

# INFLUENCIA DE LA CONTRACCIÓN POR SECADO DEL HORMIGÓN SOBRE EL ALABEO DE LARGO PLAZO DE LOSAS DE PAVIMENTOS DE HORMIGÓN

Autores:

**Edgardo Becker**, Ingeniero en Construcciones, e-mail: [edgardo.becker@intercement.com](mailto:edgardo.becker@intercement.com)

**Patricio Corallo**, Ingeniero Civil, e-mail: [PCorallo@intercement.com](mailto:PCorallo@intercement.com)

Centro Técnico LOMA NEGRA

Av. Coronel Roca 6757 (C1439DWE) C.A.B.A.

Tel.: (011) 4605-3000

## RESUMEN

Desde hace décadas, los pavimentos de hormigón son reconocidos en el ambiente vial fundamentalmente por su durabilidad y suelen ser preferidos para pavimentos urbanos pero su desarrollo en rutas y autopistas se vio limitado debido fundamentalmente a un costo relativamente alto de construcción. Sin embargo, en la última década, esto ha cambiado ya que el advenimiento de los equipos de pavimentación de alto rendimiento y a una baja de costos relativos de materiales de la mano de mayor tecnología ha permitido poner en una condición muy competitiva a esta alternativa y fue así como se han construido algunos proyectos en hormigón con TAR (tecnología de alto rendimiento).

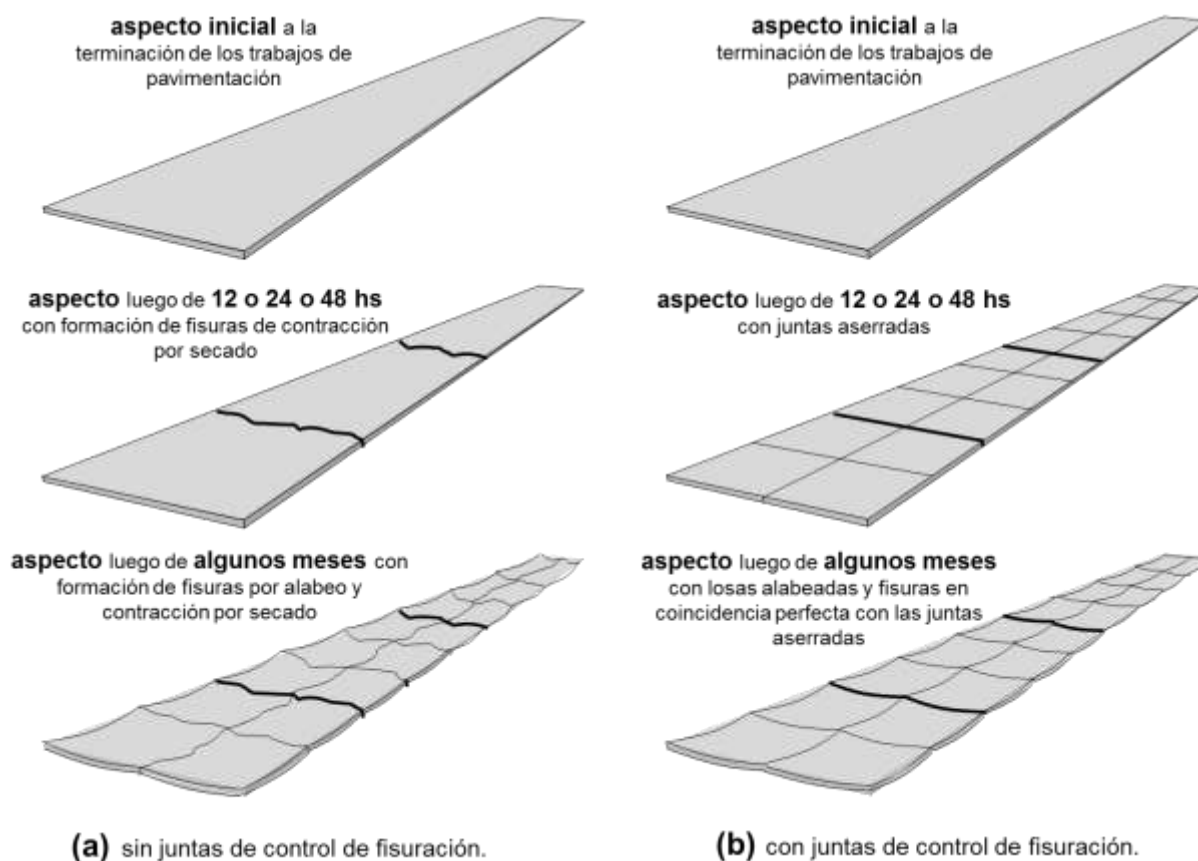
Este nuevo desarrollo ha tenido sus tropiezos en la medida que se fue “transitando la curva de aprendizaje”. Uno de los tantos temas aprendidos en este proceso es que el material necesariamente debe cumplir ciertos requisitos y es necesario estudiar la influencia de las condiciones de borde del proceso entre los que se destacan las condiciones ambientales aunque no se deben descartar otras.

En particular, respecto de las mezclas de hormigón, los pliegos vigentes, en nuestra opinión, piden una serie de requisitos demasiado restrictivos en cuanto a los materiales componentes del hormigón que no garantizan necesariamente un buen resultado y son muy laxos en cuanto a requisitos de desempeño donde debería ponerse un mayor foco de atención para tener mayor confiabilidad.

Este trabajo, se concentra en la importancia de garantizar valores adecuados de contracción del hormigón para minimizar el alabeo. Esto permitiría simultáneamente reducir el efecto negativo del alabeo constructivo sobre el IRI (international Roughness Index) y, sobre todo, limitar el desarrollo del alabeo a largo plazo lo que tiende a reducir el incremento del IRI a largo plazo mejorando el nivel de servicio del pavimento y su vida útil.

