

# Effect of particle packing in the durability of high performance concretes

## Efecto de empaquetamiento de las partículas en la durabilidad de los hormigones de alto desempeño

A. Castro \*, F. Ferreira <sup>1\*\*</sup>

\* University of São Paulo, São Paulo. BRASIL

\*\* Federal University of São Carlos, São Paulo. BRASIL

Fecha de Recepción: 02/03/2016

Fecha de Aceptación: 13/04/2016

PAG 91-104

### Abstract

*Due to the high aggressiveness in which the concrete structures are exposed, many researches have been developed in this area and search for materials with superior mechanical performance and durability has been the target of the researchers of concrete technology. Therefore, concrete obtained from the microstructure engineering are needed. Being composites made of fine grain particles and a low water/binder ratio, these materials have dense matrix by optimizing the packing of granular materials. Thus, this paper uses the concept of particles packing in the design of special concretes, analyzing the durability of these materials by determining the water absorption by immersion and by capillary, and chloride ion penetration. The properties of concrete designed based on this concept are compared to high performance concrete designed from conventional methodology, indicating superior properties in terms of durability.*

*Keywords: Special concretes, durability, water absorption, high-performance concrete*

### Resumen

Puesto que las estructuras de hormigón están expuestas a un alto grado de agresividad, se han realizado muchas investigaciones al respecto, en el área de la tecnología del hormigón. Los investigadores se han enfocado en la búsqueda de materiales que posean un mejor comportamiento mecánico así como una mayor durabilidad, para lo cual es necesario un hormigón obtenido mediante la ingeniería de la microestructura de los materiales. Como los materiales compuestos están formados por partículas de granulometría fina y una baja razón agua/aglomerante logran una matriz densa cuando se optimiza el empaquetamiento de sus partículas. Basándose en el concepto de empaquetamiento de las partículas en el diseño de los hormigones de alto desempeño, este trabajo analiza la durabilidad de esos materiales a través de la determinación de la penetración del ion cloruro y absorción de agua por inmersión y capilaridad. Se compararon las propiedades del hormigón diseñado bajo este concepto con las de los hormigones de alto desempeño diseñados de acuerdo a la metodología convencional, mostrando mejores propiedades en términos de durabilidad.

**Palabras clave:** Hormigones especiales, durabilidad, absorción de agua, hormigones de alto desempeño

## 1. Introducción

La durabilidad y la vida útil de las estructuras de hormigón han sido ampliamente discutidas dentro de la comunidad técnico-científica internacional, especialmente durante las últimas décadas, con la finalidad de mejorar las especificaciones técnicas y el diseño para las nuevas edificaciones, así como para realizar reparaciones, reforzamientos y reconstrucciones de una gran cantidad de edificaciones que presentan patologías a temprana edad.

Uno de los principales problemas patológicos es la corrosión del acero, que muchos investigadores consideran como el problema más serio y frecuente presente en las estructuras de hormigón armado. Además de ser un problema técnico-económico, representa una enorme pérdida de recursos naturales y constituye un problema local y universal.

El cálculo del costo anual en reparaciones debido a la corrosión del acero en los Estados Unidos alcanza los dos mil millones de dólares, siendo la corrosión en los puentes el problema más importante. El colapso del tablero del puente Silver Bridge sobre el río Ohio tuvo un costo de 40 vidas y

500 millones de dólares (Fontana, 1986). Según Long (1993), en Inglaterra, los estudios realizados en 1990 determinaron un costo anual de alrededor de 36 mil millones de dólares en mantenimiento y reparaciones de las estructuras de hormigón. Una información más reciente publicada por Ueda y Takewaka (2007) muestra los costos de construcción de las estructuras nuevas y los gastos en mantenimiento y reparación de las estructuras en diversos países, los que se aprecian en la Tabla 1.

En Brasil, la incidencia de la corrosión del acero de refuerzo embebido en el contexto de los problemas estructurales es muy significativo, alcanzando el 64% de los problemas patológicos encontrados en las construcciones en ciertas regiones del país (Andrade, 1997). Los costos de intervención en la estructura para alcanzar cierto nivel de durabilidad y protección aumentan con el tiempo de espera para hacer dichas intervenciones, siendo la evolución de este costo representado por una progresión geométrica de razón 5, conocida como "la ley de los cincos" o ley de Sitter (Helene, 1997), descrita en la Figura 1. En ciertos casos, la reparación y rehabilitación de las estructuras deterioradas tiene costos más altos que los necesarios para construir una estructura nueva.

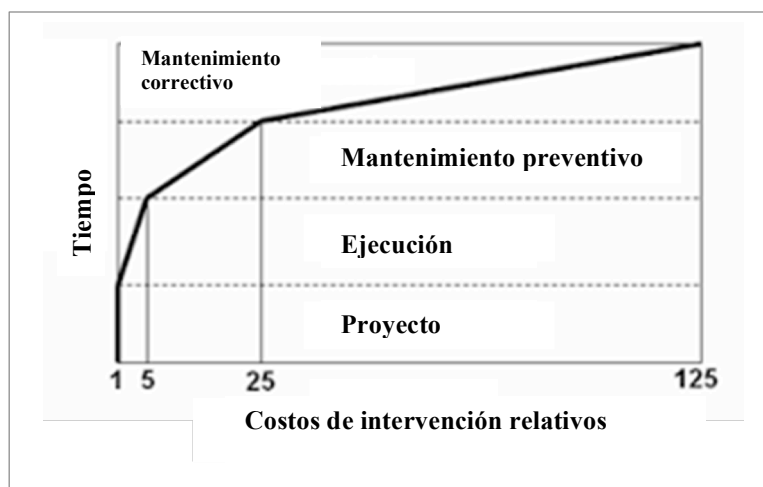
<sup>1</sup> Autor de Correspondencia:



**Tabla 1.** Trabajos de mantenimiento y reparación en algunos países (Ueda y Takewaka, 2007)

País	Gastos en 2004		
	Estructuras nuevas	Trabajos de mantenimiento y reparación	Gasto total
Japón	52.5 billones* de yenes	10.7 billones* de yenes	63.2 billones* de yenes
Corea	116.8 billones* de wones	21.1 billones* de wones	137.9 billones* de wones
Francia	85.6 mil millones de euros	79.6 mil millones de euros	165.2 mil millones de euros
Alemania	99.7 mil millones de euros	99.0 mil millones de euros	198.7 mil millones de euros
Italia	58.6 mil millones de euros	76.8 mil millones de euros	135.4 mil millones de euros

\*Un billón equivale a un millón de millones



**Figura 1.** Representación de la evolución de los costos de intervención de acuerdo al periodo en que se realizan durante la vida útil de la estructura (adaptación de Helene, 1997)

En estudios relacionados con la durabilidad de las estructuras con acero de refuerzo, pareciera ser que la corrosión del acero provocada por la acción de los iones cloruro es uno de los problemas estructurales más graves que se puede presentar. En el hormigón armado, el acero de refuerzo con un recubrimiento adecuado no debiera ser susceptible a la corrosión porque las condiciones altamente alcalinas presentes dentro del hormigón ( $\text{pH} > 12$ ) forman una película de óxido de hierro pasiva sobre la superficie del acero. Sin embargo, la carbonatación y la presencia de iones cloruro puede destruir esta película protectora. Los iones cloruro son considerados como muy agresivos puesto que pueden destruir la película protectora del acero incluso bajo condiciones de pH extremadamente altas, cuando se presentan sobre el nivel crítico.

El concepto de durabilidad abarca las propiedades de porosidad y permeabilidad del concreto. Según Hearn, Hooton y Nokken (2006) los poros pueden ejercer su influencia en las propiedades del hormigón de diversas formas. Respecto a la resistencia mecánica y elasticidad del hormigón, el volumen total de poros es el factor más importante, no su tamaño o continuidad. Sin embargo, la

durabilidad se ve influenciada por la permeabilidad que, a su vez, depende del volumen, tamaño y continuidad de los poros.

