

Incidencia del tipo de probeta y la superficie de ensayo en la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido

L. E. Carrizo¹ ¹ Laboratorio de Entrenamiento Multidisciplinario para la Investigación
C. Sakurai¹ Tecnológica (LEMIT-CICPBA). Calle 52 e/121 y 122, (1900) La Plata,
A. Pittori¹ Argentina. www.lemmit.gov.ar

Y. A. Villagrán Zaccardi^{1,2}

C. J. Zega^{1,2} ² CONICET, Argentina.

Resumen

La profundidad de penetración de agua a presión es uno de los parámetros especificados en el Reglamento CIRSOC 201:2005 para hormigones destinados a estructuras para contención o transporte de agua, estableciéndose valores límites para la penetración media y la penetración máxima. El cumplimiento de esta condición permite asegurar condiciones de servicio aceptables del hormigón. El Reglamento requiere que el procedimiento de ensayo sea realizado de acuerdo a la norma IRAM 1554. Esta norma admite variables en cuanto a la forma y el tamaño de las probetas a utilizar. En este trabajo se evalúan el efecto de estas variables en los resultados experimentales obtenidos. Se analizan resultados de probetas cúbicas y cilíndricas elaboradas con los mismos hormigones, así como tres diferentes terminaciones superficiales para la superficie de ensayo. El estudio comprende hormigones de tipo convencional con relaciones a/c de 0,35, 0,45 y 0,55.

Palabras Clave: penetración de agua a presión, hormigón, permeabilidad, IRAM 1554.

Abstract

The depth of water penetration under pressure is one of the parameters specified by the CIRSOC 201:2005 Regulation for concrete for structures aimed to contain or transport water. Average and maximum limit values are indicated. Compliance with this condition ensures acceptable performance under service of concrete. The Regulation requires that this procedure is made in accordance with IRAM 1554 standard. It offers variations in terms of shape and size of the specimens to test. In this paper, the effects of these variables on the obtained results are evaluated. Results from cubic and cylindrical specimens made with the same concrete, as well as from three different testing surfaces condition, are analysed. This study involves conventional concrete with w/c ratios of 0.35, 0.45 and 0.55.

Keywords: water penetration under pressure, concrete, permeability, IRAM 1554.

Introducción

El ingreso y redistribución del agua en la matriz porosa del hormigón se producen por medio de distintos mecanismos de transporte como son la permeabilidad, la difusión y la succión capilar. Permeabilidad es el proceso por el cual un fluido se transporta en los sistemas de poros y fisuras del hormigón debido a un gradiente de presión. La resistencia a este flujo es creada por la viscosidad del fluido, la fricción en las paredes de los poros y fisuras y el tamaño y tortuosidad de los poros y fisuras [1]. El ingreso de agua favorece también el ingreso de sustancias en solución, que puede afectar adversamente la durabilidad del hormigón.

La baja permeabilidad es también importante en algunas estructuras por cuestiones de servicio, en relación a lo hermético de aquellas que retienen líquidos [2]. Por esta razón el Reglamento CIRSOC 201:2005 define distintos ambientes de exposición en función del tipo y severidad de la agresión [3]. Así, por ejemplo, establece que los hormigones que estarán en contacto con ambientes que presenten algún tipo de agresión, por mínima que esta sea, deben satisfacer con determinados valores límites en el ensayo de succión capilar.

Para el caso de hormigones destinados a estructuras que van a contener o transportar agua, dicho reglamento especifica que debe realizarse el ensayo de penetración de agua a presión de acuerdo a la norma IRAM 1554:1983, estableciendo el cumplimiento de determinados límites máximos. Además del procedimiento de ensayo, dicha norma fija dimensiones mínimas para las probetas a utilizar, aunque ofrece opciones en cuanto a la forma y dimensiones máximas de las mismas, fundamentalmente en cuanto a su altura. Este último hecho cobra relevancia si se toma en consideración que la cara de moldeo es la que estará expuesta al agua a presión. De este modo, al variar la altura de la probeta, la calidad de la cara de moldeo resultará afectada por la exudación del hormigón, pudiendo ocasionar diferencias en el desempeño final de los hormigones. Experiencias previas de los autores sugieren que pueden existir diferencias en cuanto al tipo de probeta, aunque ello no ha sido documentado. A partir de esto, surge el interés por comparar los resultados para los diferentes casos.

