" del Texas Department of Transportation realizado por la Universidad de Texas en Austin. En uno de los subproyectos asociados realizado conjuntamente con el Centro Técnico Loma Negra se estudió la posibilidad de caracterizar y medir el grado de deterioro del hormigón atacado por formación de etringita diferida mediante técnicas de fractomecánica.

El principal objetivo de esta investigación fue verificar si los principios generales de la Mecánica de Fractura del Hormigón son adecuados para medir el deterioro de elementos de hormigón estructural debido a la formación de etringita diferida. Si se pueden desarrollar métodos simples de ensayo que provean valores consistentes de parámetros de Fracto-Mecánica en elementos de hormigón dañados por la formación de etringita diferida, entonces podríamos complementar datos de expansión con otros indicadores mejor relacionados con la capacidad de carga remanente de estructura de hormigón y con el patrón de fisuración. Esto puede llevar a mejores estimaciones de la vida de servicio residual de estructuras dañadas. Esta aproximación fue aplicada con buenos resultados hace varios años al ataque de sulfatos y al deterioro de morteros de cemento en contacto con agua de mar Di Pace, G. et al, (1979) y más recientemente se aplicó con éxito a ataque sobre hormigón Di Pace, G. y Yépez, L., (2004). También el profesor Swamy Swamy, N. y Wan, R.N. (1993) aplicó exitosamente técnicas no destructivas relativas a la detección de fisuras para monitorear el deterioro del hormigón debido a la reacción álcali-sílice. La etringita diferida se nucleará presumiblemente en el vértice de las zonas fisuradas Dav, R.L.(1992) Fu, Y.(1996) y no en las zonas planas. Si las condiciones son adecuadas, la nucleación de etringita continuará y se desarrollarán tensiones en o cerca de los vértices de las fisuras (Figura 1).

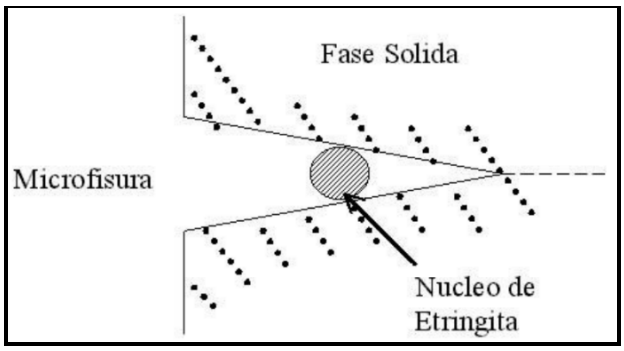

Figura 1. Formación de la sal de etringita en los vértices de las fisuras

Si la energía disponible (del aumento de tensión en el vértice de la fisura más la energía liberada en la zona de fisura – Figura 2) excede de cierto valor crítico, la fisura se propagará.

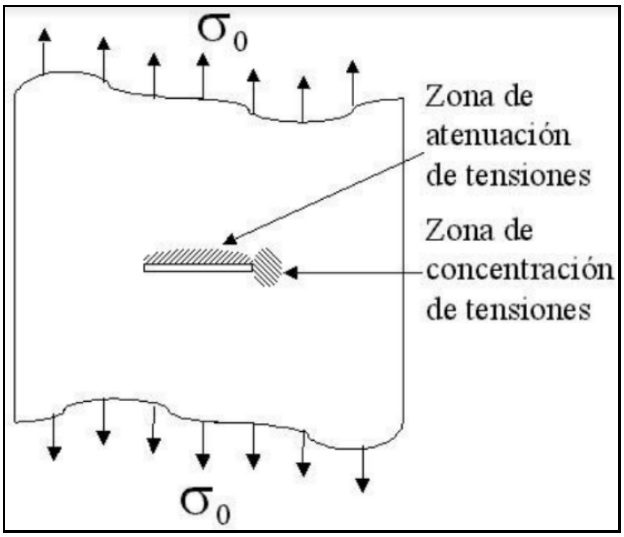

Figura 2. Mecánica de fractura del hormigón

Este valor característico de la matriz del material es: Gf = Energía Específica de Fractura (energía necesaria para abrir una fisura de área unitaria)

La fractura del elemento ocurrirá comenzando en la fisura predominante, cuando la energía liberada en la zona de fisura excede Gf. Desde el punto de vista de las tensiones, podemos considerar al elemento de hormigón estructural como sujeto a un estado elástico, con la zona del vértice de la fisura al estado plástico (siempre y cuando su dimensión sea despreciable respecto de la dimensión del elemento de hormigón). Con esta suposición se puede aplicar la Mecánica de Fractura Elástica Lineal, que es mucho más sencilla. La Figura 3 muestra la distribución ideal de tensiones cerca del vértice de la fisura.