Por lo tanto, la durabilidad del hormigón depende en gran medida de la facilidad con que los fluidos, tanto líquidos como gaseosos, puedan entrar dentro del hormigón y moverse dentro de él. El tamaño, volumen y continuidad de los poros, junto con la comprensión del mecanismo de transporte de los agentes agresivos dentro del concreto son factores importantes al momento de estimar la vida útil y asegurar la calidad de las estructuras de hormigón.

El objetivo de este estudio es mejorar las características específicas del hormigón en términos de su durabilidad (absorción de agua y penetración de los iones cloruro), a fin de prolongar la vida útil de las estructuras de hormigón, basándose en el concepto de empacamiento de las partículas descrito a continuación.

#### **Empacamiento de las partículas**

En los últimos años, en diversas áreas de la ingeniería ha aumentado el interés por el empacamiento de las partículas. Este interés se debe a que gran parte de los materiales naturales o industriales usados diariamente son o

contienen partículas de diferentes formas y tamaños. En este contexto, las partículas son consideradas como granos de agregados, polvos minerales, metálicos o químicos, suelos, moléculas, poros o piedras. Por lo tanto, el comportamiento de dichos materiales depende en parte de las propiedades de sus componentes y, parcialmente, de las interacciones entre ellos (Stroeven et al., 1999a).

El flujo inicial de las suspensiones concentradas como el hormigón también depende de consideraciones físicas, por ejemplo, de la distribución del tamaño de las partículas, del índice de tamaño y de la textura superficial de las partículas (Bonen et al., 1995). El diseño de la distribución del tamaño de las partículas es fundamental ya que promueve el empacamiento y, junto con el fluido, define las propiedades reológicas del material durante el proceso de mezclado y durante su estado fresco. Gracias al uso simultáneo de aditivos químicos y adiciones minerales ha sido posible producir hormigones de alto desempeño, que no sólo tienen con una alta resistencia mecánica, sino también con otras características tales como el mayor módulo de elasticidad, menor exudación, menor fluencia lenta y retracción, y mayor durabilidad (De Larrard et al., 1994; Hu et al., 1996). Recientemente se ha redescubierto el concepto de alta densidad de empacamiento como el parámetro clave para obtener materiales cementicios con mejor comportamiento mecánico y mayor durabilidad.

El estudio del empacamiento de las partículas se puede definir como el problema de seleccionar el tamaño y dosificación adecuados de los materiales particulados, de modo que los grandes vacíos sean rellenos por partículas más pequeñas, cuyos vacíos serán rellenos a su vez con partículas aún más pequeñas, y así sucesivamente (Oliveira et al., 2000).

En 1892, Féret publicó el primer tratado sobre el empacamiento de las partículas en el hormigón, en el que presentaba la posibilidad de seleccionar los tipos adecuados de agregados y la relación entre la porosidad y la resistencia a la compresión del material endurecido cuando se somete al proceso normal de curado en húmedo (De Larrard et al., 1994; Aiçin et al., 1997; Aiçin, 1999). Desde entonces, se han propuesto algunos modelos de empacamiento de las partículas como herramientas para calcular la densidad de empacamiento de las partículas y, de ese modo, optimizar los materiales particulados del hormigón.

Luego de un exhaustivo análisis comparativo entre dos modelos básicos propuestos (Furnas y Andreasen), se comprobó que ambos modelos convergían matemáticamente en una misma ecuación (Ecuación 1). Conocido comúnmente como el modelo de Alfred, esto es un perfeccionamiento de los modelos anteriores y demostró que, de hecho, el modelo de Furnas (discreto) y el modelo de Andreasen (continuo) podían considerarse como dos formas distintas de expresar la misma cosa. Además de introducir el concepto de tamaño mínimo de la partícula en la ecuación de Andreasen, también incluye una revisión matemática del modelo de Furnas (Oliveira et al.; Funk et al., 1994).

$$CPFT(\%) = 100 \left( \frac{D^q - D_s^q}{D_L^q - D_s^q} \right) \quad (1)$$

donde: *CPFT* es el porcentaje en volumen de partículas menores al diámetro *D*, *D<sub>L</sub>* es el diámetro de la partícula más

grande, *D<sub>s</sub>* es el diámetro de la partícula más pequeña y *q* es el coeficiente de distribución.

Usando simulaciones computacionales se verificó que los valores *q* menores o igual a 0.37 pueden favorecer el límite máximo de empacamiento para distribuciones infinitas mientras que para los valores sobre 0.37 siempre existe una porosidad residual. Para que una mezcla tenga buena fluidez, el valor del coeficiente de distribución debería ser menor a 0.30; por lo tanto, la consideración de los valores *q* cercanos a 0.30 favorecen la producción de hormigón compactado por vibración, mientras que los valores menores a 0.25 dan como resultado mezclas autocompactantes (Vanderlei, 2004). El efecto de reducir el valor del coeficiente de distribución ocurre cuando aumenta el contenido de partículas finas que influye en la interacción entre las partículas.

En general, el empacamiento al azar de monodispersiones esféricas siempre tiene como resultado el mismo factor de empacamiento (entre 0,60 y 0,64), pero la forma de las partículas de los materiales particulados encontrados normalmente en el hormigón está lejos de ser esférica y, por lo tanto, varios factores pueden alterar el empacamiento de algunos conjuntos de esas partículas.

Lo primero que se debe considerar es la existencia de partículas con diferente distribución de tamaño de las partículas, que cambian la condición de dispersión inicial. El otro factor es la forma de la partícula, puesto que cuanto menos esférica sea la partícula, menor es la densidad de empacamiento de una distribución que la contiene, ya que se produce fricción entre las partículas debido al contacto superficial irregular (Oliveira et al., 2000).

La porosidad interna de la partícula también cambia la densidad de un material. Para obtener un empacamiento de densidad máxima, considerando una distribución de tamaño de la partícula en particular, es necesario usar partículas no porosas. Para el efecto de distribución del tamaño de las partículas, las partículas que tienen una porosidad cerrada son similares a las densas, pero tienen como resultado mezclas con mayor densidad, en cambio las partículas con porosidad abierta alteran el empacamiento debido a su forma irregular y además producen mezclas con menores densidad de empacamiento (Oliveira et al., 2000).

Al analizar la influencia de la distribución del tamaño de las partículas en la densidad de empacamiento y en el grado de hidratación de un material en base a cemento, se comprueba que se busca una distribución continua de las partículas para el estado de empacamiento, mientras que una distribución heterogénea es más adecuada para la tasa de hidratación. Entonces, los dos efectos son exactamente opuestos; sin embargo, para las propiedades de los materiales, deben ser considerados simultáneamente. Por una parte, se requiere una mayor densidad de empacamiento, y, por la otra, es deseable un mayor grado de hidratación. En resumen, el material debe ser lo más poroso posible (Aiçin et al., 1997).

El estado de dispersión de las partículas también debería ser considerado al buscar un empacamiento máximo. Una dispersión inadecuada de las partículas (formación de aglomerantes) puede cambiar la curva de distribución del tamaño de las partículas entregada originalmente, aumentando el diámetro mínimo efectivo de la composición y, en consecuencia, reducir la densidad de empacamiento. Además, los aglomerantes formados son equivalentes a las partículas vacías que originan los poros en la microestructura, afectando el comportamiento mecánico del material.



Entonces, para desarrollar hormigones con un mejor comportamiento mecánico y mejor durabilidad, las características del empaquetamiento de las partículas son fundamentales. De hecho, estos hormigones se consideran como materiales con alta densidad de empaquetamiento y la idea detrás de este concepto es tratar de reconstruir una roca sólida a partir de elementos que tengan tamaños complementarios de partículas (Stroeven, 1999b).

