

# Influencia de la forma y textura de las arenas en la demanda de agua de los hormigones

María J. Positieri<sup>1</sup>, Raúl López<sup>1</sup>, Carlos E. Baronetto<sup>1</sup> y Marcelo Gonzalez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Departamento Estructuras, F.C.E.F. y N., Universidad Nacional de Córdoba, Argentina*

<sup>2</sup>*Colaborador externo, Argentina*

Fecha de recepción del manuscrito: 15/09/2015

Fecha de aceptación del manuscrito: 11/12/2015

Fecha de publicación: 15/03/2016

**Resumen**— Este trabajo presenta avances del Proyecto de investigación “Modelación de parámetros para la dosificación y optimización de hormigones con materiales locales” subsidiado por la Secyt de la U.N.C., desarrollado por los autores en la Cátedra de Tecnología de los Materiales de Construcción. Se realiza una síntesis del estado del arte referida a las características de los agregados que influyen en la demanda de agua de los hormigones. Muchos autores reconocen el impacto de variables como la forma y textura superficial de los agregados, pero no siempre se consideran en los cálculos y se deja librado el ajuste final a la experiencia del profesional o a la realización de pruebas experimentales. Se presenta la metodología de caracterización de la forma y textura de arenas de cuencas aluvionales de la provincia de Córdoba y de algunas provenientes de la trituración de rocas. Los resultados permiten cuantificar la variación de la demanda de agua en morteros en los que se variaron las relaciones agua-cemento para obtener mezclas de diferente fluidez. Estos primeros pasos permitirán avanzar en el objetivo de presentar modelos de determinación del contenido unitario de agua de los hormigones en función de las características de los materiales de uso local.

**Palabras clave**—arena, forma, textura, hormigones.

**Abstract**—This paper presents advances in the research project called "Modeling of parameters for dosing and optimizing concrete with local materials", subsidized by the Secyt of the National University of Córdoba, developed by the authors at the Chair of Technology of Building Materials. A summary of the state of the art relating to the characteristics of the aggregates that influence water demand of concrete is done. Many authors recognize the impact of variables such as surface shape and texture of the aggregates, but these are not always considered in the calculations and the final adjustment relies on the professional experience or on experimental tests. The methodology for characterizing the shape and texture of sands from alluvial basins of the province of Córdoba and some from rock crushing is presented. The results allow quantifying the water demand in mortars to achieve mixtures of different fluidities for each sand analyzed. These first steps will permit to advance toward the goal of having models for determining the water requirement of concrete based on the characteristics of the materials of local use.

**Keywords**—sand, shape, texture, concrete

## INTRODUCCIÓN

El hormigón se ha convertido en un material cada vez más complejo por los nuevos componentes usados en su formulación: gran variedad de cementos comerciales, materiales cementicios suplementarios, aditivos químicos orgánicos e inorgánicos, fibras, resinas. Además en el futuro cercano también es de esperar el uso creciente de nano-componentes y mayor disponibilidad y necesidad de reutilizar, reciclar e inmovilizar en la matriz de los hormigones subproductos de otras industrias.

Por otra parte, cada vez son más frecuentes las especificaciones basadas en propiedades que exceden y, en algunos casos, prescinden de los clásicos requerimientos por resistencia mecánica. Hoy se especifican hormigones cuyas propiedades determinantes pueden ser diversas. Por

ejemplo, en términos reológicos como es el caso de los hormigones autocompactantes, autonivelantes y hormigones de consistencia extendida en el tiempo; otros, por su permeabilidad y/o durabilidad, como en el caso de los hormigones porosos de muy alta permeabilidad controlada o los hormigones diseñados para vidas en servicio de más de 100 años con especificaciones de permeabilidad muy bajas. Otras especificaciones pueden ser su deformabilidad como en los hormigones de contracción controlada o en los hormigones expansivos, o por su comportamiento a edades tempranas como los hormigones de reparación rápida. Todas estas deben cumplirse en un contexto cambiante y cada vez más desafiante.

Incluso en el caso de los hormigones cuya exigencia dominante es la resistencia, los niveles requeridos, sus condiciones de producción y aseguramiento de calidad imponen retos cada vez mayores.

Sin embargo, aun cuando muchos de los requerimientos excluyentes pertenezcan al campo del estado endurecido temprano o avanzado, el diseño de los hormigones basado en la reología sigue siendo la clave de trabajabilidad que

Dirección de contacto:

María J. Positieri, Avenida Vélez Sarsfield 1611 Ciudad Universitaria, X5016 CGA. Tel: 5353800 interno 29071, mpositieri@gmail.com

permitirá o impedirá su correcta colocación y compactación, es decir el cumplimiento de todas las demás propiedades deseables en el hormigón de las etapas subsiguientes. Por esta misma razón sigue vigente el interés de generar, validar o completar modelos de comportamiento en estado fresco que permitan predecir y controlar la demanda de agua de los hormigones que asegure primero la consistencia necesaria al momento de la colocación y luego, las propiedades determinantes del estado endurecido.

A pesar de la importancia del contenido de agua sobre las diferentes propiedades del hormigón a todas las edades, sorprende que no se hayan realizado muchos trabajos para lograr expresar con precisión suficiente la influencia de la composición del hormigón en su requerimiento de agua. Según Popovics (Popovics, 1980) esto puede deberse a dos causas principales: la primera es que empíricamente puede conocerse la demanda de agua del hormigón con unas pocas mezclas de prueba y en segundo lugar porque la gran cantidad de variables intervinientes hace difícil encontrar una fórmula apropiada y también porque aún no se dispone de herramientas que permitan medir y caracterizar numéricamente algunas variables, como por ejemplo la forma y la textura superficial de los agregados cuya influencia es determinante. Por el contrario, los diversos modelos, fórmulas y ábacos disponibles (Popovics, 1980) (García Balado, 1982) (ACI 211.1-91, 2002) (ICPA, 2015) dan una idea muy aproximada del requerimiento de agua del hormigón, por lo que en la mayoría de los casos es la experiencia del diseñador la que da el ajuste fino y ante determinadas variaciones (p.e. en algunas propiedades de los materiales) sólo el método empírico permite una definición precisa.