## 1. INTRODUCCIÓN

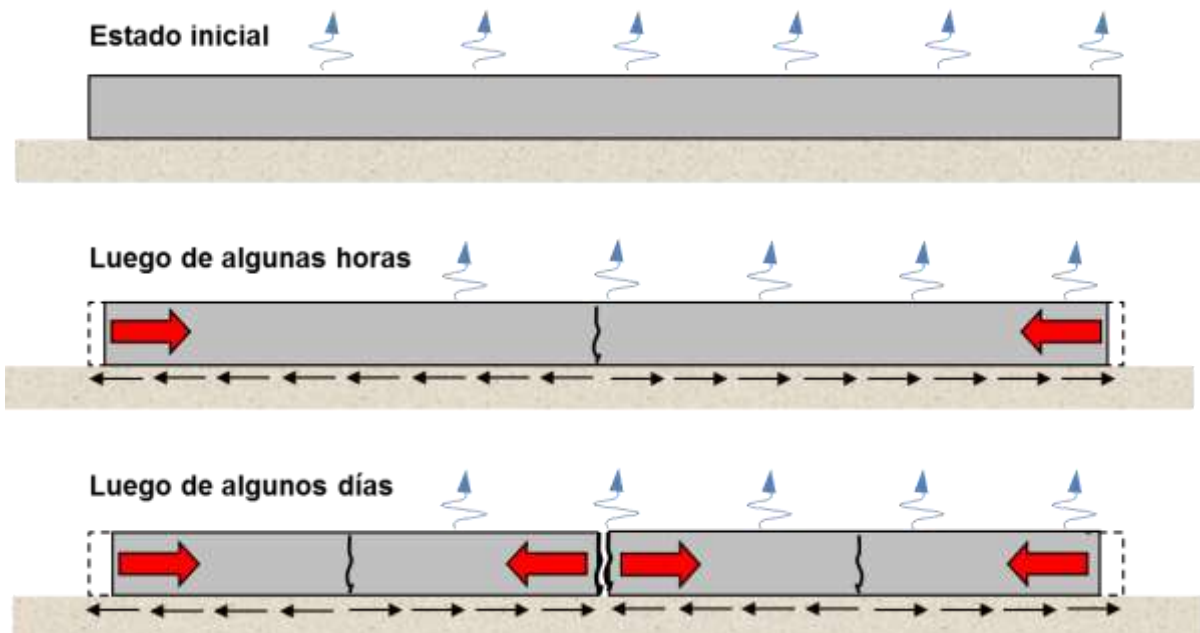
Los pavimentos de hormigón en servicio sufren deformaciones a lo largo de su vida en servicio debido fundamentalmente a gradientes de humedad y temperatura que deben ser comprendidos por el proyectista de manera de mantenerlos en niveles tolerables para el proyecto y evitar que estos sean los factores determinantes del deterioro incluso muchas veces mayor que el propio tránsito. Sin embargo, es importante tener en cuenta que en las primeras horas, días y semanas donde se producen una serie de contracciones del material producto de la propia hidratación de la pasta cementicia y, fundamentalmente, de la evaporación y la progresiva pérdida de humedad que contraen la losa de pavimento y tienden a generar fisuras por contracción y alabeo que, como muestra la figura 1, tienden a formarse bajo cierto patrón que, en el diseño tradicional de los pavimentos simples con juntas se tiende a ordenar en un patrón similar al “natural” pero más “prolijo” y predecible que permite un mejor comportamiento de las juntas y durabilidad.



**Figura 1:** patrón de fisuración básica en pavimentos de hormigón (Becker, 2014)[1].

Los patrones de fisuración básicamente responden a restricciones a la contracción del hormigón que se producen a partir de la fricción que necesariamente hay entre la losa de pavimento y la superficie de apoyo. En función del peso que descarga de la losa sobre la base y el coeficiente de rozamiento que depende fuertemente de la lisura o textura y características propias del material de apoyo que dificultan en mayor o menor medida la capacidad de deslizamiento de la losa lo que genera tensiones de tracción que, al no ser

soportadas por el hormigón, se induce una fisura que reduce la resultante de tensiones. Como puede observarse conceptualmente en los gráficos de la figura 2 este proceso vuelve a producirse con losas más pequeñas tantas veces como sea necesario hasta que la resultante de tensiones de tracción sea soportada por el hormigón.



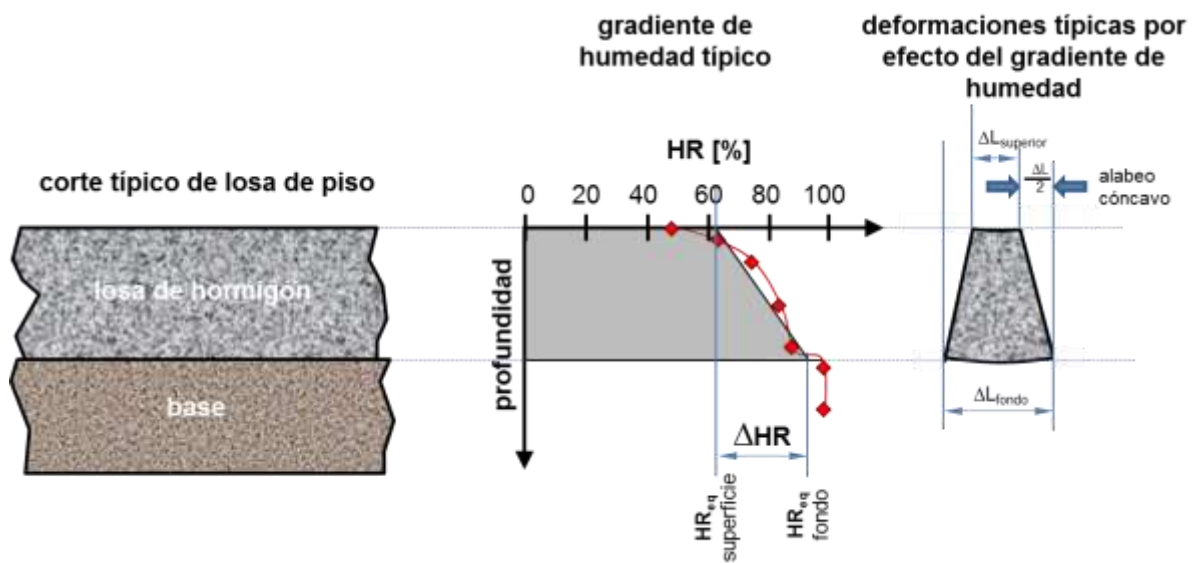
**Figura 2:** efecto de la contracción y restricción sobre la fisuración temprana de los pavimentos de hormigón simple (Becker, E., 2014)[1].

