

DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA MESOESTRUCTURA DEL HORMIGÓN

Torrijos, M. C.¹

RESUMEN

La relación entre la estructura del hormigón y sus propiedades físicas y mecánicas ha sido ampliamente documentada. Se ha observado cómo el tamaño y tipo de agregado afectan el mecanismo de inicio y propagación de fisuras o la forma en que el tamaño de las interfaces o la presencia de fisuras determinan las propiedades de transporte en el material. En este trabajo se analiza la variabilidad del método adoptado para evaluar la cantidad de agregados, zonas de interfaces y presencia de fisuras como parámetros característicos de la estructura interna del hormigón. El estudio forma parte de un plan de investigación orientado a profundizar en el conocimiento del material, con especial atención al comportamiento de hormigones dañados, y se posiciona a nivel mesoestructural asumiendo a este compuesto formado por una matriz de mortero con los agregados de mayor tamaño como inclusiones.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

En un material compuesto como el hormigón a pesar que muchas propiedades se relacionan con las características microestructurales, como por ejemplo la composición de la pasta de cemento (1-4), la respuesta del material depende estrechamente de elementos propios de la mesoestructura tales como la presencia de defectos, poros de diversos tamaños y principalmente los agregados de mayor tamaño y sus interfaces. Aunque la relación entre la estructura interna del hormigón a nivel mesoestructural y sus propiedades físicas y mecánicas ha sido ampliamente documentada (5-18) no se han propuesto métodos y criterios sencillos de caracterización de la primera. Contar con estas herramientas resulta de interés para valorar diversos casos de aplicación y desarrollos recientes. En efecto, el estudio de la distribución de agregados permite valorar la homogeneidad del hormigón o la tendencia a la segregación en hormigones autocompactables (17), por otro lado la densidad, ancho y distribución de fisuras representa un parámetro fundamental para caracterizar hormigones afectados por diferentes patologías, como la exposición a alta temperatura, la fisuración por secado o por reacciones deletéreas de los agregados (18-19).

Si bien existen herramientas sumamente potentes disponibles para el estudio de los materiales (20-22) es deseable que un método para valorar la mesoestructura del hormigón resulte lo más sencillo posible y compatible con la variabilidad propia de este material compuesto. El presente estudio forma parte de un plan de tesis doctoral orientado a profundizar en el conocimiento del hormigón con especial atención al comportamiento de estructuras dañadas. Se buscó un método de evaluación de la mesoestructura capaz de relevar la longitud, número y ancho de fisuras, sin importar su origen, como así también la distribución de tamaños y longitud de interfaz de los agregados como principales parámetros de la misma. Las fisuras y otros defectos de gran tamaño afectan en forma significativa el comportamiento mecánico y la durabilidad de las estructuras de hormigón.

¹ Becario CONICET, LEMIT. Docente Facultad de Ingeniería UNLP.

Considerando que la densidad y distribución de fisuras e interfaces constituyen un dato de referencia para el análisis de la vinculación entre estructura y propiedades macroscópicas, resulta de interés evaluar la variabilidad en las medidas a fin de acotar el error en las determinaciones. Al respecto debe considerarse tanto la variabilidad en el método de relevamiento en sí mismo como la variabilidad propia del hormigón. Esta última es seguramente muy importante debido al carácter heterogéneo de este material. Este trabajo muestra un estudio preliminar destinado a establecer la cantidad mínima de probetas a analizar así como también el número de cortes necesarios para que los datos relevados sean representativos.

METODOLOGÍA DE RELEVAMIENTO DE AGREGADOS Y FISURAS

Se propuso como objetivo de partida la búsqueda de un proceso sencillo y de bajo costo capaz de cuantificar el tipo y distribución de interfaces y fisuras. El estudio se realizó sobre probetas dañadas por exposición a altas temperaturas (500 °C), esta herramienta de daño del hormigón ha sido empleada en trabajos previos (18).

Para la digitalización de las imágenes se utilizó un escáner y dos software de procesamientos de imágenes. Mediante el primer software se acondicionaron las imágenes para que pudieran ser fácilmente evaluadas con el segundo procesador, a través del cual se realizó la valoración de las características de los agregados y fisuras.

Se relevaron las fisuras visibles en las muestras de hormigón tanto sobre el perímetro de los cilindros de 150 x 300 mm como sobre cortes de 50 mm de espesor realizados a diferentes alturas de las probetas. Este tipo de probetas cilíndricas son las habitualmente utilizadas en el ensayo de resistencia a compresión. Además cabe destacar que dentro de las evaluaciones de interés en el trabajo de tesis se destaca el análisis de las propiedades de transporte; estudios previos mostraron que es posible emplear cortes de probetas cilíndricas para evaluar el coeficiente de permeabilidad o la penetración de agua a presión.

En lo referente al estado de la superficie externa se valoraron fisuras, mientras que sobre los cortes transversales se relevaron las interfaces junto a los agregados de mayor tamaño y la existencia de fisuras. En ambos casos las fisuras y el perímetro de los agregados se calcularon directamente en un papel transparente sin ninguna preparación previa. Para delimitar las fisuras se usó una lupa. El registro sobre papel fue escaneado para obtener la imagen en formato digital y poder analizarla a través de un procesador de imágenes. En la Fig. 1 se muestra una foto de una sección de hormigón, la imagen escaneada y su posterior acondicionamiento.

Mediante el procesador de imágenes se obtienen fácilmente la cantidad y longitud de las fisuras y el área, perímetro y cantidad de agregados. Asimismo a partir de estos datos se calculan como parámetros para el análisis el área de agregados (cm^2/cm^2) y la longitud de fisuras (cm/cm^2) en referencia a la sección analizada. Otro parámetro utilizado para caracterizar el cuadro de fisuración, además de la longitud, fue el ancho máximo de fisuras. El mismo fue determinado sobre cada sección en forma manual utilizando una lupa con una precisión de 0.05 mm. De cada corte se midió la fisura más ancha a nivel interfaz y la más ancha de la matriz. Para definir a los agregados se adoptó como tamaño mínimo las partículas que en el corte presentaran una dimensión mínima superior a 5 mm.