En tal sentido, en la bibliografía pueden encontrarse diferencias considerables en los resultados de penetración de agua informados. Mattio et al. [4], al evaluar la penetración de agua sobre probetas cilíndricas de 15cm de diámetro y 15cm de altura, no encontraron diferencias significativas al variar la relación a/c del hormigón entre 0,40 y 0,70 (se registró una penetración media inferior a 20mm en todos los casos). Estos resultados fueron atribuidos a errores en la medición debidos al hecho de que las probetas se encontraban saturadas al momento del ensayo. Aun así, la norma IRAM 1554 no establece un procedimiento estándar de precondicionamiento por secado.

Cabe señalar que la cara de ensayo fue generada por aserrado a partir de una probeta cilíndrica de 30cm de altura. En otro trabajo realizado por Taus [5], también sobre probetas cilíndricas de 15x15cm se obtuvieron 24, 38 y 48mm de penetración media para relaciones a/c 0,40, 0,50 y 0,60 respectivamente. Ferreyra et al. [6], en un trabajo previo a los anteriores, informan valores para probetas de 15cm de diámetro y 12cm de altura de 62 y 120mm (altura total de la muestra) de penetración media realizadas con hormigón convencional con 0,40 y 0,60 de relación a/c respectivamente.

En cuanto a antecedentes de ensayos realizados sobre probetas prismáticas, pueden mencionarse los trabajos realizados por Zega et al [7-8], quienes midieron penetraciones medias de 12, 24 y 28mm en prismas de 20cm de lado y 15cm de altura con relación a/c 0,45, 0,50 y 0,65 respectivamente. No se ha encontrado en la literatura referencias sobre la comparación de resultados entre probetas cilíndricas y probetas cúbicas. Los resultados de penetración media informados por los autores mencionados se presentan en la Figura 1.

A partir de la disparidad de resultados hallados en los antecedentes mencionados, y considerando que el ensayo de penetración de agua a presión está especificado en el CIRSOC 201:2005 para hormigones con requerimientos de impermeabilidad, surge la necesidad de estudiar la influencia que la forma de las probetas y la terminación de la superficie de ensayo ejercen sobre los resultados de dicho ensayo.

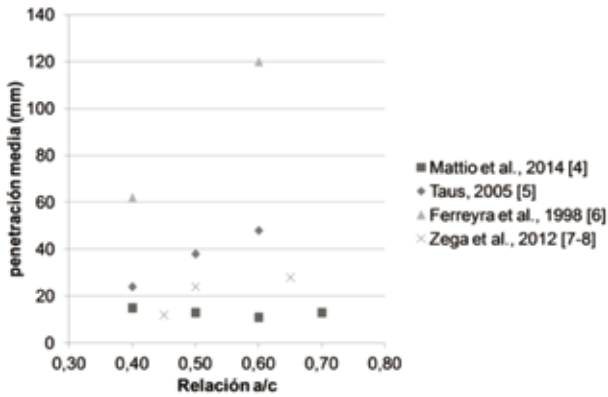


Figura 1. Penetración media en función de la relación a/c (adaptado de [4-8]).

Con este fin, se evaluaron probetas cúbicas y cilíndricas con distintas terminaciones superficiales moldeadas con hormigones convencionales de tres relaciones agua/cemento.

Experiencias

Materiales y mezclas: En la elaboración de los hormigones se empleó un cemento portland compuesto (CPC-40), dos arenas silíceas naturales (fina y gruesa) como agregado fino y piedra partida granítica de tamaño nominal 6-20mm como agregado grueso. Algunas propiedades de los agregados utilizados se presentan en la Tabla 1.