Por otro lado, la contracción por secado del hormigón no resulta uniforme en la sección de la losa ya que la pérdida de humedad se produce fundamentalmente por evaporación superficial de manera que se genera un gradiente de humedad en el espesor de la losa de pavimento como se muestra en la figura 3. Este gradiente de humedad provoca en la losa una deformación diferencial que resulta en un alabeo cóncavo.

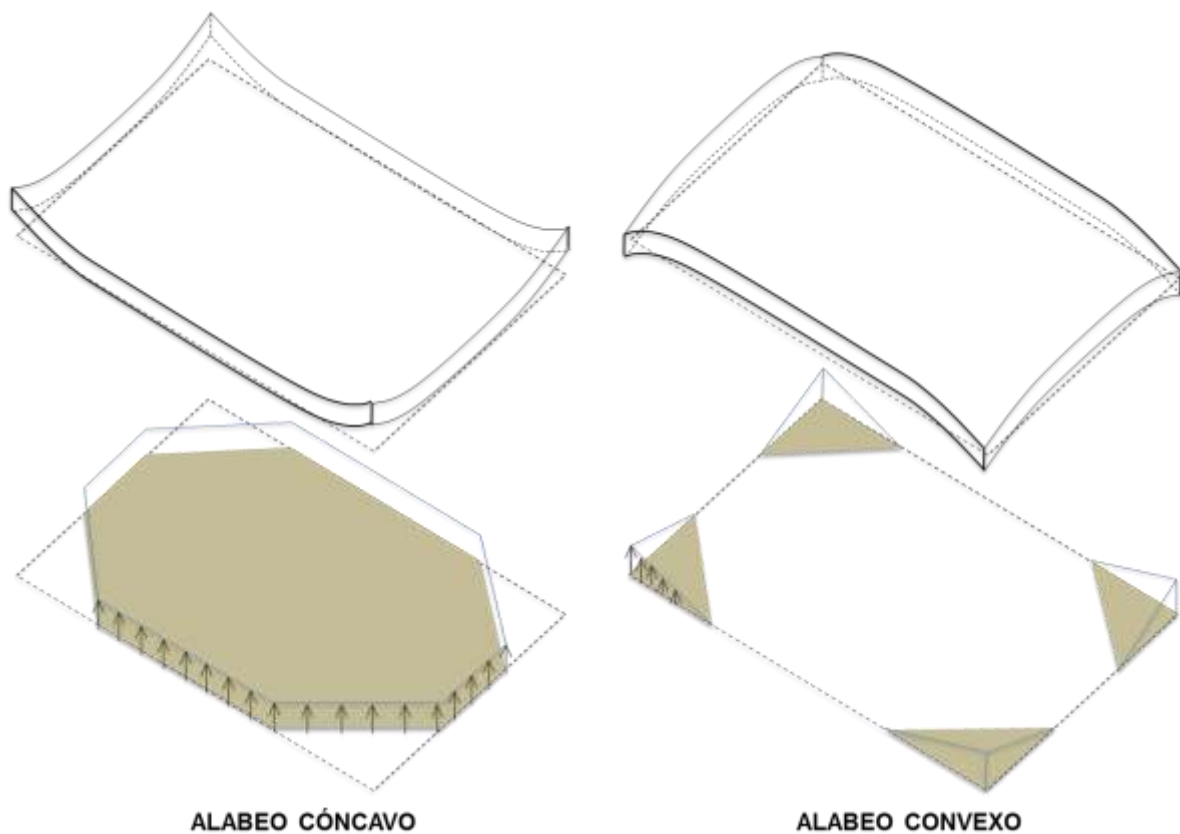
El alabeo cóncavo tiende a provocar el “levantamiento” de las esquinas de las losas de pavimento lo que provoca una reducción localizada del soporte en las esquinas y, en menor medida, en los bordes lo que quita capacidad estructural al pavimento en estas zonas. Este efecto sumado a la deformación que este alabeo “constructivo” provoca afectando negativamente al IRI reduce no sólo la calidad del pavimento en cuanto al confort del usuario que circula en su vehículo sin que, también, tiende a acelerar su tasa de deterioro.

Un buen control de la contracción del hormigón, minimiza el alabeo constructivo maximizando el nivel de servicio y reduciendo la tasa de deterioro.

En servicio, el pavimento estará sometido a condiciones medioambientales que favorecerán el alabeo convexo cuando la superficie se calienta por efecto de la radiación solar y el alabeo cóncavo por la noche cuando la superficie se enfría pero, en todo caso, estos efectos son condiciones de borde del diseño del pavimento que escapan al alcance de este trabajo



**Figura 3:** influencia del gradiente de humedad sobre el alabeo cóncavo de losas de piso o pavimento (Becker, 2015)[2].



**Figura 4:** esquema de apoyo y distribución de cargas sobre la base para losas de pavimento alabeadas en forma cóncava y convexa respectivamente (Becker, 2015)[2].

## 2. OBJETIVOS

Los objetivos del presente trabajo son, por un lado, desde el punto de vista estructural, sugerir límites de contracción por secado de las mezclas de hormigón para incluirlos en especificaciones de pavimentos que permitan acotar el alabeo constructivo; y por otro, en el campo de la tecnología del hormigón, en concordancia para satisfacer lo indicado, y para un conjunto de materiales seleccionados a modo de ejemplo:

- a) Determinar los factores críticos que influyen la contracción por secado de las mezclas de hormigón diseñadas para pavimento.
- b) Pronosticar la contracción de hormigones realizados con un conjunto de materiales conocidos.
- c) Con la información recogida de los puntos anteriores, diseñar mezclas de hormigón de pavimentos que tengan niveles de contracción suficientemente bajos de manera de minimizar el alabeo constructivo,

## 3. MATERIALES

Para el presente trabajo fue seleccionado, a modo de ejemplo, un conjunto de materiales de uso frecuente, y disponibles, en la región de la Ciudad de Buenos Aires, cuyas características se detallan en la tabla 1.

