

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS Y NATURALES

LA PERMEABILIDAD AL AGUA
COMO PARÁMETRO PARA
EVALUAR LA DURABILIDAD
DEL HORMIGÓN – PARTE II
PRÁCTICA PROFESIONAL SUPERVISADA

2014

AUTORA: ICHASO, AGUSTINA

TUTORA: IRICO, PATRICIA

ICHASO, AGUSTINA

1. AGRADECIMIENTOS

Por su participación indispensable en diferentes funciones y/o tareas, la autora desea agradecer a:

- Ing. Patricia Irico.
- Marcelo Tissera.
- Ing. Raúl López.
- Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.

2. RESUMEN

Según el ambiente de exposición en el que esté emplazada la estructura a construir, el Reglamento CIRSOC 201 establece los parámetros de durabilidad que debe tener el hormigón. En particular, incorpora limitaciones en la velocidad de succión capilar y penetración de agua máxima y media. A partir de aquí surge la necesidad de contar con correlaciones entre estas exigencias y parámetros de diseño del hormigón (p.e.: a/c , tipos de cemento, etc.), que ayuden en la etapa de dosificación de las mezclas de obra.

Un factor importante en el diseño es la relación a/c , por lo que se decidió tomarla como variable de análisis, trabajando con valores de la misma entre 0,4 y 0,7, utilizando materiales de la zona central del país.

Para evaluar la permeabilidad se realizaron ensayos de penetración de agua (IRAM 1554) y succión capilar (IRAM 1871). Este último se llevó a cabo en dos laboratorios considerando los antecedentes de baja reproducibilidad de este ensayo. Complementariamente se midió la permeabilidad al aire de estos hormigones por el método de Torrent, para contar con mayor cantidad de datos para el análisis.

Si bien, los resultados evidencian un aumento de la velocidad de succión capilar a mayor relación a/c , los valores obtenidos en ambos laboratorios difieren significativamente en su magnitud, y respecto de otros antecedentes encontrados. Esto no permite establecer una relación única entre velocidad de succión y relación a/c y plantea la necesidad de estudiar qué variables no contempladas en la metodología de ensayo pueden originar estas diferencias.

Por otro lado, la penetración de agua a presión no revela una tendencia definida y los valores obtenidos, aun para relaciones a/c elevadas, cumplen con los requisitos reglamentarios. Esto también hace suponer que la metodología indicada en la norma no brinda resultados que sirvan para evaluar la calidad del hormigón y que es necesaria su revisión.

3. ÍNDICE GENERAL

1.	AGRADECIMIENTOS.....	1
2.	RESUMEN.....	2
4.	ÍNDICE DE FIGURAS.....	5
6.	ASPECTOS INTRODUCTORIOS.....	8
6.1.	INTRODUCCIÓN.....	8
6.2.	MARCO Y LUGAR DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA.....	9
6.2.1.	Marco del desarrollo de la Práctica Supervisada	9
6.2.2.	Lugar de desarrollo de las actividades.....	9
6.3.	OBJETIVOS Y ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN LA PRÁCTICA PROFESIONAL SUPERVISADA.....	10
6.3.1.	Objetivos de la Práctica Supervisada	10
6.3.2.	Plan de Actividades	10
7.	MARCO TEÓRICO	11
7.1.	EL HORMIGÓN Y SUS PROPIEDADES	11
7.1.2.	Pasta de Cemento.....	12
7.2.	POROSIDAD	13
7.2.1.	Porosidad del Hormigón	13
7.2.2.	Porosidad de la Pasta de Cemento	13
7.3.	DURABILIDAD	16
7.3.1.	Permeabilidad.....	16
7.4.	MECANISMOS DE TRANSPORTE	18
7.4.1.	Permeabilidad.....	19
7.4.2.	Difusión	20
7.4.3.	Absorción Capilar	20
8.	MATERIALES Y DOSIFICACIÓN	23
9.	METODOLOGÍAS.....	25
9.1.	CONFECCIÓN DE PASTONES	25
9.2.	ENSAYOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO	25
9.2.1.	Asentamiento (Cono de Abrams).....	25
9.2.2.	Temperatura.....	26
9.2.3.	Aire incorporado (aparato de Washington)	26
9.2.4.	Densidad	26
9.3.	PREPARACIÓN Y CURADO DE PROBETAS.....	26
9.4.	ASERRADO DE PROBETAS	27

9.5.	ENSAYOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO	28
9.5.1.	Ensayo de Compresión	28
9.5.2.	Ensayo de Penetración de Agua a Presión.....	28
9.5.3.	Ensayo de Succión Capilar	30
9.5.4.	Ensayo de Permeabilidad al Aire	31
10.	RESULTADOS.....	33
10.1.	ENSAYOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO	33
10.2.	ENSAYOS DE COMPRESIÓN.....	33
10.3.	ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN.....	34
10.4.	ENSAYO DE SUCCIÓN CAPILAR.....	35
10.4.1.	Laboratorio de Estructuras de la UNC.....	35
10.4.2.	Centro Tecnológico y Corporativo de Holcim (CTC).....	37
10.4.3.	Comparación de resultados	39
10.4.4.	Análisis de posibles variables que pudieron afectar la reproducibilidad de los ensayos de succión capilar.	40
10.5.	Ensayo de Permeabilidad al Aire	44
11.	CONCLUSIONES	47
12.	BIBLOGRAFIA	48

4. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Resistencia vs. relación a/c.....	12
Figura 2: Estructura porosa del hormigón.	13
Figura 3: a) Variación de la porosidad en función de la relación a/c. b) Continuidad de los poros capilares en función de la relación a/c.	14
Figura 4: a) Relación resistencia - permeabilidad - porosidad capilar. b) Relaciones resistencia - permeabilidad - gel/espacio.	15
Figura 5: Relación entre la porosidad y el grado de hidratación para pastas con razón a/c de 0,38 y 0,70.....	15
Figura 6: Coeficiente de permeabilidad al agua en función de la relación a/c.	17
Figura 7: Variación del coeficiente de permeabilidad en función de la razón a/c para hormigones de distinto tamaño máximo, mortero y pasta de cemento.....	18
Figura 8: Ascensión del líquido en un tubo capilar.....	21
Figura 9: Volumen de agua absorbida por un hormigón en función del tiempo.	22
Figura 10: Curado de probetas.	27
Figura 11: Usos de las probetas de ensayo (unidades en mm).....	27
Figura 12: Aserrado de las probetas de ensayo.....	28
Figura 13: Equipo de penetración de agua a presión.....	29
Figura 14: Rotura de probetas y mediciones.....	29
Figura 15: Ensayo de succión capilar.	30
Figura 16: Gráfico de succión capilar.....	30
Figura 17: Gráfico de velocidad de succión capilar.	31
Figura 18: Esquema y detalle del método de Torrent.....	32
Figura 19: a) Resistencia a la compresión vs. relación a/c. b) Factor de resistencia vs. relación a/c.	34
Figura 20: a) Penetración de agua media vs. relación a/c. b) Penetración de agua máxima vs. relación a/c.....	35
Figura 211: Capacidad de succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo, registrada en el Laboratorio de Estructuras de la FCEFyN - UNC.....	36
Figura 222: Velocidad de succión capilar, Laboratorio de Estructuras de la FCEFyN - UNC.....	36
Figura 23: Capacidad de succión capilar vs. relación a/c.....	37
Figura 24: Capacidad de succión capilar en función de la raíz del tiempo, registrada en el CTC - Holcim.	38
Figura 25: a) Capacidad de succión capilar vs. relación a/c. b) Velocidad de succión capilar vs. relación a/c.	38

Figura 26: Relación a/c vs. velocidad de succión capilar registradas en distintos laboratorios.....	39
Figura 28: posición de las probetas de ensayo.	40
Figura 29: Velocidad de succión capilar registrada en el CTC.	41
Figura 30: Pérdida de agua en función del tiempo registrada en el Laboratorio de Estructura.	42
Figura 31: Pérdida de agua en función del tiempo registrada en el CTC.....	42
Figura 32: a) Pérdida en masa durante el secado expresada en porcentaje, en función de la relación a/c para ambos laboratorios. b) Velocidad de succión capilar vs. pérdida de masa por secado, registrada en ambos laboratorios.....	43
Figura 33: a) Velocidad de succión capilar para relación $a/c = 0,4$. b) Velocidad de succión capilar para relación $a/c = 0,7$	44
Figura 34: a) kT vs. relación a/c . b) Velocidad de succión capilar vs. kT	46

5. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación por tamaño de los poros de la pasta de cemento.	14
Tabla 2: Propiedades de los agregados.....	23
Tabla 3: Granulometría de los agregados y la mezcla.	23
Tabla 4: Características del aditivo.	24
Tabla 5: Dosificación y características de la mezcla.	24
Tabla 6: Ensayos de realizar con cada probeta.	26
Tabla 7: Características de los hormigones estudiados.	33
Tabla 8: Resultados ensayos de compresión.....	33
Tabla 9: Resultados ensayos de penetración de agua a presión.	34
Tabla 10: Resultados ensayos de succión capilar obtenidos en el Laboratorio de Estructuras.	35
Tabla 11: Resultados ensayos de succión capilar obtenidos en el CTC.	37
Tabla 12: Resumen resultados obtenidos en ambos laboratorios,	39
Tabla 13: Resumen resultado hipótesis 1.	41
Tabla 14: Resumen resultados hipótesis 3.	44
Tabla 15: Resultados ensayos permeabilidad al aire. Laboratorio de Estructuras.....	45
Tabla 16: Resultados ensayo permeabilidad al aire. CTC.....	45
Tabla 17: Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función de kT	45
Tabla 18: Comparación de resultados.	46

6. ASPECTOS INTRODUCTORIOS

6.1. INTRODUCCIÓN

Se entiende por durabilidad del hormigón a su capacidad para resistir a la acción del tiempo, los ataques químicos, la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. De este modo un hormigón durable conservará su forma original, su calidad y sus propiedades de servicio cuando sea expuesto en su medio ambiente.

La durabilidad del hormigón se relaciona de manera directa con la facilidad con la cual los agentes agresivos ingresan y se mueven en su interior. Los mecanismos de penetración del agua dentro de la red porosa del material pueden seguir principios físicos muy distintos, como la permeabilidad, la difusión o la absorción capilar. Sin embargo, los fenómenos más frecuentes de penetración de agua al interior del hormigón en la construcción son, en orden, la capilaridad y la permeabilidad.

El flujo de masa líquida en un material poroso que es originado por la tensión superficial actuando en los capilares se denomina succión capilar. Este mecanismo puede ser caracterizado por dos parámetros, la cantidad de agua necesaria para saturar el hormigón denominada porosidad efectiva, y la velocidad a la cual se produce el ingreso de agua en el hormigón conocida como tasa de absorción.

La permeabilidad se define como la propiedad que establece la aptitud de un medio poroso a ser atravesado por un fluido en presencia de un gradiente de presión. Dicho gradiente puede ser originado por diferencia de presiones hidrostáticas o por efectos de las tensiones capilares.

El Reglamento CIRSOC 201-2005 incluye criterios prescriptivos para asegurar la durabilidad de las estructuras, estableciendo relaciones a/c máximas en función de los distintos ambientes agresivos.

Los mecanismos de transporte mencionados son contemplados a través del límite para la velocidad de succión capilar, establecido en $4 \text{ g/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$, de acuerdo al procedimiento de ensayo indicado en el IRAM 1871; y los límites para la penetración de agua máxima y media, fijados en 50 mm y 30 mm respectivamente, de acuerdo al procedimiento de ensayo indicado en el IRAM 1554.

En este trabajo se analizaron ambos ensayos, buscando establecer una correlación entre los parámetros limitados por el CIRSOC y distintas relaciones a/c.

Considerando los antecedentes de baja reproducibilidad del ensayo de succión capilar, se realizó el mismo en dos laboratorios y se evaluaron posibles causas que generan variación en los resultados.

6.2. MARCO Y LUGAR DE DESARROLLO DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

6.2.1. Marco del desarrollo de la Práctica Supervisada

La Práctica Profesional Supervisada se realizó en el marco de la asignatura homónima de la carrera Ingeniería Civil. Por parte de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba se asignó como tutora interna a la Profesora Ing. Patricia Irico.

La Práctica se llevó a cabo bajo la responsabilidad del tutor externo Ing. Raúl López, director del Centro Tecnológico Corporativo de Holcim.

6.2.2. Lugar de desarrollo de las actividades

Bajo el acompañamiento de Marcelo Tissera en el Laboratorio de Estructuras de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, ubicado sobre Av. Vélez Sarsfield dentro de Ciudad Universitaria, se elaboraron los pastones y probetas de prueba, y se realizaron los ensayos de permeabilidad.

Se llevaron a cabo tareas de oficina que incluyeron: programación de ensayos, registro de datos, análisis de los resultados obtenidos y elaboración de conclusiones.

Además se realizaron visitas al Centro Tecnológico Corporativo de Holcim para llevar a cabo los ensayos de permeabilidad al aire.

6.3. OBJETIVOS Y ACTIVIDADES DESARROLLADAS EN LA PRÁCTICA PROFESIONAL SUPERVISADA

6.3.1. Objetivos de la Práctica Supervisada

Se ha planteado para el desarrollo de la presente práctica que la alumna cumpla con los siguientes objetivos personales y profesionales:

- Alcanzar un desarrollo personal y profesional en un ámbito de trabajo cotidiano.
- Aplicar y profundizar los conceptos adquiridos durante el cursado de la carrera Ingeniería Civil de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba.
- Lograr una interacción permanente con un grupo de profesionales dedicados a la tecnología del hormigón.
- Adquirir experiencia necesaria para poder detectar ciertos errores y tomar decisiones en el desarrollo de trabajos de investigación.
- Aprender y profundizar conocimientos en la utilización de instrumentos y sistemas de medición.

6.3.2. Plan de Actividades

Las tareas realizadas fueron las siguientes:

- Reconocimiento del Laboratorio de Estructuras y calibración de instrumentos de medición.
- Estudio de normas IRAM 1554 (Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido) y 1871 (Método de ensayo para determinar la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido).
- Determinación de la materia prima a utilizar, dosificaciones y relaciones a/c.
- Programación de los pastones y ensayos a realizar.
- Realización de pastones y probetas de prueba, ensayos sobre el hormigón fresco y endurecido.
- Realización de los ensayos de penetración de agua a presión, succión capilar y permeabilidad al aire.
- Procesamiento y análisis de resultados.
- Discusión y elaboración de conclusiones y recomendaciones.
- Elaboración del informe final de la práctica supervisada.

7. MARCO TEÓRICO

7.1. EL HORMIGÓN Y SUS PROPIEDADES

El hormigón es básicamente una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento Portland, agua y eventualmente aditivos químicos y adiciones minerales pulverulentas, une los agregados, normalmente arena y grava.

La mezcla, inicialmente de consistencia pastosa, se rigidiza paulatinamente hasta alcanzar un grado de dureza similar al de una piedra natural, debido a la reacción química que se produce entre el cemento y el agua de amasado.

La composición de la mezcla se determina racionalmente teniendo en cuenta las propiedades que se esperan alcanzar. Dentro de este conjunto se encuentran:

Trabajabilidad: debe ser posible mezclar el hormigón, transportarlo, colocarlo y compactarlo correctamente en encofrados y moldes, con los equipos disponibles en obra, sin que segregue ni exude excesivamente.

Resistencia: debe soportar las acciones a las que estará sometido.

Durabilidad: debe mantener sus propiedades inalterables en el tiempo.

Economía: debe optimizarse el uso de los materiales para lograr las propiedades anteriores al menor costo.

Estas propiedades del hormigón dependen de:

- Propiedades de la pasta (porosidad, relación a/c, productos de hidratación).
- Propiedades de los agregados (tipos de roca, minerales constituyentes).
- Interacción entre pasta y agregados.
- Elaboración, transporte, colocación, curado, etc.