Con los materiales antes mencionados se elaboraron hormigones de tres niveles de resistencia a compresión a partir de variar la relación a/c (0,35, 0,45 y 0,55).

Las proporciones de las mezclas elaboradas se presentan en la Tabla 2. De manera complementaria, las propiedades determinadas en el estado fresco junto con la resistencia a compresión a la edad de 28 días y la velocidad de succión capilar se informan en la Tabla 3.

Para los ensayos de penetración de agua a presión, por cada pastón se moldearon 6 probetas cilíndricas de 15cm de diámetro y 30cm de altura y 3 probetas cúbicas de 20cm de lado. Las mismas fueron desmoldadas a las 24 horas y curadas de manera normalizada (T: 23±2°C; HR>95%) durante 28 días.

Propiedad	Arena Fina	Arena Gruesa	Agregado Grueso
Módulo de finura	0,89	2,98	---
Tamaño máximo(mm)	---	---	19
Densidad	2,66	2,65	2,75
Absorción (%)	0,40	0,53	0,20
Pasa tamiz 75µm (%)	0,35	0,59	0,10

Tabla 1: Propiedades de los agregados fino y grueso utilizados.

Materiales (kg/m³)	Hormigones		
	0,35	0,45	0,55
Agua	139	155	168
Cemento	397	345	305
Arena fina	269	269	270
Arena gruesa	626	626	627
Agregado grueso	1000	1000	1000
Superplastificante	2,40	1,85	1,85

Tabla 2: Proporciones de las mezclas elaboradas, propiedades en estado fresco y endurecido.

Propiedad	Hormigones		
	0,35	0,45	0,55
En estado fresco			
Asentamiento (mm)	150	100	110
PUV (kg/m³)	2434	2398	2371
Aire incorporado (%)	3,4	3,9	2,5
En estado endurecido			
Absorción 24h (%)	4,52	5,12	5,67
Resistencia a compresión (MPa)	46,0	33,4	29,2
Velocidad de succión capilar (g/m²/s¹/²)	1,60	3,40	4,30

Tabla 3: Propiedades en estado fresco y endurecido.

Metodología de ensayo: La Norma IRAM 1554 establece que las probetas destinadas a evaluar la penetración de agua a presión deben tener una altura mínima de 15cm, siendo la dimensión mínima de las mismas también de 15cm. Además, establece que el ensayo se debe realizar sobre la cara de moldeado (cara superior), previo

escarificado con cepillo de acero. Considerando dichas condiciones, una vez finalizado el curado se aserraron las probetas cilíndricas a mitad de su altura (haciendo un total de 12 muestras) y se realizaron ensayos sobre tres tipos de superficie. Por un lado, 3 muestras se ensayaron según indica la norma, sobre la cara de moldeo (serie s) aplicándole un escarificado con cepillo de acero para quitar la película impermeable de cemento. Otras 3 se ensayaron también sobre la cara de moldeo, pero con la realización previa de un leve aserrado superficial para eliminar imperfecciones y la película de pasta de cemento (serie a). Las muestras del sector inferior de las probetas (15cm) fueron ensayadas evaluando las superficies de aserrado (serie i).

De esta forma las series a e i se diferencian en la altura de la superficie de ensayo respecto a la base de la probeta, y las series s y a se diferencian en la preparación de la superficie. En los cubos, el ensayo se realizó sobre la cara de moldeo previo escarificado con cepillado de acero, de acuerdo a lo que indica la norma.

Con relación a la superficie de contacto probeta-agua a presión, la norma indica que el área circundante a la zona marcada que recibirá la presión de agua deberá ser sellada y ofrecer una superficie lisa e impermeable, que impida el escape del agua aplicada a presión. Al mismo tiempo, debe disponerse conforme un apoyo apropiado para el asiento del aro de caucho que durante el ensayo circunda la superficie de aplicación de la presión de agua. A tal fin, sobre la cara de ensayo se marcó un círculo concéntrico con el eje de la probeta, de 7,5cm de diámetro en el caso de las cilíndricas y de 10cm en las cúbicas, y se impermeabilizó la superficie restante mediante pintura a base de caucho clorado. A continuación se preparó el equipo de ensayo y se expusieron las probetas a distintos escalones de presión según lo especificado en la norma, cuya secuencia y tiempo de mantenimiento se indican en la Tabla 4.