En contraposición a la resolución del problema en general, un objetivo menos pretencioso pero igualmente útil, es calibrar los modelos existentes o algún derivado de los mismos para representar con suficiente precisión el comportamiento de los materiales locales y sus variaciones normales. La consecuencia de alcanzar dicho objetivo permitirá mayor precisión y menor consumo de recursos al momento de diseñar y optimizar mezclas de hormigón bajo las condiciones locales dominantes. Con tal propósito, este trabajo, enmarcado en el proyecto "Modelación de parámetros para la dosificación y optimización de hormigones con materiales locales", resume modelos disponibles para la estimación del contenido unitario de agua del hormigón y efectos principales derivados de las características de los materiales componentes del hormigón.

## REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA Y ESTADO DEL ARTE

### *Las variables que influyen en la demanda de agua del hormigón*

Las variables que afectan la demanda de agua del hormigón son numerosas e incluyen desde las características y propiedades de sus materiales componentes hasta las condiciones bajo las cuales se efectúa la elaboración, en particular la temperatura, catalizador universal de los fenómenos físico-químicos. Pero, cuando en laboratorio las condiciones de elaboración y evaluación del hormigón son acotadas, entonces las características de los agregados dominan el escenario mostrando su influencia

determinante sobre las propiedades del hormigón fresco y endurecido. Así se revelan las diferencias entre las características de los materiales provenientes de distintas regiones, particularmente las arenas, que debido a su mayor superficie específica afectan el contenido de agua requerido por los hormigones con mayor intensidad y en rangos más amplios.

Como ya se insinuó, entre las características significativas de los agregados que afectan la demanda de agua del hormigón, se encuentran su tamaño máximo y la distribución de tamaño de sus granos, comúnmente denominada granulometría. Es práctica común que ambas características descriptivas de los agregados se consoliden en una única magnitud numérica e ingenierilmente práctica denominada módulo de finura, que surge de la sumatoria de porcentajes retenidos acumulados del material en una serie de tamices prefijada. Esta magnitud se asume como determinante de la demanda de agua del hormigón, lo que resulta suficientemente preciso cuando se modifica el tamaño y grado de partición sin cambiar otras características del agregado. Sin embargo, es fácil imaginar que el mismo módulo de finura no resultará en una misma demanda de agua en el hormigón si se modifican otras propiedades y características de los agregados tan significativas como el grado de partición.

En efecto, se sabe que la forma y textura superficial de los agregados ejercen una fuerte influencia sobre el requerimiento de agua, pero al presente no se dispone de métodos suficientemente confiables o consensuados para caracterizar dichas propiedades de manera práctica y precisa.

El otro componente significativo respecto a la demanda de agua del hormigón es el cemento y, al menos, deberían ser considerados dos aspectos relacionados al mismo: su demanda de agua intrínseca y su contenido relativo en la mezcla.

En lo que hace a la demanda de agua intrínseca Day (Day, 2006) considera que el agua de consistencia normal del cemento debería ser un parámetro a medir y tener en cuenta para controlar la demanda de agua del hormigón. Sin embargo la experiencia de los mismos autores indica que no hay buena correlación entre ambos parámetros. Por esa misma razón, casi ningún modelo tiene en cuenta la demanda de agua del cemento, posiblemente porque lo que se esté midiendo en un caso y en otro sean propiedades no vinculadas. En sentido contrario, se han informado resultados de estudios locales (López et al., 2012) que han aportado una buena correspondencia entre la fluidez de morteros y la demanda de agua de hormigones que sólo tienen en común el cemento utilizado. Por tal motivo, tampoco debería descartarse la posibilidad de valorar la demanda de agua del cemento sobre mortero para inferir su impacto en el hormigón. En lo que hace al efecto del contenido relativo de cemento en la mezcla, se sabe que, en general, el requerimiento de agua de un hormigón es mínimo para un determinado contenido de cemento, y si bien dentro de un rango amplio de entre 240 y 360 kg/m<sup>3</sup> el cambio en el contenido de cemento afecta poco a la demanda de agua (Fig. 2), cuando nos alejamos de este entorno los cambios pueden ser muy significativos (Popovics, 1980). Por la misma razón, para altos contenidos de cemento la influencia de las propiedades de los

agregados sobre la demanda de agua del hormigón se hace menos influyente; se podría decir que al aumentar el contenido de cemento pierden influencia las características de los agregados.

Otro aspecto a considerar en la determinación de la demanda de agua es que la misma disminuye en la medida que aumenta el aire incorporado en el hormigón. Aún sin utilizar aditivos para incorporar intencionalmente aire, las mezclas de hormigón ocuyen cantidades de aire de entre 1 y 4% en volumen, magnitud que es influida por los aditivos utilizados en la molienda del cemento, por el contenido, finura y naturaleza de las partículas más pequeñas del hormigón, por las características del mezclado, y por la temperatura de los materiales componentes entre otras variables significativas.

En definitiva, estas variables que afectan la demanda de agua del hormigón presentan un amplio campo de estudio, aún sin una respuesta contundente.

### ***Algunas formas de cálculo de la demanda de agua del hormigón***

Hay una gran cantidad de fórmulas y ábacos presentados por diferentes autores que permiten calcular el contenido unitario de agua en el hormigón para lograr una consistencia dada, también llamado “requerimiento de agua”.

Un método que fuera publicado en el año 1982 por el Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA) y muy utilizado en las décadas de 1980 y 1990 en Argentina, fue el del Ing. García Balado (García Balado, 1982), que si bien ya está en desuso, incluye conceptos que es interesante rescatar. El método se basa en una serie de premisas, dentro de las que se destacan las siguientes:

- La trabajabilidad y la consistencia de un hormigón elaborado con un agregado dado se mantendrán aproximadamente constantes si el contenido unitario de agua y el volumen de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón se mantienen constantes.
- Las mezclas elaboradas con diferentes agregados gruesos del mismo tamaño máximo tendrán similar trabajabilidad cuando tengan igual volumen compactado de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón.
- Para diferentes agregados gruesos del mismo tamaño máximo y un determinado agregado fino, los contenidos de agua serán función de la consistencia y el volumen absoluto (sólido) de agregado grueso

En el método, el contenido de agua se determina a partir de un ábaco en función del volumen sólido del agregado grueso por  $m^3$  de hormigón y del módulo de finura de la arena. A su vez, el volumen sólido de agregado grueso es función de su tamaño máximo, del módulo de finura de la arena y del peso por unidad de volumen del agregado.