7.1.1. Influencia del Contenido de Agua en las Propiedades del Hormigón

La influencia del contenido de agua se puede analizar desde los dos estados principales del hormigón:

En *estado fresco* el agregado de agua aumentará la fluidez del hormigón.

En *estado endurecido* es donde tiene sus efectos más negativos: la cantidad de agua para hidratar el cemento es de aproximadamente el 25 % del peso del cemento. Con relaciones a/c tan bajas no se puede lograr un hormigón trabajable, con lo cual se debe agregar mayor cantidad de agua de la necesaria para la hidratación. El agua sobrante tenderá a ser eliminada de la masa del hormigón por evaporación, una parte de los espacios donde se encontraba serán ocupados por los compuestos de hidratación del cemento, mientras que el resto de dichos espacios permanecerán vacíos. Esto genera el aumento de la porosidad del hormigón y, consecuentemente, la disminución de la resistencia.

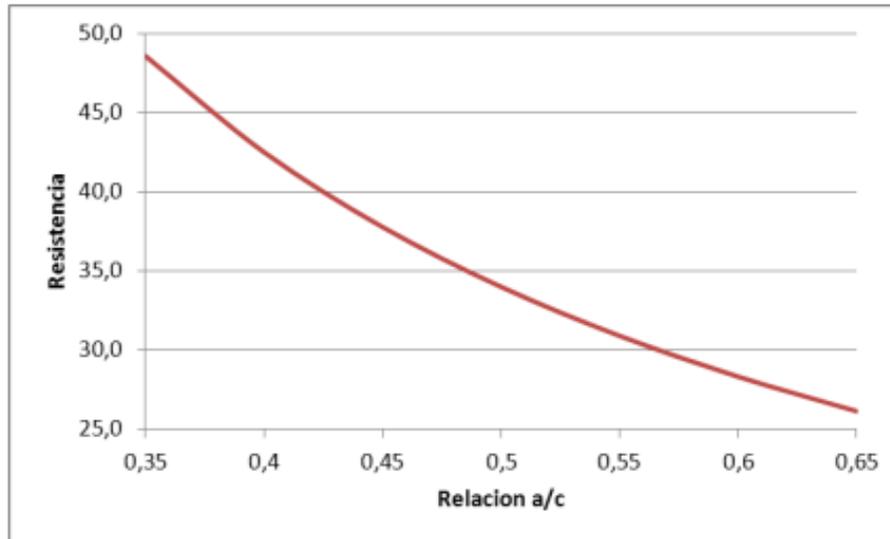


Figura 1: Resistencia vs. relación a/c.

Por lo tanto, la calidad del hormigón endurecido es fuertemente influenciada por la cantidad de agua usada con relación a la cantidad de cemento.

7.1.2. Pasta de Cemento

La calidad de unión (adhesión, adherencia) de la pasta de cemento Portland se debe a las reacciones químicas entre el cemento y el agua, conocidas como hidratación.

El cemento portland no es un compuesto químico sencillo, es una mezcla de muchos compuestos. Cuatro de ellos totalizan el 90 % o más del peso del cemento Portland: silicato tricálcico, silicato dicálcico, aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico (aluminio ferrito tetracálcico). Cada tipo de cemento Portland contiene los mismos cuatro compuestos principales, pero en proporciones diferentes.

Los dos silicatos de calcio, los cuales constituyen el 75 % del peso del cemento portland, reaccionan con el agua para formar dos compuestos: hidróxido de calcio y silicato de calcio hidratado (S-C-H). Este último es, sin duda, el compuesto más importante del hormigón. Las propiedades de ingeniería del hormigón (fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional) dependen principalmente del silicato de calcio hidratado. En pastas endurecidas de cemento, este compuesto forma un vínculo denso entre las otras fases cristalinas y los granos de cemento aún no hidratados; también se adhiere a los granos de arena y a los agregados gruesos, cementándolo todo junto.

Mientras el hormigón se endurece, su volumen bruto permanece casi inalterado, pero el hormigón endurecido contiene poros llenos de agua y aire. La resistencia está en las partes sólidas de la pasta, sobre todo en el silicato de calcio hidratado y en los compuestos cristalinos.

Cuanto menos porosa es la pasta de cemento, más resistente es el hormigón. Por lo tanto, al mezclarse el hormigón, no se debe usar más agua que aquella estrictamente necesaria para obtenerse un hormigón plástico y trabajable.

7.2. POROSIDAD

7.2.1. Porosidad del Hormigón

Un medio poroso se compone de una fase sólida y de un espacio poroso o volumen de vacíos. En el hormigón endurecido, constituido por agregados, pasta y aire (naturalmente o intencionalmente incorporado), se debe tener en cuenta los vacíos presentes en los agregados y en la pasta, que representan entre el 8 % y el 25 % del volumen total. Usualmente, el aire incorporado se presenta como poros no conectados, teniendo una escasa influencia en los mecanismos de transporte de fluidos. Las propiedades de transferencia de materia en medios porosos dependen tanto de la distribución de tamaño de poros como de su conectividad.

Los poros presentes en el hormigón tienen distinto origen, poseen los más diversos tamaños y su distribución y conectividad en la mezcla pueden ser muy variables. En la pasta de cemento pueden encontrarse los poros capilares, los generados en la incorporación intencional de aire, los poros del C-S-H, los vacíos producidos durante las operaciones de mezclado y compactación, y los originados como consecuencia del fenómeno de exudación. Si bien los agregados también presentan poros, su porosidad en general es muy baja comparada con la de la pasta.

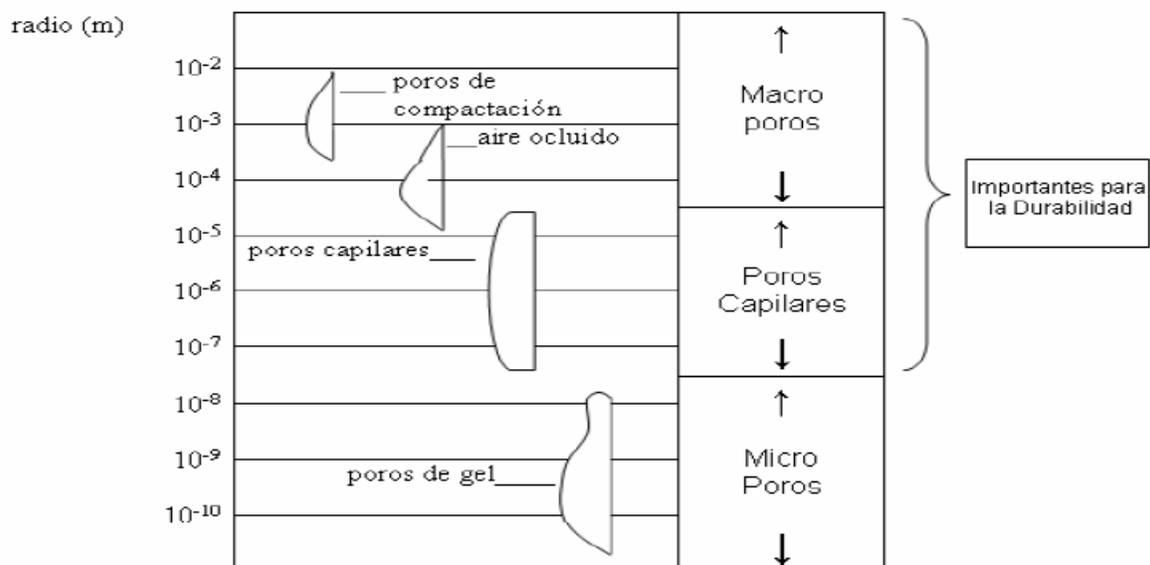


Figura 2: Estructura porosa del hormigón.

En lo que respecta a los procesos de durabilidad, los poros más críticos son los comprendidos entre 10^{-2} m hasta 10^{-7} m (poros de compactación, aire ocluido y poros capilares). Los micro poros o poros de gel no tienen incidencia en los procesos de durabilidad.

7.2.2. Porosidad de la Pasta de Cemento

El tamaño de los poros de una pasta hidratada varía desde la escala subnanométrica a la escala micrométrica (tabla 1). El primer caso corresponde a los poros de gel, mientras que en el segundo caso, los poros de radio de entre 10 nm a 1000 nm se denominan poros capilares, y son el resultado de los espacios que inicialmente se encuentran ocupados por el agua de mezclado y, a posteriori, son parcialmente rellenos con

productos de hidratación. A medida que el proceso de hidratación evoluciona, la porosidad capilar se reduce incrementado la resistencia mecánica.

Tabla 1: Clasificación por tamaño de los poros de la pasta de cemento.

Denominación	Diámetro	Descripción	Rol del agua	Propiedad afectada
Poros capilares	10 - 0,05 μm	Capilares grandes	Se comporta como agua libre	Resistencia, permeabilidad
	20 - 10 nm	Capilares medianos	Genera moderada fuerza de tensión superficiales	Resistencia, permeabilidad, contracción a alta humedad
	10 - 2,5 nm	Pequeños capilares	Genera elevadas fuerzas de tensión superficiales	Contracción a 50 % HR
Poros de gel	2,5 - 0,5 nm	Microporos	Agua fuertemente absorbida, no forma menisco	Contracción por secado, creep
	< ~0,5 nm	Microporos entre laminas	Agua estructural involucrada en las uniones	Contracción por secado, creep

La porosidad capilar de la pasta depende del agua que excede al agua combinada, teniendo en cuenta que solamente entre 0,23 y 0,25 en peso del cemento es necesario para la hidratación completa del cemento, el resto del agua queda sin combinar, y durante el secado origina la estructura de poros capilares. En la figura 3a se indica la variación de la porosidad en función de la relación a/c.

A medida que la hidratación progresa, los productos de reacción van colmatando los poros capilares, y para una relación a/c mayor a 0,70 la hidratación completa del cemento no alcanza para segmentar los poros capilares, que permita interrumpir su continuidad y de esta manera reducir el transporte de sustancias en el hormigón (figura 3b). Los reglamentos generalmente especifican para hormigones expuestos a condiciones ambientales severas una relación a/c menor a 0,40, ya que para ese valor con sólo alcanzar el 50 % de la hidratación del cemento, los poros capilares dejan de tener continuidad, asegurando una reducción del ingreso de sustancias agresivas para el hormigón y el acero.

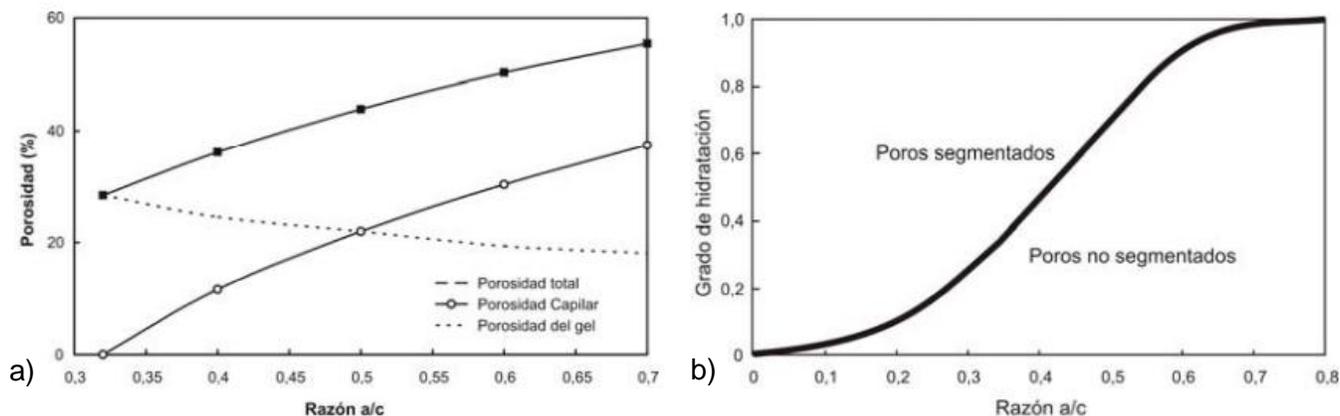


Figura 3: a) Variación de la porosidad en función de la relación a/c. b) Continuidad de los poros capilares en función de la relación a/c.

Propiedades Mecánicas

La variación de la porosidad capilar de la pasta afecta directamente la resistencia mecánica y el coeficiente de permeabilidad al agua. En la figura 4a se observa que a medida que la porosidad se reduce, la resistencia se incrementa ($f'c$), como consecuencia del incremento a nivel microscópico de las fuerzas de unión, de la disminución en el tamaño y conectividad de los poros.

En cambio la permeabilidad de la pasta se reduce notablemente cuando la porosidad alcanza un valor cercano al 28%, debido a que en este punto se produce la segmentación de poros. En la figura 4b se observa el mismo comportamiento en función de la relación gel/espacio.

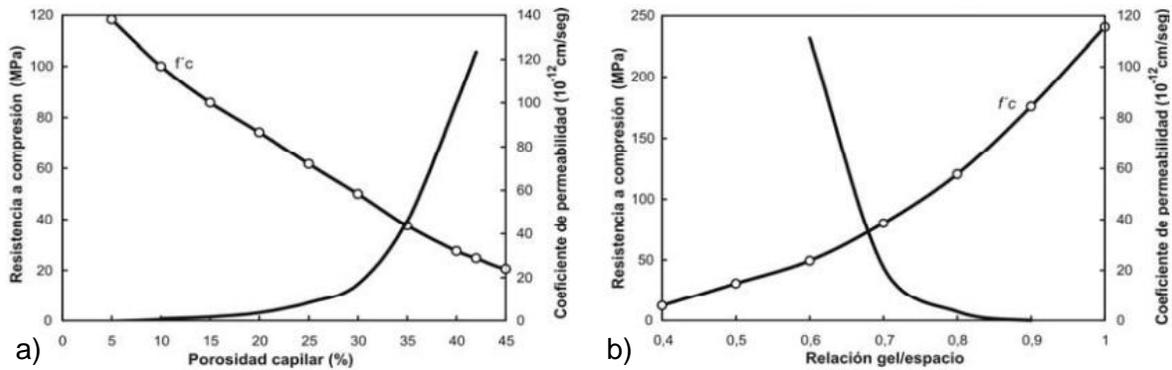


Figura 4: a) Relación resistencia - permeabilidad - porosidad capilar. b) Relaciones resistencia - permeabilidad - gel/espacio.

A nivel ingenieril esto se refleja por la relación a/c, pues frente a un mismo grado de hidratación este parámetro define la porosidad capilar del sistema (figura 5).

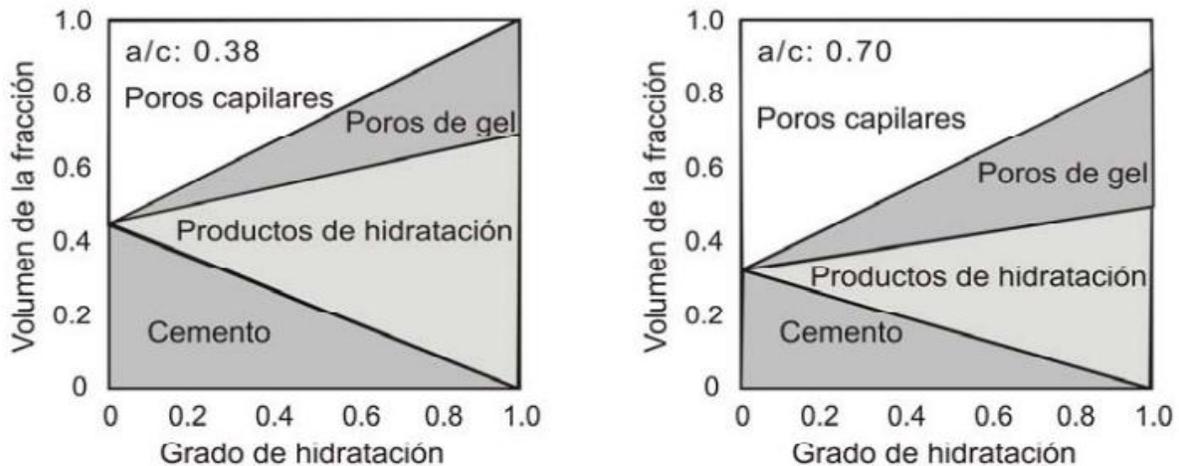


Figura 5: Relación entre la porosidad y el grado de hidratación para pastas con razón a/c de 0,38 y 0,70.