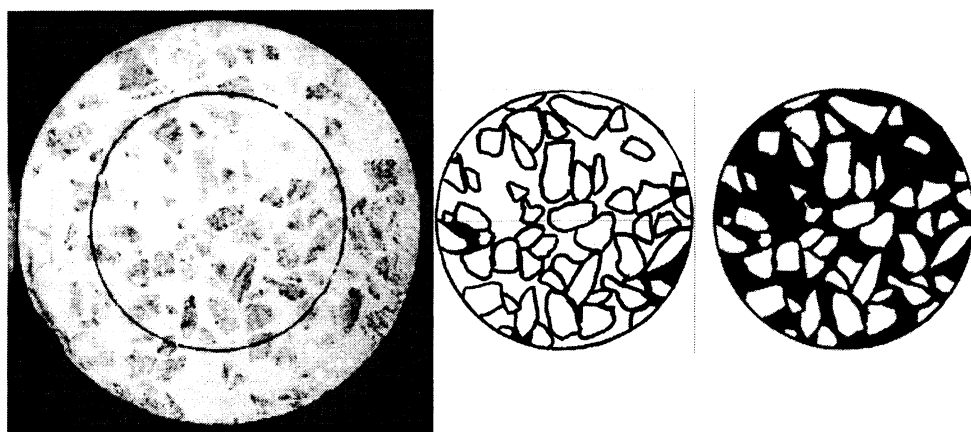


Figura 1. Sección de hormigón, imagen escaneada a partir del relevamiento manual y posterior acondicionamiento.

Para analizar la fiabilidad del relevamiento manual de fisuras y agregados, también se procedió al análisis de fotografías de diferentes cortes. Se emplearon cilindros dañados correspondientes a dos hormigones elaborados con diferentes tipos de agregado grueso, uno con piedra partida granítica (PP) y otro con canto rodado silíceo (CR).

Mediante una cámara digital (6M zoom digital) se fotografiaron un corte de CR y otro del grupo PP. A las imágenes fotográficas visualizadas en un programa de procesamiento de imágenes se las aumentó de tamaño (hasta un límite que depende de la resolución de la imagen) de manera tal que se distinguieran fácilmente los bordes de los agregados y luego se marcaron los bordes dibujándolos sobre la imagen. En la Fig. 2 se puede observar el procedimiento realizado, en la Tabla 1 se comparan los valores de densidad y perímetro de agregados obtenidos a partir del relevamiento manual sobre la probeta con los resultados obtenidos a partir del análisis de las imágenes fotográficas.

Tabla 1. Comparación entre los valores de densidad y perímetro de fisuras obtenidos a partir del relevamiento manual (RM) con los resultantes del análisis de las fotografías (F).

Agregados	PP (F)	PP (RM)	CR (F)	CR (RM)
Densidad (cm^2/cm^2)	0.379	0.350	0.297	0.299
Perímetro (cm)	167.6	165.5	117.4	116.9

De la Tabla 1 surge que no hay diferencias significativas entre el relevamiento realizado observando la rodaja a simple vista y el realizado analizando la fotografía mediante el procesador de imágenes. Cabe comentar que la variación tanto para la densidad de agregados como el perímetro es menor en el caso del canto rodado que de la piedra partida. En las fotos de la Fig. 2 se aprecia cómo las partículas de canto rodado son más redondeadas y de bordes más definidos, características que facilitan el relevamiento.

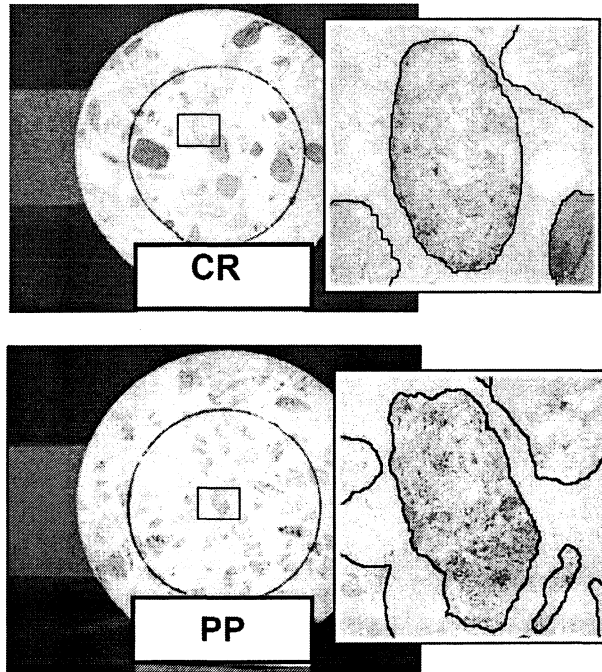


Figura 2. Fotografías de los cortes de cilindros de hormigón con canto rodado y piedra partida granítica, y detalle del método utilizado para la demarcación de las interfaces de los agregados relevados.

ESTUDIO DE LA VARIABILIDAD DEL DAÑO EN EL HORMIGÓN

Materiales

Con el fin de estudiar la variabilidad en la distribución de agregados y fisuras en hormigones dañados se elaboraron dos hormigones convencionales tipo H21 empleando dos tipos de agregados gruesos de origen natural ampliamente utilizados en la región, que poseen marcadas diferencias tanto en lo que se refiere a su textura superficial como a su respuesta cuando son expuestos a altas temperaturas: un canto rodado silíceo (hormigón CR) procedente del río Uruguay y una piedra partida granítica (hormigón PP) obtenida en la zona central de la Provincia de Buenos Aires.

Detalles experimentales

Se seleccionaron 4 probetas cilíndricas de 150 x 300 mm de cada hormigón que fueron curadas en cámara húmeda durante 28 días. Luego se mantuvieron en ambiente de laboratorio durante dos semanas para disminuir su nivel de humedad.

Para iniciar el proceso de degradación (fisuración interna) las muestras se expusieron a una temperatura máxima de 500 °C durante 1 hora; la velocidad de elevación de la temperatura fue igual a 100 °C por hora. Dicho proceso se realizó para dos probetas de CR y dos de PP (identificadas como a y b) en una mufla pequeña, y se repitió para otras dos probetas de cada hormigón (llamadas c y d) utilizando para el calentamiento un horno eléctrico con control automático de temperatura y ventilación superior para permitir el escape de gases.

El proceso de enfriamiento (donde en realidad se produce el mayor daño) fue mucho más rápido en el primer caso y, por ende, debiera afectar en mayor medida la estructura del hormigón.

Finalizado el proceso de daño se realizó el relevamiento de la superficie perimetral de cada probeta, registrando la extensión de las fisuras y el ancho de las mismas.

En el primer grupo (probetas a y b) se realizaron 4 cortes transversales mientras que en el segundo (probetas c y d) sólo 3 cortes (ver Fig. 3). El relevamiento se efectuó sobre las dos caras de cada corte, en una zona limitada a un círculo central de 100 mm de diámetro. Esta limitación fue adoptada para vincular estas medidas con determinaciones del coeficiente de permeabilidad al agua, realizadas posteriormente sobre los mismos cortes.