De alguna manera el método tiene en cuenta la granulometría, forma y textura del agregado grueso a través del peso por unidad de volumen del agregado y los resultados llevan a que, cuanto menor es el peso por unidad de volumen del agregado grueso menor será la cantidad recomendada de éste en el hormigón. Esto se relaciona con el hecho de que para un agregado dado el peso por unidad de volumen disminuirá según empeore la forma de las partículas o su textura se vuelva más áspera. Otro aspecto de interés es que tiene en cuenta el tamaño máximo del agregado, parámetro que no es frecuentemente utilizado en la determinación del contenido de agua. Sin embargo, de las características de la arena, sólo se tiene en cuenta su módulo de finura

Otro método de dosificación es el propuesto por el ACI (American Concrete Institute) (ACI 211.1-91, 2002), que tiene similitud con el método indicado anteriormente (García Balado, 1982). El ACI indica que la cantidad de agua requerida por unidad de volumen de hormigón para lograr un determinado asentamiento es función del tamaño máximo nominal del agregado, de la forma de las partículas y la distribución granulométrica de los agregados. Pero también de la temperatura del hormigón, la cantidad de aire incorporado y el uso de aditivos químicos. Este método propone una tabla para estimar la demanda de agua en función del asentamiento requerido y del tamaño máximo del agregado, con la particularidad de que distingue hormigones con y sin aire incorporado.

El tamaño máximo del agregado y módulo de finura de la arena determinan el volumen de agregado grueso, en la condición compactada y seca, por unidad de volumen del hormigón. Al igual que en el método anterior (García Balado, 1982) las diferencias en la cantidad de mortero requeridas para lograr adecuada trabajabilidad con diferentes agregados, debido a diferencias en la forma de las partículas y su distribución granulométrica se compensan automáticamente por las diferencias en el peso unitario compactado del agregado o, dicho de otra manera, en el contenido de vacíos del agregado seco y compactado.

Nuevamente, en este método, del agregado fino sólo se tiene en cuenta su módulo de finura.

Un método bastante difundido en Argentina para calcular la demanda de agua en el hormigón es el propuesto por el Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA, 2015), en el cual el contenido de agua se estima considerando solamente el módulo de finura de la mezcla de agregados y, naturalmente, la consistencia (asentamiento) buscada, utilizando el ábaco de la Fig.1. Por el contrario, este método no toma en cuenta los aspectos relacionados al cemento y su contenido relativo, ni a la forma y textura de los agregados. Respecto a esto último sólo refiere a que cuando se utilizan agregados triturados los contenidos de agua deberán aumentarse entre un 5 y un 10%.

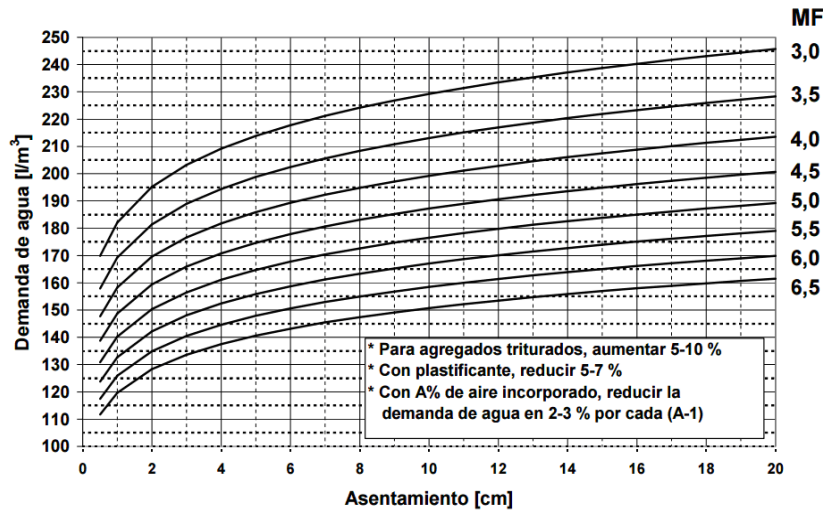


Fig. 1. Abaco para la determinación de la demanda de agua del hormigón propuesto por el ICPA (ICPA, 2015).

Finalmente, una extensa revisión del estado del arte efectuada por Popovics (Popovics, 1980) reunió numerosas expresiones propuestas por distintos autores para estimar el requerimiento de agua en función de la composición del hormigón fresco. Ninguna de ellas contempla todas las variables antes mencionadas, por el contrario, solamente refieren a aquellas variables que los autores han considerado de primer orden. Finalmente el autor propone una ecuación propia “ec. (1)” como la que mejor representa los efectos individuales de los agregados y el cemento:

$$A = C^x \left\{ 0.1 + \frac{0.032 \times (2^{mf} - 60)^2 + 6570}{C - 100} \right\} \quad (1)$$

Donde:

A: demanda de agua para un asentamiento de 10 cm en lb/y<sup>3</sup>,

C: contenido unitario de cemento en lb/y<sup>3</sup>

mf: módulo de finura de la mezcla de agregados

Se debe considerar en el uso de esta ecuación que el contenido de cemento debe expresarse en libras / yarda<sup>3</sup> y por lo tanto el contenido de agua calculado será en las mismas unidades.

Si se representan gráficamente las demandas de agua para diferentes contenidos de cemento y para diferentes módulos de finura, que se presentan en las Figs. 2 y 3, se observan algunas de las fortalezas de la ecuación, indicadas por el autor:

- Existe un requerimiento de agua mínimo para cierto contenido de cemento.
- Existe un requerimiento de agua mínimo para un módulo de finura óptimo.
- Considera los efectos de las desviaciones en las granulometrías.

Las fortalezas de esta ecuación confluyen a una clara representación de las tendencias observadas en el comportamiento real de los hormigones. Aun así, debe resaltarse que ni los impactos de primer orden derivados de la demanda de agua intrínseca del cemento ni la forma

y textura de los agregados quedaron dentro del campo de consideración del autor.