La reducción de la relación a/c tiene un papel determinante, y la prolongación del curado del hormigón, permite mantener las condiciones adecuadas para la continuidad de la formación de productos de hidratación que inducen cambios en la relación gel/espacio. Esta relación adquiere una relevancia tal vez mayor que la razón a/c, dado que evalúa la cantidad de sólidos que van llenando los espacios inicialmente ocupados por el agua de mezclado y el cemento.

Con respecto a la relación entre la resistencia y la porosidad de la pasta, se debe tener en cuenta que a cualquier edad, la porosidad de la pasta cementícea es la principal variable que define el comportamiento mecánico, y que condiciona algunos aspectos de la durabilidad del material en estado endurecido. La porosidad del hormigón está controlada

por la cantidad y calidad de la pasta de cemento, aunque la existencia de microfisuras en las interfaces modifica la permeabilidad del hormigón.

7.3. DURABILIDAD

En la actualidad los parámetros de durabilidad han adquirido tanta importancia como los de resistencia. Se define la durabilidad como la capacidad del hormigón de una estructura para resistir a la acción del ambiente, al ataque químico y a la abrasión, conservando su forma original, su calidad y sus propiedades de servicio cuando el mismo sea expuesto en su medio ambiente.

La estructura de los poros y la configuración de las fisuras, así como el contenido de agua en los mismos, son parámetros que determinan la permeabilidad del hormigón que, a su vez, controla la penetración de las sustancias y gases disueltos.

7.3.1. Permeabilidad

El hormigón es un material poroso. El volumen, tamaño y distribución de los poros y sus características, regulan la rapidez con que el hormigón absorbe agua y otros líquidos o gases, y su permanencia en los mismos. Se entiende como permeabilidad la velocidad con que el agua y otros líquidos fluyen a través del hormigón.

Una permeabilidad mayor del hormigón al agua, va a ser función de la permeabilidad de la pasta, de la permeabilidad y granulometría del agregado y de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado. La permeabilidad de la pasta depende también de la relación agua/cemento y del grado de hidratación del cemento, además de la duración y calidad del curado.

Cuanto más permeable sea el hormigón, menor será su durabilidad. Un hormigón permeable es propenso a su desintegración, porque el agua que penetra en sus poros se expande por congelación sometándolo a tensiones que no puede soportar. Igualmente la fácil penetración de sulfatos, ácidos y otros productos químicos agresivos aceleran el proceso de destrucción del hormigón, así como de las barras de acero en los hormigones armados.

Por lo anteriormente expuesto, la reducción de la permeabilidad es una manera efectiva para mejorar la durabilidad del hormigón.

Influencia de la Relación a/c

La relación a/c afecta no solamente la resistencia a la compresión del hormigón, sino también su permeabilidad.

Con menores relaciones a/c, la concentración creciente de granos de cemento en la pasta deja menos espacio entre ellos para ser ocupados por el agua, al estar más unidos unos con otros.

Inicialmente el espacio entre los granos de cemento forma una red continua llena de agua, formada por los poros capilares. A medida que los granos de cemento se van hidratando, generan cristales que bloquean los poros y esto hace al hormigón menos penetrante. Los poros pequeños son bloqueados más fácilmente que los grandes, y mientras más granos de cemento se tengan (menor relación a/c) el bloqueo será mayor, con lo que se consigue una menor permeabilidad y un hormigón más durable.

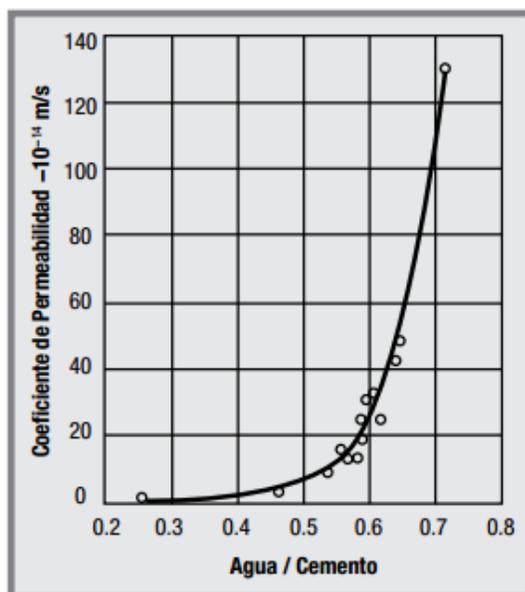


Figura 6: Coeficiente de permeabilidad al agua en función de la relación a/c

Influencia de los Agregados

Los agregados ocupan alrededor del 75% del volumen absoluto del hormigón, por lo tanto tienen gran influencia en las propiedades del mismo. No sólo limitan la resistencia del hormigón en muchos casos, sino que sus propiedades también afectan al desempeño del mismo durante su vida útil (durabilidad).

Mientras mayor cantidad de agua demande la granulometría para una cierta trabajabilidad, mayor será la permeabilidad del hormigón frente a sustancias agresivas que lo penetren y lo deterioren; por lo tanto menor será la durabilidad.

Influencia de la Interfase pasta - agregado

La zona de interfase pasta - agregado presenta siempre una mayor porosidad, debido a distintos fenómenos: condiciones de hidratación diferentes, efecto pared, acumulación de agua exudada.

El tamaño y la granulometría del agregado afectan las características de exudación del hormigón, lo cual a su vez afecta la resistencia de la zona de transición. Durante los periodos iniciales de hidratación, dicha zona es vulnerable a la fisuración, debido a los pequeños esfuerzos entre la pasta de cemento y el agregado, inducidos generalmente por la retracción por secado, contracción térmica y cargas aplicadas externamente. Las fisuras producidas poseen un tamaño mucho mayor que la mayoría de las cavidades capilares presentes en la matriz de la pasta de cemento, y por lo tanto son capaces de establecer las interconexiones que aumentan la permeabilidad del sistema.

El incremento en el tamaño máximo del agregado también provoca un incremento en la permeabilidad, dado que se magnifica la incompatibilidad mecánica y reológica con la pasta, alterando la zona de interfase. La figura 7 muestra este concepto para distintos hormigones. Sin embargo, no debe perderse de vista el efecto de la estabilidad dimensional relativa de pastas y hormigones. Una pasta evaluada sobre una pequeña muestra, es menos permeable que el hormigón, pero la fisuración que experimenta, origina otras vías para el ingreso de agua de mucha mayor importancia relativa que la permeabilidad intrínseca de los sectores no fisurados.

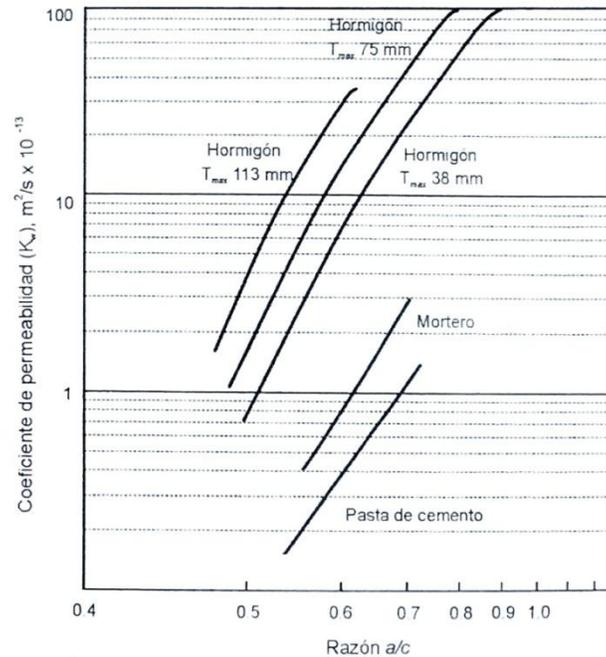


Figura 7: Variación del coeficiente de permeabilidad en función de la razón a/c para hormigones de distinto tamaño máximo, mortero y pasta de cemento.

7.4. MECANISMOS DE TRANSPORTE

La penetración de fluidos dentro del hormigón determina en buena parte la durabilidad del material. En el caso particular de los líquidos, estos pueden penetrar la red porosa del hormigón usando principios físicos muy distintos, siendo los fenómenos más frecuentes y de mayor preocupación frente a la contención de líquidos o penetración al interior del material: la permeabilidad, la difusión y la absorción capilar.

La *permeabilidad* se refiere al movimiento de un líquido en presencia de un gradiente de presión. El hormigón debe estar saturado para poder medir la permeabilidad, la cual se expresa en términos de m^3/m^2s .

Por *difusión* se designa el proceso de transporte de un constituyente dentro de un medio cualquiera, bajo el efecto de su agitación aleatoria a escala molecular. Cuando existe una diferencia de concentración entre dos puntos del medio, aparece una resultante del movimiento aleatorio que genera un transporte global (o neto) del constituyente considerado, desde la zona con mayor concentración hacia la zona de menor concentración. La difusión se determina en general sobre hormigones saturados.

La *absorción capilar* corresponde al desplazamiento de un frente líquido a través de un capilar, como consecuencia de la interacción de las fuerzas de contacto líquido - sólido. Este fenómeno de movimiento de agua tiene lugar en hormigones secos o parcialmente saturados.

Tanto la permeabilidad como la absorción capilar dependen fundamentalmente del tamaño de los poros, mientras que la difusión, depende principalmente de la interconexión de la red porosa.

7.4.1. Permeabilidad

Las estructuras sumergidas o de contención de líquidos están expuestas al desplazamiento del líquido en su interior.

La permeabilidad del hormigón se calcula a partir de una condición de presión hidrostática sobre una de sus caras, y corresponde a la velocidad o al caudal de agua que atraviesa el material, debido a la diferencia de presión entre la cara en contacto con el agua y la cara que no lo está. El flujo de agua a través del hormigón, debido al empuje del líquido (gracias a la gravedad), depende de factores externos al material, como la altura de la lámina de agua y el espesor del elemento, pero también de factores internos, como la capacidad del material para contener el líquido.

El parámetro que en este caso describe la calidad del material es el coeficiente de permeabilidad al agua (K) de Darcy, el cual representa la facilidad con la que el material puede ser penetrado por el agua:

$$Q = - \frac{KA dP}{\mu dz} \quad (1)$$

donde Q es el caudal de un fluido de viscosidad cinemática μ , que atraviesa un espesor dz de sección aparente A, bajo el gradiente de presión dP. Esta expresión supone un régimen laminar en los poros del material.

El término K corresponde a un área y se expresa en metros cuadrados. Esta magnitud se denomina permeabilidad intrínseca y no debe confundirse con el coeficiente de permeabilidad. Este parámetro, es una característica intrínseca del material y no depende del líquido utilizado para su medida.

Si el líquido en cuestión es agua, el gradiente de presión puede redefinirse como:

$$\frac{dP}{dz} = \gamma_w \frac{dh}{dz}$$

donde γ_w es el peso específico del agua.

Debido a que la velocidad del flujo es $v = Q/A$, la ecuación se puede expresar en términos de velocidad (v) de la siguiente manera:

$$v = - \frac{K}{\mu_w} \gamma_w \frac{dh}{dz}$$

donde μ_w es la viscosidad del agua. Por lo que la velocidad del agua aparente se expresa como:

$$v = - K_w \frac{dh}{dz}$$

Por lo tanto K_w es el coeficiente de permeabilidad al agua y se expresa en m/s; no es una propiedad intrínseca del material ya que depende de los parámetros γ_w y μ_w .

7.4.2. Difusión

El parámetro que cuantifica la capacidad de transporte por este mecanismo se denomina coeficiente de difusión D_f , definido en la primera ley de Fick:

$$J_x = D_f \frac{dC}{dx}$$

donde J_x es el flujo constituyente en la dirección x y dC/dx es el gradiente de concentración en esa dirección.

Si se considera que el fenómeno de difusión tiene lugar en un poro capilar cilíndrico de radio r , la dimensión l del capilar no tiene ninguna influencia en la velocidad de difusión, siempre que esa dimensión sea suficientemente grande comparada con el recorrido medio de la moléculas. En la práctica, el radio del capilar debe ser mayor que algunas decenas de nanómetros.

Los transportes por difusión pueden ocurrir en fase líquida o gaseosa. El primero involucra el transporte de sustancias en solución en la fase acuosa intersticial, y son ejemplo de este caso el ataque por agua de mar o por ácido carbónico de un suelo rico en materia orgánica.

El transporte de gases en los hormigones, se produce en general por difusión en el aire contenido en los poros y fisuras del material. La difusión en fase gaseosa involucra el proceso de desecación del hormigón ya parcialmente seco (transferencia de vapor de agua), así como la penetración de CO_2 y O_2 .

7.4.3. Absorción Capilar

Dadas las características del sistema de poros de la estructura de la pasta de cemento endurecida, los fenómenos capilares tienen una influencia significativa en los mecanismos de transporte. La absorción capilar es el mecanismo de transferencia de líquidos más rápido, y la determinación de la capacidad de absorción capilar constituye una herramienta confiable para caracterizar la estructura de poros en forma comparativa.

Fenómenos Capilares. Ley de Jurín

Si un líquido se encuentra en contacto con hormigón no saturado, las diferencias de humedad pueden dar lugar a la aparición de tensión capilar y con ella, al movimiento de un líquido hacia el interior de la masa del hormigón.

Cuando se coloca un tubo capilar verticalmente en un recipiente que contiene un líquido que moje, el líquido asciende por el capilar hasta alcanzar una determinada altura, mientras que si el líquido no moja, el nivel de líquido en el capilar es menor que en el recipiente.

Puede considerarse con gran aproximación que la superficie del menisco es un casquete esférico de radio R . La relación entre el radio del capilar r , el radio del menisco R y el ángulo de contacto θ , se expresa como $r = R \cos\theta$.

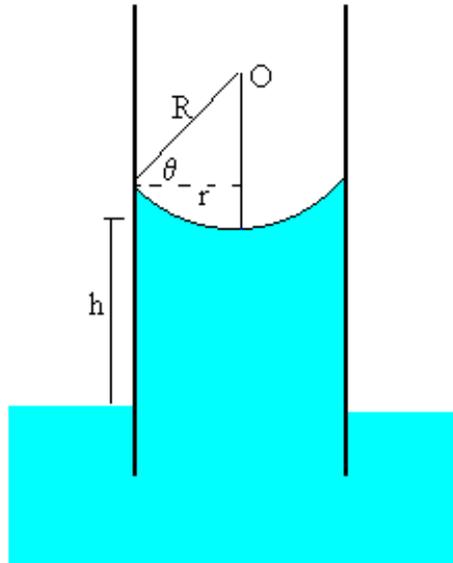


Figura 8: Ascensión del líquido en un tubo capilar

Debido a la curvatura de la superficie, habrá una sobrepresión hacia el centro del menisco, que de acuerdo con la ley de Laplace (superficie de una cara), tiene el siguiente valor:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} = \frac{2\gamma}{r} \cos \theta \quad (2)$$

Por efecto de esta sobrepresión, el líquido asciende una altura h .

$$\Delta p = \rho g h$$

donde ρ es la densidad del líquido, g es la constante gravitatoria y h es la altura a la que asciende el nivel del líquido en el capilar, la cual se expresa a continuación:

$$h = \frac{2\gamma}{r\rho g} \cos \theta \quad (3)$$

Esta expresión es la denominada ley de Jurín, de la cual se deduce que la altura a la cual se eleva o desciende un líquido en un capilar es directamente proporcional a su tensión superficial, e inversamente proporcional a la densidad del líquido y el radio del capilar.