En el área de la tecnología del hormigón, los investigadores se han enfocado en la búsqueda de materiales que posean un mejor comportamiento mecánico así como una mayor durabilidad, para lo cual es necesario el hormigón obtenido mediante la ingeniería de la microestructura de los materiales. Como los materiales compuestos están constituidos por partículas con distribución del tamaño de las partículas finas (partículas de menor tamaño) y una baja razón agua/aglomerante poseen una matriz densa cuando se optimiza el empaquetamiento de los materiales particulados; en cambio, la trabajabilidad adecuada se obtiene por la dispersión de las partículas promovida mediante la incorporación de aditivos químicos.

Este trabajo aplica el concepto de empaquetamiento de las partículas al diseño de hormigones que contienen cemento Portland y subproductos industriales con la intención de obtener matrices más densas y, por lo tanto, más durables en ambientes agresivos. Se presentan y comparan las propiedades de los hormigones diseñados bajo este concepto con aquellos hormigones especiales considerados en las investigaciones de obras civiles. Los ensayos incluyen la absorción de agua por inmersión y capilaridad, y la penetración del ión cloruro a través de los ciclos de secado y humectación del hormigón en una solución de NaCl.

## 2. Programa experimental

### 2.1 Materiales

El cemento usado en las mezclas del hormigón de referencia y en el hormigón con empaquetamiento de las partículas fue cemento Portland de alta resistencia inicial (CP V-ARI), cuyas propiedades químicas y físicas se presentan en la Tabla 2. La distribución del tamaño de las partículas de este cemento se describe en la Figura 2.

Para fabricar el hormigón de referencia, se usó piedra chancada y arena natural como componentes de los agregados de la mezcla. La piedra chancada era de origen basáltico, clasificada como tamaño número 0, y la arena natural era arena de cuarzo natural clasificada como arena fina, ambas clasificaciones realizadas de acuerdo a la NBR 7211 (2009). El módulo de fineza y el tamaño máximo de estos agregados se determinó usando el ensayo de determinación de la composición granulométrica de las partículas (NBR NM 248, 2003) y los valores obtenidos fueron de 5.29 y 9.5 mm respectivamente para la piedra chancada, y de 2,34 y 4.8 mm para la arena.

Se usaron los agregados AG 10-20, AG 05-08, AG 40-50 y AG 80-100 en la composición del nuevo hormigón (diseñado bajo el concepto del empaquetamiento de las partículas). Todas eran arenas de cuarzo natural de granos redondeados. La distribución del tamaño de las partículas de estos agregados se controló mediante técnicas estadísticas para el tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad; las características físicas y químicas se mantuvieron estables y de acuerdo con las especificaciones de mercado (arenas comercialmente disponibles, usadas para la elaboración de filtros, vidrios y cerámicos).

La distribución del tamaño de las partículas de los agregados usados en la elaboración de ambos hormigones se presenta en la Figura 2. Su peso unitario y su densidad se encuentran en la Tabla 3.

**Tabla 2.** Composición química y propiedades físicas del CP V-ARI

Composición química: determinaciones	Resultados (%)	Propiedades físicas	Resultados
SiO <sub>2</sub>	21.16	Pasta de consistencia normal	0,30
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.71	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	3,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.89	Fineza Blaine (m <sup>2</sup> /kg)	700
TiO <sub>2</sub>	0.15	Tiempo de fraguado inicial (min)	143
CaO	68.08	Tiempo de fraguado final (min)	338
MgO	0.48	Resistencia a la compresión (MPa)	
Na <sub>2</sub> O	0.29	1 día	25,2
K <sub>2</sub> O	0.56	3 días	36,2
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.28	7 días	39,8
Pérdida de ignición	2.39	28 días	47,4

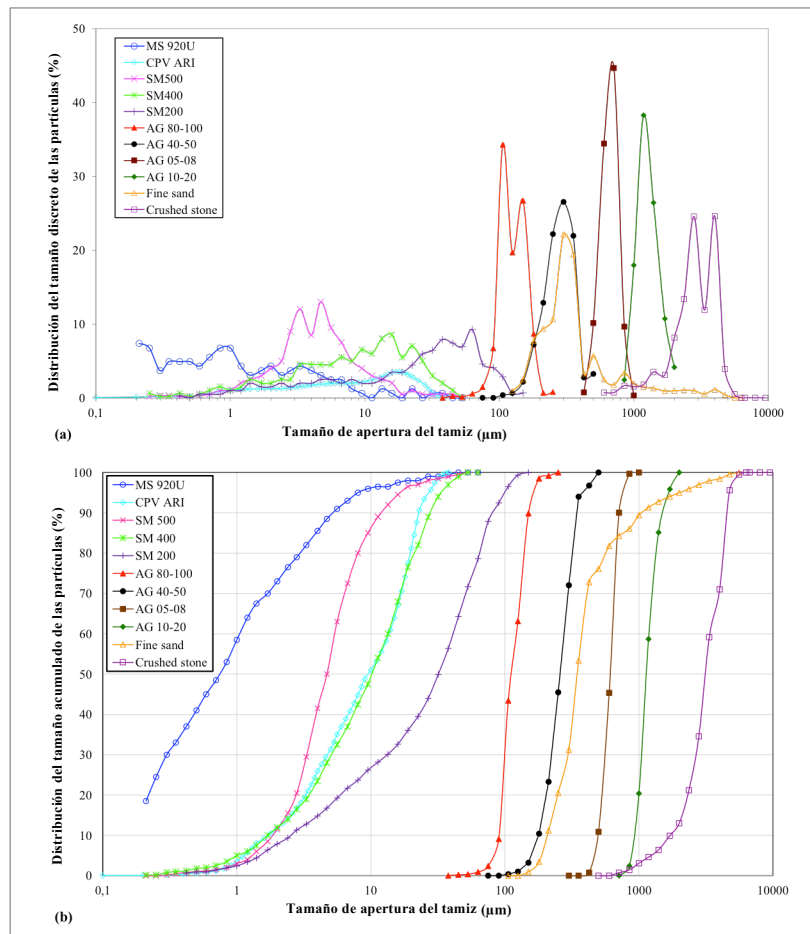
**Tabla 3.** Peso unitario y densidad de los agregados utilizados en ambos hormigones

Agregado	Peso unitario (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
Piedra chancada	1.49	2.87
Arena fina	1.67	2.61
AG 10-20	1.48	2.62
AG 05-08	1.46	2.63
AG 40-50	1.45	2.63
AG 80-100	1.43	2.64

Los polvos de cuarzo SM 200, SM 400 y SM 500 se usaron solamente en la composición del hormigón nuevo. Eran polvos de sílice triturados obtenidos de materias primas de calidad superior, usando equipos avanzados, a fin de cumplir con la estrictez de las especificaciones técnicas del mercado (materiales disponibles con diferentes distribuciones de tamaños, que se usan en la producción de pinturas, plásticos, gomas, pulidores, abrasivos, etc.). El humo de sílice MS 920U, usado en la composición de ambos hormigones (de referencia y nuevo), es un sílice no densificado obtenido de la manufactura del silicio metálico o aleaciones de ferro-silicio. Es un material extremadamente fino, conformado por

pequeñas partículas esféricas con un diámetro promedio unas 50 a 100 veces menor al diámetro promedio de las partículas de cemento, que entregan como resultado un área superficial muy específica. El humo de sílice tiene una composición química uniforme, considerándose como casi puro ya que sus partículas poseen un alto contenido de sílice amorfo en comparación con la presencia de pequeñas cantidades de otros elementos. La distribución del tamaño de las partículas de los materiales finos utilizados se muestra en la Figura 2.