Al finalizar el período de exposición, se retiraron las probetas del equipo y se partieron por compresión diametral. De esta forma las probetas se fracturaron a través de un plano perpendicular al plano que estuvo sometido a la presión de agua. Finalmente, para medir la penetración se toma como eje de abscisas la arista formada por el

plano de fractura con la cara de la probeta sobre la que actuó la presión de agua. El segmento de abscisa contenido en el círculo sobre el cual se aplicó la presión de agua se divide en un número de partes iguales de 5mm de ancho. Sobre cada división obtenida e incluyendo la de los puntos extremos, se levantan las ordenadas de la línea del contorno del frente de penetración de agua, midiéndose la mismas en milímetros. Se calcula el promedio de las mediciones para cada cara de fractura y ambos valores obtenidos vuelven a promediarse para obtener la penetración media. A su vez, la penetración máxima es el valor más alto de penetración que se haya medido en cualquiera de las dos caras de fractura.

Resultados

Incidencia de la forma de las probetas: En la Figura 2 se presentan los promedios de los resultados de las penetraciones medias obtenidas según norma, correspondientes a las probetas cúbicas y cilíndricas de la serie s, discriminadas de acuerdo a su relación a/c. Se indica también el desvío estándar de cada serie de datos. Para ambos tipos de probetas se puede observar que la profundidad de penetración de agua se incrementa con el aumento de la relación a/c. Éste constituye un hecho esperable por cuanto a mayor relación a/c se incrementa la porosidad del hormigón, haciendo que el agua pueda ingresar a mayor profundidad dentro del mismo.

Sin embargo, se aprecian diferencias significativas en los valores obtenidos según se trate de probetas cilíndricas o cúbicas, para cada relación a/c evaluada. En tal sentido, la penetración media en las probetas cilíndricas es mayor que en las probetas cúbicas en 24, 96 y 70% para las relaciones a/c 0,35, 0,45 y 0,55 respectivamente. Como consecuencia de ello, se observa que los valores de penetración registrados en las probetas cilíndricas son superiores al límite de 30mm especificado en el CIRSOC 201:2005 para la penetración media. En cuanto a las probetas cúbicas, solo aquellas de relación a/c 0,35 estuvieron por debajo de dicho límite, mientras que las de a/c 0,45 lo superan levemente, mostrando un nivel de penetración equivalente al de las cilíndricas de a/c 0,35. También se puede observar una dispersión mayor en general en los resultados obtenidos con las probetas cilíndricas.

Cabe recordar que en el caso de hormigones que estarán expuestos en ambientes agresivos, una relación a/c 0,45 es la máxima permitida por dicho reglamento. Ante esta situación, el tipo de probeta empleada implica una afectación significativa en cuanto al cumplimiento o no de la limitación impuesta, que debiera depender principalmente de la calidad del hormigón. Este hecho no se condice con el objetivo del reglamento de asegurar un desempeño aceptable del hormigón, y limita significativamente la repetitividad del método. Dicho de otro modo, la exigencia para la penetración de agua a presión según IRAM 1554 implica la necesidad de disminuir la relación a/c del hormigón en al menos 0,10 puntos cuando se evalúa en probetas cilíndricas en comparación con probetas cúbicas.

En la Figura 3 se muestran los resultados de las penetraciones máximas correspondientes a las probetas cúbicas y cilíndricas de la serie s, discriminadas de acuerdo a su relación a/c.