Además de la altura alcanzada por el líquido, es posible estimar la velocidad de ascenso del flujo v en el tubo capilar, mediante la expresión propuesta por Washburn dada por:

$$v = \frac{r\gamma \cos \theta}{4d\mu} \quad (4)$$

donde d es la profundidad de penetración del líquido, y μ es la viscosidad del fluido.

Tanto la ecuación (3) como la ecuación (4), son el resultado de deducciones teóricas considerando como hipótesis que el capilar es un tubo ideal de sección transversal constante, perfectamente circular y exactamente alineado con la dirección del flujo. Debido a ello, no son estrictamente aplicables al hormigón por tratarse de un material esencialmente heterogéneo, por la presencia de una rugosidad superficial que modifica el ángulo de contacto entre el sólido y la superficie del líquido, y fundamentalmente por presentar una red de poros capilares muy tortuosa y de disposición caprichosa, que convergen y divergen hacia los poros vecinos de una manera aleatoria.

Capacidad de Absorción Capilar

Cuando el transporte de líquidos en sólidos porosos se debe a la tensión superficial que actúa en los capilares, el transporte del líquido está influenciado por las características del mismo (viscosidad, densidad y tensión superficial) y por las características del sólido poroso (permeabilidad, estructura de poros, energía superficial). A partir de las leyes de Darcy (1) y de Laplace (2), es posible deducir que el peso de agua absorbida por unidad de superficie (W/A) en el tiempo t se expresa:

$$\frac{W}{A} = S t^{1/2}$$

siendo S la capacidad de absorción capilar.

La experiencia muestra que si se considera la absorción capilar a edades más largas (un par de semanas), esta expresión sobreestima la masa de agua absorbida. Se considera que una vez superada la capacidad de absorción inicial, distintos mecanismos provocan una reducción de la velocidad de absorción.

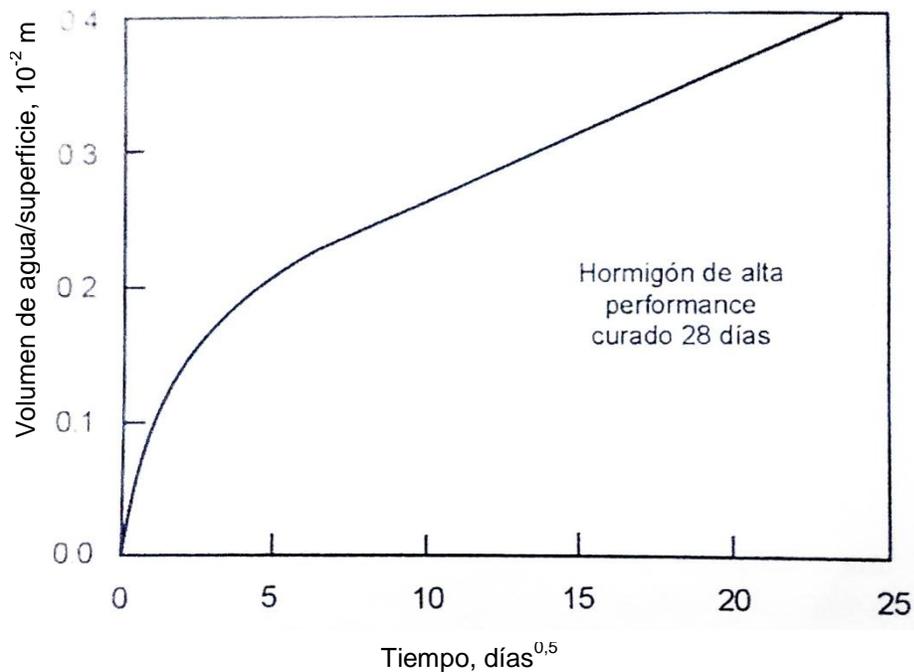


Figura 9: Volumen de agua absorbida por un hormigón en función del tiempo.

8. MATERIALES Y DOSIFICACIÓN

Se elaboraron de nueve pastones con relaciones a/c entre 0,4 y 0,7, empleando agregados convencionales, cemento Portland compuesto (CPC40) y aditivo plastificante para ajustar la consistencia en el rango de 8 a 12 cm. Los materiales utilizados corresponden a la zona central del país.

El cemento portland utilizado fue un cemento Holcim compuesto por filler calcáreo y escoria, proveniente de la planta Malagueño, Córdoba.

Las propiedades y granulometría de los áridos se detallan en las tablas 2 y 3; y las características del aditivo se muestran en la tabla 4.

Tabla 2: Propiedades de los agregados.

IDENTIFICACION	Arena Marchisone	Triturado 6-19 Pétreos
Densidad (Kg/m ³)	2640	2735
Absorción (%)	0,70	0,80

Tabla 3: Granulometría de los agregados y la mezcla.

IDENTIFICACION		Arena Marchisone	Triturado 6-19 Pétreos	Mezcla
% TAMIZ ASTM	% TAMIZ IRAM	46,0%	54,0%	100,0%
3"	76	100,0	100,0	100,0
2"	50	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	37,5	100,0	100,0	100,0
1"	25	100,0	100,0	100,0
3/4"	19	100,0	97,9	98,9
1/2"	12,5	100,0	60,8	78,9
3/8"	9,5	100,0	38,6	66,9
4	4,75	98,4	1,9	46,3
8	2,36	90,4	0,6	41,9
16	1,18	64,5	0,0	29,7
30	0,6	28,6	0,0	13,2
50	0,3	5,6	0,0	2,6
100	0,15	0,5	0,0	0,2
Mf Individuales		3,1	6,6	5,0

Tabla 4: Características del aditivo.

Identificación	Sikament-90 E
Descripción	Aditivo polifuncional plastificante y superfluidificante
Ventajas	<p><u>En el hormigón fresco:</u> Mejora la trabajabilidad del hormigón Disminuye la exudación del agua y evita la segregación de los materiales Rango de asentamiento ideal entre 6 cm y 15 cm Plasticidad mantenida durante 60 minutos Reduce el contenido del agua del 6% al 20% No provoca incorporación de aire</p> <p><u>En el hormigón endurecido:</u> Incrementa la resistencia mecánica a la compresión Mejora la compacidad y durabilidad del hormigón Mayor módulo de elasticidad y menor retracción por secado</p>
Datos Técnicos	Densidad a 20 °C: 1,18 Kg/l PH: 8-10 Resistencia a las 24 hs (incremento máximo respecto al testigo): 20% Resistencias finales (incremento máximo respecto al testigo): 25%

El Reglamento CIRSOC 201-2005 incluye criterios prescriptivos para asegurar la durabilidad de las estructuras, estableciendo relaciones a/c máximas en función de los distintos ambientes agresivos.

A partir de lo expresado en el punto anterior, y teniendo en cuenta que la relación a/c es un factor importante en el diseño de mezclas de hormigón, se decidió tomarla como variable de análisis. Se utilizaron 4 valores para la elaboración de los pastones: 0,4; 0,5; 0,6 y 0,7; los cuales representan los límites determinados por el reglamento.

Tabla 5: Dosificación y características de la mezcla.

Relación a/c	0,4	0,5	0,6	0,7
Cemento CPC40 - Planta Malagueño	485	388	348	316
Agua	195	190	215	217
Arena gruesa Marchisone	702	817	858	909
Triturado 6-19 Pétreos Holcim	1010	959	930	909
Aditivo plastificante Sikament 90E	0,75	0,75	--	--
Densidad teórica	2393	2355	2351	2351
Asentamiento de consigna	10 ± 2	10 ± 2	10 ± 2	10 ± 2

* Dosis de aditivo para lograr asentamiento de consigna. Se estima una dosis de 0,6%.

9. METODOLOGÍAS

9.1. CONFECCIÓN DE PASTONES

Inicialmente se realizaron cuatro pastones, uno por cada relación a/c (0,4; 0,5; 0,6 y 0,7). El pastón correspondiente a la relación a/c = 0,5 debió ser repetido, debido a que el asentamiento obtenido inicialmente fue mayor a los 12 cm establecidos como límite superior.

Luego se confeccionaron cuatro pastones de repetición, uno por cada relación a/c como en el caso anterior, para corroborar resultados y contar con un mayor número de muestras para los ensayos.

Todos los pastones se realizaron siguiendo una serie de pasos predeterminados para homogeneizar el proceso y poder efectuar la comparación de resultados de manera representativa.

- *Corrección por humedad de los áridos*

Para asegurar que las proporciones que intervinieran en las mezclas fueran las correspondientes a las dosificaciones adoptadas, se realizó la corrección por humedad de todos los agregados (finos y gruesos).

Se tomó 1 Kg de cada uno de los materiales en estado natural, se los colocó en una bandeja metálica y se los secó en anafe (hasta masa constante).

Se los dejó enfriar, se los pesó, y con la diferencia entre peso húmedo y seco se realizó la corrección del contenido de agua del pastón.

- *Preparación del pastón*

Con la máquina húmeda se incorporó el 100% de la piedra, luego el 100% del cemento y se comenzó a mezclar. Con la máquina encendida se fue agregando el agua (aproximadamente un 80% del total según dosificación), se mezcló durante 30 segundos, se incorporó la arena gruesa y se continuó con el mezclado durante 30 segundos más. Se agregó la arena fina y lo que restaba del agua con el aditivo en los casos correspondientes. Se mezcló durante 2 minutos, se dejó reposar 2 minutos y se volvió a mezclar 2 minutos más.

9.2. ENSAYOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

Se llevaron a cabo una serie de ensayos al hormigón en estado fresco para caracterizarlo. Los ensayos realizados fueron los siguientes:

9.2.1. Asentamiento (Cono de Abrams)

El método de ensayo se realizó según la norma IRAM 1536.

Con este ensayo se determinó la consistencia por la pérdida de altura expresada en centímetros, de un cierto volumen de hormigón fresco de forma determinada al ser retirado el molde que lo contenía, siendo la consistencia, la capacidad de deformarse del hormigón en relación a su fluidez.

Un aumento o una disminución del asentamiento, son indicio de variaciones de la proporción de los materiales, de la granulometría de los agregados, o del porcentaje de humedad de los mismos. Como el resultado de la prueba es inmediato, resulta posible introducir rápidamente las correcciones necesarias para restablecer las condiciones de diseño del hormigón fresco.

9.2.2. Temperatura

Finalizado el ensayo de asentamiento, se vertió la mezcla en una bandeja metálica y se unificó con una pala.

Con un termómetro se midió la temperatura ambiente y del hormigón.

9.2.3. Aire incorporado (aparato de Washington)

El método de ensayo se realizó siguiendo la norma IRAM 1602.

Se determinó el contenido de aire mediante el método de presión: el hormigón fresco es un fluido incompresible, en su interior existen burbujas de aire cuyo volumen puede variar en función inversa de la presión a que sean sometidas

9.2.4. Densidad

La densidad es una propiedad intrínseca que proporciona valiosa información sobre la homogeneidad de la mezcla.

Para conocer la densidad del hormigón fresco hace falta una balanza y un recipiente. Por diferencia entre el peso del recipiente enrasado con hormigón y el peso del recipiente vacío, se obtiene el peso de un determinado volumen de H°. Se utilizó para la realización del ensayo el aparato de Washington, ya que el volumen del mismo es conocido.

Se comparó el valor obtenido con el teórico y se verificó que no difiera en +/-2%. Esta limitación de la variación de la densidad, tiene por objetivo verificar que se mantengan las proporciones entre los materiales componentes, establecidos en el estudio de la dosificación. De esta manera se toman recaudos para asegurar que se alcancen las propiedades previstas para el hormigón endurecido, especialmente, la resistencia mecánica.

9.3. PREPARACIÓN Y CURADO DE PROBETAS

Las probetas fueron moldeadas y curadas según la norma IRAM 1534.

Se confeccionaron siete probetas por cada pastón, dos de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, y cinco de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. En la tabla 6 se detallan los ensayos realizados con cada una de ellas.

Tabla 6: Ensayos de realizar con cada probeta.

Nº de Probeta	Tamaño de la Probeta	Ensayo a Realizar
1	10 cm de ϕ , 20 cm de h	Compresión a 7 días
2	10 cm de ϕ , 20 cm de h	Compresión a 7 días
3	15 cm de ϕ , 30 cm de h	Compresión a 28 días
4	15 cm de ϕ , 30 cm de h	Compresión a 28 días
5	15 cm de ϕ , 30 cm de h	Penetración de agua a presión, succión capilar, permeabilidad al aire
6	15 cm de ϕ , 30 cm de h	Penetración de agua a presión, succión capilar, permeabilidad al aire
7	15 cm de ϕ , 30 cm de h	Penetración de agua a presión, succión capilar, permeabilidad al aire

Las probetas estuvieron en curado húmedo hasta el momento de los ensayos.



Figura 10: Curado de probetas.

9.4. ASERRADO DE PROBETAS

Una vez finalizado el curado de las probetas, se realizó un primer aserrado de las mismas a la mitad de la altura (15 cm). De esta manera se obtuvo una superficie plana y lisa para exponer a la presión del agua. Con la mitad restante se efectuó un segundo y tercer aserrado de 5 cm cada uno, a partir de la cara interna. Las dos rodajas se utilizaron para el ensayo de succión capilar, realizando el mismo en dos laboratorios, dados los antecedentes de gran dispersión de dicho ensayo.

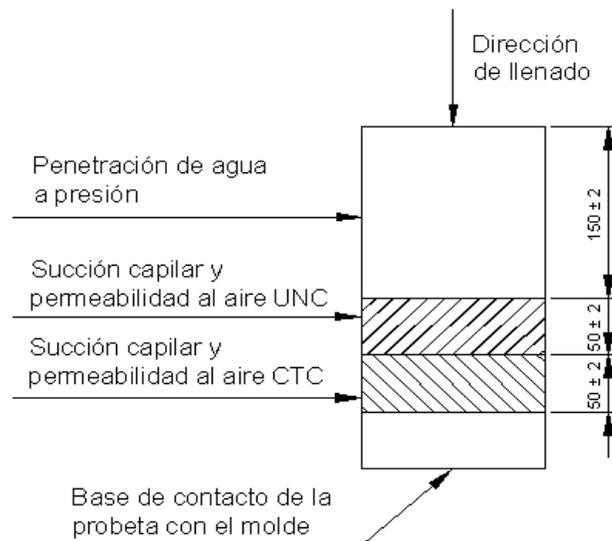


Figura 11: Usos de las probetas de ensayo (unidades en mm).



Figura 12: Aserrado de las probetas de ensayo.

9.5. ENSAYOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO

9.5.1. Ensayo de Compresión

El método de ensayo se realizó siguiendo la norma IRAM 1546.

La resistencia a la compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a la carga axial de especímenes de hormigón.

La resistencia a compresión que el hormigón logra es función de la relación a/c, de cuanto la hidratación ha progresado, de las condiciones ambientales y de la edad del hormigón. A los 28 días, este alcanza entre un 90% y 95% de la resistencia final. A efectos de los cálculos estructurales, se considera la resistencia a 28 días, como “resistencia final o máxima del hormigón”.

Además de los ensayos de compresión realizados a la edad de 28 días, anteriormente se ensayaron probetas a 7 días para verificar la evolución de la resistencia del hormigón.

9.5.2. Ensayo de Penetración de Agua a Presión

Los ensayos para determinar la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido fueron realizados siguiendo la norma IRAM 1554.

En la cara de ensayo se marcó un círculo concéntrico con el eje de la probeta de 7,5 cm, y se impermeabilizó la superficie circundante.

A continuación se preparó el equipo de ensayo para 6 probetas y se las sometió a presión de agua (destilada y coloreada con azul de metileno).



Figura 13: Equipo de penetración de agua a presión.