Las caras se identifican como muestra la Fig. 3, las rodajas se numeraron en orden ascendente comenzando por la cara de moldeo, el subíndice "s" representa la cara superior (más cercana a la de moldeo) mientras que el subíndice "i" se asigna a la cara opuesta de cada una de las rodajas.

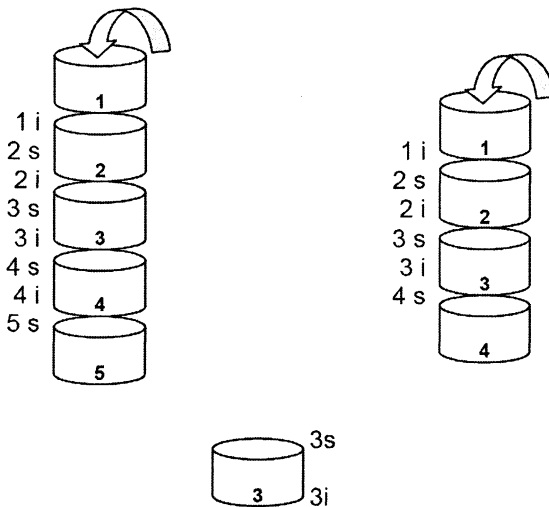


Figura 3. Cortes transversales para el análisis de la densidad de fisuras.

Resultados

En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos del relevamiento de fisuras, se indican para las diferentes rodajas de cada una de las probetas la altura del corte respecto a la base de la probeta, la densidad fisuras (longitud de fisura por unidad de área cm/cm^2) en cada corte, el promedio de toda la probeta y los valores relativos respecto a dicho promedio. Además se incluye la densidad de fisuras sobre la superficie lateral (perímetro de toda la probeta). Cabe reiterar que el estudio analiza la variabilidad del daño en el hormigón y es de esperar que la distribución de fisuras no resulte homogénea a distintas alturas de una misma probeta. También es lógico que la variabilidad se incremente en los casos donde el grado de afectación es mayor, tal es el caso de las muestras a y b (enfriadas a mayor velocidad) que en las identificadas como c y d; finalmente los valores de la Tabla 2 muestran para cada condición mayor variabilidad en el hormigón CR que en el PP, donde la variación dimensional del agregado es menor.

También se informan en la Tabla 2 los datos que surgen del relevamiento del ancho de fisuras discriminando fisuras de interfaces y de matriz (mortero) en los cortes y las fisuras sobre el perímetro externo. Cabe aclarar que en las casillas de la tabla donde dice 'sí' significa que se observó un notable deterioro de la pasta, pero no fisuras. En el grupo de probetas elaboradas con piedra partida granítica no se observaron fisuras nítidas como en el caso de las probetas con canto rodado, pero sí fue posible observar interfaces más deterioradas (ver Fig. 4).

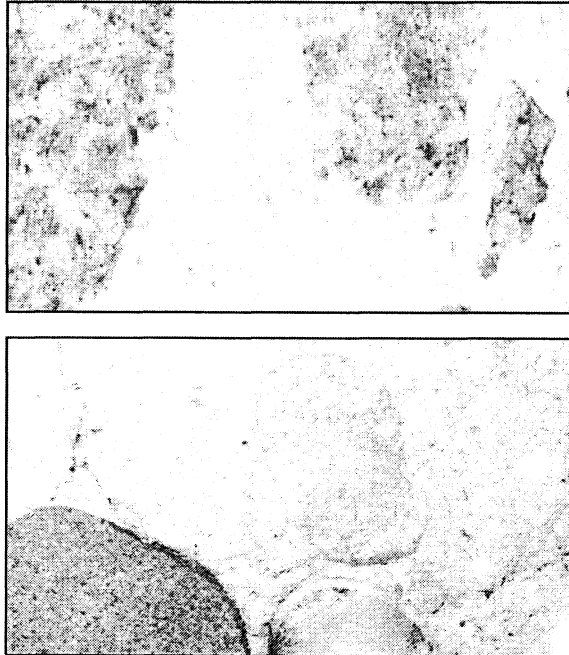


Figura 4. Estado de las interfaces en probetas expuestas a 500°C . Arriba: deterioro de la pasta en hormigón PP sin fisuras. Abajo: fisuras en hormigón CR.

Tabla 2. Relevamiento de fisuras, probetas de hormigón elaborado con canto rodado (CR).

Probeta	Altura (cm)	Densidad			Ancho		
		Corte (cm/cm ²)	Corte/Promedio	Perímetro (cm/cm ²)	Interfaz (mm)	Matriz (mm)	Perímetro (mm)
CRa-1i	6	0.78	1.08				
CRa-2s	6	0.63	0.86		0.25	0.10	
CRa-2i	12	0.84	1.17		0.30	0.10	
CRa-3s	12	0.90	1.24	0.45	0.25	1.00	<0.10-0.20
CRa-3i	18	0.89	1.23		0.75	0.20	
CRa-4s	18	0.94	1.30		0.50	0.10	
CRa-4i	24	0.35	0.49		0.70	0.05	
CRa-5s	24	0.45	0.63		1.00	0.10	
CRa	Promedio	0.72			0.54	0.24	
	DStd	0.22			0.29	0.34	
CRb-1i	6	0.80	1.31		0.25	0.10	
CRb-2s	6	0.41	0.68		0.50	0.10	
CRb-2i	12	0.84	1.39		0.30	0.05	
CRb-3s	12	0.71	1.17	0.39	0.50	0.15	<0.20-0.30
CRb-3i	18	0.73	1.20		0.50	0.25	
CRb-4s	18	0.52	0.85		0.50	0.20	
CRb-4i	24	0.41	0.67		0.20	0.20	
CRb-5s	24	0.44	0.73		0.15	0.10	
CRb	Promedio	0.61			0.36	0.14	
	DStd	0.18			0.15	0.07	
CRc-1i	5	0.16	0.63		0.20	0.05	
CRc-2s	5	0.22	0.88		0.05	0.25	
CRc-2i	15	0.28	1.10	0.43	0.10	0.05	<0.10-0.20
CRc-3s	15	0.26	1.02		0.20	Sí	
CRc-3i	25	0.27	1.08		0.05	Sí	
CRc-4s	25	0.33	1.30		0.20	Sí	
CRc	Promedio	0.25			0.13	0.12	
	DStd	0.06			0.07	0.11	
CRd-1i	5	0.41	1.30		0.05	No	
CRd-2s	5	0.22	0.69		0.10	Sí	
CRd-2i	15	0.22	0.69	0.39	0.20	0.10	<0.10-0.05
CRd-3s	15	0.21	0.66		0.10	0.05	
CRd-3i	25	0.37	1.17		0.10	0.05	
CRd-4s	25	0.48	1.50		0.30	0.05	
CRd	Promedio	0.32			0.14	0.06	
	DStd	0.12			0.09	0.02	

Tabla 2 (continuación). Relevamiento de fisuras, probetas de hormigón elaborado con piedra partida granítica (PP).