Al igual que en la figura anterior, se indica el desvío estándar de cada serie de datos. En este caso la penetración máxima en las probetas cilíndricas también es mayor que en las cúbicas, en 10, 76 y 74% para las relaciones a/c 0,35, 0,45 y 0,55 respectivamente. También puede observarse que en el caso de las probetas cilíndricas, solamente las de relación a/c 0,35 cumplieron con el límite de 50mm impuesto por el CIRSOC 201 para la penetración máxima. En cuanto a las probetas cúbicas, las de relación a/c 0,35 y 0,45 presentaron una penetración máxima que está 16 y 10mm

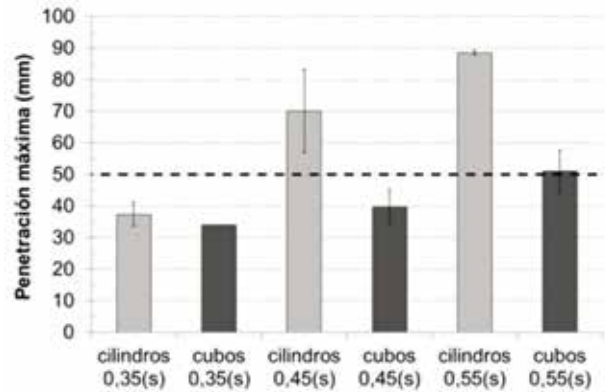


Figura 3. Penetración máxima en función del tipo de probeta y la relación a/c.

por debajo de la restricción del citado reglamento respectivamente, mientras que las de a/c 0,55 se situaron 1mm por encima de dicho límite. En este caso se verifica también una dispersión algo mayor en las probetas cilíndricas.

Existen dos hipótesis por las cuales podría explicarse esta diferencia en los resultados. La primera es geométrica y tiene que ver con el confinamiento del volumen de hormigón que se ensaya efectivamente. Mientras que en la probeta cilíndrica el confinamiento se define con un espesor constante de 7,5 cm de espesor a lo largo de todo el perímetro de la probeta, en la probeta cúbica este espesor de confinamiento se ve incrementado en las zonas de las aristas. Esto podría significar una mayor dificultad del aire en los poros para evacuarse y ceder el espacio al agua bajo presión. La otra hipótesis es la altura de la muestra. Las diferencias observadas para las penetraciones, ya sean medias como máximas, entre las probetas cilíndricas y cúbicas pueden atribuirse a una inferior calidad de la superficie de ensayo de las muestras cilíndricas como consecuencia de una mayor altura de exudación. Ya que los cilindros tienen un 50% más de altura que los cubos, es esperable que el volumen de agua exudada por unidad de superficie a través de la cara superior también sea un 50% mayor. Ello implica una mayor conectividad de poros en la cara de moldeo que resulta en el incremento de la penetrabilidad de agua a presión.

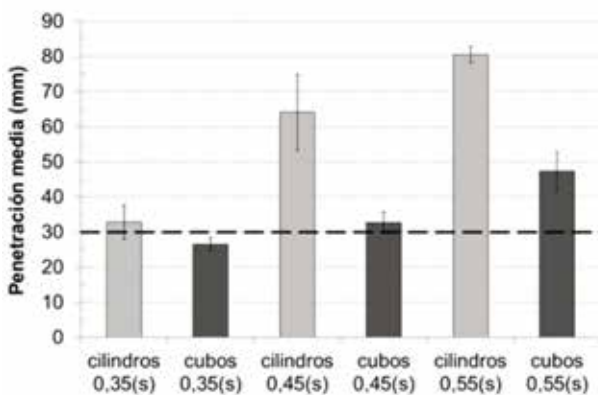


Figura 2. Penetración media en función del tipo de probeta y la relación a/c.

En las Figuras 4, 5 y 6 se comparan los perfiles de penetración de una probeta cilíndrica “s” (a la izquierda en la imagen) y una probeta cúbica (a la derecha en la imagen) para las relaciones a/c 0,35, 0,45 y 0,55 respectivamente. Se puede observar el efecto confinamiento al cual se hace mención anteriormente y cómo dicho efecto resulta más notorio al incrementarse la relación a/c de los hormigones.