**Tabla 1 – Características de los materiales empleados**

Material	Caraterísticas
Cemento pórtland – CPN50	Densidad: 3,15; Blaine: 420m <sup>2</sup> /kg; Resistencia a compresión a 2 días: 31MPa; Resistencia a compresión a 7 días: 44 MPa; Resistencia a compresión a 28 días: 55 MPa
Escoria de alto horno	Densidad: 2,94; IV: 96,6; IE: 1,69; IH: 0,70
Arena fina	Densidad S.S.S.: 2,63; Módulo de finura: 1,9; Absorción: 0,2%
Arena 0-6	Densidad S.S.S.: 2,68; Módulo de finura: 3,2; Absorción: 0,4%
Piedra partida 6-20	Densidad S.S.S.: 2,73; Módulo de finura: 6,7; Absorción: 0,5%
Agregado fino liviano	Densidad S.S.S.: 1,75; Módulo de finura: 3,9; Absorción: 27,1%
Aditivo fluidificante “F”	Densidad: 1,20; Base: Lignosulfonato
Aditivo hiperfluidificante “H”	Densidad: 1,20; Base: Policarboxilato
Aditivo reductor de contracción “E1” o “E2”, según dosis	Confidencial

## 4. DESARROLLO

En una **Etapa 1** se evaluaron hormigones con contenidos unitarios de 280, 340 y 420 kg/m<sup>3</sup> de CPN50 como único material cementicio, manejándose en cada caso las siguientes alternativas: sin aditivos, con aditivo fluidificante “F”, con aditivo hiperfluidificante “H”.

**Tabla 2:** Combinación de agregados empleada

Característica	UM	Valor
Tamaño máximo agregado grueso	mm	19
Relación "Arena fina"/Agregado fino	%v	60
MF agregado fino	-	2,40
Relación Agregado fino/Agregado total	%v	48

En todos los casos, el contenido de agua fue ajustado para alcanzar un asentamiento de 10+/-1 cm. Los agregados empleados fueron "Arena fina", "Arena 0-6" y "Piedra partida 6-20", en las proporciones que se indican en la tabla 2.

En la **Etapa 2** fueron evaluados hormigones con 340 y 420 kg/m<sup>3</sup> de material cementicio, con los aditivos "F" y "H", pero en esta ocasión estando formado el material cementicio por 30% y 50% de escoria de alto horno. El resto de los parámetros de las mezclas coinciden con los de la Etapa 1.

En la **Etapa 3** fueron evaluadas pastas semejantes a las contenidas en las Etapas 1 y 2. Esto es, pastas con relaciones A/C de 0,60; 0,50; 0,40 y 0,35, en las que el material cementicio está conteniendo alternativamente 0%, 30% y 50% de escoria de alto horno, y a su vez, manejando las siguientes alternativas: ningún aditivo, aditivo fluidificante "F" y aditivo hiperfluidificante "H" (las pastas con relación A/C=0,60, solo fueron evaluadas sin aditivos y con el aditivo "F", y las pastas con A/C=0,35, sólo el aditivo "H").

En una **Etapa 4**, nuevamente fueron evaluados hormigones con 340 y 420 kg/m<sup>3</sup> de CPN50 como único material cementicio, con los aditivos "F" y "H", pero en esta ocasión reemplazándose 20% y 40%, en volumen, del agregado fino de densidad normal por liviano de alta absorción saturado. El resto de los parámetros de las mezclas coinciden con los de la Etapa 1, excepto cuando 40% del agregado fino es liviano, casos en los que no es posible reducir el módulo de finura hasta 2,40.

En la **Etapa 5**, también fueron evaluados hormigones con 340 y 420 kg/m<sup>3</sup> de CPN50 como único material cementicio, con los aditivos "F" y "H", pero en esta oportunidad se agregan a todas las mezclas 1% o 2% (en peso del cemento) del aditivo reductor de la contracción por secado. El resto de los parámetros de las mezclas son los de la Etapa 1.

En la **Etapa 6** fueron evaluadas pastas con relaciones A/C= 0,50 (con el aditivo "F"), 0,40 (con el aditivo "F" y con el aditivo "H") y 0,35 (con el aditivo "H"), incorporándose 1% y 2%, en peso del material cementicio, del aditivo reductor de la contracción.

En una **Etapa 7** fueron realizados hormigones con las mismas pastas que las indicadas en la etapa 3, con los agregados en las proporciones indicadas en la tabla 2, ajustándose alternativamente los volúmenes de las correspondientes pastas para alcanzar asentamientos de 4+/-2 cm, 10+/-2 cm y 18+/-2 cm.

Finalmente, en la **Etapa 8** fueron realizados morteros con las mismas pastas que las indicadas en la etapa 3, conteniendo "Arena fina" y "Arena de trituración 0-6" (sólo el material menor que 4,75 mm), en las proporciones indicadas en la tabla 2. Notar que la realización de morteros es una excusa para realizar mezclas semejantes a las de la etapa 7, pero con mayores contenidos de pasta, sin que ocurra segregación.

## 5. RESULTADOS

Para todos los hormigones, morteros y pastas indicadas en las etapas 1 a 8 la contracción por secado fue determinada conforme a las siguientes condiciones:

- Se utilizaron probetas prismáticas de 7,5 x 7,5 x 27,5 cm (tanto para hormigones, como para morteros y pastas);
- Todas las probetas fueron curadas durante 14 días en una solución saturada con hidróxido de calcio a  $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ;
- Después de los 14 días de curado, la contracción por secado fue medida a 1, 2, 7, 14, 28, 42, 56 e 84 días de secado.
- Durante el secado, las probetas quedaron expuestas a un ambiente una temperatura de  $21\pm 2^{\circ}\text{C}$ , con  $45\pm 5\%$  de humedad relativa.

Por razones de extensión y confidencialidad, la totalidad de los resultados obtenidos no se presenta en este artículo. Sólo se analizan las tendencias más relevantes, utilizando una parte de ellos.