Las propiedades físicas de estos materiales, área superficial específica y densidad, se presentan en la Tabla 4.



**Figura 2.** Distribución del tamaño de las partículas (a) discreto y (b) acumulado de los materiales utilizados para la elaboración de ambos hormigones



**Tabla 4.** Área superficial específica y densidad de los materiales finos usados

Material fino	Área superficial específica (m <sup>2</sup> /kg)	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
SM 200	758	2.72
SM 400	1.346	2.72
SM 500	2.498	2.70
MS 920U	14.270	2.42

Para lograr la trabajabilidad deseable de las mezclas de hormigón se usó un aditivo químico, esto es, un aditivo superplastificante en base a policarboxilato, conocido como aditivo de tercera generación.

## 2.2 Dosificación de las mezclas

La composición del diseño de la mezcla de hormigón utilizada en este estudio se basó en estudios anteriores, cuando los hormigones se elaboraban con diferentes coeficientes de empaquetamiento de las partículas (Castro et al., 2009) y diferentes tipos de cemento (Castro et al., 2011). Debido a la pequeña diferencia entre los resultados obtenidos para estos hormigones, se seleccionó uno para evaluar las propiedades relacionadas con la durabilidad, y un hormigón especial muy usado en la práctica para comparar los resultados.

### 2.2.1 Hormigón de referencia (REF)

El hormigón de referencia (Castro, 2007) corresponde al diseño de mezcla de un hormigón de alto desempeño, ampliamente considerado en las investigaciones destinadas al desarrollo y aplicación de hormigones especiales en las obras de construcción. Estaba compuesto por cemento, arena y piedra chancada, humo de sílice, aditivo superplastificante y agua, y fue desarrollado a partir del estudio inicial de las fases que constituyen el hormigón: pasta de cemento y agregados.

Se realizó el estudio de la matriz de la pasta de cemento para evaluar la compatibilidad entre los materiales aglomerantes y el aditivo superplastificante, así como para determinar el punto de saturación del aditivo, ya que las pastas de cemento que tienen un buen comportamiento de fluidez dan como resultado hormigones con fluidez y consistencia satisfactorios.

Se estudió la fase agregados para obtener el mayor empaquetamiento de las partículas, determinando la composición óptima entre ellos. Esta composición óptima se determinó de acuerdo a las recomendaciones de Helene et al. (1992). Se combinaron en diversas fracciones dos agregados con distinta distribución del tamaño de las partículas, determinándose el peso unitario en el estado comprimido de cada combinación. La composición se considera óptima cuando el valor obtenido para el peso unitario es el máximo. Para el hormigón de referencia, la composición óptima se determinó entre la arena natural fina y la piedra chancada.

Una vez definidas las dos fases que componían el hormigón, se hizo la composición del diseño de la mezcla final. Las dosificaciones entre los materiales constituyentes de la mezcla se determinaron directamente una vez definidas las características de sus fases constitutivas. Se estableció un

valor de descenso de cono de (160 ± 20) mm y, si éste no se obtenía, se harían los ajustes variando el contenido de aditivo, ya que la cantidad de agua de mezclado se mantuvo constante. El diseño de mezcla final para el hormigón de referencia fue de 1 : 1.75 : 1.75, con una razón agua/aglomerante de 0.40; un contenido de humo de sílice del 10% en volumen reemplazando al cemento y un contenido de superplastificante de 0.61% en la masa de cemento.

En el laboratorio, el hormigón de referencia se elaboró usando un reómetro. La secuencia de adición de los materiales constitutivos y el procedimiento de mezclado en la producción del hormigón de referencia se basó en los procesos de mezclado usados comúnmente en la práctica, esto es:

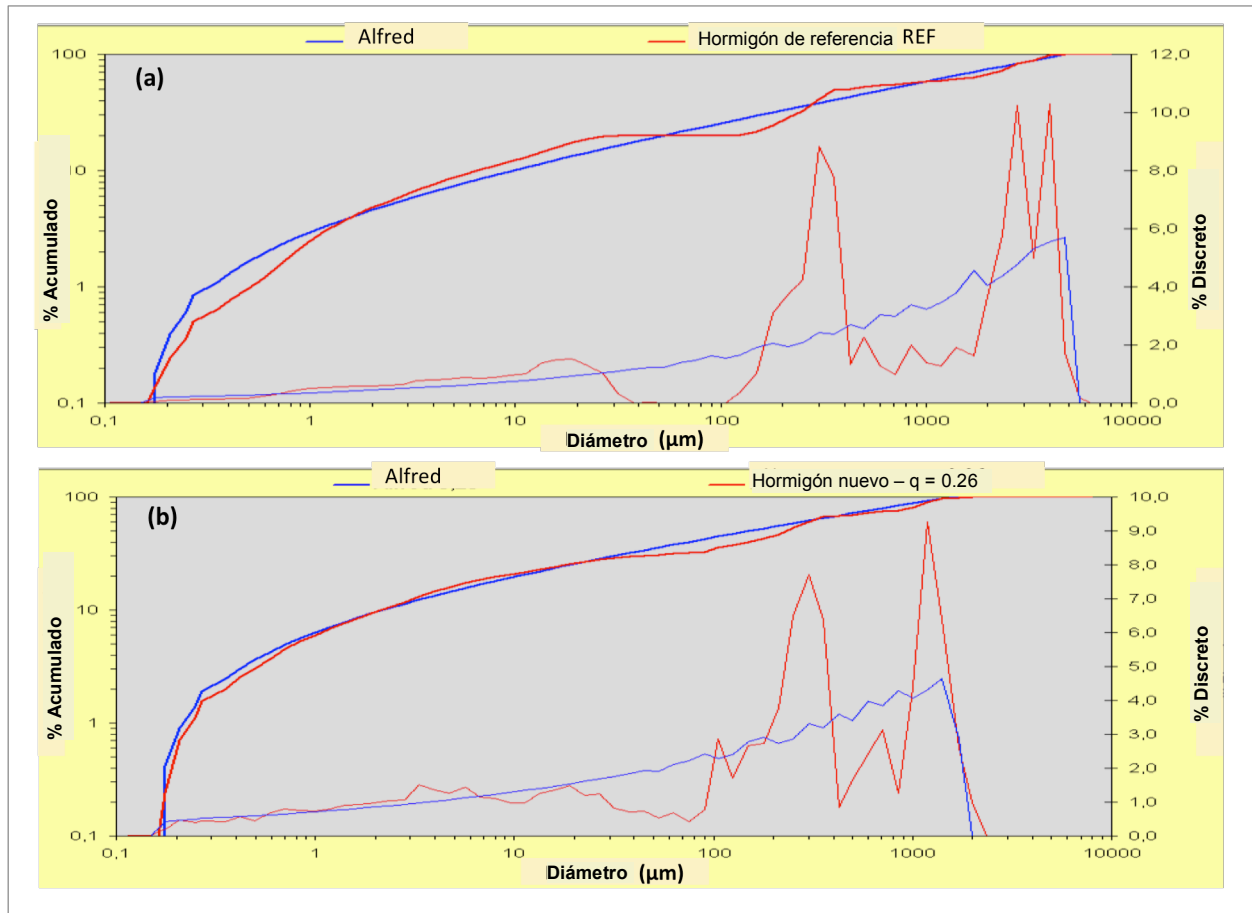
- Inicialmente, piedra chancada y el 90% del total de agua de mezclado, mezclado durante 1 minuto a baja velocidad (20 rpm)
- se detuvo la mezcladora durante 1 minuto, y luego de agregar el cemento y el humo de sílice, se reinició la mezcladora durante 1 minuto a baja velocidad
- se detuvo nuevamente la mezcladora y se dejó reposar la mezcla durante 1 minuto mientras se raspaban con una espátula las paredes del tambor para remover el material retenido. Luego, se agregó la arena natural fina y el material se mezcló nuevamente durante 1 minuto a baja velocidad
- se detuvo nuevamente la mezcladora durante 1 minuto para limpiar las paredes del tambor y, durante este intervalo, se adicionó el resto del agua de mezclado y el superplastificante
- finalmente, el material se mezcló durante 3 minutos a alta velocidad (60 rpm) contabilizando un tiempo total de mezclado de 9 minutos.