Probeta	Altura (cm)	Densidad			Ancho		
		Corte (cm/cm ²)	Corte/Promedio	Perímetro (cm/cm ²)	Interfaz (mm)	Matriz (mm)	Perímetro (mm)
PPa-1i	6	0.21	0.87		0.05	No	
PPa-2s	6	0.17	0.71		0.05	Sí	
PPa-2i	12	0.37	1.54		0.05	Sí	
PPa-3s	12	0.36	1.50	0.11	0.05	Sí	<0.05
PPa-3i	18	0.25	1.04		0.05	Sí	
PPa-4s	18	0.24	1.00		0.20	0.10	
PPa-4i	24	0.11	0.46		0.05	no	
PPa-5s	24	0.17	0.71		0.05	sí	
PPa	Promedio	0.24			0.07	0.10	
	DStd	0.09			0.05		
PPb-1i	6	0.22	0.91		0.05	sí	
PPb-2s	6	0.14	0.58		0.05	0.05	
PPb-2i	12	0.32	1.32		0.05	0.05	
PPb-3s	12	0.34	1.43	0.16	0.05	0.05	<0.05
PPb-3i	18	0.22	0.94		0.05		
PPb-4s	18	0.37	1.57		0.10	0.05	
PPb-4i	24	0.12	0.49		0.10	0.05	
PPb-5s	24	0.18	0.76		0.05	sí	
PPb	Promedio	0.24			0.06	0.05	
	DStd	0.09			0.02		
PPc-1i	5	0.14	0.95		0.05	no	
PPc-2s	5	0.12	0.84		0.05	no	
PPc-2i	15	0.09	0.59	0.31	0.05	no	<0.10-0.05
PPc-3s	15	0.17	1.14		0.10	sí	
PPc-3i	25	0.16	1.11		0.05	sí	
PPc-4s	25	0.20	1.37		0.05	0.05	
PPc	Promedio	0.15			0.06	0.05	
	DStd	0.04			0.02		
PPd-1i	5	0.27	1.52		0.05	No	
PPd-2s	5	0.24	1.31		0.05	No	
PPd-2i	15	0.18	1.00	0.29	0.05	No	<0.05
PPd-3s	15	0.08	0.43		0.05	Sí	
PPd-3i	25	0.13	0.74		0.05	Sí	
PPd-4s	25	0.18	1.00		0.05	No	
PPd	Promedio	0.18			0.05		
	DStd	0.07			0.00		

En la Tabla 3 se presentan los resultados del relevamiento de agregados en las diferentes rodajas de cada probeta, nuevamente se indican la altura del corte respecto a la base de la probeta, la densidad de agregados y la longitud de interfaces. Además en la última columna se han incluido valores del coeficiente de permeabilidad al agua determinados sobre algunas rodajas de cada hormigón. El procedimiento de determinación del coeficiente de permeabilidad puede hallarse en (22-23).

Tabla 3. Relevamiento de agregados y ensayos de permeabilidad (CR).

Probeta	Altura (cm)	Agregados		Coeficiente de permeabilidad (10^{-11} m/s)
		Densidad (cm^2/cm^2)	Perímetro (cm)	
CRa-1i	6	0.38	143.9	
CRa-2s	6	0.30	117.3	
CRa-2i	12	0.32	119.2	
CRa-3s	12	0.32	129.8	
CRa-3i	18	0.28	121.3	
CRa-4s	18	0.29	136.2	4000
CRa-4i	24	0.25	122.0	
CRa-5s	24	0.29	125.4	2000
CRa	Promedio	0.30	126.9	
	DStd	0.04	9.2	
CRb-1i	6	0.27	116.8	3800
CRb-2s	6	0.26	109.5	
CRb-2i	12	0.31	126.3	
CRb-3s	12	0.29	104.7	
CRb-3i	18	0.25	107.2	
CRb-4s	18	0.35	138.8	3700
CRb-4i	24	0.30	117.5	
CRb-5s	24	0.29	112.2	
CRb	Promedio	0.29	116.6	
	DStd	0.03	11.3	
CRc-1i	5	0.36	122.8	
CRc-2s	5	0.29	124.0	
CRc-2i	15	0.34	116.8	
CRc-3s	15	0.33	115.3	
CRc-3i	25	0.28	114.4	
CRc-4s	25	0.32	121.9	800
CRc	Promedio	0.32	119.2	
	DStd	0.03	4.2	
CRd-1i	5	0.33	130.8	250
CRd-2s	5	0.38	125.8	
CRd-2i	15	0.31	129.1	
CRd-3s	15	0.33	140.2	
CRd-3i	25	0.29	122.7	
CRd-4s	25	0.27	112.0	
CRd	Promedio	0.32	126.8	
	DStd	0.04	9.4	

Tabla 3 (continuación). Relevamiento de agregados y ensayos de permeabilidad (PP).