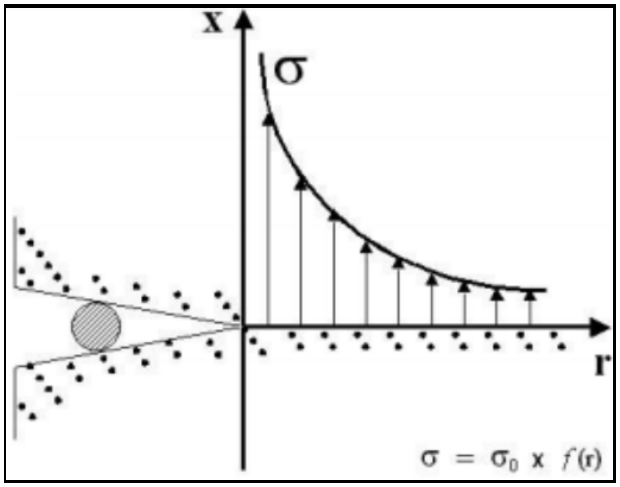

Figura 3. Concentración de tensiones en el vértice de la fisura

Si $r \rightarrow 0$, luego $f(r) \rightarrow \infty$

Podemos expresar esta función como:

$$\sigma = K_1 / (2\pi r)^2 \cdot f(\text{geometría}) \quad (1)$$

Donde K1 es el Factor de Intensidad de Tensiones.

Al ocurrir la fractura, K1 resulta K1C que es llamado Tenacidad a la Fractura, característica del material. La Tenacidad a la Fractura y la Energía Específica de Fractura están relacionadas por medio de la ecuación (2).

$$Gf = K_{1C}^{\,2} / E' \quad (2)$$

E' es el Módulo Efectivo; E' = E (Módulo de Young) para Tensiones Planas o

$$E' = E / (1-\nu^2) \quad (3)$$

Para deformaciones Planas; ν: Módulo de Poisson.

K1C puede ser medido mediante técnicas de laboratorio Bazant, Z.P. y Planas, J. (1998) RILEM (1989). K1C está fuertemente influenciado por el efecto tamaño y se debe hacer una gran cantidad de ensayos con probetas de diferentes tamaños, pero para un caso particular podemos obtener un valor también particular de K1C que será valido mientras no cambiemos el dispositivo de ensayo o la forma y tamaño de la probeta. En dicho caso, K1C se transforma en K1NU, llamado Tenacidad de Fractura Aparente.

En un escenario más realista la zona plástica puede ser pequeña, pero no despreciable. La Mecánica de Fractura Elástica Lineal ya no será valida en esa zona, donde tiene lugar la fisuración y el patrón de fisuración es azaroso y no puede ser modelado en forma confiable. Pero con un error pequeño Bazant, Z.P. y Planas, J. (1998) para describir el efecto debido al cuadro de fisuración real, podemos imaginar una Extensión de Fisura Equivalente que responda a la Mecánica de Fractura Elástica Lineal.

$$\Delta a_{ec} = a_e - a_o \quad (4)$$

Donde:

- Δa_{ec} : Extensión Crítica de Fisura Equivalente
- a_e : Longitud de Fisura Equivalente
- a_o : Longitud de Fisura Inicial.

Las conclusiones de este trabajo fueron muy interesantes aunque el análisis detallado de las mismas escapa al alcance de esta conferencia. Basta solo remarcar aquí las dos más importantes:

- Se ha demostrado que los parámetros fracto-mecánicos son adecuados para

- medir el deterioro debido a la formación de etringita diferida. La tenacidad aparente a la fractura K1C se ve levemente afectada por la formación de etringita diferida porque refleja la alteración de la matriz cementicia y el incremento en la fisura equivalente a_e se ve muy afectado porque mide el incremento en la fisuración.
- La formación de etringita diferida es fuertemente afectada por el contenido de yeso del cemento. En este trabajo a pesar del hecho que se usaron solo cementos con bajo y moderado aluminato, todos los hormigones mostraron deterioro por la etringita excepto los hormigones realizados con el cemento C2 (bajo aluminato y bajo sulfato) y los hormigones realizados con cemento C5 (aluminato moderado, alto yeso y 30% de reemplazo por escoria).

Los autores consideran que los límites admisibles superiores de SO3 en las normas de cemento deben ser revisados, especialmente para hormigones sometidos a curado térmico.