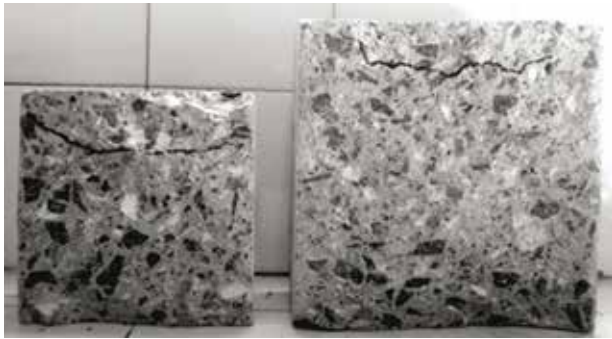


Figura 4. Perfiles de penetración en probeta cilíndrica “s” y probeta cúbica, a/c = 0,35.

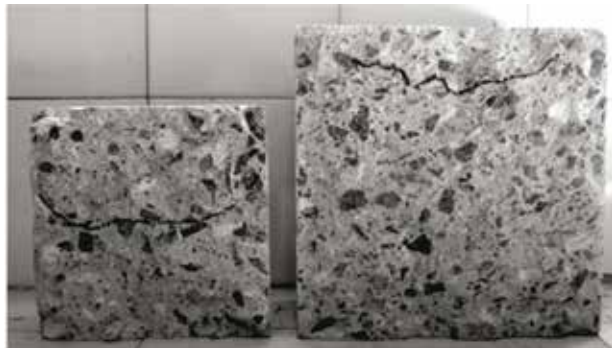


Figura 5. Perfiles de penetración en probeta cilíndrica “s” y probeta cúbica, a/c= 0,45.

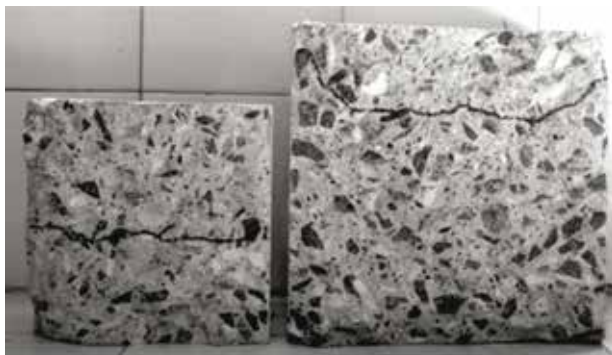


Figura 6. Perfiles de penetración en probeta cilíndrica “s” y probeta cúbica, a/c= 0,55.

Incidencia de la superficie de exposición:

A partir de la posible incidencia de la capacidad de exudación, se comparan a continuación los resultados de acuerdo a la cara de ensayo en las probetas cilíndricas. Con respecto a la incidencia de la superficie de exposición sobre el valor de penetración de agua, en la Figura 7 se presentan los resultados de penetración media de las probetas cilíndricas para las tres superficies consideradas, en función de la relación a/c de los hormigones. Se puede observar que, para todas las relaciones a/c, también los valores obtenidos para las superficies de análisis de las series con cara de molde aserrada (serie a) y cara aserrada a mitad de la altura (serie i), superan el límite del reglamento. Para las probetas ensayadas sobre las superficies de moldeo con escarificado (s) y de moldeo aserrada (a) la penetración crece al aumentar la relación a/c, mientras que en el caso de la superficie interior (i) dicho comportamiento se verifica para las a/c de 0,35 a 0,45, pero permanece constante al pasar de una relación a/c de 0,45 a 0,55.

Asimismo, los valores de penetración sobre las superficies (s) y (a) resultan similares para las relaciones a/c 0,45 y 0,55, en tanto que para la relación a/c 0,35 la penetración sobre la superficie escarificada (s) resultó 26% inferior a la de la superficie aserrada (a). La mayor resistencia de la matriz 0,35 podría dificultar el escarificado superficial resultando en una subvaloración de la penetración, hecho que no se presentaría para las otras relaciones a/c evaluadas.