Probeta	Altura (cm)	Agregados		Coeficiente de permeabilidad (10^{-11} m/s)
		Densidad (cm^2/cm^2)	Perímetro (cm)	
PPa-1i	6	0.22	117.0	180
PPa-2s	6	0.33	153.6	
PPa-2i	12	0.33	153.6	
PPa-3s	12	0.28	126.8	
PPa-3i	18	0.26	137.7	
PPa-4s	18	0.30	154.1	250
PPa-4i	24	0.28	134.2	
PPa-5s	24	0.30	141.4	70
PPa	Promedio	0.29	139.8	
	DStd	0.04	13.7	
PPb-1i	6	0.29	148.0	
PPb-2s	6	0.26	117.1	330
PPb-2i	12	0.29	134.5	
PPb-3s	12	0.32	148.2	600
PPb-3i	18	0.33	126.1	
PPb-4s	18	0.32	129.7	230
PPb-4i	24	0.31	128.5	
PPb-5s	24	0.32	145.5	90
PPb	Promedio	0.31	134.7	
	DStd	0.02	11.5	
PPc-1i	5	0.29	149.6	60
PPc-2s	5	0.28	129.4	
PPc-2i	15	0.28	119.8	
PPc-3s	15	0.28	129.4	
PPc-3i	25	0.29	143.2	
PPc-4s	25	0.28	130.3	
PPc	Promedio	0.28	133.6	
	DStd	0.01	10.8	
PPd-1i	5	0.31	147.4	
PPd-2s	5	0.33	141.3	
PPd-2i	15	0.30	123.1	
PPd-3s	15	0.29	127.6	
PPd-3i	25	0.29	134.8	
PPd-4s	25	0.23	120.4	200
PPd	Promedio	0.29	132.4	
	DStd	0.03	10.6	

Si bien el análisis de la relación entre el cuadro de fisuras y otras propiedades del hormigón excede el propósito de este trabajo, resulta de interés ilustrar de qué modo se pueden vincular los parámetros de la mesoestructura con el comportamiento del material. Un ejemplo de esto será someramente expuesto al final de este artículo.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Estudio de la distribución de fisuras

En la Fig. 5 se muestra la distribución de la densidad de fisuras a lo largo de cada probeta, representando la densidad calculada para cada corte. Es posible observar que aunque las probetas de CR y PP presentan distinto cuadro de fisuración, en ambos casos las probetas a y b son las más afectadas. También se puede apreciar que la zona central de las probetas posee un cuadro de fisuración más homogéneo, en las probetas a y b es, además, la zona más fisurada. A simple vista comparando los valores de densidad a ambos lados de cada corte surge que resulta suficiente con relevar sólo una de las caras de cada corte, este tema será analizado más adelante.

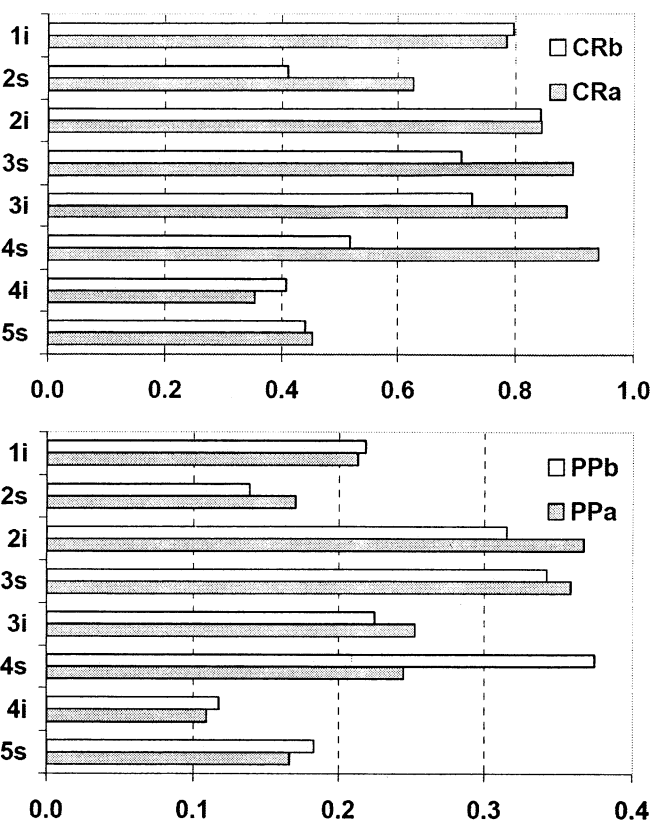


Figura 5.a. Densidad de fisuras (cm/cm²) en cortes a distintas alturas en las probetas a y b.

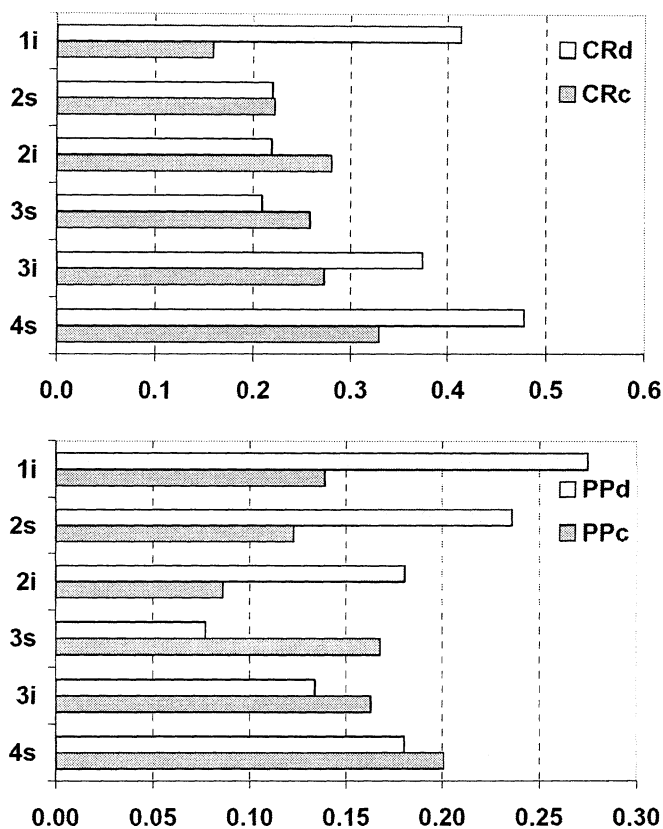


Figura 5.b. Densidad de fisuras (cm/cm^2) en cortes a distintas alturas en las probetas c y d.

Tabla 4. Distribución y densidad de fisuras. Valores promedios.