La secuencia y tiempo de mantenimiento de las presiones durante el ensayo varían según lo indicado en la norma.

Al finalizar el último ciclo, se retiraron las probetas del equipo y se las partió en dos mitades aplicando con una prensa una carga perpendicular a la superficie sobre la que se incorpora el agua. Sobre la mitad visiblemente más afectada se realizó la medición de penetración del agua.



Figura 14: Rotura de probetas y mediciones.

9.5.3. Ensayo de Succión Capilar

El método de ensayo, realizado según la norma IRAM 1871, permite calcular la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido, mediante el registro del incremento de masa de una probeta, sometida a la acción de contacto con agua en una de sus bases.

Considerando los antecedentes de baja reproducibilidad del ensayo, se realizó el mismo en dos laboratorios: Laboratorio de Estructuras de la UNC y Centro Tecnológico y Corporativo de Holcim (CTC). Luego se evaluaron posibles causas que generan variación en los resultados.

Una vez efectuado el aserrado, las muestras se impermeabilizaron lateralmente, y se secaron en estufa a 50 °C hasta masa constante. Luego se procedió al ensayo en sí mismo, que consiste en poner la cara de ensayo de las muestras en contacto con agua, con un pelo de agua de 3 mm por sobre la base, y registrar los incrementos de peso en intervalos regulares de tiempo (0,5; 1, 2, 3, 4, 5, 6, 24, 48, 72 h...), hasta que el incremento resulte menor a 0,1 % en peso de la muestra.



Figura 15: Ensayo de succión capilar.

Finalizado el ensayo se determina la capacidad de succión capilar de cada probeta (C_i), en gramos por metro cuadrado, que es el valor del incremento de masa por unidad de área de la sección transversal de la probeta (i), en el instante de lectura (t), C_{it} , que corresponde al tiempo (t) cuando la variación de masa es menor que 0,1% entre dos determinaciones sucesivas de la masa húmeda (M_{hi}).

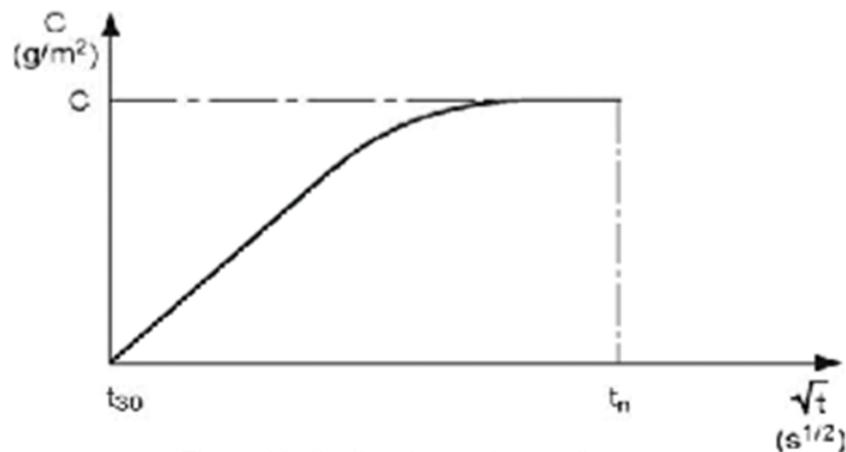


Figura 16: Gráfico de succión capilar.

La velocidad de succión capilar del hormigón (S) correspondiente a la serie de ensayo, en gramos por metro cuadrado por segundo a la un medio, es la pendiente de la recta obtenida mediante ajuste por cuadrados mínimos de la serie de puntos (figura 17).

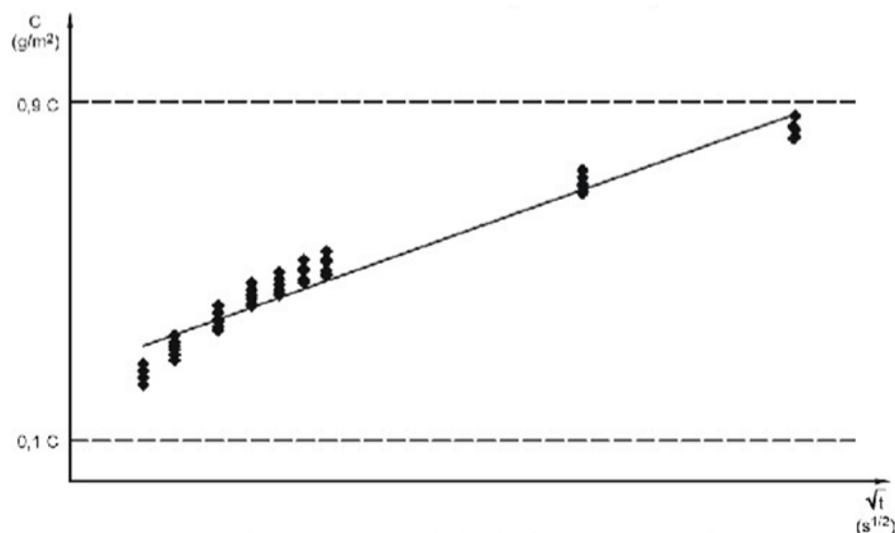


Figura 17: Gráfico de velocidad de succión capilar.

9.5.4. Ensayo de Permeabilidad al Aire

La medición in situ de la permeabilidad al aire es una técnica rápida, no destructiva y que provee información importante para calificar la calidad de las capas superficiales del hormigón. Tiene relación directa con la durabilidad potencial del hormigón, y además aporta información acerca de la calidad de ejecución y la existencia de defectos no visibles.

La permeabilidad al aire se midió siguiendo el Método de Torrent.

La disposición del instrumental del aparato se esquematiza en la figura 18. Sus dos características distintivas son:

- una celda con doble cámara, basada en el principio del anillo de guarda. Consiste en una cámara interna i y una cámara externa e .
- un regulador de presión a membrana, cuya función es mantener a ambas cámaras siempre a la misma presión ($P_i = P_e$).

La operación del aparato es como sigue: con las válvulas 1 y 2 abiertas, se crea vacío en ambas cámaras mediante la bomba. Cuando la presión P_i baja a ~ 30 mbar se cierra la válvula 2, momento a partir del cual la bomba solo puede actuar (cuando se lo permite el regulador) sobre la cámara externa, de manera de equilibrar en todo momento la presión en ambas cámaras. De este modo, todo exceso de aire que ingrese lateralmente en la cámara externa será evacuado por la cámara exterior. Así se logra que el flujo de aire hacia la cámara central sea básicamente unidireccional y no afectado por el ingreso espurio de aire, sea por un deficiente sellado de la cámara externa o a través de la más permeable 'piel' superficial.

La evolución de la presión P_i se mide a partir de los 60 s con un sensor de presión comandado por un microprocesador que tiene integrado un cronómetro. El microprocesador almacena la información y efectúa los cálculos para mostrar automáticamente, al fin del ensayo, el valor del coeficiente de permeabilidad al aire kT (m^2). El fin del ensayo acontece cuando la elevación de la presión en la cámara interna P_i

alcanza 20 mbar o, en el caso de hormigones muy impermeables cuando han transcurrido 720 s desde el comienzo del ensayo. Así, dependiendo de la permeabilidad del hormigón, el ensayo puede durar de 2 a 12 minutos. El microprocesador es capaz de almacenar los datos de los ensayos y la información puede ser transferida a una PC para su posterior análisis y registro.

La función de la válvula 1 es restablecer el sistema para un nuevo ensayo ventilándolo con aire a la presión atmosférica.

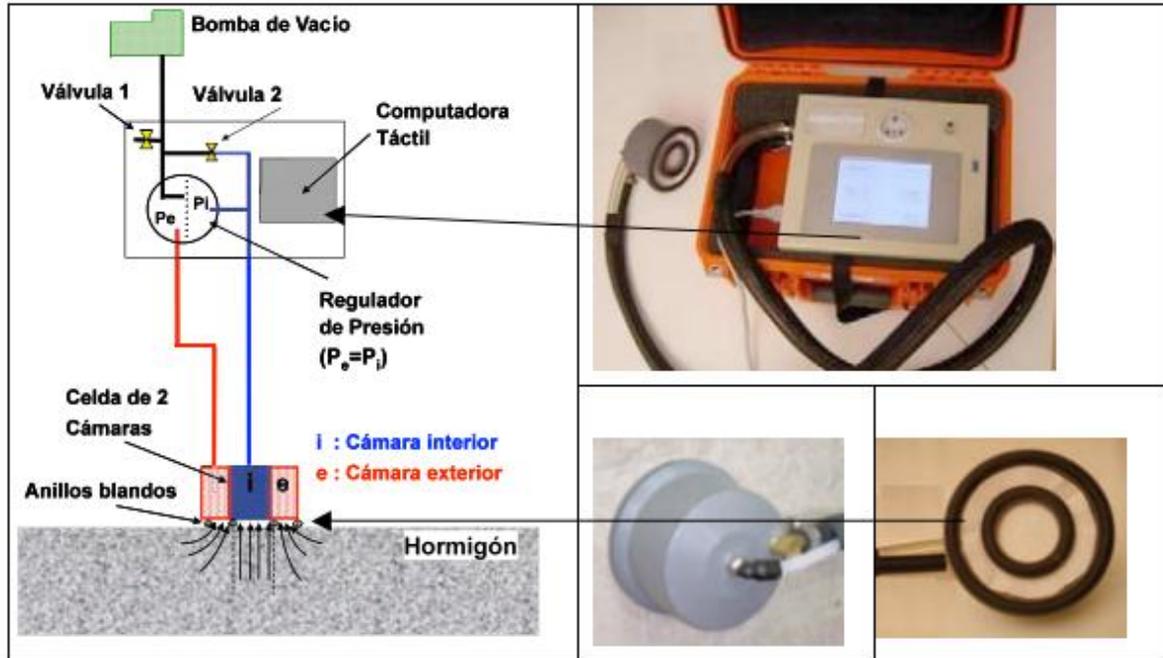


Figura 18: Esquema y detalle del método de Torrent.

10. RESULTADOS

10.1. ENSAYOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

En la tabla 7 se detallan los resultados de los ensayos realizados sobre el hormigón en estado fresco.

Tabla 7: Características de los hormigones estudiados.

Pastón	Relación a/c Real	Asentamiento [cm]	Aire Incorporado [%]	Temp. del Hormigón [°C]	Temp. Ambiente [°C]	Densidad Real [kg/m ³]
0,4 A	0,40	8,0	2,0	26,0	24,5	2339
0,4 B	0,40	11,0	2,1	27,0	25,0	2403
0,5 A	0,49	> 12,0	2,6	27,0	25,5	2332
0,5 B	0,49	8,0	2,3	26,0	25,0	2332
0,5 C	0,49	8,0	2,6	26,0	25,0	2378
0,6 A	0,62	10,0	1,9	21,0	19,0	2351
0,6 B	0,62	9,0	2,0	28,0	29,0	2343
0,7 A	0,69	9,5	1,7	21,0	20,0	2352
0,7 B	0,69	10,0	2,1	29,0	29,0	2319

Todos los parámetros medidos se encuentran dentro de los límites establecidos en el diseño de los hormigones de ensayo. El pastón 0,5 A presentó un asentamiento mayor a 12 cm, superando el valor fijado en la dosificación, con lo cual, se elaboró nuevamente (0,5 B). Este último logró el asentamiento buscado.

En cuanto a las densidades, los valores reales no difirieron en más del 2 % de los valores teóricos.

Por otro lado, el aire incorporado no superó en ningún caso el 3% prefijado.

10.2. ENSAYOS DE COMPRESIÓN

En la tabla 8 se observan los resultados de los ensayos de compresión a 7 y 28 días de los hormigones estudiados. Además se detalla la evolución de la resistencia de cada pastón, y los factores de resistencia (producto entre la resistencia a la compresión y la relación a/c).

Los datos que se presentan corresponden al promedio de resultados de dos probetas.

Tabla 8: Resultados ensayos de compresión.

Pastón - a/c	Resistencia a la Compresión [Mpa]		Evolución de 7 a 28 días [%]	Factor de Resistencia	
	7 días	28 días		7 días	28 días
0,4 A	41,5	41,0	99%	16,6	16,4
0,4 B	36,5	45,0	123%	14,6	18,0
0,5 A	32,0	36,5	114%	16,0	18,3
0,5 B	32,0	38,0	119%	16,0	19,0
0,5 C	27,5	35,0	127%	13,8	17,5
0,6 A	22,0	27,5	125%	13,2	16,5
0,6 B	23,0	26,5	115%	13,8	15,9
0,7 A	20,0	25,0	125%	14,0	17,5
0,7 B	18,5	25,0	135%	13,0	17,5

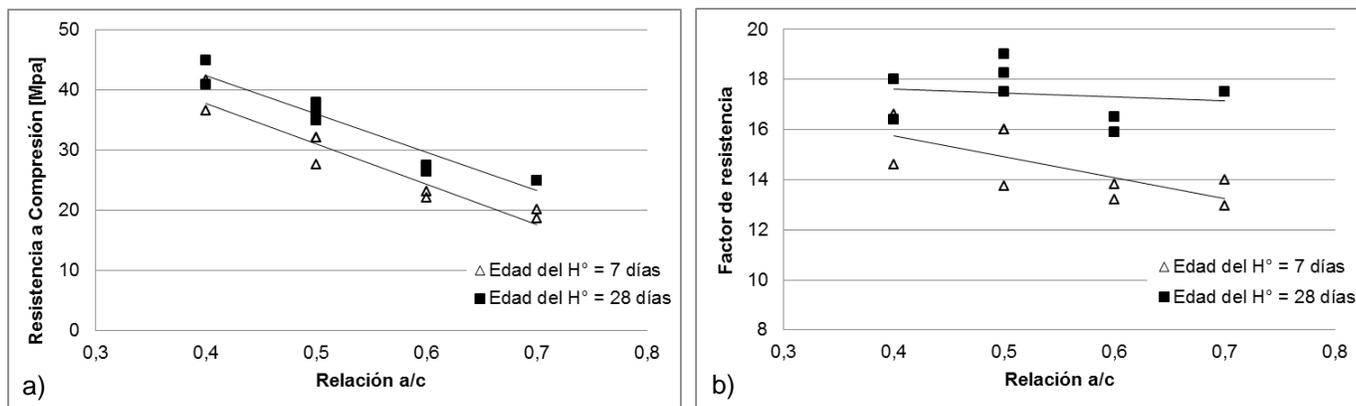


Figura 19: a) Resistencia a la compresión vs. relación a/c. b) Factor de resistencia vs. relación a/c.

Se observa que la resistencia a los 28 días es superior a la obtenida a los 7 días, y que la misma aumenta a medida que la relación a/c disminuye.

El pastón 0,4 A es el único que no incrementó su resistencia luego de los 7 días, lo cual puede deberse a diversos factores de laboratorio, como un mal rectificado de la superficie de la probeta en donde se aplica la carga o el descentrado de la misma en la prensa de ensayos. Se decidió no descartar el pastón, pero se analizó la influencia de los resultados mencionados en los demás ensayos.

10.3. ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN

En la tabla 9 se muestran los resultados de penetración media y máxima correspondiente a los ensayos de penetración de agua a presión en el hormigón endurecido. En las figuras 20a y 20b se observa la variación de dichos valores en función de la relación a/c.

Tabla 9: Resultados ensayos de penetración de agua a presión.