## 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para la presentación de los resultados se realiza la siguiente codificación de las mezclas:

Tipo | CMC | A | E | A/C | Vp | Ad1 | Ad2 | Leca

Siendo:

Tipo: "H"=hormigón; "M"=mortero; "P"=pasta.

CMC: contenido unitario de material cementicio (cemento + escoria), en  $\text{kg}/\text{m}^3$

A: contenido unitario de agua, en  $\text{kg}/\text{m}^3$

E: relación escoria de alto horno/material cementicio, en masa

A/MC: relación agua/material cementicio

Vp: volumen de pasta, en % (pasta=cemento + agua + aditivos, sin incluir el aire)

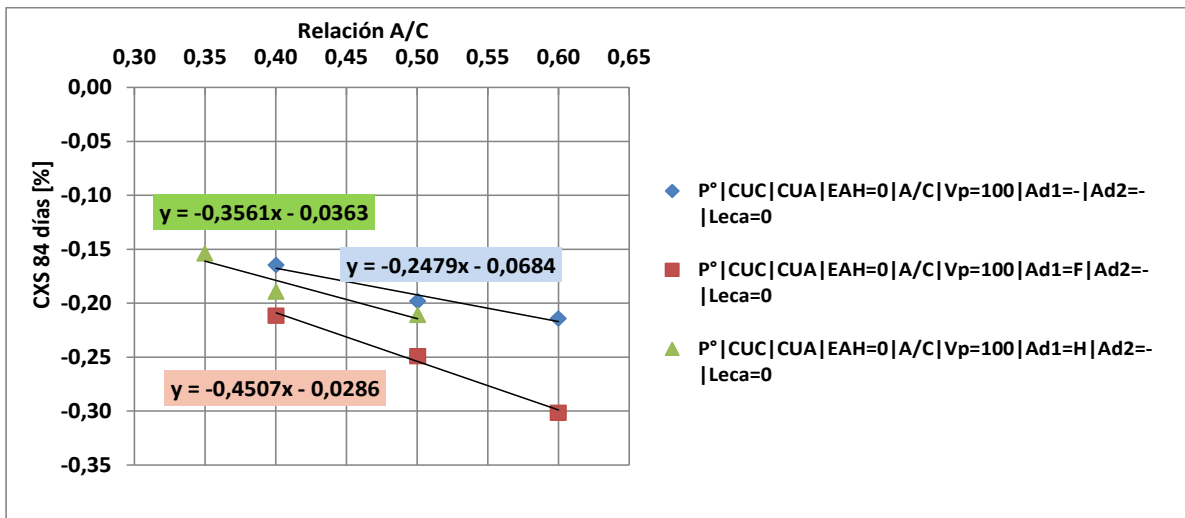
Ad1: "-"=ningún aditivo; "F"=aditivo fluidificante; "H"=aditivo hiperfluidificante

Ad2: "-"= ningún aditivo reductor de contracción; "E1"=aditivo reductor de la contracción, en una dosis del 1%; "E2"=aditivo reductor de la contracción, en una dosis del 2%

Leca: "-"= sólo agregados de densidad normal; "20"=20% del volumen del agregado fino es liviano; "40"=40% del agregado fino es liviano.

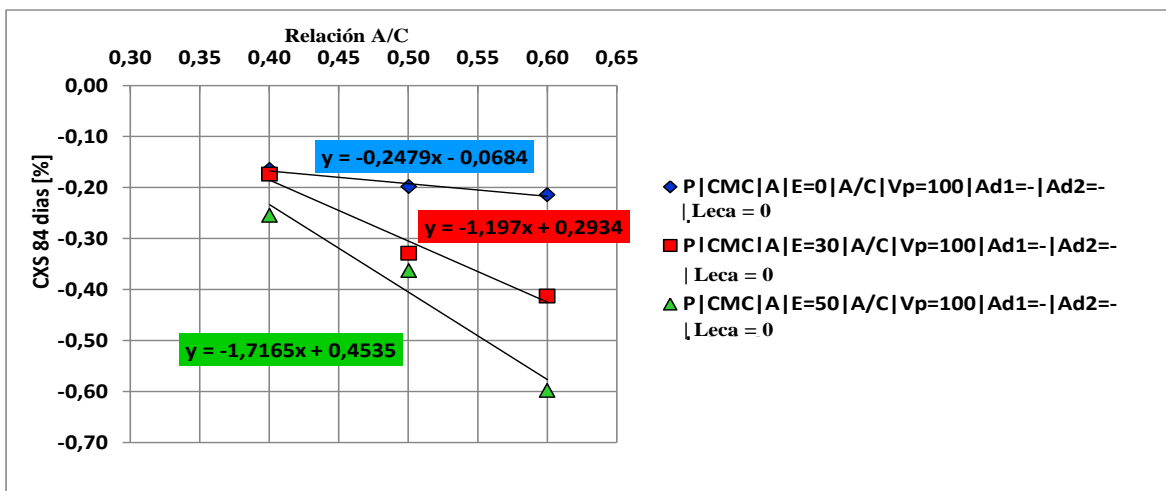
A modo de ejemplo, en la figura 5 se muestra la influencia en la contracción a los 84 días de secado del aditivo reductor de agua en pastas sin escoria de alto horno. Semejante tratamiento de datos fue realizado para las pastas con 0%, 30%, 50% de escoria a las edades de 28, 42, 56 y 84 días, información no presentada en este artículo. Puede observarse que la contracción por secado aumenta cuando se agregada a la mezcla un aditivo reductor, efecto mucho más drástico cuando ese producto es el aditivo "F".





**Figura 5:** Influencia del aditivo reductor de agua en la contracción a 84 días de secado en pastas

La misma información fue tratada desde otro ángulo, valorando la influencia de la escoria de alto horno. Por ejemplo en la figura 6 se grafica la contracción a 84 días de secado en pastas sin aditivos reductores de agua, con 0%, 30% y 50% de escoria de alto horno. El mismo tratamiento de datos fue realizado para todas las pastas sin aditivos reductores de agua, con aditivo “F”, y con aditivo “H” a las edades de 28, 42, 56 y 84 días de secado. Hay una tendencia marcada que conforme el cemento se sustituye por escoria de alto horno, la contracción se incrementa notablemente.