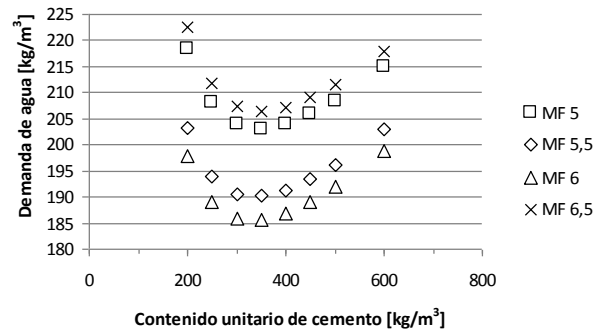


Fig. 2. Contenido unitario de agua del hormigón para lograr un asentamiento en cono de Abrams de 10 cm, en función del contenido unitario de cemento, para diferentes módulos de finura de la mezcla de agregados (Popovics, 1980).

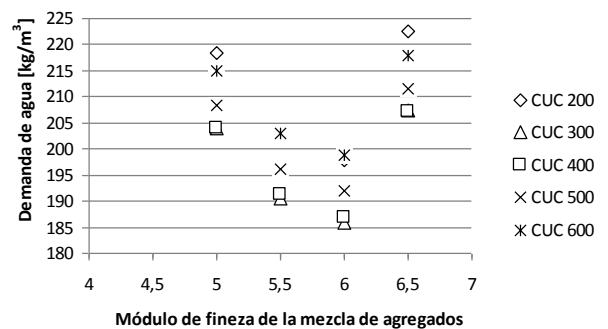


Fig. 3. Contenido unitario de agua del hormigón para lograr un asentamiento en cono de Abrams de 10 cm, en función del módulo de finura de la mezcla de agregados, para diferentes contenidos unitarios de cemento. (Popovics, 1980).

Debe notarse que todas las fórmulas de los distintos autores, e incluso la del ICPA, han sido inicialmente planteadas para una consistencia determinada medida con el cono de Abrams y luego generalizadas a todo el ámbito de validez del mismo aplicando la ley potencial que se presenta en la “ec. (2)”, o su versión logarítmica:

$$\left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 = \left(\frac{As_1}{As_2}\right) \tag{2}$$

Donde:

$W_i$ : demanda de agua en el hormigón para lograr el asentamiento  $As_i$ .

$As_i$ : asentamiento medido en el cono de Abrams.

**Forma y textura superficial de los agregados como variable en el cálculo de la demanda de agua**

Los principales atributos de una partícula de agregado son la forma y la textura superficial (Cabrera, 2013), sin embargo las normas que especifican las características que deben tener los agregados finos para uso en hormigón (IRAM 1512, 2013) (ASTM C33, 1999) no ponen limitaciones a estos parámetros. Para el caso de los agregados gruesos, algunas normas limitan el contenido de partículas con formas lajosas (aplanadas) (IRAM 1531, 2012).

En el capítulo 3 del trabajo de tesis doctoral del Ing. O. Cabrera (Cabrera, 2013) se hace un vasto análisis de la forma, angulosidad y texturas de las partículas de los agregados, que si bien excede el propósito de este trabajo, presenta algunos aspectos que se detallan a continuación.

Las experiencias del autor utilizando arena natural de partículas redondeadas de superficie lisa y arena granítica de trituración de partículas angulares y textura cristalina, ambas de similares granulometrías, muestran la influencia de estas características sobre el porcentaje de vacíos calculado a partir de la determinación de la densidad real del agregado y la densidad aparente, suelta y compactada, de los mismos. En las Figs. 4 y 5 se aprecia la sensibilidad del contenido de vacíos de la arena con los cambios graduales de forma y textura de las partículas y la fluidez del mortero.

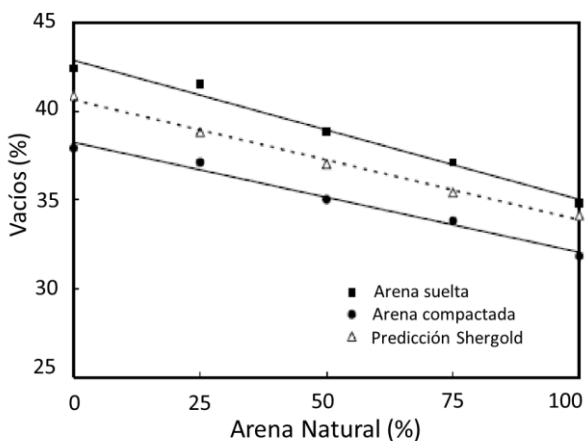


Fig. 4. Contenido de vacíos de mezclas de arenas natural silíceas y triturada granítica. (Cabrera, 2013).

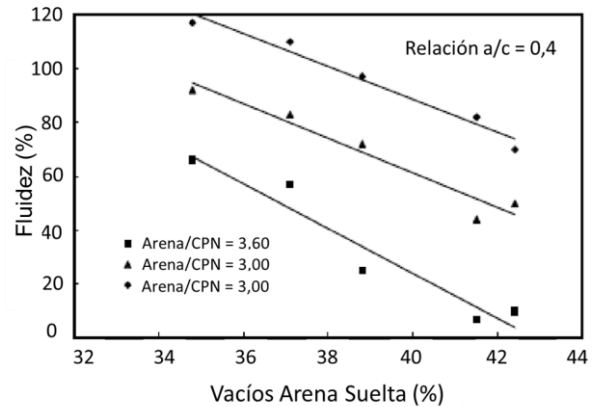


Fig. 5. Relación entre la fluidez de morteros con diferentes proporciones agregado / cemento y el contenido de vacíos de la mezcla de arena suelta (Cabrera, 2013).

Cabrera (Cabrera, 2013) concluye que son la forma y textura de las partículas las que influyen en la fluidez de las mezclas realizadas con un contenido de agua constante, de lo que se infiere que las características de las partículas de los agregados influirán en la demanda de agua necesaria para lograr una fluidez determinada.