### 2.2.2 Hormigón diseñado bajo el concepto de empaquetamiento de las partículas (0.26)

La composición del nuevo hormigón se diseñó en base al concepto computacional del empaquetamiento de las partículas, según el modelo de Alfred, en el que el valor asumido para el coeficiente de distribución ( $g$ ) era de 0.26 (Castro et al., 2009). La cantidad de cada materia prima, definida por el estudio del empaquetamiento de las partículas, se aprecia en la Tabla 5 y Figura 3.

**Tabla 5.** Dosificación de las materias primas para las mezclas de hormigón

Materia prima	$q = 0.26$ (hormigón nuevo)	REF (hormigón de referencia)
	%-agua	%-agua
Piedra chancada	-----	39
Arena fina	-----	38
AG 10-20	24	-----
AG 05-08	7	-----
AG 40-50	29	-----
AG 80-100	7.5	-----
SM 200	7	-----
SM 400	3	-----
SM 500	2.5	-----
MS 920U	10	6.6
CPV ARI	10	16.4



**Figura 3.** Las curvas de distribución del tamaño de las partículas de (a) el hormigón de referencia (REF) y (b) el hormigón diseñado bajo el concepto del empaquetamiento de las partículas ( $q = 0.26$ )



Teniendo ya definido el sistema granulométrico que conformaba la mezcla ( $q = 0.26$ ), se realizó el estudio para determinar el punto de saturación del aditivo superplastificante (contenido óptimo). Se hicieron adiciones sucesivas del aditivo hasta que el índice de fluidez libre medido fuera igual o mayor al 80%. La razón agua/materiales granulares totales se fijó en un 7% y el contenido óptimo de aditivo fue del 0.65%. Cabe recordar que los contenidos de agua y de superplastificante fueron determinados para la cantidad total de materiales granulares y no sólo para la cantidad de cemento y/o aglomerante - cemento y humo de sílice (Castro et al., 2009).

El procedimiento de mezcla utilizado en la elaboración del nuevo hormigón fue distinto al usado en la preparación del hormigón de referencia. Para la nueva composición, los materiales granulares secos fueron homogeneizados previamente en forma manual dentro de bolsas plásticas. Luego, se agregó toda el agua de mezclado y el material se mezcló durante 1 minuto a baja velocidad (20 rpm). Se detuvo la mezcladora durante 1 minuto y se rasparon con una espátula las paredes del tambor para retirar el material retenido y durante este intervalo, se agregó el superplastificante. A continuación, se mezcló el material durante 5 minutos a alta velocidad (60 rpm), contabilizando un tiempo total de mezclado de 7 minutos.

### 3. Métodos

#### 3.1 Absorción de agua por capilaridad

Se usó el ensayo de absorción de agua por capilaridad para determinar la absorción de agua en los hormigones con un curado en húmedo de 7 y 28 días, de acuerdo a la norma ABNT 9779 (2012). Se usaron probetas cilíndricas de 50 mm de diámetro por 100 mm de largo. Se selló la cara lateral de las probetas con silicona hasta los 3 cm de altura de modo que sólo una cara circular de la probeta quedara expuesta al agua. El nivel de agua durante los ensayos se mantuvo constante 5 mm sobre la superficie de la probeta en contacto con el agua. Se monitoreó el peso de las probetas durante el periodo (0-72 horas) en que el cemento estuvo en contacto con el agua.

Se calculó la sorptividad, dada por el volumen de agua que penetra por unidad de área y tiempo, para facilitar la interpretación de los resultados. En este trabajo, el tiempo considerado para calcular la sorptividad fue de 72 horas. Así, la sorptividad se obtiene empíricamente de la inclinación del volumen acumulado de agua absorbida por unidad de área superficial *versus* la raíz cuadrada del tiempo, como se representa en la Ecuación (2).

$$S = \frac{V_w}{A_c \times t^{1/2}} \quad (2)$$

donde:  $S$  es la sorptividad ( $\text{g}/\text{cm}^2$ );  $V_w$  es el volumen de agua absorbida por la probeta ( $\text{mm}^3$ );  $A_c$  es el área transversal de cada probeta ( $\text{mm}^2$ ) y  $t$  es el tiempo de exposición (h).

Después del pesaje final, se rompieron las probetas por compresión diametral para verificar la distribución del agua dentro de ellas y así poder determinar el movimiento ascendente del agua por capilaridad en la probeta de hormigón. La altura interna máxima del ascenso del agua por capilaridad se expresó en centímetros, y la distribución interna

del agua absorbida se registró tomando una fotografía a la probeta ensayada.

#### 3.2 Absorción de agua por inmersión

Se empleó el ensayo de absorción de agua por inmersión para estimar la cantidad máxima de agua que puede ser absorbida por una muestra seca y, de este modo, entregar una medida del total de poros permeable que existe dentro del hormigón.

Se determinó la absorción de agua y el porcentaje de vacíos del hormigón según la norma NBR 9778 (2005). Se usaron probetas cilíndricas de 50 mm de diámetro por 100 mm de largo, y las determinaciones se realizaron a los 7 y 28 días de curado en húmedo.

Inicialmente, las probetas se secaron en un horno durante 72 h y, al cabo de este periodo, se determinó su masa. Se dejaron enfriar a temperatura ambiente; después fueron sumergidas en agua a 23°C y mantenidas en esta condición durante 72h y luego se determinó su masa. Una vez terminada la etapa de saturación, las probetas se colocaron en un recipiente lleno de agua, el que gradualmente se llevó a ebullición. Las probetas se mantuvieron en ebullición durante 5h y se dejaron enfriar en el agua hasta llegar a la temperatura ambiente; luego se determinó su masa aparente inmersa usando una balanza hidrostática. A continuación, se sacaron del agua, se limpiaron con un paño húmedo y se registró su masa en condición saturada y superficialmente seca. El porcentaje de absorción de agua por inmersión y el volumen de vacíos se calculó según las Ecuaciones 3 y 4.

$$A = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (3)$$

$$I_V = \frac{m_{sat} - m_s}{m_{sat} - m_i} \times 100 \quad (4)$$

donde:  $A$  es el porcentaje de absorción de agua por inmersión (%);  $I_V$  es el volumen de vacíos (%);  $m_s$  es la masa de la muestra secada en horno, en aire (g);  $m_{sat}$  es la masa de la muestra superficialmente seca, en aire, después de la inmersión y hervido (g);  $m_i$  es la masa aparente de la muestra en agua después de la inmersión y hervido (g).

#### 3.3 Penetración de iones cloruro

Se determinó la penetración de los iones cloruro mediante el método colorimétrico por aspersión con nitrato de plata para determinar la profundidad de penetración de los iones cloruro en el hormigón después de cuatro semanas de someter las probetas a ciclos de secado y humectación en una solución al 10% de NaCl. Se usaron probetas cilíndricas de 50 mm de diámetro por 100 mm de largo, y el ensayo se inició después de 28 días de curado en húmedo.

Inmediatamente después del ciclo de curado, se retiraron las probetas de la cámara húmeda y se dejaron secar a la temperatura del laboratorio durante 14 días. Luego de este periodo, se colocaron en un recipiente con una solución de NaCl al 10% en la que se dejaron parcialmente sumergidas durante 3 días. Después del periodo de inmersión (humectación), se inició el ciclo de secado de 4 días (secado); los ciclos se repitieron hasta completar todos los ciclos. La solución fue reemplazada una vez a la semana para mantener su concentración.