**Figura 6:** Influencia de la escoria de alto horno en la contracción a 84 días de secado en pastas

La influencia del aditivo reductor de la contracción en dos dosis (1% y 2%) se evaluó en pastas sin escoria a las edades de secado de 28, 42, 56 y 84 días con los aditivos “F” y “H”. La figura 7 sólo muestra el análisis a 84 días. Puede observarse que la reducción de la contracción que desempeña este producto es indiscutible.



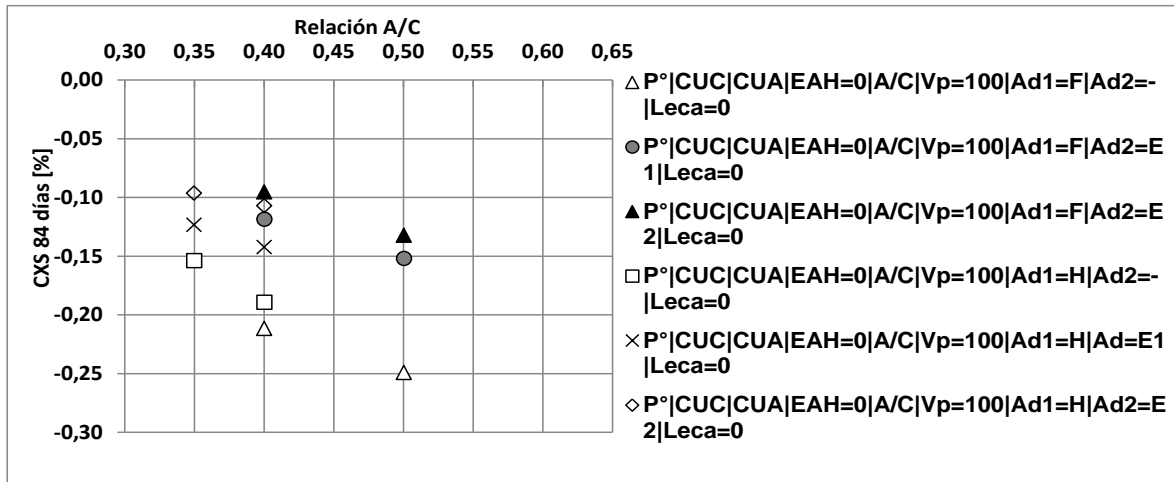


Figura 7: Influencia del aditivo reductor de la contracción a 84 días de secado en pastas

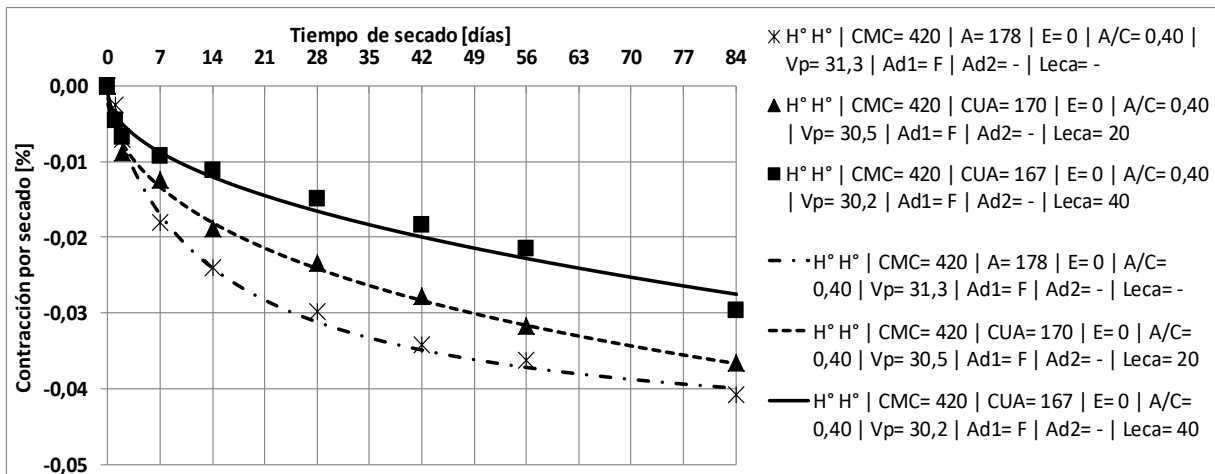


Figura 8: Influencia del agregado liviano en la contracción de hormigones con alta A/C