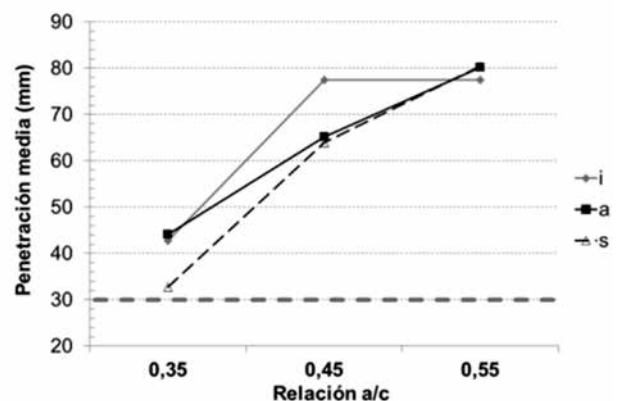


Figura 7. Penetración media en función de la superficie de ensayo y la relación a/c.

En la Figura 8 se presentan los resultados de penetración máxima de las probetas cilíndricas, en función de la superficie sobre la cual se realizó el ensayo y la relación a/c de los hormigones. Se observa nuevamente que solamente las probetas de relación a/c 0,35 cumplen con el límite que establece el CIRSOC 201 para la penetración máxima de agua a presión cualquiera fuere la superficie de ensayo. El comportamiento relacionado con la incidencia de la superficie de ensayo es semejante al descrito para el caso de las penetraciones medias.

De las Figuras 7 y 8 se desprende que la exudación sucedida en la cara sobre la cual se realiza el ensayo puede adquirir relevancia en el caso de bajas relaciones a/c , en las cuales el escarificado superficial podría ser insuficiente para eliminar por completo la película de pasta de cemento impermeable, dando como resultado una subvaloración de la penetración. A juzgar por los valores de penetración obtenidos sobre la superficie aserrada (a) y la superficie interna (i), la altura de exudación sufrida a través de la probeta no tendría una influencia relevante sobre el resultado del ensayo, al menos para los tipos y dimensiones de las probetas utilizadas. Esto contradice la hipótesis de la afectación de la exudación como un factor determinante, ya que la serie (i) también muestra una alta penetración de agua a presión a pesar de que la altura de exudación que sufrió esta sección es menor a la de los cubos (15 cm versus 20 cm).

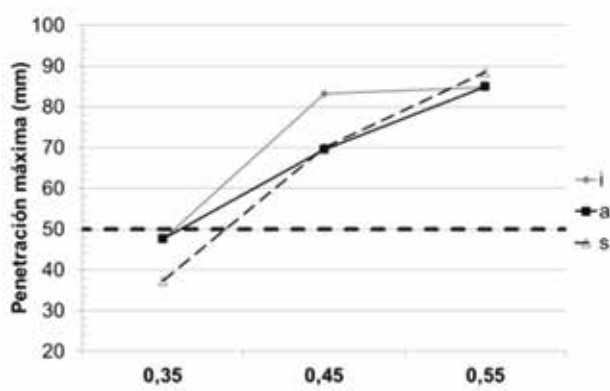


Figura 8. Penetración máxima en función de la superficie de ensayo y la relación a/c .

En las Figuras 9, 10 y 11 se presentan los perfiles de penetración de agua representativos de cada una de las superficies de exposición evaluadas, para las relaciones a/c 0,35, 0,45 y 0,55 respectivamente.

Conclusiones

A partir del análisis de los resultados del ensayo de penetración de agua a presión realizado sobre probetas cúbicas y cilíndricas con tres tipos de terminación superficial, las cuales fueron

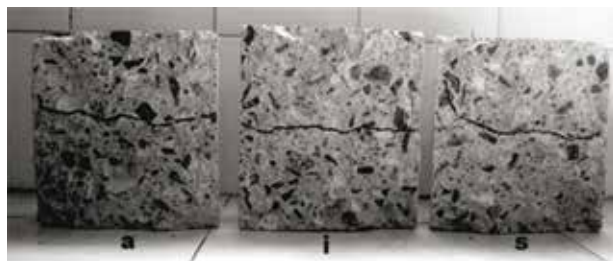


Figura 9. Perfiles de penetración en diferentes superficies de probetas cilíndricas de $a/c=0,35$ (a=aserrada; i=interna; s=escarificada).