Posteriormente a la publicación de este trabajo en el "Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete", Tesalónica, Grecia Di Pace, G. et al (2003), diversos autores coincidieron en afirmar los mismos postulados y en identificar la formación de etringita diferida como un fuerte riesgo para la durabilidad del hormigón de las obras civiles con los cementos corrientes que se fabrican hoy día en todo el mundo. También muchos de ellos aconsejan limitar el contenido de yeso agregado al cemento para disminuir el riesgo de ocurrencia de este fenómeno.

5. OTROS ANTECEDENTES

Vinculado a este tema el autor tuvo la oportunidad de trabajar a lo largo de más de 25 años en temas referidos a modelación térmica tensional de hormigones masivos en el INTI y en la Universidad de California Berkeley, fisuración del hormigón al estado joven en el INTI y en la Universidad técnica de Munich y en la formulación de modelos numéricos sencillos para predecir la modificación de las propiedades del hormigón en el tiempo, en particular temperaturas, tensiones de origen

térmico y evaluación del riesgo de la fisuración térmica, en el Centro Técnico del hormigón de Holcim, Ecuador y en el Centro Técnico Loma Negra de Argentina.

Todos estos antecedentes fueron tenidos en cuenta al colaborar en la dirección de obra e inspección del nuevo puente de acceso a la ciudad de Guayaquil, Ecuador, obra comenzada a fines del 2003 y que programa su culminación para Abril del 2006.

6. PUENTE CARLOS PEREZ PERASSO

El nuevo puente está proyectado hacia el norte y de manera paralela al puente actual y a una distancia libre entre ellos de 10,0 metros. Su ancho total de 20,80 m proporciona capacidad para 4 carriles de tráfico de 3,60 metros cada uno; un espaldón de 2,85 m hacia el lado norte y otro de 0,35 m al sur; una vía para ciclistas de 1,10 mts de ancho, así como también para alojar aceras peatonales, barreras de tráfico y barandas, Di Pace, G. (2005).

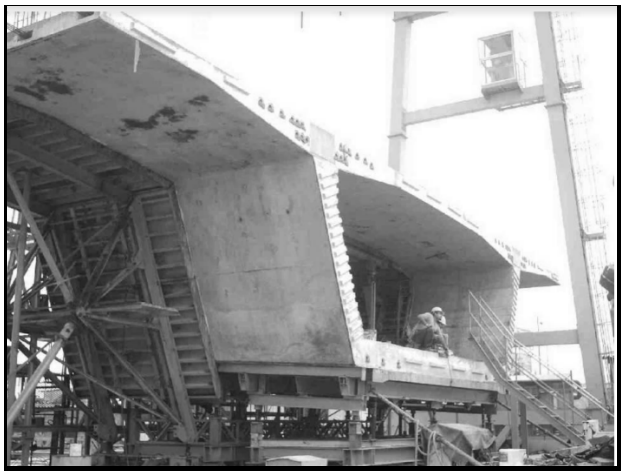

Figura 4. Dovela premoldeada pretensada

La longitud total es de 1.031,76 m, la misma que se descompone en una estructura de puente segmental central de 850,0 m y dos estructuras de accesos, una en cada extremo (lado Guayaquil y lado Puntilla) de 90,88 m cada una.

La superestructura (tablero) estará formada por una viga cajón unicelular que longitudinal trabajará como viga continua .

Las dovelas están siendo realizadas con un hormigón de excelente calidad donde se especifican variables de desempeño: resistencia, módulo de elasticidad, contracción por secado, coeficiente de fluencia lenta y temperatura máxima de curado. El diseño de este puente fue realizado por T.Y. Lin de San Francisco (EEUU) y Consulsísmica de Ecuador.

Para evitar el riesgo de formación de etringita diferida se fijó una temperatura máxima de curado del hormigón de 65 °C. El conseguir este valor aún en condiciones de alta temperatura ambiente, de secciones masivas y del uso de cementos de alta resistencia inicial, motivó la necesidad de implementar un complejo sistema de pre y post enfriamiento del hormigón que fue monitoreado constantemente mediante el registro con termocuplas. También se modelaron las propiedades térmicas del hormigón y se corrió un software para predecir las temperaturas que se iban a obtener durante el curado.

Durante la construcción de las dovelas premoldeadas no se registraron problemas en la verificación del límite máximo de temperatura admisible de 65°C .

Pero hubo una dovela que se debe moldear en el sitio a uno y otro lado del puente (dovela de cierre entre el puente segmental y los tableros realizados in situ en ambas márgenes del río) ,en particular en el acceso Guayaquil en la que se registró un aumento de temperatura muy superior a la máxima admisible ,ya que en varias termocuplas insertas en el hormigón se registraron temperaturas cercanas a los 80 °C.