	CRa	CRb	CRc	CRd	PPa	PPb	PPc	PPd
Densidad de fisuras (cm/cm^2)	0.72	0.61	0.25	0.32	0.24	0.24	0.15	0.18
Desviación Estándar (cm/cm^2)	0.22	0.18	0.11	0.12	0.09	0.10	0.04	0.06
COV (%)	30	30	37	37	39	40	27	31
Nº de fisuras ($\text{N}^\circ/\text{cm}^2$)	0.29	0.27	0.25	0.26	0.23	0.25	0.18	0.21
Desviación Estándar ($\text{N}^\circ/\text{cm}^2$)	0.09	0.10	0.07	0.11	0.09	0.12	0.06	0.06
COV (%)	33	37	29	42	38	47	34	29
Densidad en el perímetro (cm/cm^2)	0.45	0.39	0.43	0.39	0.11	0.16	0.31	0.29

En la Tabla 4 se resumen los promedios de la densidad y número de fisuras y sus respectivos desvíos estándar y COV, como así también la densidad de fisuras relevada sobre todo el perímetro externo de las probetas. Al comparar longitud (densidad) y número de fisuras por unidad de área entre las probetas CR y PP se observa que todas tienen similar número de fisuras; sin embargo las CR presentan mayor densidad, ya que poseen fisuras más largas que bordean los agregados y atraviesan la matriz. El análisis de la densidad de fisuras es más efectivo para determinar el grado de deterioro del material en comparación con el análisis del número de fisuras. Se puede apreciar que en el hormigón dañado la variabilidad entre cortes es bastante elevada, con valores del COV del orden del 30 al 40 %, tanto si se considera la densidad como el número de fisuras. Cabe indicar que parte de la variabilidad entre cortes cercanos en una misma probeta se debe a la tortuosidad en la propagación de fisuras propia del hormigón.

Otra observación evidente son las diferencias entre los pares de probetas a-b y c-d que fueron calentadas con distintos equipos y enfriadas a distintas velocidades; las probetas a-b tanto las de CR como las de PP mostraron mayor densidad de fisuras en los cortes que en el perímetro mientras que sucede lo contrario con los pares c-d; que fueron enfriados más bruscamente.

Del relevamiento del perímetro surge que las probetas CR poseen mayor densidad de fisuras, lo que es concordante con las medidas sobre los cortes transversales. También se puede observar que los pares de probetas de un mismo hormigón, sometidas a las mismas condiciones de calentamiento y enfriamiento, poseen en el perímetro una densidad de fisuras similar, pudiendo ser también éste un parámetro para caracterizar al material.

Uno de los interrogantes planteados fue la cantidad de cortes requerida para lograr un relevamiento representativo de toda la probeta. Para analizar este aspecto se realizaron promedios con distintas combinaciones de las secciones analizadas, a saber:

Criterio A: promedio de todos los cortes.

Criterio B: promedio cortes mitad superior de la probeta (caras 1i, 2s, 2i y 3s).

Criterio C: promedio cortes zona central (probetas a-b promedio de las caras 2i, 3s, 3i y 4s y probetas c-d promedio de las caras 2i y 3s).

Criterio D: un sólo corte en la mitad de la probeta (probetas a-b promedio de las caras 2i y 3s y probetas c-d promedio de las caras 2s y 2i).

Criterio E: promedio cortes mitad inferior de la probeta (probetas a-b promedio de las caras 3i, 4s, 4i y 5s y probetas c-d promedio de las caras 2i, 3s, 3i y 4s).

Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 5 junto con la desviación estándar y el COV. Es posible observar que las menores variaciones se producen cuando se aplica el criterio C, en este caso se toman en cuenta los valores de los cortes centrales

Otro aspecto importante fue analizar si es necesario relevar las dos caras de un mismo corte o basta con evaluar una sola. En la Tabla 6 se presentan los mismos promedios de la Tabla 5 pero tomando por separado las caras de abajo y de arriba de cada rodaja. El criterio D fue excluido de este análisis ya que considera dos caras de un mismo corte. Como era previsible en la mayoría de los casos los resultados son concordantes, por lo tanto se concluye que es suficiente relevar sólo una cara de cada corte.

Tabla 5. Valores promedio de la densidad de fisuras (cm/cm^2), obtenidos a partir de diversas combinaciones de cortes.

	Criterio	CRa	CRb	CRc	CRd	PPa	PPb	PPc	PPd
A	Promedio	0.72	0.61	0.25	0.32	0.24	0.24	0.15	0.18
	Desvío	0.22	0.18	0.06	0.12	0.09	0.10	0.04	0.07
	COV (%)	31	30	23	37	39	40	27	39
B	Promedio	0.79	0.69	0.23	0.27	0.27	0.25	0.13	0.19
	Desvío	0.12	0.19	0.06	0.11	0.10	0.09	0.03	0.05
	COV (%)	15	28	26	42	37	37	21	25
C	Promedio	0.89	0.70	0.27	0.21	0.31	0.31	0.13	0.13
	Desvío	0.04	0.13	0.02	0.01	0.07	0.06	0.06	0.07
	COV (%)	5	19	6	3	22	20	45	57
D	Promedio	0.87	0.78	0.25	0.22	0.36	0.33	0.10	0.21
	Desvío	0.04	0.09	0.04	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04
	COV (%)	4	12	16	0.2	2	6	25	19
E	Promedio	0.66	0.52	0.29	0.32	0.19	0.23	0.15	0.14
	Desvío	0.30	0.14	0.04	0.14	0.07	0.11	0.02	0.05
	COV (%)	45	28	13	42	35	48	13	36

De acuerdo a Fig. 3:

Criterio A: promedio de todos los cortes.

Criterio B: promedio de las caras 1i, 2s, 2i y 3s.

Criterio C: para las probetas a-b promedio de las caras 2i, 3s, 3i y 4s y para las c-d promedio de las caras 2i y 3s.

Criterio D: para las probetas a-b promedio de las caras 2i y 3s y para las c-d promedio de las caras 2s y 2i.

Criterio E: para las probetas a-b promedio de las caras 3i, 4s, 4i y 5s y para las c-d promedio de las caras 2i, 3s, 3i y 4s.

Tabla 6. Comparación de la densidad de fisuras (cm/cm^2) en relevamientos de caras opuestas del mismo corte.

Criterio	caras	CRa	CRb	CRc	CRd	PPa	PPb	PPc	PPd
A	i	0.72	0.69	0.24	0.34	0.24	0.22	0.13	0.20
	s	0.73	0.52	0.27	0.30	0.23	0.26	0.16	0.16
B	i	0.84	0.79	0.22	0.32	0.28	0.25	0.11	0.23
	s	0.82	0.55	0.24	0.21	0.26	0.29	0.15	0.16
C	i	0.87	0.78	0.27	0.21	0.31	0.27	0.13	0.13
	s	0.92	0.61			0.30	0.36		
E	i	0.76	0.56	0.29	0.34	0.26	0.30	0.18	0.13
	s	0.70	0.66	0.28	0.30	0.24	0.22	0.12	0.16

Tabla 7. Variabilidad en la densidad de fisuras entre las probetas de un mismo grupo.