El contenido de vacíos del agregado fino resulta sensible a los cambios de forma y textura superficial de las partículas y se vincula directamente con el comportamiento de los morteros en estado fresco. Además es un método sencillo de realizar y económico en tiempo y equipamiento

En Estados Unidos se ha elaborado un mapa con la distribución geográfica de agregados finos de acuerdo a la forma y textura de las partículas, basado en el porcentaje de vacíos:

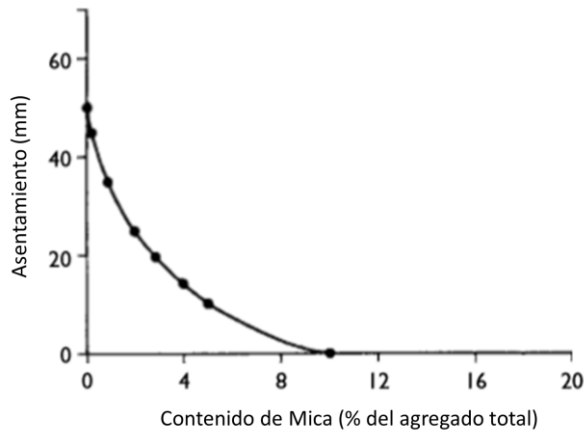
- Redondeada < 30%
- Media: 31 – 33 %
- Angular: >35%

Además, se indica que diferencias de 1% en el porcentaje de vacíos de la arena se corresponden con 2 a 5 kg/m<sup>3</sup> de variación en el requerimiento de agua para lograr la misma consistencia (Cabrera, 2013).

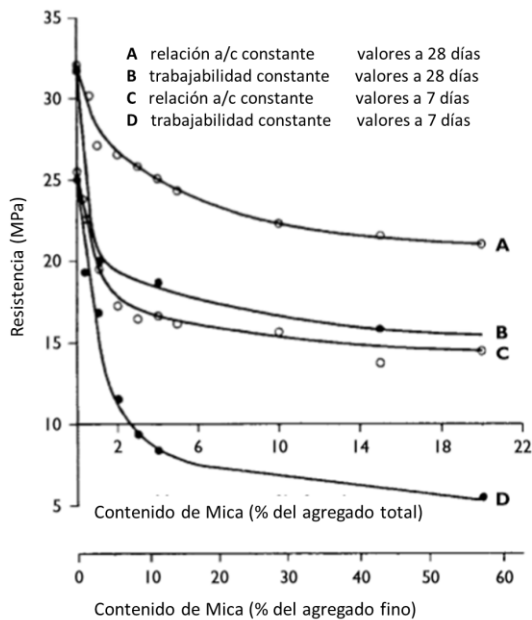
**Contenido y tipo de partículas finas contenidas en los agregados**

Otro aspecto a identificar para los agregados locales es el impacto de sus fracciones más finas, dado que las mismas incrementan la demanda de agua, básicamente debido a su mayor superficie específica, efecto que es particularmente más sensible en la medida que el tamaño de las partículas se aleja por debajo de los 300 μm. Además, estas fracciones pueden estar constituidas por varios tipos de materiales. En el caso de las arenas naturales, serán principalmente arena fina, limos y arcilla, mientras que en el caso de las arenas trituradas será predominantemente polvo de roca. Otro componente particularmente problemático de las arenas naturales es la mica, la cual es un constituyente común de las arenas de

la provincia de Córdoba. En las Figs. 6 y 7 se presentan resultados de Alexander y Mindess, quienes determinaron que la mica aumenta la demanda de agua, reduce la trabajabilidad y la resistencia del hormigón (Alexander y Mindess, 2005).



**Fig. 6.** Efecto del contenido de mica en el agregado sobre el asentamiento logrado en hormigón (Alexander y Mindess, 2005).



**Fig. 7.** Efecto del contenido de mica del agregado total y del agregado fino sobre la resistencia a 7 y 28 días del hormigón a consistencia constante y a relación agua / cemento constante. (Alexander y Mindess, 2005).

Cuando los finos de las arenas contienen arcillas del tipo de las montmorillonitas, illitas y atapulgitas, pueden llegar a desencadenarse efectos sensibles de adsorción que impactan no sólo en la demanda de agua del hormigón sino también en su estabilidad dimensional e incluso en el tiempo de fraguado. Este tipo de finos puede ser identificado petrográficamente o por sus efectos físicos sensibles en ensayos como el de azul de metileno (Norma IRAM 1594 1994). Otras arcillas menos nocivas pueden ser permitidas hasta cierto punto y sus efectos juzgados básicamente por su influencia sobre la demanda de agua del hormigón.

## PLAN EXPERIMENTAL Y RESULTADOS

Como parte del proyecto “Modelación de parámetros para la dosificación y optimización de hormigones con materiales locales”, el plan experimental que se está llevando a cabo se motiva en lo expresado en los puntos anteriores, es decir, en la necesidad de incorporar nuevas variables que ayuden a ajustar mejor los contenidos de agua en los hormigones al diseñar los mismos, como así también a tener herramientas para ajustarlos en el día a día y optimizarlos de manera eficiente cuando nuevos materiales se presentan para su uso.

En el caso particular de Córdoba, la mayoría de las arenas son de origen aluvial, provenientes de la desintegración de las rocas de las sierras situadas al oeste de la provincia y como es natural sus depósitos se encuentran ubicados a lo largo de los principales ríos de la provincia. El mapa de la Fig.8, resulta interesante para conocer la ubicación de los principales yacimientos en la provincia.

Basado en lo anterior, el trabajo propone la caracterización de la forma y textura de las arenas de diferentes alturas de las principales cuencas aluvionales de la provincia, como así también el estudio de algunas arenas provenientes de la trituración de rocas, que si bien su uso local en hormigones es menos frecuente, posiblemente se incremente en los próximos años por restricciones a la explotación de bancos de arenas naturales. Se procurará correlacionar estas características con las variaciones en el requerimiento de agua en morteros, primero, y luego en hormigones, para incorporarlas a alguno de los modelos existentes de determinación contenido unitario de agua para una consistencia dada.

Considerando los antecedentes recopilados de otros autores (Cabrera, 2013) (Alexander y Mindess, 2005), se decidió analizar estas características a partir de la medición del porcentaje de vacíos de la arena suelta, lo que se complementará con un análisis petrográfico de las mismas.

Hay diversas metodologías utilizadas para determinar el porcentaje de vacíos, pero se adoptó una reconocida y utilizada que es la que propone la norma ASTM C 1252.

Esta norma presenta 3 variantes:

- A. Utiliza una granulometría artificial de la arena, “armada” de acuerdo a los porcentajes de la Tabla 1.
- B. Utiliza las mismas fracciones del método A, pero las analiza en forma separada.
- C. Utiliza la arena con su granulometría natural.