Pastón - a/c	Penetración media [mm]				Penetración máxima [mm]			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
0,4 A	12	19	19	17	19	23	27	23
0,4 B	16	12	12	13	23	16	15	18
0,5 A	18	13	13	15	25	20	16	20
0,5 B	9	11	9	10	11	15	11	12
0,5 C	12	15	11	13	19	23	13	18
0,6 A	11	10	11	11	18	14	18	17
0,6 B	14	15	17	15	18	17	19	18
0,7 A	16	13	12	14	22	16	16	18
0,7 B	23	21	21	10	27	27	24	26

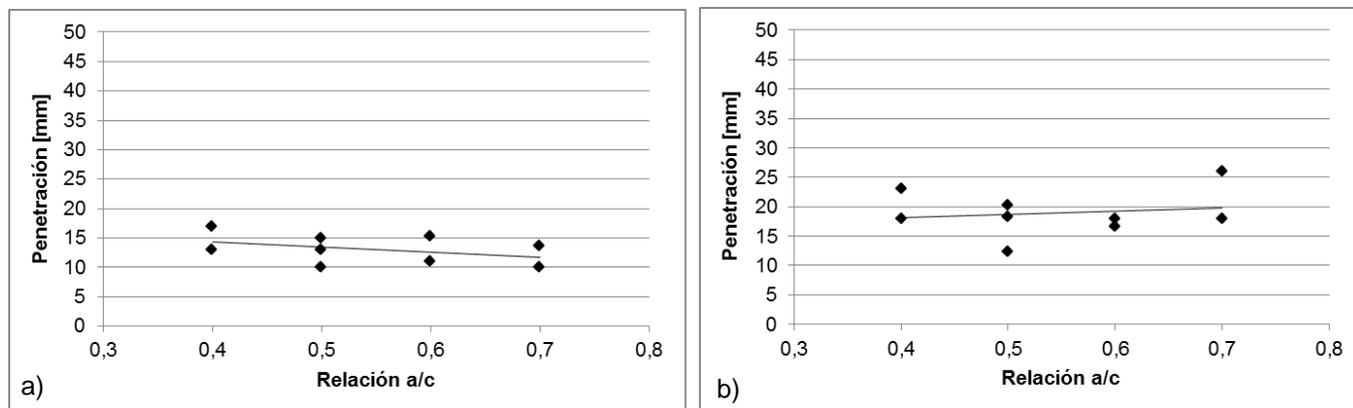


Figura 20: a) Penetración de agua media vs. relación a/c. b) Penetración de agua máxima vs. relación a/c.

En la figura 20 se observa que, independientemente de la relación a/c, la penetración de agua media y máxima no presentó variaciones significativas, con lo cual no es posible establecer una tendencia. Debido a que la metodología de medición depende de la valoración del operario, las diferencias encontradas posiblemente se deban a errores propios del método. Se considera que por estar saturadas las probetas al inicio del ensayo, no se aprecian diferencias entre los diferentes hormigones.

10.4. ENSAYO DE SUCCIÓN CAPILAR

10.4.1. Laboratorio de Estructuras de la UNC

Los resultados de los ensayos de succión capilar obtenidos en el Laboratorio de Estructuras se muestran en la tabla 10.

En las figuras 21 y 22 se representan la capacidad de succión en función de la raíz cuadrada del tiempo y la velocidad de succión respectivamente. Estos datos corresponden al promedio de los ensayos realizados por cada relación a/c.

Tabla 10: Resultados ensayos de succión capilar obtenidos en el Laboratorio de Estructuras.

Pastón - a/c	Capacidad de Succión Capilar Individual [g/m ²]			Capacidad de succión capilar "C" [g/m ²]	Velocidad de succión capilar "S" [g/m ² s ^{0,5}]
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3		
0,4 A	2234	2463	2531	2409	2,77
0,4 B	2109	2120	2095	2108	2,73
0,5 A	3206	2998	2964	3056	4,34
0,5 B	2556	2651	2319	2509	2,99
0,5 C	2933	2803	2967	2901	4,16
0,6 A	4671	4319	4336	4442	6,11
0,7 A	5016	4786	4797	4866	7,75

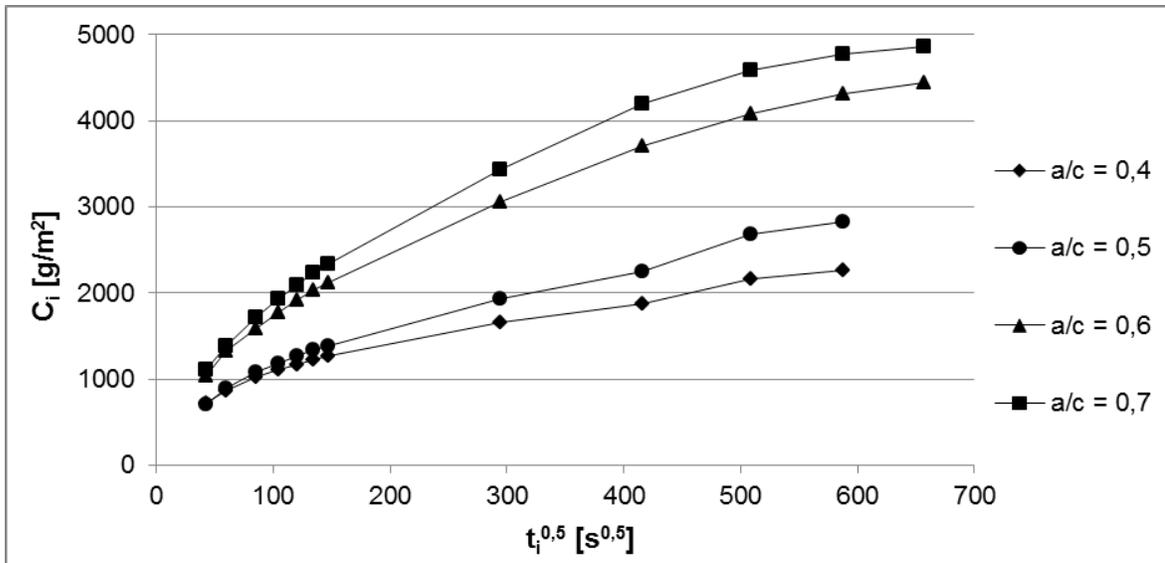


Figura 21: Capacidad de succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo, registrada en el Laboratorio de Estructuras de la FCEFyN - UNC.

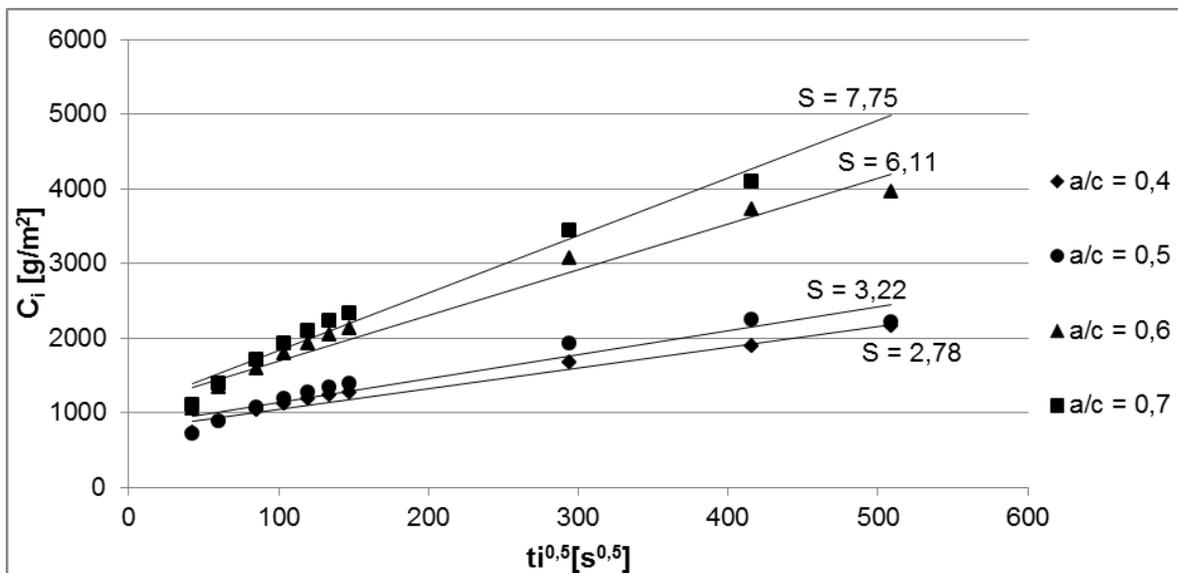


Figura 22: Velocidad de succión capilar, Laboratorio de Estructuras de la FCEFyN - UNC.

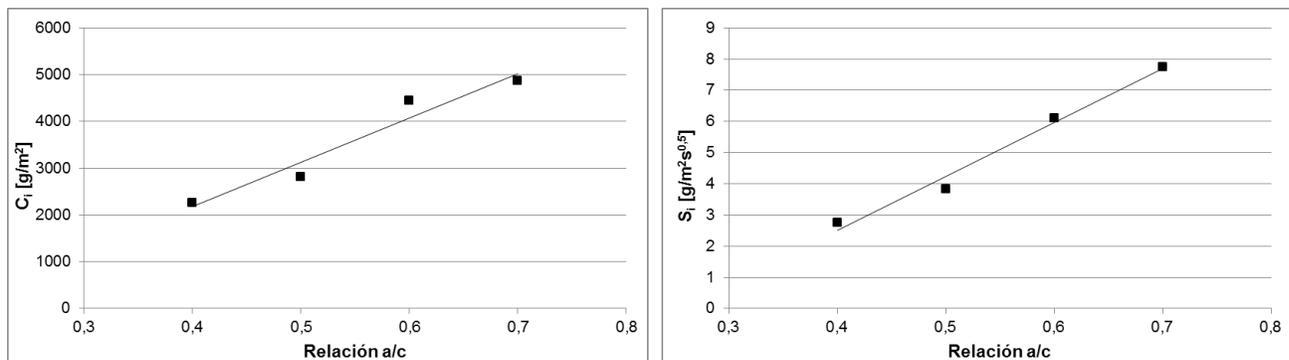


Figura 23: a) Capacidad de succión capilar vs. relación a/c. b) Velocidad de succión capilar vs. relación a/c

En la figura 23a y 23b se observa como la capacidad y la velocidad de succión capilar se incrementan a medida que crece la relación a/c, lo cual resulta lógico, ya que la pasta posee mayor espacio disponible entre los granos de cemento.

10.4.2. Centro Tecnológico y Corporativo de Holcim (CTC)

Los resultados de los ensayos de succión capilar obtenidos en el CTC se muestran en la tabla 11.

En la figura 24 se representa la capacidad de succión en función de la raíz cuadrada del tiempo. Los valores corresponden al promedio de los ensayos realizados por cada relación a/c.

Tabla 11: Resultados ensayos de succión capilar obtenidos en el CTC.

Pastón - a/c	Capacidad de Succión Capilar Individual [g/m ²]			Capacidad de succión capilar "C" [g/m ²]	Velocidad de succión capilar "S" [g/m ² s ^{0,5}]
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3		
0,4 A	3894	3925	4030	3950	5,22
0,4 B	3886	4073	3778	3912	9,84
0,5 A	4581	4156	4220	4319	5,84
0,5 B	1959	1767	1719	1815	2,31
0,5 C	4546	4698	4344	4529	12,31
0,6 A	5621	5518	5866	5668	12,66
0,6 B	6378	6172	6216	6255	17,83
0,7 A	6065	6010	6194	6090	13,82
0,7 B	6467	6610	6407	6495	26,10

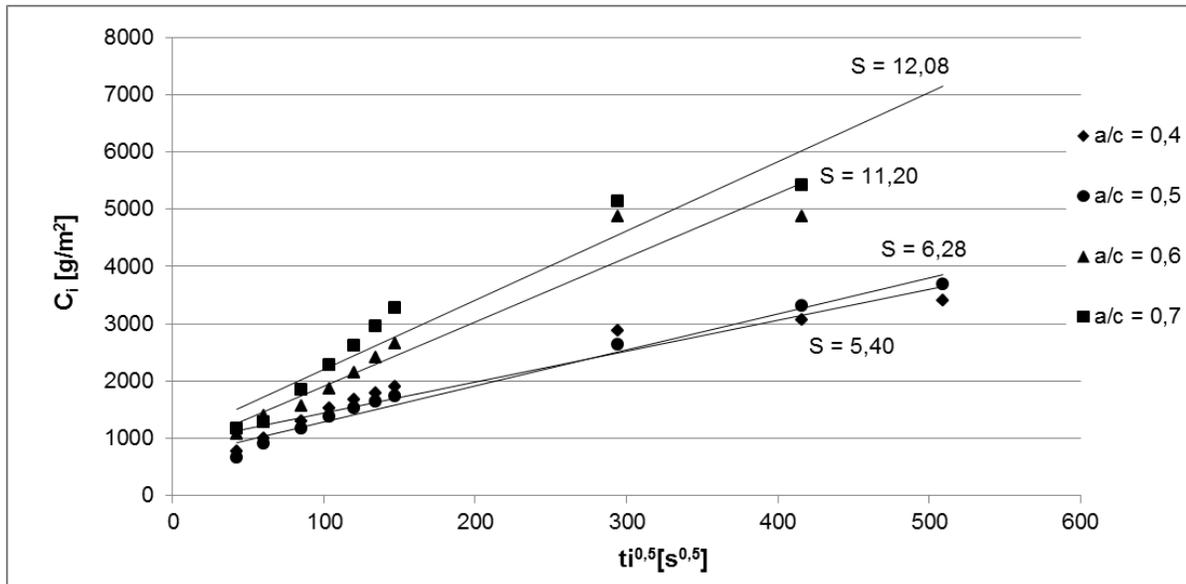


Figura 24: Capacidad de succión capilar en función de la raíz del tiempo, registrada en el CTC - Holcim.

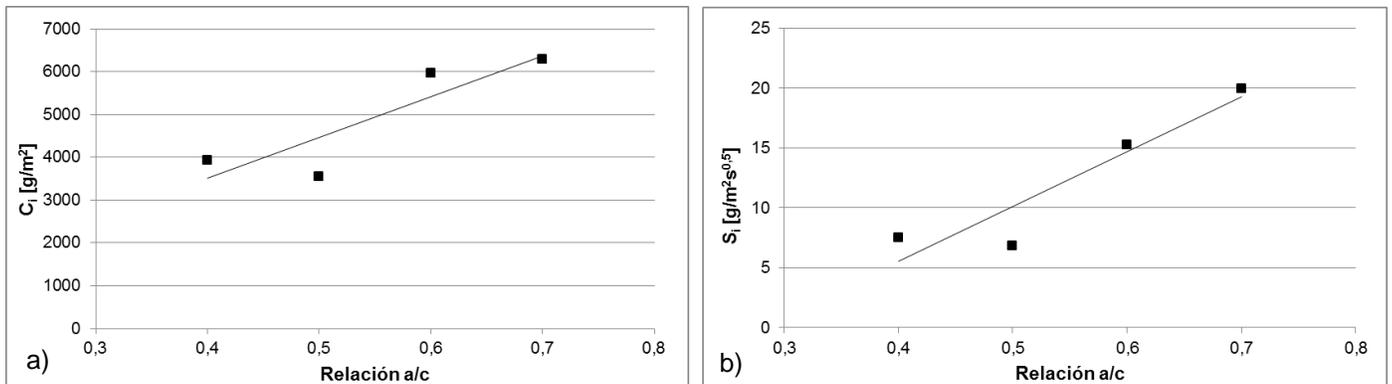


Figura 25: a) Capacidad de succión capilar vs. relación a/c. b) Velocidad de succión capilar vs. relación a/c.

En la figura 25a y 25b se observa como la capacidad y la velocidad de succión capilar se incrementan a medida que crece la relación a/c.

10.4.3. Comparación de resultados

A continuación se muestra un resumen de los resultados de los ensayos de succión capilar (tabla 12) obtenidos en ambos laboratorios.

Tabla 12: Resumen resultados obtenidos en ambos laboratorios,

Relación a/c	Capacidad de succión capilar "C" [g/m ²]		Velocidad de succión capilar "S" [g/m ² s ^{0,5}]	
	Laboratorio de Estructuras FCEfyN	CTC Holcim	Laboratorio de Estructuras FCEfyN	CTC Holcim
0,4	2259	3931	2,75	7,53
0,5	2822	3555	3,83	6,82
0,6	4442	5962	6,11	15,25
0,7	4866	6292	7,75	19,96

Se pueden observar importantes diferencias en las capacidades (C) y velocidades de succión capilar (S) determinadas en cada laboratorio.