Una vez terminado en número de ciclos de secado y humectación, las probetas se sometieron a compresión diametral hasta su fractura y se les aplicó una solución de nitrato de plata de 0.1 M de concentración por aspersion sobre la superficie expuesta. Después se dejaron en un ambiente iluminado para que la solución reaccionara con los iones cloruro y, al cabo de unas pocas horas, se midió con una regla la profundidad de penetración de los iones cloruro.

La solución de nitrato de plata reacciona con el NaCl produciendo cloruro de plata en presencia de cloruro libre y óxido de plata en ausencia de los cloruros, y sus coloraciones son contrastantes. En el primer caso, la superficie se mantuvo

sin color, mientras que en el segundo, la superficie se oscureció.

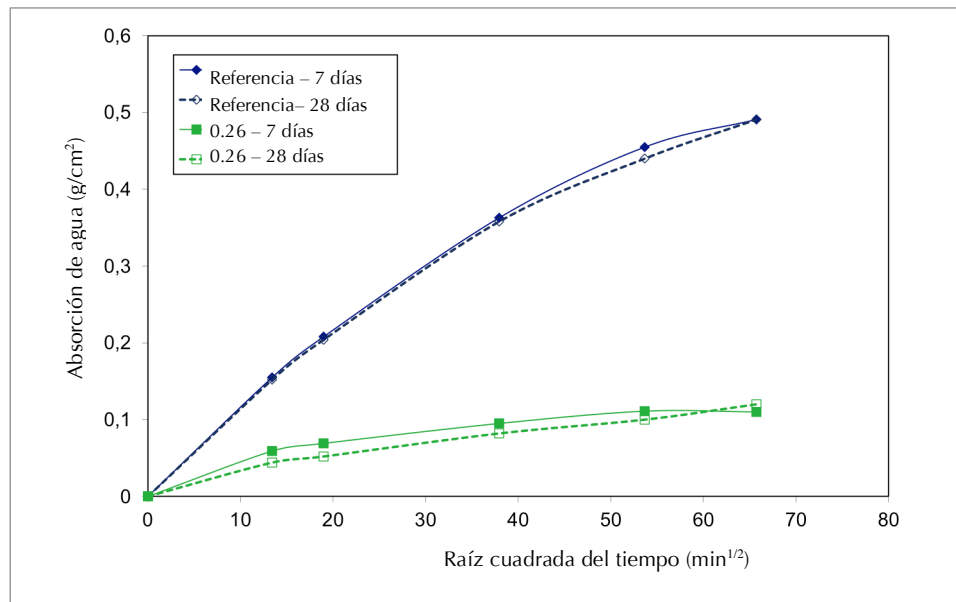
## 4. Resultados y discusiones

### 4.1 Absorción de agua por capilaridad

Los valores de la absorción de agua por capilaridad medida a las 3, 6, 24, 48 y 72 horas se muestran en la Tabla 6, con valores que representan el promedio de tres lecturas. La absorción de agua por capilaridad versus la raíz cuadrada del tiempo se muestra en la Figura 4.

**Tabla 6.** Absorción de agua por capilaridad de los hormigones, en g/cm<sup>2</sup>

Tiempo (horas)	7 días		28 días	
	REF	0.26	REF	0.26
3	0.155	0.059	0.152	0.044
6	0.208	0.069	0.204	0.052
24	0.363	0.095	0.358	0.082
48	0.455	0.111	0.440	0.100
72	0.491	0.110	0.491	0.120



**Figura 4.** Resultados de la absorción por capilaridad de los hormigones versus la raíz cuadrada del tiempo



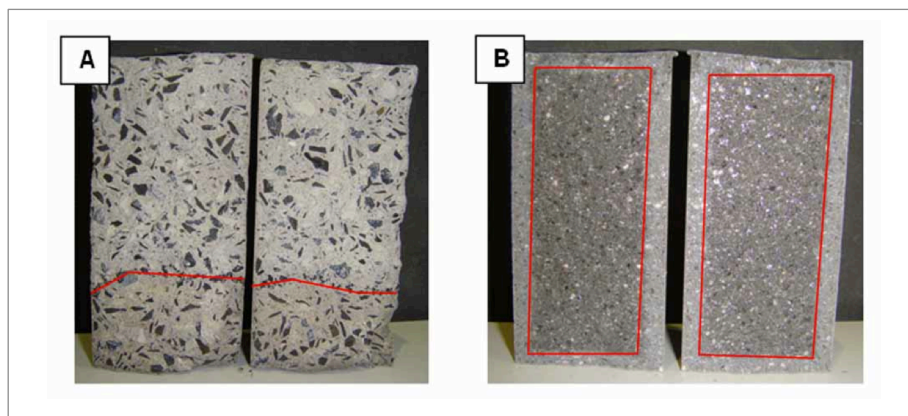
Los resultados presentados en la Tabla 6 y representados gráficamente en la Figura 4 indican que el hormigón diseñado bajo el concepto del empacamiento de las partículas (0.26) presentó valores mucho más bajos para la absorción por capilaridad que el hormigón de referencia (0.120 g/cm<sup>2</sup> y 0.491 g/cm<sup>2</sup> respectivamente, a la edad de 28 días) debido a un mejor empacamiento de las partículas y a una microestructura más densa del material. Cabe señalar que no se encontraron diferencias significativas entre los valores de absorción por capilaridad de ambos hormigones después de los 7 y 28 días.

En la Figura 5 se puede apreciar que el incremento de la capilaridad de las probetas de hormigón diseñadas bajo el concepto del empacamiento de las partículas ( $q = 0,26$ ) es mayor al de los hormigones de referencia (REF), sin embargo los coeficientes de absorción son más bajos (Figura 4). Además, la forma de la ascensión del agua resultó diferente en ambas composiciones. En el hormigón de referencia (REF), la ascensión ocurrió en forma homogénea en la base de la probeta, con casi la misma altura de agua que se observó en los bordes y en el centro. En cambio, la ascensión de agua en el nuevo concreto ( $q = 0.26$ ) ocurrió solamente en el centro de la probeta.

Se sabe que a menor diámetro del poro de capilaridad, mayor es la presión de capilaridad y, en consecuencia, mayor es la penetración de agua dentro del hormigón. Por lo tanto, a mayor diámetro del poro de capilaridad, la altura de ascensión del agua por capilaridad es menor, a pesar de que la cantidad de agua absorbida será mayor (Helene, 1993), como se observó en este estudio. Al usar el método del empacamiento de las partículas determinado computacionalmente se produce un refinamiento de los poros del hormigón. En consecuencia, se observa que existe un refinamiento de los poros del hormigón (mayor altura de ascensión del agua por capilaridad) cuando se usa el método computacional basado en el concepto del empacamiento de las partículas para el diseño de la mezcla, aunque el coeficiente de absorción de agua del hormigón sea menor.

#### 4.2 Absorción de agua por inmersión

Los valores de la absorción de agua por inmersión y el volumen del espacio de poros permeables (volumen de vacíos) obtenido para los hormigones se presenta en la Tabla 7, con valores que representan el promedio de tres lecturas. Las Figuras 6 y 7 representan la absorción de agua y el volumen de vacíos de los hormigones a los 7 y 28 días.