**TABLA 1.** Porcentajes de las diferentes fracciones de la arena. Adaptado de ASTM C 1252.

Fracción	Porcentaje individual %
#8 - #16 (2,36 a 1,18 mm)	23,2
#16 - #30 (1,18 a 0,60 mm)	30,0
#30 - #50 (0,60 a 0,30 mm)	37,9

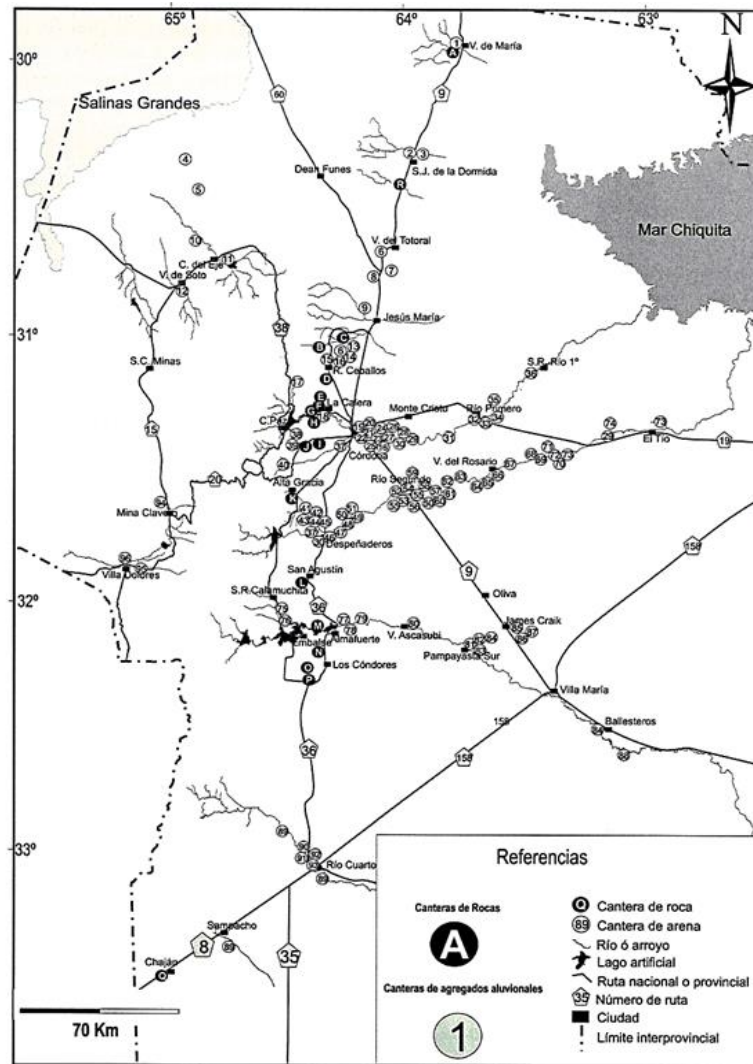


Fig. 8. Ubicación de las canteras de rocas y agregados aluviales en la Provincia de Córdoba (Bonalumi et al., 2011).

En el caso del trabajo que se está realizando, se utiliza en primer lugar el método A para caracterizar la forma y textura de las partículas de la arena, a partir de la medición del porcentaje de vacíos que dejan los granos de ésta cuando se la deja escurrir libremente hasta llenar un recipiente de dimensiones conocidas. El uso de una granulometría “armada” elimina la influencia de la distribución granulométrica particular de cada material y permite evaluar su forma y textura. Con estas muestras se analiza la demanda de agua en morteros y luego se evaluará la demanda de agua en hormigones elaborados con diferentes arenas, pero, por razones prácticas, con la granulometría natural de las mismas.

En la etapa actual del proyecto se han muestreado arenas de diferentes canteras y se han determinado propiedades de interés como son: densidad y absorción, granulometría y contenido de finos menores a 75 micras, peso por unidad de volumen en condición seca y suelta con su granulometría natural y con la indicada en la Tabla 1. Las principales características de las arenas se detallan en la Tabla 2. El porcentaje de vacíos de las arenas del río Suquía es muy similar y cercano al 44%. La arena de la cantera 3 (arena de trituración), como era esperable, es la que presenta el mayor porcentaje de

vacíos y entre las anteriores arenas se encuentra la de la cantera 5 con porcentaje de vacíos medio.

Las evaluaciones mencionadas también se harán con la arena con granulometría natural, con el método C de la norma ASTM C 1252

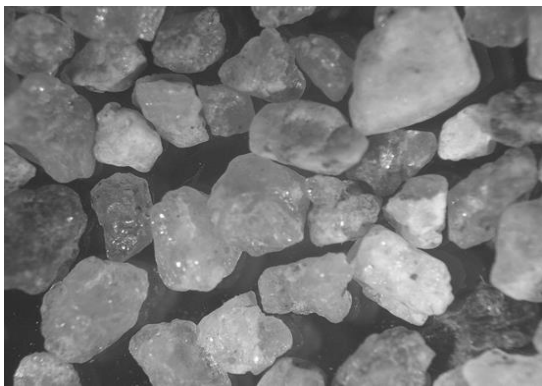
TABLA 2. Principales características de las arenas analizadas.

Cantera	1	2	3	4	5
Origen	Río Suquía	Río Suquía	Malagueño	Río Suquía	Río Xanaes
Tipo de arena	Depósito aluvial	Depósito aluvial	De trituración	Depósito aluvial	Depósito aluvial
Densidad relativa s.s.s.	2,666	2,646	2,785	2,644	2,614
Absorción [%]	0,46	0,72	0,97	1,59	0,50
Módulo de fineza	3,04	3,15	3,29	3,26	3,48
Vacíos [%]*	44,6	44,2	51,1	44,1	45,9
Relación a/c para un extendido de 210mm*	0,598	0,616	0,779	0,623	0,689

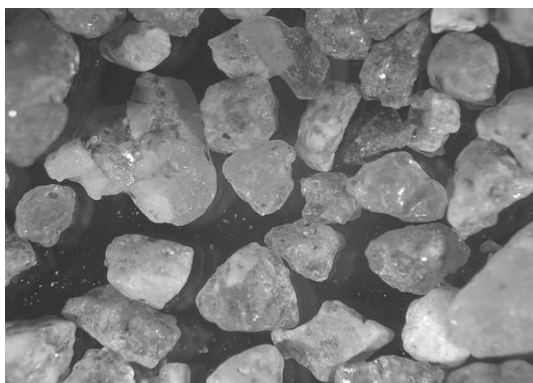
\*valores determinados sobre granulometría “armada” según Tabla 1