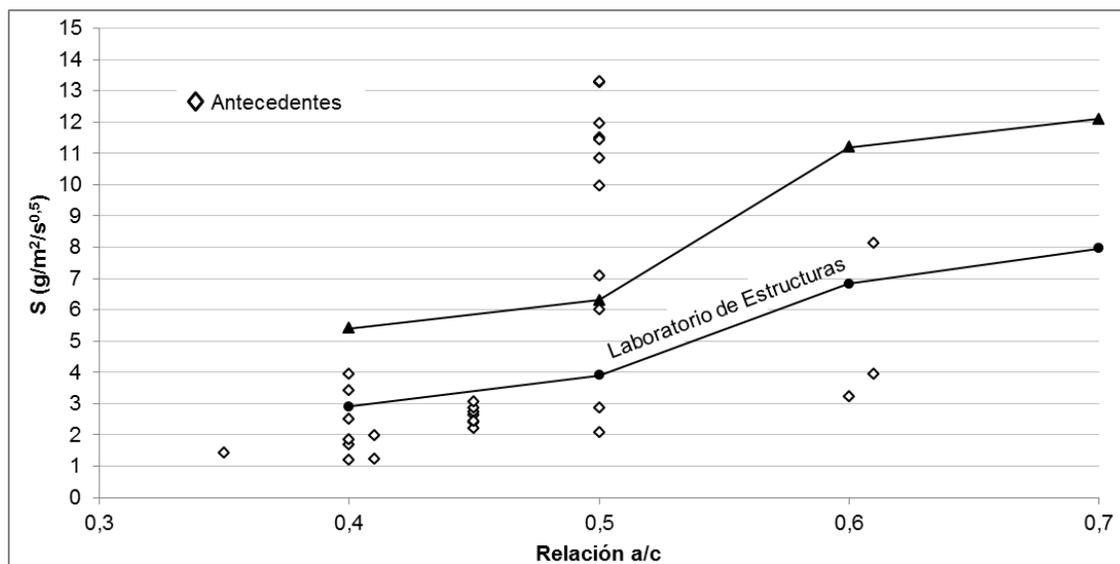


Figura 26: Relación a/c vs. velocidad de succión capilar registradas en distintos laboratorios.

La figura 26 refleja las diferencias obtenidas entre los laboratorios, y entre éstos y otros antecedentes encontrados. Si bien, los resultados evidencian un aumento de la velocidad de succión capilar a mayor relación a/c, los valores difieren significativamente en su magnitud. Esto no permite establecer una relación única entre velocidad de succión y relación a/c y plantea la necesidad de estudiar qué variables no contempladas en la metodología de ensayo pueden originar dichas diferencias.

10.4.4. Análisis de posibles variables que pudieron afectar la reproducibilidad de los ensayos de succión capilar.

A partir de la información disponible se analizaron las posibles causas de dispersión. Se plantearon las diferencias encontradas en la metodología de ensayo entre los dos laboratorios:

- En el Laboratorio de Estructuras se utilizaron como probetas de ensayo las correspondientes a la posición 1, mientras que en el CTC, se utilizaron las correspondientes a la posición 2 (figura 28).

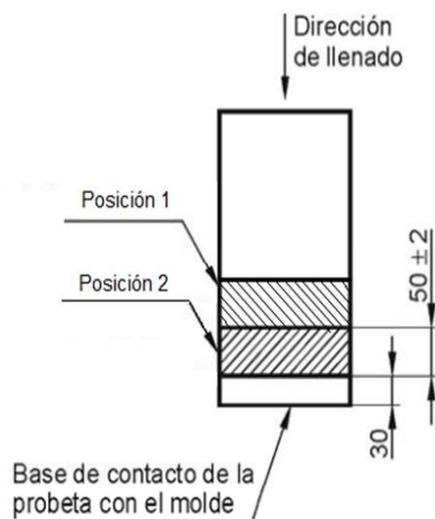


Figura 27: posición de las probetas de ensayo.

- En el Laboratorio de Estructuras, en cada uno de los ensayos, el secado de las probetas se realizó ingresando un mismo número de muestras a la estufa; mientras que en el CTC, el número de probetas fue variable.
- En el laboratorio de estructuras el secado de las probetas se inició inmediatamente después de finalizados los 28 días de curado de las mismas, por considerarse que las probetas se encontraban saturadas. En el CTC, antes de comenzar con el proceso de secado, se sumergieron 72 h en agua según se establece en la norma IRAM 1871.

A partir de las diferencias mencionadas se plantearon las correspondientes hipótesis y se realizó el análisis de cada una de ellas:

- 1) La variación se debe a la calidad del hormigón de cada probeta de ensayo, según la posición ocupada antes del aserrado.
- 2) La variación se debe a la diferencia en las condiciones de secado y, con ello, de humedad, que poseen las probetas en el momento de iniciar el ensayo.
- 3) La variación se debe a las 72 h en que las probetas permanecen en agua previamente al secado.

Hipótesis 1

En el CTC se realizó el ensayo con 2 series de probetas correspondientes a las relaciones a/c 0,6 y 0,7, utilizando las de la posición 1. Luego se repitió el procedimiento empleando las probetas de la posición 2.

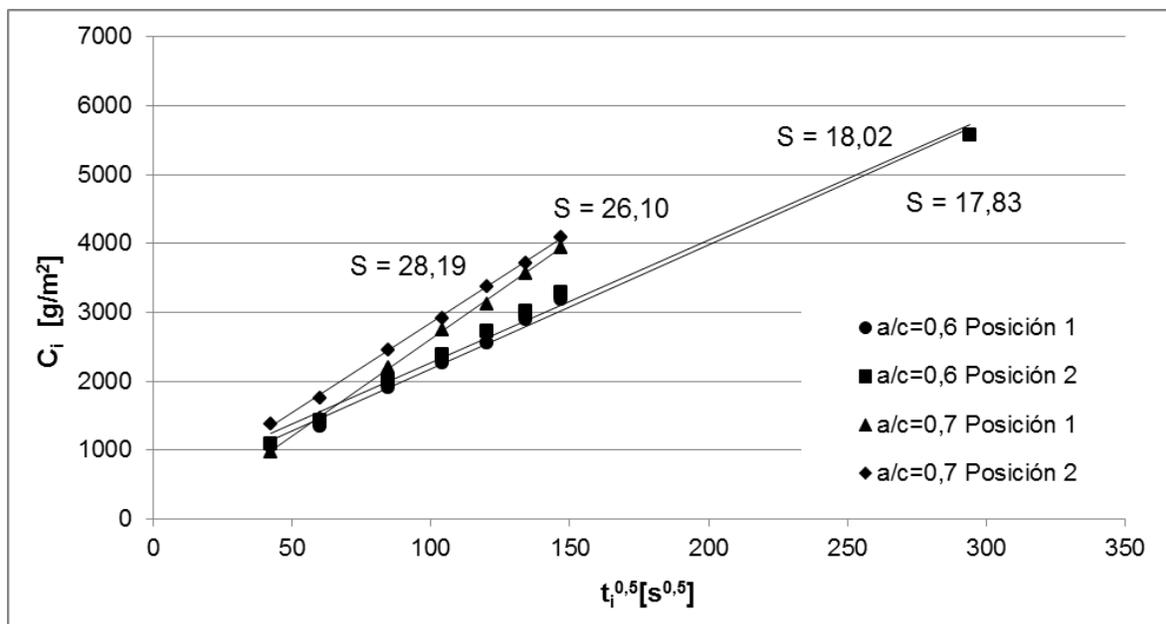


Figura 28: Velocidad de succión capilar registrada en el CTC.

Tabla 13: Resumen resultado hipótesis 1.

Relación a/c	Velocidad de Succión "S" [g/m ² s ^{0,5}]	
	Posición 1	Posición 2
0,6	18,02	17,83
0,7	28,19	26,10

En la figura 29 se observa que independientemente de la posición de la probeta de ensayo, los valores de velocidad de succión capilar son muy similares para una misma relación a/c. Por lo tanto, dicha velocidad no varía en función de la posición que ocupan las probetas antes del aserrado, con lo cual podría descartarse la hipótesis N° 1.

Hipótesis 2

En el Laboratorio de Estructuras, durante el secado y hasta alcanzar masa constante, en la estufa sólo permanecieron las probetas de ensayo, no ingresándose otros materiales ni nuevas probetas.

Se efectuó el control de la pérdida de peso de cada probeta (figura 30), pero no se registró la condición de humedad dentro de la estufa.

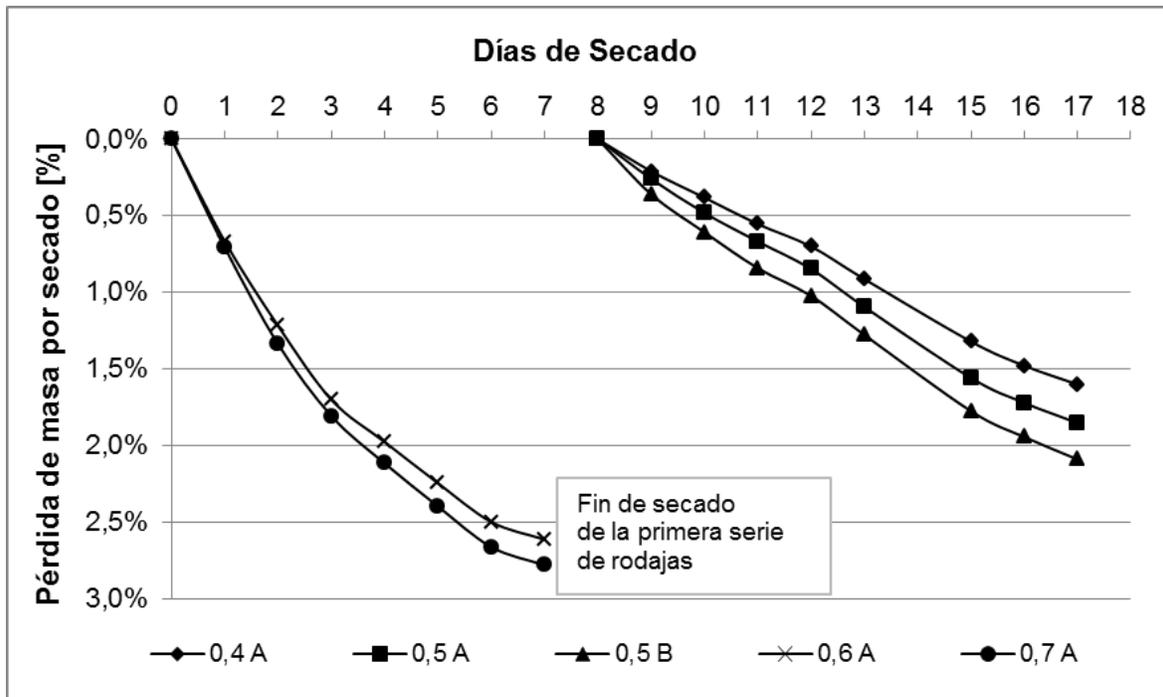


Figura 29: Pérdida de agua en función del tiempo registrada en el Laboratorio de Estructura.

En la figura 31 se observa cómo en el CTC se fueron incorporando nuevas probetas a la estufa, cuando aún había otras muestras en proceso de secado en la misma.

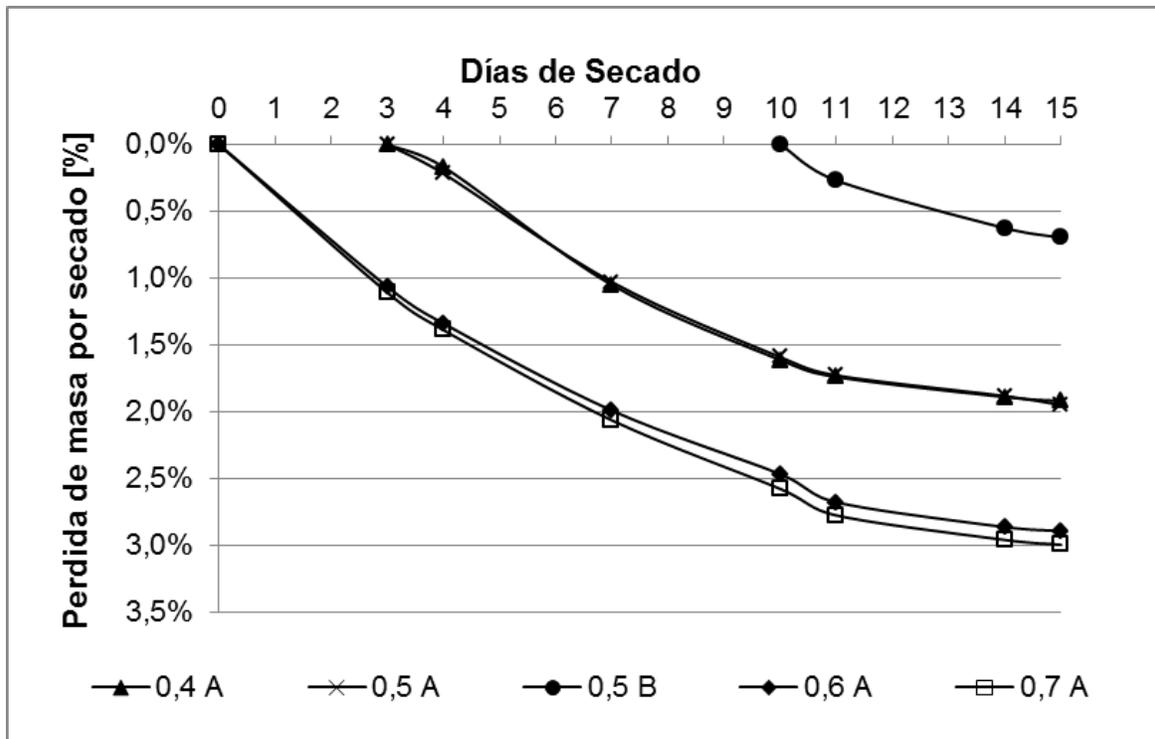


Figura 30: Pérdida de agua en función del tiempo registrada en el CTC.

El tiempo de secado de las últimas series incorporadas a la estufa fue menor al tiempo correspondiente a las primeras, esto, se supone, sería porque al ingresar nuevas probetas húmedas a la estufa, la misma ya se encontraba con una humedad provista por los especímenes anteriores, generando esto, que se alcance la masa de equilibrio más rápidamente y con menor pérdida de masa (agua).

Es interesante observar que, independientemente del laboratorio, de la relación a/c, de los días de secado y de la forma en que se realizara el secado, todas las probetas que se encontraban en una estufa en un momento determinado alcanzaron su masa de equilibrio al mismo tiempo.