Criterio	Densidad (cm/cm ²)	CR a y b	CR c y d	PP a y b	PP c y d
A	Promedio	0.67	0.29	0.24	0.16
	Diferencia	0.11	0.07	0.00	0.03
B	Promedio	0.74	0.25	0.26	0.16
	Diferencia	0.10	0.04	0.02	0.06
C	Promedio	0.80	0.24	0.31	0.13
	Diferencia	0.19	0.06	0.00	0.00
D	Promedio	0.82	0.24	0.35	0.16
	Diferencia	0.09	0.03	0.03	0.11
E	Promedio	0.59	0.30	0.21	0.15
	Diferencia	0.14	0.03	0.04	0.01

Finalmente en lo que respecta a la densidad de fisuras, se analizó la variabilidad entre probetas de un mismo grupo; en la Tabla 7 se puede observar el promedio de cada grupo y la diferencia entre ambos valores individuales. En general la variación entre las dos probetas no es muy grande, por lo que se estima que con relevar dos probetas se obtendrá un valor suficientemente representativo. Se aprecia mayor variabilidad en el hormigón CR que en PP lo que puede atribuirse a la mayor alterabilidad de los rodados silíceos al ser expuestos a temperaturas de 500 °C.

Un parámetro importante al momento de caracterizar las fisuras es su ancho. En este caso se midió la fisura más ancha en cada cara distinguiéndose entre las fisuras producidas en la interfaz, en la matriz y también las fisuras desarrolladas en el perímetro de las probetas como se muestra en la Tabla 2. Al analizar los valores obtenidos surge claramente el mayor deterioro de las probetas de canto rodado, ya que la interfaz es más débil, y aparecen fisuras más anchas tanto en la interfaz como en la matriz. En el hormigón con piedra partida se observaron muy pocas fisuras de matriz.

En ambos hormigones las fisuras de interfaz son las que poseen el mayor ancho. Las fisuras del perímetro son menos anchas que las de los cortes. Como las fisuras fueron originadas luego de exponer el hormigón a temperaturas de 500 °C, la mayoría se deben a las diferencias de expansión térmica entre los agregados y la pasta de cemento, probablemente, debido a esto las mayores fisuras se observan en los cortes.

Mesoestructura y propiedades del hormigón

Como fuera expuesto uno de los puntos de interés del proyecto de investigación dentro del que se enmarca este trabajo, es el conocimiento de la estrecha relación existente entre la mesoestructura y las propiedades del hormigón. Entre estas últimas se consideran no sólo las propiedades mecánicas sino también las propiedades de transporte, ya que las mismas están asociadas con la vida en servicio de las estructuras de hormigón. A modo de ejemplo y tal como se consigna en la Tabla 3, se realizaron ensayos de permeabilidad al agua sobre algunas de las rodajas, determinando el coeficiente de permeabilidad. Para esta determinación se asume como hipótesis la existencia de un flujo continuo.

La Fig. 6 representa la relación entre los anchos máximos de fisuras vs. coeficiente de permeabilidad de varias secciones de hormigón. A la vez en la Fig. 7 se muestra la vinculación entre densidad de fisuras y permeabilidad. Si bien la cantidad de determinaciones es pequeña y sólo se pretende dar a este punto el carácter de ejemplo, es posible inferir que la permeabilidad aumenta en forma considerable para anchos de fisuras mayores a 0.2 mm, para anchos de fisuras menores pareciera tener mayor influencia la densidad de fisuras que el ancho. La existencia de valores umbrales para la permeabilidad ha sido planteada por otros autores (2, 10, 11).

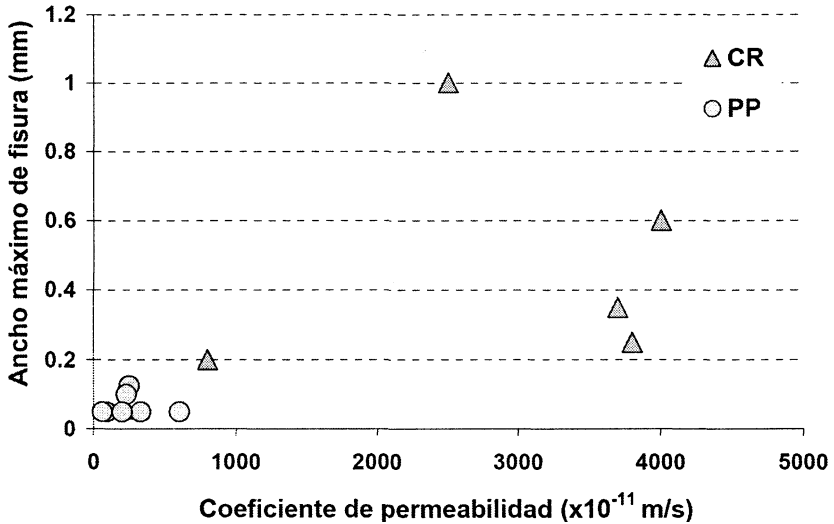


Figura 6. Relación entre anchos de fisuras y coeficiente de permeabilidad.

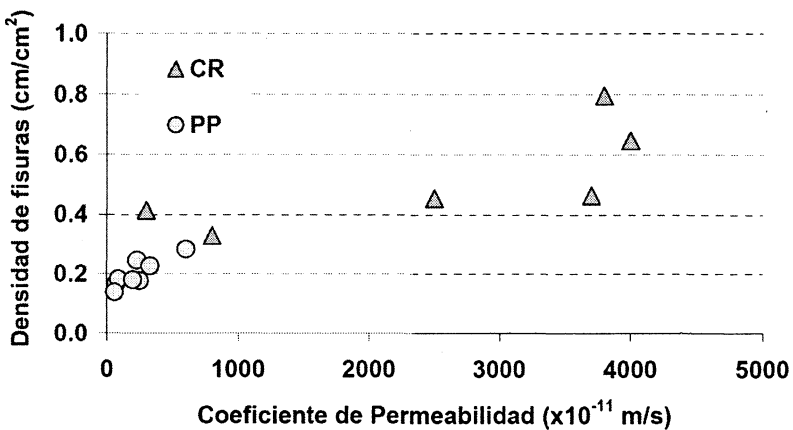


Figura 7. Relación entre densidad de fisuras y coeficiente de permeabilidad.

CONCLUSIONES

En este trabajo se describe y analiza la metodología adoptada para la observación y evaluación de fisuras y agregados como elementos característicos de la mesoestructura del hormigón. Las principales conclusiones se indican a continuación.

El método de observación utilizado es sencillo y relativamente rápido, y al verificar los resultados con otro procedimiento más laborioso y de mayor precisión no se observaron diferencias significativas.