Figura 10. Perfiles de penetración en diferentes superficies de probetas cilíndricas de $a/c=0,45$ (a=aserrada; i=interna; s=escarificada).

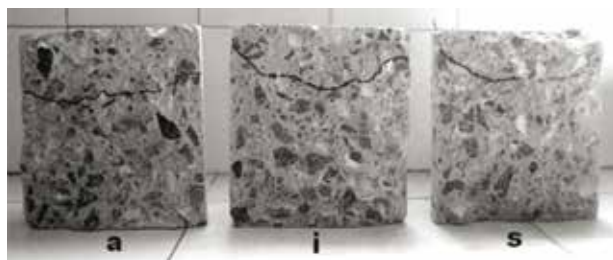


Figura 11. Perfiles de penetración en diferentes superficies de probetas cilíndricas de $a/c=0,55$ (a=aserrada; i=interna; s=escarificada).

moldeadas con hormigones de tres niveles resistentes (a/c: 0,35, 0,45 y 0,55), se puede indicar que:

Las penetraciones medias y máximas resultan mayores en las probetas cilíndricas que en las cúbicas. La principal causa parece ser el diferente confinamiento en ambas geometrías, que otorga más resistencia a la penetración de agua a presión en probeta cúbica respecto a la cilíndrica en función de la mayor dificultad para evacuar el aire en los poros.

El tipo de probeta que se emplee en la determinación de la profundidad de penetración de agua a presión en el hormigón endurecido según IRAM 1554 adquiere una importancia equiparable a la de la relación a/c. Se debe notar que incluso los resultados de las superficies (i), cuya altura de exudación (15cm) es menor que la altura de las probetas cúbicas (20cm), presentan una penetración mayor. Se infiere que la forma de la probeta representa una variable importante, incluso más significativa que la altura de la probeta.

En cuanto a la terminación de la superficie sobre la cual se realiza el ensayo, pudo notarse una afectación del resultado por la película superficial sólo en los hormigones con baja relación a/c. En los hormigones con mayor relación a/c se obtuvieron penetraciones muy similares a las de las superficies aserradas.

De lo mencionado anteriormente, se desprende la necesidad imperiosa de revisar la norma IRAM 1554, por cuanto los resultados que se obtengan puedan depender en gran medida del tipo de probeta utilizada, pudiendo significar que el hormigón cumpla o no con las especificaciones del reglamento CIRSOC 201:2005.

Referencias

- (1) Newman, J., Choo B. S., "Advanced Concrete Technology", Elsevier, (2003).
- (2) Neville, A. M., "Tecnología del Concreto", Tomo II, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C., (1977).
- (3) CIRSOC 201:2005, "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón Armado", Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Argentina.
- (4) Mattio, M. E., Ichaso, A., Irico, P., López, R., "La permeabilidad al agua como parámetro para evaluar la durabilidad del hormigón", VI Congreso Internacional y 20^o Reunión Técnica de la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Concordia, Argentina, p.247 (2014).
- (5) Taus, V. L., "Caracterización de la estructura porosa del hormigón", Ciencia y Tecnología del Hormigón, 11, p.49-58 (2004).
- (6) Ferreyra Hirschi, E., Giaccio, G., Zerbino, R., "Permeabilidad y otras propiedades físicas de hormigones convencionales y de alta performance", 1er Congreso Internacional de Tecnología del Hormigón, Buenos Aires, Argentina, p.111 (1998).
- (7) Zega, C. J., Taus, V. L., "Influencia del curado sobre las propiedades de transporte de hormigones sometidos a reciclados sucesivos", Ciencia y Tecnología del Hormigón, 12, p.47 (2005).
- (8) Zega, C. J., Di Maio, A. A., "Influencia del tipo de agregado grueso natural sobre algunas propiedades de los hormigones reciclados", V Congreso Internacional y 19^a Reunión Técnica Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón, Bahía Blanca, Argentina, p.151 (2012).