En las Figs. 9 a 13 se muestran imágenes del aspecto superficial del material, realizado mediante la observación sobre granos sueltos con una lupa estereomicroscópica sobre la fracción retenida en tamiz N°16 (1,18 mm). La arena de trituración de la cantera 3 (Fig. 11) presenta una textura superficial áspera por tratarse de una roca triturada sin proceso alguno de abrasión superficial; sus granos son de bordes angulosos y su forma tiende a cúbica. La arena de la cantera 5 (Fig. 13), si bien presenta formas subredondeadas, a pesar de haber sido lavada, tiene en superficie gran cantidad de polvo adherido, lo que puede haber contribuido a darle una aparente aspereza superficial traducida en un alto porcentaje de vacíos y alta demanda de agua. Las arenas del río Suquía, canteras 1,2 y 4, (Fig. 9, 10 y 12), presentan apariencia muy similar entre sí, siendo la de la cantera 4, la que tiene mayores irregularidades superficiales.

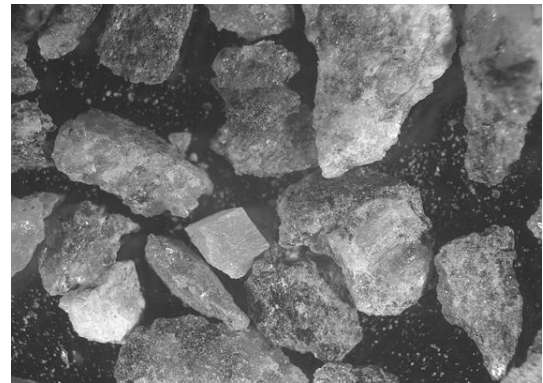
En la continuidad de este trabajo se realizará una petrografía más detallada, describiendo los minerales presentes en las diferentes canteras.



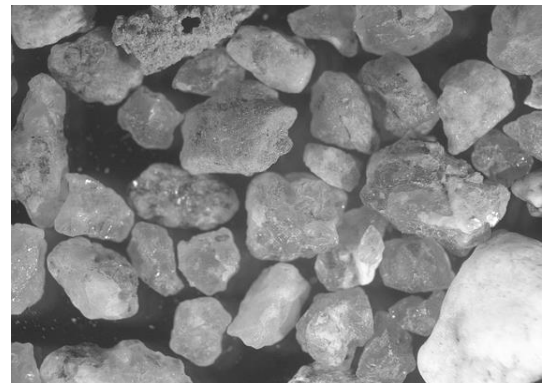
**Fig. 9.** Arena de la Cantera 1.



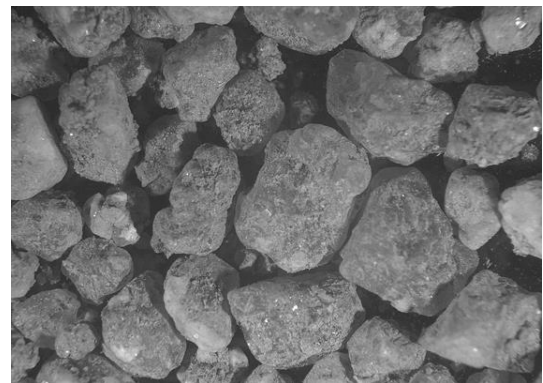
**Fig. 10.** Arena de la Cantera 2.



**Fig. 11.** Arena de la Cantera 3.



**Fig. 12.** Arena de la Cantera 4.



**Fig. 13.** Arena de la Cantera 5.

Con el objetivo de definir una relación a/c única para los morteros que permita evaluar las diferencias en la demanda de agua debido a las diferentes arenas empleadas con la granulometría de la Tabla 1, se elaboraron morteros con diferentes relaciones agua/cemento; para cada arena se realizaron por lo menos tres determinaciones de fluidez. Los morteros utilizados tienen las siguientes proporciones: arena: 1350 g y cemento: 450 g, con cantidades de agua variables y mezclados siguiendo la metodología indicada en la norma IRAM 1622. La fluidez del mortero se determinó de acuerdo a la norma IRAM 1654 midiendo el extendido (flow).



En la Fig. 14 se presentan los resultados de las mediciones de las cinco arenas analizadas; a la izquierda se ubican las arenas del Río Suquía con un comportamiento similar, que tienen la menor demanda de agua. Estas arenas corresponden a depósitos aluviales del río Suquía cercanos a la ciudad de Córdoba. A la derecha, con relaciones a/c mayores, la del Río Xanaes con demanda de agua intermedia y luego, la arena de trituración.

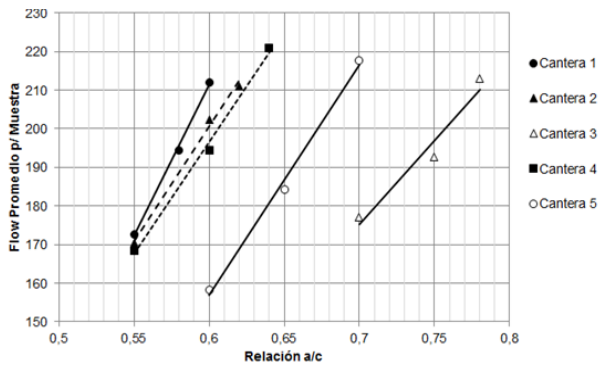


Fig. 14. Relación fluidez – relación a/c para diferente arenas.

A partir de estas determinaciones se caracterizó cada arena por la relación agua/cemento necesaria para alcanzar un extendido (flow) de 210 mm, fijado arbitrariamente como la fluidez objetivo. En la Fig. 15. se presenta la relación agua/cemento en función del porcentaje de vacíos de las arenas.

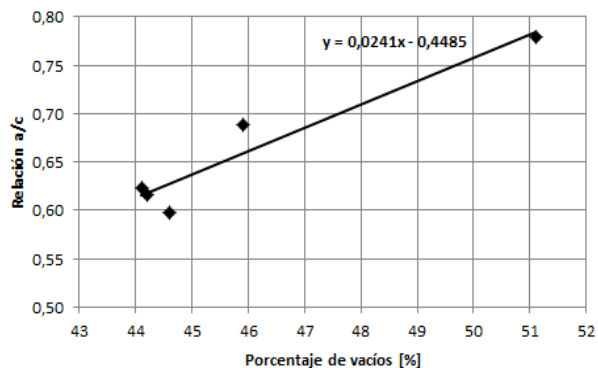


Fig. 15. Relación porcentaje de vacíos de la arena con la relación a/c requerida para lograr una fluidez (extendido) de 210 mm.