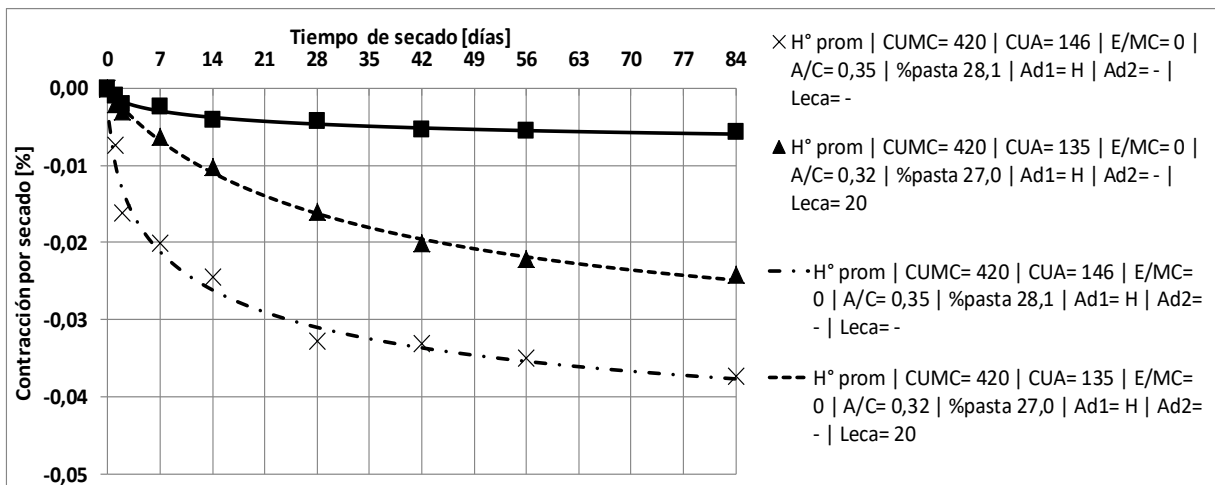
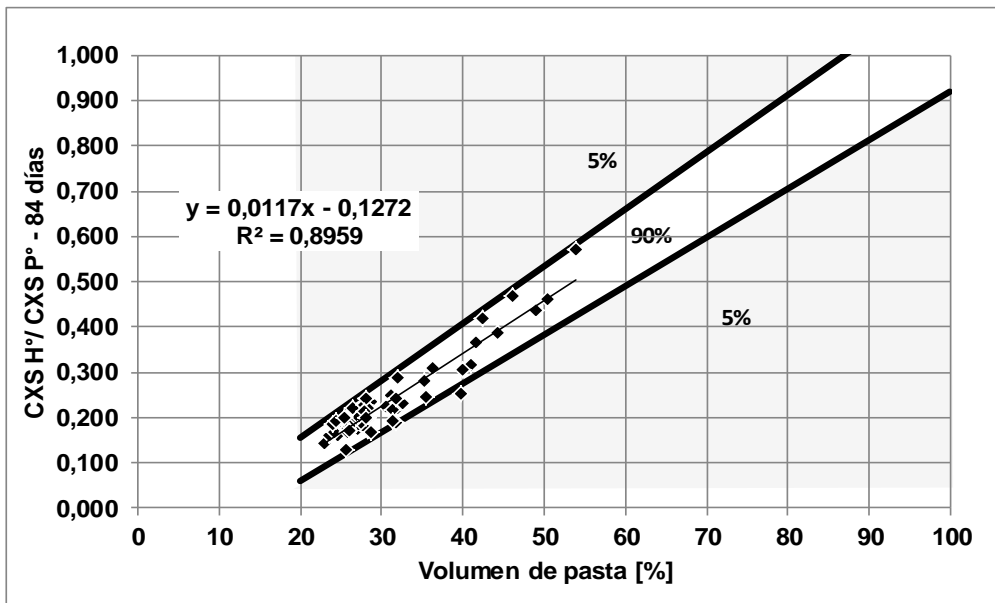


Figura 9: Influencia del agregado liviano en la contracción de hormigones con baja A/C

El efecto de la sustitución de 20% y 40% en volumen agregado fino de densidad normal por otro liviano de alta absorción se muestra en las figuras 8 y 9, para hormigones con baja relación A/C y con alta relación A/C, respectivamente. La reducción de la contracción debido a la presencia del agregado de alta absorción es notable, aún mayor para hormigones con bajas relaciones A/C, lo que se atribuye a un efecto de autocurado (Corallo et al., 2010)[3].

La contracción por secado de los hormigones y morteros se relaciona a continuación con la de las pastas en ellos contenidas. En el eje horizontal de la figura 10 se representa el volumen de pasta de los hormigones y morteros, y en el vertical, el cociente entre la contracción por secado del hormigón o mortero (CXS H°) y la contracción por secado de la pasta en ellos contenida (CXS P°), a la misma edad.



**Figura 10:** Correlación entre el volumen de pasta y relación contracción del hormigón/contracción de la pasta

La figura 10 sólo muestra la información correspondiente a la contracción a 84 días de secado, para hormigones sin escoria. Aunque no presentado en este artículo por las razones anteriormente expuestas, el mismo tratamiento de datos fue realizado a 28, 42, 56 y 84 días de secado, para mezclas sin escoria, y todo junto, con y sin escoria.

Realizando un análisis de covarianza entre ambas variables, es posible obtener los límites entre los que es probable encontrar todos los resultados con un determinado nivel de certeza: 90% para este trabajo. La tabla 3 informa los parámetros de las ecuaciones de las rectas correspondientes a los mencionados límites.

**Tabla 3:** Parámetros de las rectas límites, mostradas en la figura 10

Parámetro	Tiempo de secado: 84 días		
	Límite superior	Medio	Límite inferior
Ordenada	-0,157	-0,127	-0,097
Pendiente	0,011	0,012	0,013

Un tratamiento semejante de los datos restantes lleva a encontrar los mismos parámetros para edades de secado de 28, 42, 56 y 84 días, para mezclas con escoria y, todo junto, con y sin escoria.

En primer lugar, con todo el tratamiento de datos realizado (parcialmente expuesta en este trabajo) es posible estimar para un hormigón realizado con los materiales en cuestión (sin agregados livianos) la contracción media de la pasta en él contenida a las distintas edades (28, 42, 56 y 84 días) utilizando las correlaciones como las mostradas en las figuras 3 a 5. Con el empleo de la información como la mostrada en la figura 8, y teniendo en cuenta la contracción por secado media de la pasta estimada, es posible pronosticar la contracción por secado media y máxima garantizada (con una certeza del 95%) del hormigón propuesto.

Por ejemplo, sea el hormigón de las características que se muestran en la tabla 4. Se precisa estimar la contracción media y garantizada a 84 días de secado.