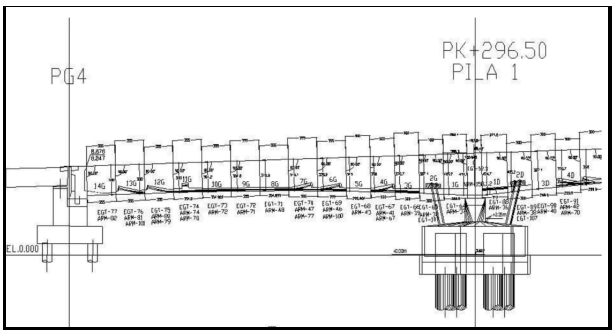

Figura 5. Esquema del tablero del puente

En esas circunstancias se debió enfrentar la necesidad de tomar una decisión pronta y lo más acertada posible acerca del potencial de deterioro prematuro de ese segmento del puente. Esta responsabilidad recayó en el autor. Al efecto se analizó el cumplimiento de los siguientes aspectos:

- Resistencia: Cumplía
- Temperatura: No cumplía
- Contenido alto de aluminatos y sulfatos en el cemento: Sí
- Posibilidad de fisuración térmica: Sí
- Existencia de humedad en el ambiente: Sí
- Existencia de sulfatos en el ambiente: Sí
- Métodos de protección y atenuación: No conocidos al momento.

Lamentablemente la decisión, resistida inicialmente pero aceptada y compartida posteriormente, fue la demolición de esta dovela, identificada como la dovela N° 15 de acceso a la ciudad de Guayaquil, por el gran riesgo que existía de que esta dovela fuera afectada por la formación de etringita diferida poniendo en riesgo la hiperestaticidad del puente, en un plazo relativamente cercano en el tiempo.

Cumplido el paso de la demolición, se realizó una nueva modelación térmica ajustando los parámetros y se incrementó el sistema de post enfriamiento. Con estas precauciones a los pocos días de la demolición de la original, la dovela 15 fue reconstruida satisfactoriamente.

Figura 6. Demolición de la dovela 15

Figura 7. Reconstrucción de la dovela 15

7. REFLEXIONES FINALES

Para finalizar, el autor desea compartir una lista de ideas y sugerencias motivadas por la participación en el análisis y solución de este problema. Ellas son las siguientes:

- Evaluar posibles remedios y protecciones que eviten la demolición.
- Solicitar ayuda de expertos en las diferentes dudas de obras.
- Transmitir seguridad.
- Utilizar siempre materiales de calidad garantizada.
- Disponer en obra de personal calificado.
- Investigar y desarrollar cementos que aseguren una buena durabilidad.

- Analizar siempre las condiciones térmicas del hormigón.
- Reconocer que nuestro conocimiento es limitado y que debemos mejorarlo.

Para concluir, los adeptos a los acrósticos podrán encontrar, uniendo las primeras letras de cada reflexión, la única acción que nos permitirá avanzar hacia estructuras de hormigón cada vez más seguras, más confiables y más durables: ESTUDIAR

Ing. Guillermo Di Pace, Buenos Aires, 22 de Septiembre de 2005.

8. REFERENCIAS

- Bazant, Z.P. & Planas, J. "Fracture and Size Effect in Concrete and other Quasibrittle Materials", CRC Press, USA, 1998
- Day, R.L. "The effect of Secondary Ettringite Formation on the Durability of Concrete: A literature analysis". Portland Cement Association, USA, 1992.
- Di Pace, G; Torrent, R & Bunge, H. "Evaluation of the Damage Caused by Sea Water to Concrete-like Materials" RILEM International Symposium of Offshore Structures, Brazil, 1979.
- Di Pace, G. et al, "Use of Fracture Mechanics Parameters to monitor Concrete Deterioration due to Delayed Ettringite Formation", Sixth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete", Tesalónica, Grecia, 2003
- Di Pace, G. "El uso de hormigones de altas prestaciones en la construcción de un puente segmental por dovelas premoldeadas y en la readecuación de un puente existente", Revista Vial, Febrero 2005.
- Fu, Y. "Delayed Ettringite Formation in Portland Cement Products" PhD Thesis, University of Ottawa, Canada, 1996.
- RILEM Report "Fracture Mechanics of Concrete Structures: From theory to applications", Chapman & Hall, UK, 1989.
- Swamy, N. & Wan, R. M. "Use of Nondestructive Test Methods to Monitor Concrete Deterioration due to Alkali-Silica Reaction" Cement, Concrete and Aggregates, V. 15, n 1, University of Sheffield, UK, 1993.