**Figura 5.** Probetas fracturadas después de los ensayos de absorción de agua por capilaridad, (A) hormigón de referencia (REF) y (B) nuevo hormigón (0.26)

**Tabla 7.** Absorción de agua por inmersión y volumen de vacíos de los hormigones, en %

Propiedad	7 días		28 días	
	Referencia	0.26	Referencia	0.26
Absorción de agua	6.2	1.9	6.0	1.7
Volumen de vacíos	13.7	4.4	13.5	3.9

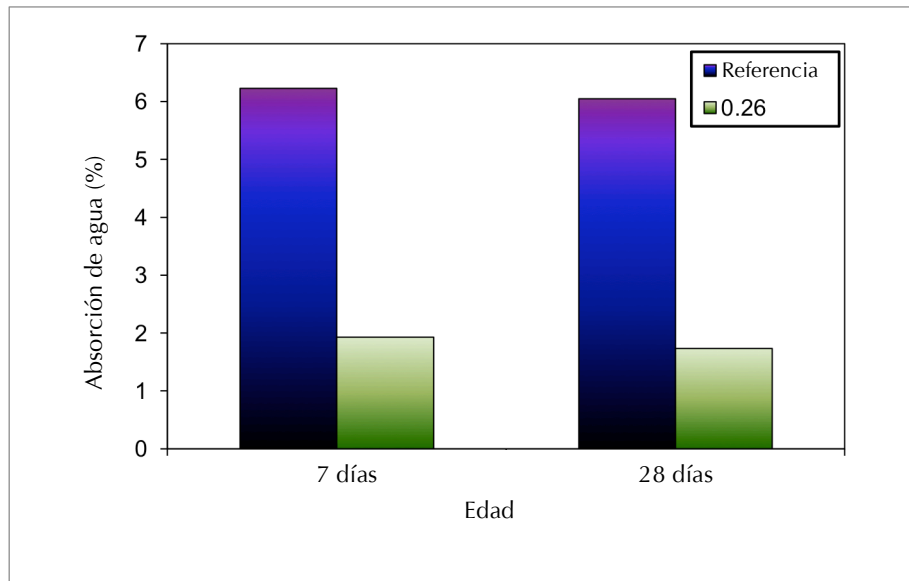


Figura 6. Absorción de agua por inmersión de los hormigones

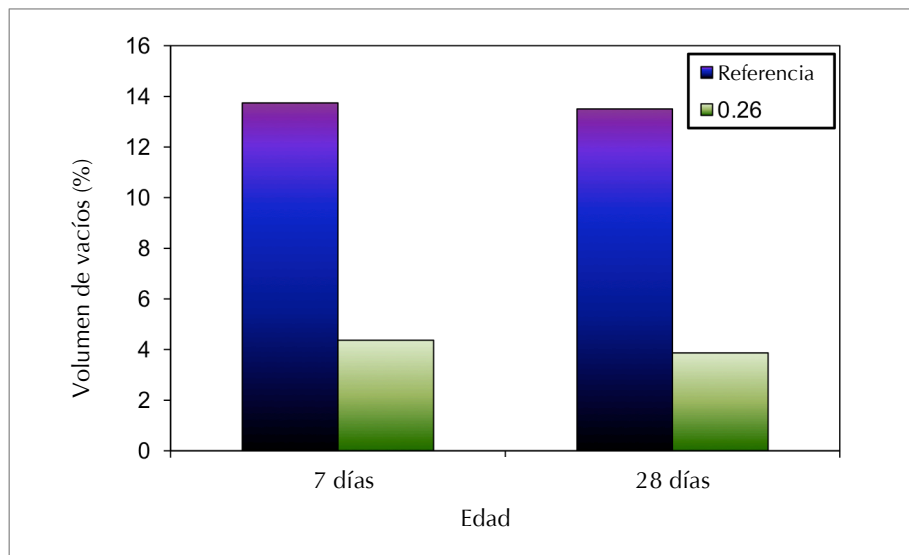


Figura 7. Volumen de vacíos de los hormigones

Al observar los resultados presentados en la Tabla 7 y graficados en las Figuras 6 y 7, se puede deducir que tanto la absorción de agua como el volumen de vacíos en el hormigón de referencia (REF) son muchos mayores que para el hormigón diseñado bajo el concepto del empacamiento de las partículas (0.26), manteniéndose la misma diferencia para todas las edades. El mejor comportamiento del nuevo hormigón (0.26) se asocia al mejor empacamiento de las partículas y, en consecuencia, al desarrollo de una matriz más densa en este material.

El CEB-192 (1998) relaciona la absorción de agua del hormigón con su calidad. Para una absorción de agua menor al 3%, se considera que el hormigón tiene baja absorción y buena calidad; con un 3% a 5%, la calidad y absorción son de calidad media y si la absorción es mayor al 5%, se considera de alta absorción y el hormigón es pobre. En términos de los hormigones estudiados, se encontró que el nuevo hormigón (0.26) presentaba baja absorción y alta calidad, mientras que el hormigón de referencia se consideró como un material de alta absorción y, por lo tanto, de baja calidad.

Por otra parte, en base a la absorción de agua, el hormigón puede ser clasificado como durable (absorción menor al 4.2%), normal (entre un 4.2% y 6.3%) y deficiente (mayor al 6.3%) (Helene, 1893). De acuerdo a lo anterior, el nuevo hormigón (0,26) se considera un material durable mientras que el hormigón de referencia (REF) presenta un comportamiento regular en términos de durabilidad.

### 4.3 Penetración de los iones cloruro

La profundidad de la penetración de los iones cloruro se determinó asperjando una solución de nitrato de plata sobre las probetas fracturadas. Los resultados, que corresponden a la media de tres determinaciones de la profundidad de penetración, obtenidos para el hormigón de referencia (REF) y para el hormigón diseñado bajo el concepto del empacamiento de las partículas (0.26) se muestran en la Figura 8. La Figura 9 muestra las fotografías de las probetas después de haber sido asperjadas con la solución de nitrato de plata.

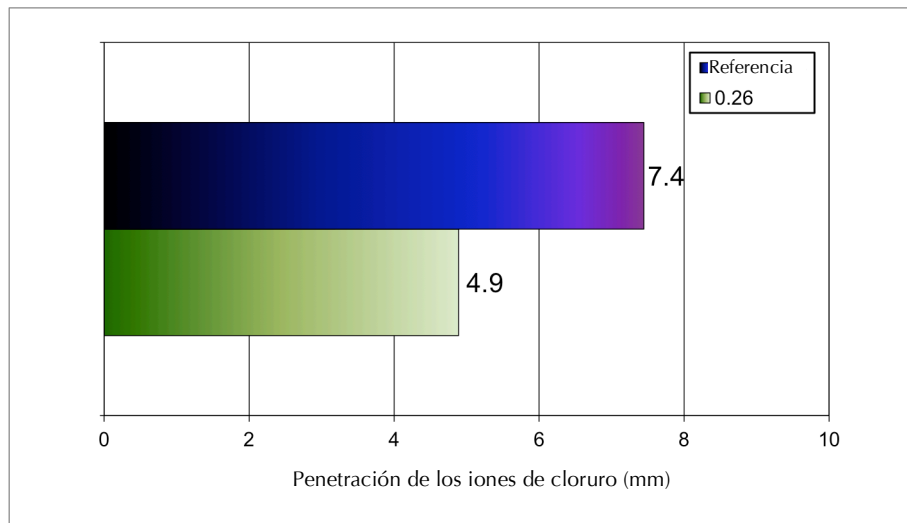


Figura 8. Profundidad de penetración de los iones cloruro en las probetas de hormigón