Los resultados indican que, teniendo en cuenta la variabilidad propia del material, es suficiente relevar dos cortes por probeta para obtener resultados representativos con este método y, además, basta con relevar sólo una cara en cada uno de los cortes.

En cuanto a los parámetros representativos de la mesoestructura, se verifica que, como era de esperar, es más significativo el estudio de la densidad de fisuras que el número de las mismas. Con respecto a los agregados se analizaron tanto la densidad de agregados de mayor tamaño como su perímetro, considerando que la interfaz agregado-matriz es una zona de mayor porosidad que resulta determinante al momento de evaluar la durabilidad.

Las experiencias para evaluar la variabilidad en las determinaciones de parámetros de la mesoestructura fueron realizadas sobre dos hormigones dañados por exposición a alta temperatura. Dichos hormigones se elaboraron con agregados gruesos de uso frecuente en la región con marcadas diferencias en su forma y textura. Los valores obtenidos fueron consistentes con los trabajos de diversos autores en lo que se refiere al efecto del tipo de agregado y la velocidad de enfriamiento sobre la formación de fisuras así como en lo relativo a la vinculación entre el nivel de fisuración y las propiedades de transporte del hormigón.

REFERENCIAS

- (1) Jacobsen, S., Marchand, J. and Homain, H. "SEM observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concretes". *Cement and Concrete Research* 25 (8), 1995, pp. 1781-1790.
- (2) Aldea, C, Shah, S. and Karr, A. "Effect of Cracking on water and chloride permeability", *Journal of Materials in Civil Engineering* 11 (3), 1999, pp 181-187.
- (3) Soroushian P. and Elzafraney, M. "Damage effects on concrete performance and microstructure". *Cement & Concrete Composites* 26, 2004, pp 853-859.
- (4) Cwirzen A. and Penttala V. "Aggregate-cement paste transition zone properties affecting the salt-frost damage of high-performance concretes". *Cement and Concrete Research* 35, 2005, pp. 671-679.
- (5) Zhang, B. "Relationship between pore structure and mechanical properties of ordinary concrete under bending fatigue". *Cement and Concrete Research* 28 (5), 1998, pp. 699-711.
- (6) Gowripalana N., Sirivivatnanon V. and Lim C.C. "Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure". *Cement and Concrete Research* 30, 2000, pp. 725-730.
- (7) Leemann A., Münch B., Gasser P. and Holzer L. "Influence of compaction on the interfacial transition zone and the permeability of concrete". *Cement and Concrete Research* 36, 2006, pp. 1425-1433.

- (8) Lu, S., Landis, E.N. and Keane, D.T. "X-ray microtomographic studies of pore structure and permeability in Portland cement concrete". *Materials and Structures* 39, 2006, pp. 611–620.
- (9) Gonen T. and Yazicioglu, S. "The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete". *Construction and Building Materials* 21, 2007, pp 1040–1045.
- (10) Wang, K., Jansen, D.C., Shah, S. P., Karr, A.F. "Permeability study of cracked concrete". *Cement and Concrete Research* 27 (3), 1997, pp. 381-393.
- (11) Aldea, C. M., Shah, S. P. and Karr, A. "Permeability of Cracked Concrete". *Materials and Structures* 32, 1999, pp. 381-393.
- (12) Lepech, M. and Li, V. C. "Water permeability of cracked cementitious composites". 2001, Advanced Civil Engineering Materials Research Laboratory, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Michigan, USA.
- (13) Johnston, C.D. "Strength and deformation of concrete in uniaxial tension and compression" *Magazine of concrete research* 22 (70), 1970, pp 5-16.
- (14) Mehta, P. K. and Aitcin, P.C. "Effect of coarse aggregate characteristics on mechanical properties of high-strength concrete", *ACI Materials Journal* 87 (2), 1990, pp. 103-107.
- (15) Giaccio, G., Rocco, C., Violini, D., Zappitelli, J. and Zerbino, R. "High-strength Concretes incorporating different coarse aggregates", *ACI Materials Journal* 89 (3), 1992, pp. 242-246.
- (16) Giaccio, G. and Zerbino, R. "Failure Mechanism of Concrete: Combined Effects of Coarse aggregates and Strength Level", *Advanced Cement Based Materials*, 7 (1), 1998, pp. 41-48.
- (17) Torrijos, M.C., Barragán, B.E. and Zerbino, R.L., "Physical-mechanical properties, and mesostructure of plain and self-compacting concrete", *Construction and Building Materials*, 2007. En prensa.
- (18) Torrijos, M.C., Giaccio, G. y Zerbino, R. "Estructura y propiedades de transporte en hormigones dañados por temperatura" Congreso Binacional SAM/CONAMET 2005, Mar del Plata, Argentina, en CD ISBN 987-22443-0-8, Trabajo 297.
- (19) Torrijos M. C., Batic O., Giaccio G., Tobes, J. M., Zerbino R. "Comportamiento mecánico de hormigones elaborados con agregados reactivos bajo cargas de larga duración". 16ª Reunión Técnica AATH, 2006, Mendoza, Argentina, pp. 265-272.
- (20) Liang-Chien Chen, Yi-Chen Shao; Huang-Hsiang Jan; Chen-Wei Huang; and Yong-Ming Tien "Measuring System for Cracks in Concrete Using Multitemporal 13. Images" *Journal of Surveying Engineering, ASCE*, 2, 2006, pp 77-82.
- (21) Tara C., Hutchinson and Zhi Qiang Chen, "Improved Image Analysis for Evaluating Concrete Damage", *Journal of Computing in Civil Eng, ASCE*, 3, 2006, pp. 210-216.
- (22) Ammouche, A., Breyse, D., Hornain, H., Didry, O., Marchand, J., "A new image analysis technique for the quantitative assessment of microcracks in cement-based materials", *Cement and Concrete Research* 30, 2000, pp. 25-35.
- (23) Di Maio, A., Giaccio, G. and Zerbino, R. "Physico mechanical properties of high-performance concrete". II Int. Conf. on high-performance concrete, and performance and quality of concrete structures. ACI SP-186, Ed. V. M. Malhotra, ACI Int, USA 1999, pp 275-289.
- (24) Barragán, B., Di Maio, A., Ferreyra Hirschi, E., Giaccio, G. y Zerbino, R. "Consideraciones sobre la resistencia y otras propiedades fisicomecánicas en hormigones convencionales y de alta performance" *Ciencia y Tecnología del Hormigón* N 6, 1998, pp. 33-47.