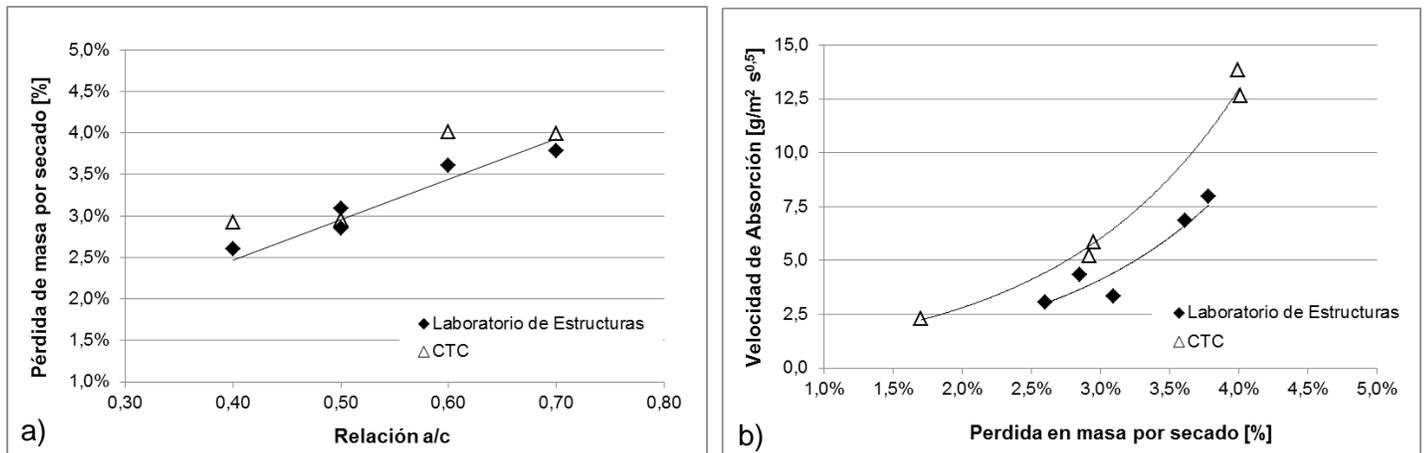


Figura 31: a) Pérdida en masa durante el secado expresada en porcentaje, en función de la relación a/c para ambos laboratorios. b) Velocidad de succión capilar vs. pérdida de masa por secado, registrada en ambos laboratorios.

Analizando esta información, en la figura 32a, se observa que las pérdidas de masa durante el secado de las probetas de ensayo en ambos laboratorios no presentaron diferencias significativas, por lo que, en principio, el volumen total de agua perdida por secado no habría sido la diferencia. Como se observa en la figura 32b, la misma pérdida de masa por secado dio diferentes velocidades de absorción según el laboratorio, por lo que esta pérdida no explica por sí misma las diferencias encontradas en la velocidad de succión capilar. Sin embargo, también se observa que la pérdida de humedad, y por consiguiente la humedad residual en la probeta al inicio de la absorción, pueden impactar fuertemente en el resultado.

Hipótesis 3

En el Laboratorio de Estructuras se repitió el ensayo de dos de las series, sumergiendo las probetas 72 h en agua de las piletas de curado. Se eligieron para las repeticiones los dos valores extremos de relación a/c 0,4 y 0,7. Luego se compararon los resultados con los obtenidos en el laboratorio 2.

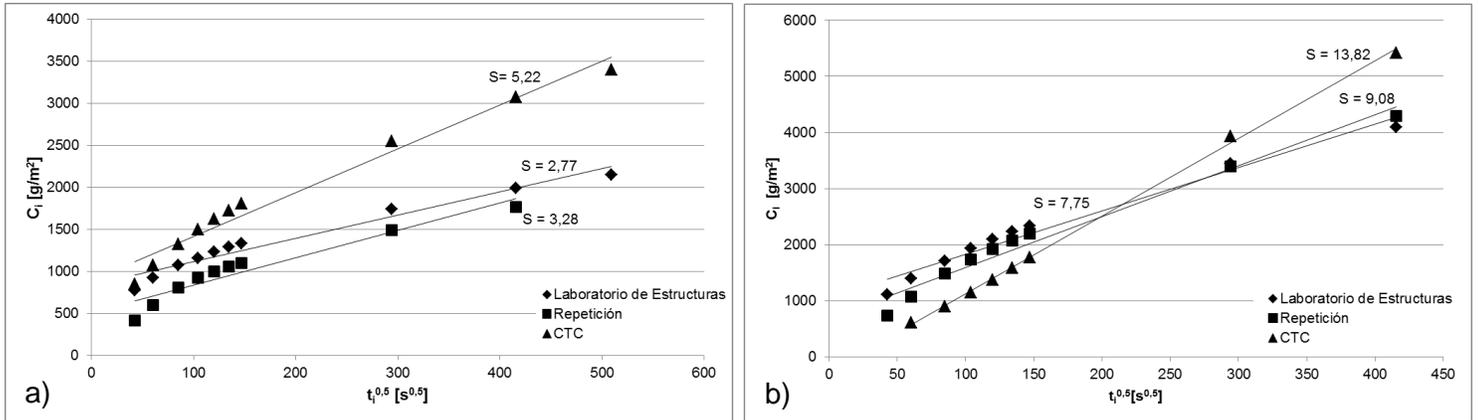


Figura 32: a) Velocidad de succión capilar para relación a/c = 0,4. b) Velocidad de succión capilar para relación a/c = 0,7.

Tabla 14: Resumen resultados hipótesis 3.

Relación a/c	Velocidad de Succión "S" [g/m ² s ^{0,5}]		
	CTC	Lab de Estructuras	Repetición
0,4	5,22	2,77	3,28
0,7	13,82	7,75	9,08

Se observa que los resultados obtenidos inicialmente en el laboratorio 1 y los obtenidos en la repetición son muy similares. Si bien es necesario contar con un mayor número de repeticiones, se puede pensar que el hecho de haber sumergido las probetas en agua, previamente al secado, no fue el factor que generó la diferencia de resultados entre los dos laboratorios, con lo cual podría descartarse la hipótesis N° 3

10.5. Ensayo de Permeabilidad al Aire

Sobre el total de las probetas utilizadas en el ensayo de succión capilar se midió la permeabilidad al aire, empleando el método de Torrent.

En las tablas 15 se observan los valores unitarios y promedios del coeficiente de permeabilidad al aire kT. En función de sus magnitudes, se clasifica a los distintos hormigones según lo expresado en la tabla 17.

Tabla 15: Resultados ensayos permeabilidad al aire. Laboratorio de Estructuras.

Pastón - a/c	Valores unitarios			Valor Kt [10^{-16} m ²]	Permeabilidad
	kT [10^{-16} m ²]	kT [10^{-16} m ²]	kT [10^{-16} m ²]		
0,4 A	0,080	0,066	0,050	0,065	Baja
0,5 A	0,090	0,170	0,156	0,139	Moderada
0,5 B	0,080	0,111	0,122	0,104	Moderada
0,5 C	0,062	0,153	0,149	0,121	Moderada
0,6 A	0,104	0,106	0,161	0,124	Moderada
0,6 B	1,145	1,513	1,873	1,510	Alta
0,7 A	0,255	0,272	0,331	0,286	Moderada
0,7 B	0,609	0,501	0,740	0,617	Moderada

Tabla 16: Resultados ensayo permeabilidad al aire. CTC.

Pastón - a/c	Valores unitarios			Valor Kt [10^{-16} m ²]	Permeabilidad
	kT [10^{-16} m ²]	kT [10^{-16} m ²]	kT [10^{-16} m ²]		
0,4 A	0,657	0,733	0,630	0,673	Moderada
0,4 B	0,194	0,112	0,114	0,140	Moderada
0,5 A	0,719	0,709	0,631	0,686	Moderada
0,5 B	0,607	0,428	0,520	0,518	Moderada
0,5 C	0,311	0,252	0,14	0,234	Moderada
0,6 A	1,476	1,112	1,803	1,464	Alta
0,6 B	1,067	0,806	1,196	1,023	Alta
0,7 A	2,586	3,183	2,818	2,862	Alta
0,7 B	3,377	3,376	5,112	3,955	Alta

Tabla 17: Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función de kT.

Clase	kT (10^{-16} m ²)	Permeabilidad
PK1	< 0,01	Muy Baja
PK2	0,01 - 0,1	Baja
PK3	0,1 - 1,0	Moderada
PK4	1,0 - 10,0	Alta
PK5	> 10,0	Muy Alta

En la figura 34a se muestra la variación del coeficiente de permeabilidad kT en función de la relación a/c. Luego se relacionó dicho coeficiente con la velocidad de succión capilar para evaluar si existe una correlación entre ambos parámetros (figura 34b).

Tabla 18: Comparación de resultados.

Pastón - a/c	kT [10 ⁻¹⁶ m ²]		Velocidad de Succión "S"	
	Laboratorio de Estructuras FCEFyN	CTC	Laboratorio de Estructuras FCEFyN	CTC
0,4 A	0,065	0,673	2,770	5,22
0,4 B	-	0,140	2,730	9,84
0,5 A	0,139	0,686	4,340	5,84
0,5 B	0,104	0,518	3,000	2,31
0,5 C	0,121	0,234	4,160	12,31
0,6 A	0,124	1,464	6,110	12,66
0,6 B	1,510	1,023	-	17,83
0,7 A	0,286	2,862	7,750	13,82
0,7 B	0,617	3,955	-	26,10

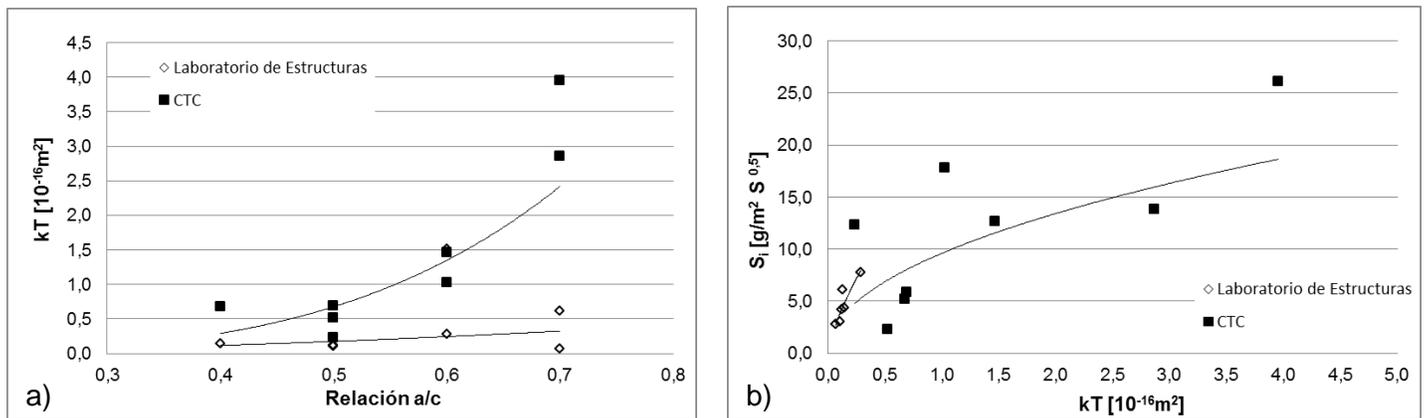


Figura 33: a) kT vs. relación a/c. b) Velocidad de succión capilar vs. kT.

Los resultados expresados en la figura 34a evidencian un aumento de la permeabilidad al aire a mayor relación a/c, al igual que ocurrió con la velocidad de succión capilar. Sin embargo, se observa una gran dispersión, lo cual no permite establecer una relación única entre permeabilidad y relación a/c.

Si bien se observan valores con gran dispersión, se debe tener en cuenta que el método se especifica para controlar la calidad del hormigón en estructuras terminadas. El ensayo afectó una determinada profundidad de hormigón que en ocasiones superó los 5 cm de espesor de las muestras utilizadas, con lo cual se puede atribuir a este factor las variaciones encontradas.

La figura 34b muestra como aumenta la velocidad de succión capilar a medida que se incrementa el coeficiente de permeabilidad kT, permitiendo establecer una buena correlación entre ambos parámetros.

11. CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos, se pueden expresar las siguientes conclusiones:

- La penetración del agua a presión no presentó una tendencia definida, ya que tanto los valores medios como los máximos fueron muy similares entre sí, independientemente de la relación a/c. Esto indicaría que hormigones de muy distinta calidad presentan la misma permeabilidad, lo cual no resulta lógico.

Por los motivos expresados, creo que la metodología indicada en la norma IRAM 1554 para el ensayo de penetración de agua a presión no es útil para evaluar la durabilidad del hormigón. Se requiere la revisión de dicha norma, y en principio, fijarse métodos de acondicionamiento de las probetas previo al ensayo.

- La velocidad de succión capilar aumenta a mayor relación a/c, sin embargo, no puede establecerse una correlación única entre ambos parámetros, debido a la alta dispersión de este ensayo en los antecedentes encontrados y los estudios realizados en este trabajo.

Las repeticiones efectuadas indican, en principio, que la variación podría deberse a la diferencia en las condiciones de secado, y con ello, de humedad que poseen las probetas en el momento de iniciar la absorción. Sin embargo, es preciso realizar un análisis más profundo de las diferentes variables que pueden afectar el ensayo.

- Es necesaria la revisión de las metodologías de ensayo indicadas en las normas IRAM 1554 y 1871 por la necesidad de conocer la real calidad del hormigón y, además, por los impactos contractuales que pudieran tener resultados dispares.

- Los valores del coeficiente de permeabilidad al aire kT , obtenidos en el método de Torrent, presentaron una buena correlación con los resultados del ensayo de succión capilar. Además, se estudiaron otros antecedentes donde se observó que dicho coeficiente también se correlaciona muy bien con otros métodos para medir fenómenos de transporte en el hormigón, como la permeabilidad al oxígeno y la migración de cloruros.

Se puede concluir, entonces, que el valor de kT es un buen indicador de durabilidad frente a la penetración de agentes agresivos a las estructuras, con la ventaja de ser más rápido y totalmente no destructivo.

12. BIBLOGRAFIA

- CIRSOC 201-2005. (2005). Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. INTI. Buenos Aires. 452 p.
- L. Fernández Luco. (Octubre 2001). “La durabilidad del Hormigón: su relación con la estructura de poros y los mecanismos de transporte de fluidos”. Durabilidad del Hormigón Estructural, XIV Reunión Técnica AATH. 306 p.
- Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. (2012). Ese material llamado hormigón.
- PCA Portland Cement Association. Diseño y control de mezclas de concreto. ´
- GEHO-CEB Grupo Español del Hormigón. Durabilidad de estructuras de hormigón. Guía de diseño CEB.
- Germán Hermida. (2013). “Hormigón de baja permeabilidad, algo más que disminuir la razón A/C”. Hormigonar 30. 41 p.
- P.K Mehta. 1968. “Concreto, Estructura, Propiedades y Materiales”.
- Y. A. Villagrán Zaccardi, V. L. Taus, A. A. Di Maio, A. Piñtteri. Relación entre la velocidad de succión capilar y la velocidad de secado de probetas de hormigón”. V Congreso Internacional y 19ª Reunión Técnica de la AATH.
- Y. A. Villagrán Zaccardi, C. J. Zega, M. E. Sosa. “¿Cuán apto es el método para medir velocidad de succión capilar cuando es aplicado a hormigones de muy baja capilaridad?”.
- Cristian Sakurai. (2010). Absorción por Succión Capilar en el Hormigón Enduracido - LEMAC UNLP.
- Francisco Rios Merino. Efecto en la impermeabilidad de hormigones con un alto contenido de finos.
- Sika. Hormigón impermeable, una mirada reciente. 32 p.
- Bizzotto, Marcela B.- Astori, Raúl E.- Sanguinetti, Bibiana M. (2006). Determinación de la absorción capilar en hormigones de alto desempeño elaborados con materiales de la región NEOA.
- ICPA. (octubre 1990). Importancia de la permeabilidad en los hormigones. Como elaborar hormigones menos permeables y mas durables.
- IRAM 1627. (1997). Agregados. Granulometría de los agregados para hormigones. 23 p.
- IRAM 1536. (1978). Hormigón fresco de cemento portland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco cono. 8 p.
- IRAM 1602 – Parte I. (1988). Hormigón de Cemento Portland. Método por presión para la determinación del contenido de aire en mezclas frescas de hormigones y morteros – Método A. 12 p.
- IRAM 1534. (2004). Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral. 15 p.

- IRAM 1546. (2013), Hormigón de Cemento. Método de ensayo de compresión. 13 p.
- IRAM 1554. (1983). Hormigón de cemento portland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido. 13 p.
- IRAM 1871. (2004). Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido. Primera edición. 12 p.