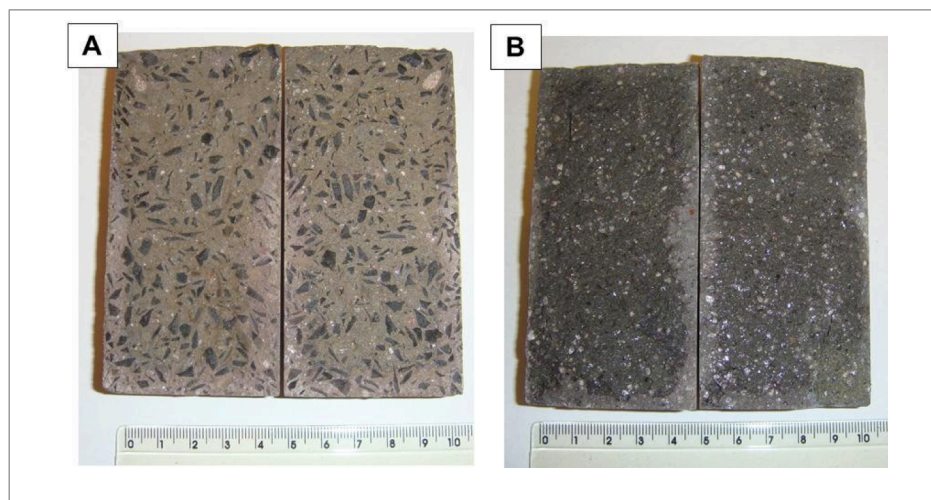


Figura 9. Probetas fracturadas después de haber sido asperjadas con una solución de nitrato de plata, (A) hormigón de referencia (REF) y (B) hormigón nuevo (0.26)

De los resultados obtenidos (Figuras 8 y 9), se observa que la mezcla de hormigón diseñada bajo el concepto del empaquetamiento de las partículas (0.26) y, por lo tanto, el desarrollo de una microestructura más densa dio como resultado una profundidad de penetración de los iones cloruro inferior a la del hormigón de referencia (REF).

Debe recordar que a mayor cantidad de silicato cálcico hidratado (C-S-H) en el hormigón endurecido, ya sea por la reacción de hidratación del cemento o por la reacción puzolánica del humo de sílice, menor es la tasa de penetración de esos iones en el hormigón. Los iones cloruro pueden combinarse con el C-S-H adsorbido químicamente en la superficie del C-S-H; en la superficie de las capas de C-S-H y formando parte de la estructura del C-S-H, influenciando así la cinética de las reacciones (Silva, 2006).

## 5. Conclusión

La aplicación del concepto de empaquetamiento de las partículas en el diseño de la mezcla de hormigón permite el desarrollo de hormigones con mejores propiedades incluso al ser comparados con otros hormigones de alto desempeño que se usan en las investigaciones enfocadas hacia el diseño y aplicación de hormigones especiales en la construcción de obras civiles.

Los coeficientes de absorción de agua del nuevo hormigón (0.26), tanto por capilaridad como por inmersión, fueron más bajos que los del hormigón de referencia (REF), indicando la extremadamente baja permeabilidad del material. La profundidad de la penetración de los iones cloruro también disminuyó después de los ciclos de secado y humectación en una solución de NaCl, constituyéndose el nuevo hormigón (0.26) en una barrera física más eficiente para la penetración de los iones cloruro al compararlo con el hormigón de alto desempeño estudiado (REF).

Por lo tanto, la aplicación del concepto de empaquetamiento de las partículas para incrementar la densidad del sistema granular en los materiales cementicios, demuestra ser un parámetro clave para obtener hormigones con un alto comportamiento mecánico y mayor durabilidad para su uso en obras civiles.

## 6. Agradecimientos

Los autores desean agradecer a la Universidad de São Paulo (POLI-USP), a la Universidad Federal de São Carlos, a la Fundación para el Fomento de la Investigación de São Paulo (FAPESP) y al Consejo Nacional para el Desarrollo Científico y Tecnológico (CNPq) por su apoyo financiero.

## 7. Referencias

- Aiqin W., Chengzhi Z. and Ningsheng Z. (1997)**, Study of the influence of the particle size distribution on the properties of cement. *Cement and Concrete Research*, v.27, n.5, p.685-695.
- Aiqin W., Chengzhi Z. and Ningsheng Z. (1999)**, The theoretic analysis of the influence of the particle size distribution of cement system on the property of cement. *Cement and Concrete Research*, v.29, n.11, p.1721-1726.
- Andrade J. (1997)**, Durabilidade das estruturas de concreto armado: análises das manifestações patológicas nas estruturas do estado de Pernambuco, Porto Alegre, Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 148 p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT) (2009)**, NBR 7211: Agregados para concreto: especificação, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT) (2003)**, NBR NM 248: Agregados: determinação da composição granulométrica, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT) (2012)**, NBR 9779: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água por capilaridade, Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT) (2005)**, NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro, 2005.
- Bonen D. and Sarkar S. L. (1995)**, The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss. *Cement and Concrete Research*, v.25, n.7, p.1423-1434.
- Castro A. L., Liborio J. B. L. and Pandolfelli V. C. (2009)**, Desempenho de concretos avançados para a construção civil, formulados a partir do método de dosagem computacional. *Cerâmica*, v.55, n.335, p.233-251.
- Castro A. L., Liborio J. B. L. and Pandolfelli V. C. (2011)**, A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional. *Cerâmica*, v.57, n.341, p.10-21.
- Castro A. L. (2007)**, Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho, São Carlos, Tese (Doutorado) - Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, 302 p.
- Comité Euro-International Du Béton (CEB). (1998)**, Diagnosis and assessment of concrete structures: state-of-the-art report. *Bulletin d'Information* no 192.
- De Larrard F. and Sedran T. (1994)**, Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model. *Cement and Concrete Research*, v.24, n.6, p.997-1009.
- Fontana M. G. (1986)**, *Corrosion Engineering*, New York: McGraw-Hill, 3ed, 556 p.
- Funk J. E. and Dinger D. R. (1994)**, Predictive process control of crowded particulate suspensions: applied to ceramic manufacturing, Boston: Kluwer Academic, 786 p.
- Hearn N., Hooton D. R and Nokken M. R. (2006)**, Pore Structure, Permeability, and Penetration Resistance Characteristics of Concrete. In.: LAMOND, J. F.; PIELERT, J. H. (editors). *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*, West Conshohocken/PA, USA: ASTM International, p.238-252.
- Helene P. (1983)**, La agresividad del medio y la durabilidad del hormigón. *Hormigón*, n.10, p.25-35.
- Helene P. and Terzian P. (1992)**, Manual de dosagem e controle do concreto, São Paulo: PINI; Brasília: SENAI, 349 p.
- Helene P. (1993)**, Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado, São Paulo, Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 248 p.
- Helene P. (1997)**, A nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a vida útil das estruturas de concreto. Disponível em: <<http://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/06/185.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2014.



- Hu C. and De Larrard F. (1996)**, The rheology of fresh high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, v.26, n.2, p.283-294.
- Long A. E. (1993)**, Introduction to a series of technical notes in-situ non-destructive testing techniques. *Proceedings of the ICE - Structures and Building*, v.99, n.1, p.63.
- Oliveira I. R., Studart A. R., Pileggi R. G. and Pandolfelli V.C. (2000)**, Dispersão e empacotamento de partículas: princípios e aplicações em processamento cerâmico, São Paulo: Fazenda Arte Editorial, 224 p.
- Silva F. G. (2006)**, Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos, São Carlos, Tese (Doutorado) - Interunidades em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, 220 p.
- Stroeven P. and Stroeven M. (1999a)**, Space system for simulation of aggregated matter application to cement hydration. *Cement and Concrete Research*, v.29, n.8, p.1299-1304.
- Stroeven P. and Stroeven M. (1999b)**, Assessment of packing characteristics by computer simulation. *Cement and Concrete Research*, v.29, n.8, p.1201-1206.
- Ueda T. and Takewaka K. (2007)**, Performance-based standard specification for maintenance and repair of concrete structures in Japan. *Structural Engineering International*, v.4, n.7, p.359-366.
- Vanderlei R. D. (2004)**, Análise experimental do concreto de pós reativos: dosagem e propriedades mecânicas, São Carlos, Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 168 p.