A partir de estas determinaciones se pretende encontrar un parámetro de corrección de la demanda de agua del hormigón, calculada a partir de cualquiera de las metodologías existentes, que sea función de la forma y textura de la arena. De igual manera esto podría utilizarse para modificar el requerimiento de agua de un hormigón dado al cambiar el agregado fino.

**CONSIDERACIONES FINALES Y TRABAJOS FUTUROS**

El programa experimental está en plena etapa de desarrollo por lo que los resultados presentados son parciales; aun así, en los mismos ya se esbozan algunas relaciones causa-efecto entre la forma y textura de las

arenas, valorada por el contenido de vacíos y la demanda de agua de los morteros.

Se considera simple y adecuada la metodología empleada por la norma ASTM C 1252 para caracterizar la forma y textura de las partículas de la arena, permitiendo en forma rápida obtener datos útiles para la selección de materiales. Es importante destacar que el uso de una granulometría “armada”, propuesta por la norma, permite eliminar la influencia de la distribución granulométrica particular de cada material y evaluar su forma y textura de una manera práctica y sencilla.

La procedencia de las arenas, aun siendo de origen aluvial, tiene impacto en su forma y textura, y estas características influyen en el porcentaje de vacíos.

En Estados Unidos se ha elaborado un mapa con la distribución geográfica de agregados finos de acuerdo a la forma y textura de las partículas, basado en el porcentaje de vacíos:

- Redondeada < 30%
- Media: 31 – 33 %
- Angular: >35%

Además, se indica que diferencias de 1% en el porcentaje de vacíos de la arena se corresponden con 2 a 5 kg/m3 de variación en el requerimiento de agua para lograr la misma consistencia (Cabrera, 2013).

Los resultados obtenidos han aportado una buena correspondencia entre la fluidez y la demanda de agua de morteros, por lo que se podría considerar la posibilidad de valorar la demanda de agua en el mortero para inferir su impacto en el hormigón, coincidiendo con Cabrera; este investigador concluye que son la forma y textura de las partículas las que influyen en la fluidez de las mezclas realizadas con un contenido de agua constante, de lo que se infiere que las características de las partículas de los agregados influirán en la demanda de agua necesaria para lograr una fluidez determinada.

Es importante destacar que este concepto podría ser incorporado en aquellos ábacos para calcular la demanda de agua, como el propuesto por el ICPA que sólo considera el módulo de finura del agregado fino o en el del método del Ing. García Balado que determina el contenido de agua sólo en función del volumen sólido del agregado grueso por m3 de hormigón y del módulo de finura de la arena.

En trabajos futuros, está previsto el análisis de nuevas canteras de arenas en otras ubicaciones, distantes de las analizadas, a fin de tener una evaluación más completa de este material en la provincia de Córdoba. El proyecto también contempla la caracterización de las arenas incluyendo la determinación de partículas menores a 75 micras en cuanto a cantidad y tipo, para hacer nuevos ajustes en la demanda de agua calculada o en uso, al cambiar estos parámetros.

Se considera que esta información puede ser de utilidad no sólo en el avance del conocimiento de los materiales locales y de sus formas de evaluación, sino también para la industria de la construcción que frecuentemente y por diversos motivos, se encuentra ante

la situación de evaluar nuevos materiales y de optimizar su uso.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Secyt de la UNC por el subsidio otorgado para el Proyecto, a la Secretaría de Investigación y Posgrado, Área Ingeniería de la FCEFyN por el apoyo brindado, al Departamento Estructuras de la FCEFyN por el uso de la infraestructura del mismo, a Holcim (Argentina) S.A. por facilitar los materiales y por el uso de equipamientos de su Centro Tecnológico y a los alumnos Juan Pignata y Bruno Lancioni por su colaboración en las tareas de laboratorio.

## REFERENCIAS

- [1] ACI 211.1-91, (2002) “*Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight and Mass Concrete*”, ACI Manual of Concrete Practice
- [2] Alexander M, Mindess S, (2005) “*Aggregates in Concrete*”, Taylor & Francis.
- [3] Bonalumi A, Sfragulla J, Locatti F, Pokllepovic F, (2011), “*Publicación Especial - Agregados Pétreos de las Provincias de Buenos Aires y Córdoba*”, Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería.
- [4] Cabrera, O. (2013) “*Caracterización de la durabilidad de hormigones con arenas de trituración*”, Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- [5] Day K W, (2006), “*Concrete Mix Design, Quality Control and Specification*”, Taylor & Francis, Londres.
- [6] García Balado J, (1982), “*Método para la Dosificación de Hormigones*”, Instituto del Cemento Portland Argentino (ICPA).
- [7] ICPA, “*Diseño Racional de Mezclas de Hormigón - Método de dosificación del ICPA*”, <http://www.icpa.org.ar/publico/files/DOSIFICACION%20DE%20HORMIGONES.pdf>
- [8] López R, Clariá M, Barberi D, González M, (2012) “*Propiedades mecánicas y durables de cementos con moderado C3A y escoria de alto horno*”, V congreso internacional y 19ª Reunión Técnica, AATH, Bahía Blanca, Argentina.
- [9] Norma ASTM C 1252-06, *Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*.
- [10] Norma ASTM C33 - (1999) *Standard Specification for Concrete Aggregates F. de Larrard*, “*Concrete Mixture Proportioning*.”
- [11] Norma IRAM 1512 (2013), *Agregado fino para hormigón de cemento – Requisitos*.
- [12] Norma RAM 1531 (2012), *Agregado grueso para hormigón de cemento – Requisitos*.
- [13] Norma IRAM 1594 (1994), *Agregados. Determinación de arcilla. Método del azul de metileno*.
- [14] Norma IRAM 1622 (1995), *Cemento pórtland. Determinación de resistencias mecánicas*.
- [15] Norma IRAM 1654 (1968), *Puzolanas. Métodos de ensayo generales*.
- [16] Popovics S., (1980), “*Calculation of the water requirement of mortar and concrete. A state-of-the-art report, Materials and Structures*”, vol. 13, No 5, pp. 343-352.