**Tabla 4:** Ejemplo de hormigón para la estimación de contracción por secado

Material	UM	Valor
Agua	kg/m <sup>3</sup>	170
Cemento CPN50	kg/m <sup>3</sup>	340
Arena fina	kg/m <sup>3</sup>	492
Arena 0-6	kg/m <sup>3</sup>	407
Piedra partida 6-20	kg/m <sup>3</sup>	1000
Aditivo fluidificante F	% MC	0,25
Aditivo Reductor de la contracción	% MC	0 y 2
Relación A/C	kg/kg	0,50
Volumen de pasta	% vol	28

De acuerdo con la correlación de figura 5, para el caso de la mezcla sin aditivo reductor de contracción, la contracción media de la pasta a los 84 días  $CXS_P$  debe ser:

$$CXS_P = -0,4507 \cdot \left(\frac{A}{C}\right) - 0,0286 \quad (\text{Ecuación 1})$$

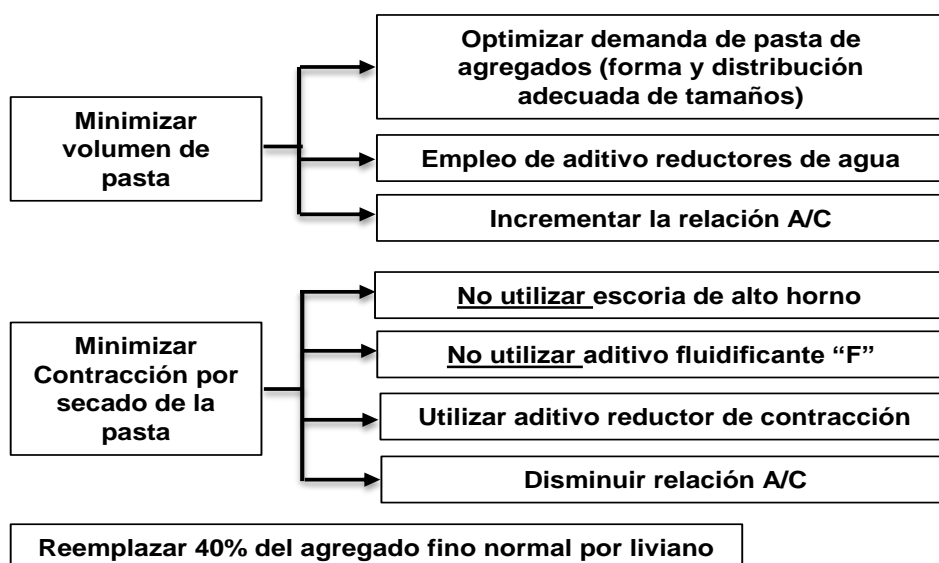
Para una relación  $A/C = 0,50$  resulta ser  $CXS_P = -0,254\%$ . De acuerdo con la figura 7, para el caso con 2% de aditivo reductor de contracción, la contracción media de la pasta a los 84 días es  $CXS_P = -0,130\%$ . Para el hormigón sin aditivo reductor de la contracción, las contracciones media y máxima garantizadas pronosticadas son, teniendo en cuenta la información de la tabla 3:

$$CXS_{H,media} = (-0,127 + 0,012 \cdot V_p) \cdot CXS_P \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$CXS_{H,max} = (-0,097 + 0,013 \cdot V_p) \cdot CXS_P \quad (\text{Ecuación 3})$$

Para  $V_p = 28\%$  y  $CXS_P = -0,254\%$  resulta que  $CXS_{H,media} = -0,053\%$  y  $CXS_{H,max} = -0,068\%$ . Para un hormigón con 2% de aditivo reductor de contracción, las contracciones media y máxima garantizadas pronosticadas son, de acuerdo con lo indicado en el párrafo anterior, para  $V_p = 28\%$  y  $CXS_P = -0,130\%$   $CXS_{H,media} = -0,027\%$  e  $CXS_{H,max} = -0,034\%$

Además del modelo desarrollado para la estimación de la contracción, los resultados obtenidos permiten escribir que las acciones indicadas en la figura 11, individualmente, tienden a reducir la contracción por secado de los hormigones. Debe notarse que algunas acciones actúan simultáneamente en sentidos opuestos. Por ejemplo, el empleo del aditivo fluidificante "F" permite por un lado reducir el volumen de pasta del hormigón, ya que ésta se vuelve más fluida, pero por otro, la contracción por secado de la pasta es incrementada por efecto del mismo producto (ver figura 5). Por ello, no necesariamente la incorporación a un hormigón de un aditivo fluidificante, como "F", reduce su contracción por secado.



**Figura 11:** Acciones para disminuir la contracción de hormigones

## 7. CONCLUSIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos, podemos obtener las siguientes conclusiones que resultan válidas para el conjunto de materiales analizados:

- El estudio de mezclas de hormigón para aprobación previa al inicio de los trabajos de pavimentación debe incluir la realización de ensayos de contracción por secado.
- Dado que la contracción por secado maneja en gran medida el alabeo constructivo junto a las buenas prácticas de protección y curado temprano del hormigón resulta muy recomendable establecer en las especificaciones un requerimiento que limite a valores suficientemente reducidos.
- Cuando se dispone de antecedentes suficientes, es posible encontrar un modelo predictivo que permite estimar la contracción por secado de una mezcla de hormigón y establecer límites de confianza de manera de reducir la cantidad de ensayos necesarios para demostrar el cumplimiento de las especificaciones.
- El uso de aditivos reductores de contracción, en dosis suficiente, es efectivo para controlar la tasa de pérdida de humedad del hormigón.
- En casos extremos, cuando se requiere de un valor de contracción muy bajo, el reemplazo parcial de un 40% del volumen de un agregado fino de densidad normal por otro agregado fino de alta absorción puede resultar una opción muy conveniente a explorar. Si se requiere una reducción más moderada, el reemplazo puede reducirse hasta el 20% del volumen de total del agregado fino.

## 8. REFERENCIAS

- [1] BECKER E., 2014. "Algunos Conceptos Básicos sobre Patrones de Fisuración en Pavimentos de Concreto". Revista NOTICRETO N°124, mayo de 2014.
- [2] BECKER, E., 2015. "Alabeo de Losas de Pisos de Hormigón: causas, efectos y reparación". Revista OBRA, edición 26, septiembre de 2015.
- [3] CORALLO, P.; COLLURA, A.; RÍOS, C.; ACRI, A. "Evaluación de la capacidad de auto-curado en hormigones". Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, 18° Reunión Técnica, Argentina, 2010.
- [4] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. "ACI 209R-92: Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures", Estados Unidos, 2010.
- [5] POPOVICS, S. "Concrete Materials: Properties, Specification and Testing". Noyes Publications, Estados Unidos, 1992.
- [6] NEVILLE, A. "Properties of Concrete". John Wiley & Sons, Estados Unidos, 1995.
- [7] DAMINELI, B. "Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas". Escola politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil, 2013