

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA  
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS FÍSICAS  
Y NATURALES



LA PERMEABILIDAD AL AGUA  
COMO PARÁMETRO PARA  
EVALUAR LA DURABILIDAD  
DEL HORMIGÓN - PARTE I  
PRACTICA PROFESIONAL SUPERVISADA

2014

AUTORA: MATTIO, MARÍA EUGENIA

TUTORA: IRICO, PATRICIA

SUPERVISOR EXTERNO: LOPEZ, RAÚL



## 1. AGRADECIMIENTOS

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

- Ing. Patricia Irico.
- Ing. Raúl López.
- Marcelo Tissera.
- 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 201-2005 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). 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 difieren significativamente en su magnitud 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
3.	ÍNDICE GENERAL .....	3
4.	ÍNDICE DE FIGURAS .....	5
5.	ÍNDICE DE TABLAS .....	7
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
7.1.1.	Influencia del Contenido de Agua en las Propiedades del Hormigón .....	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 .....	27
9.1.	CONFECCIÓN DE PASTONES .....	27
9.1.1.	Equipo .....	27
9.1.2.	Procedimiento.....	27
9.2.	ENSAYOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO .....	28
9.2.1.	Asentamiento (Cono de Abrams).....	28
9.2.2.	Temperatura.....	29



9.2.3.	Aire Incorporado .....	29
9.2.4.	Densidad .....	30
9.3.	MOLDEO Y CURADO DE PROBETAS .....	31
9.3.1.	Número y Tamaño de Probetas .....	31
9.4.	ASERRADO DE PROBETAS .....	32
9.5.	PREPARACIÓN DE LAS BASES DE PROBETAS PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN.....	33
9.6.	ENSAYOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO .....	34
9.6.1.	Ensayo de Compresión .....	34
9.6.2.	Ensayo de Penetración de Agua a Presión.....	36
9.6.3.	Ensayo de Succión Capilar .....	38
9.6.4.	Ensayo de Permeabilidad al Aire .....	40
10.	RESULTADOS.....	43
10.1.	ENSAYOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO .....	43
10.2.	ENSAYO DE COMPRESIÓN .....	43
10.3.	ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN.....	44
10.4.	ENSAYO DE SUCCIÓN CAPILAR .....	45
10.4.1.	Comparación con Antecedentes Encontrados.....	47
10.4.2.	Análisis del Secado de las Probetas .....	48
10.5.	ENSAYO DE PERMEABILIDAD AL AIRE .....	49
11.	CONCLUSIONES .....	51
12.	BIBLOGRAFIA .....	52



#### 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) Relaciones 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 relación 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 relación 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: Curvas límites IRAM 1627 y curva de la mezcla. ....	24
Figura 11: Relación a/c vs. resistencia del hormigón a 28 días. ....	26
Figura 12: Ensayo cono de Abrams. ....	29
Figura 13: Aparato de Washington.....	30
Figura 14: Curado de probetas. ....	32
Figura 15: Usos de las probetas de ensayo (unidades en mm).....	33
Figura 16: Aserrado de las probetas de ensayo.....	33
Figura 17: Preparación de las bases de probetas. ....	34
Figura 18: Compresión de probetas.....	35
Figura 19: Tipos de roturas típicas.....	36
Figura 20: Equipo de penetración de agua a presión.....	37
Figura 21: Rotura de probetas y mediciones.....	38
Figura 22: Ensayo de succión capilar. ....	39
Figura 23: Gráfico de succión capilar.....	40
Figura 24: Gráfico de velocidad de succión capilar. ....	40
Figura 25: Aparato de Torrent.....	41
Figura 26: a) Resistencia a la compresión vs. relación a/c. b) Factor de resistencia vs. relación a/c. ....	44
Figura 27: a) Penetración de agua media vs. relación a/c. b) Penetración de agua máxima vs. relación a/c.....	45
Figura 28: Capacidad de succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo.....	46
Figura 29: Velocidad de succión capilar.....	46



Figura 30: a) Capacidad de succión capilar vs. relación a/c. b) Velocidad de succión capilar vs. relación a/c. .... 47

Figura 31: Relación a/c vs. velocidad de succión capilar en antecedentes encontrados. . 47

Figura 32: Pérdida de agua en función del tiempo. .... 48

Figura 33: a)  $kT$  vs. relación a/c. b) Velocidad de succión capilar vs.  $kT$ ..... 50



## 5. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación por tamaño de los poros de la pasta de cemento. ....	14
Tabla 2: Características del cemento. ....	23
Tabla 3: Propiedades de los agregados. ....	23
Tabla 4: Granulometría de los agregados y la mezcla. ....	24
Tabla 5: Características del aditivo. ....	25
Tabla 6: Dosificación y características de la mezcla. ....	26
Tabla 7: Ensayos a realizar con cada probeta. ....	31
Tabla 8: Número de capas y varillados. ....	31
Tabla 9: Tiempo de mantenimiento de presiones. ....	37
Tabla 10: Características de los hormigones estudiados. ....	43
Tabla 11: Resultados ensayos de compresión. ....	43
Tabla 12: Resultados ensayos de penetración de agua a presión. ....	44
Tabla 13: Resultados ensayos de succión capilar. ....	45
Tabla 14: Resumen de resultados obtenidos. ....	46
Tabla 15: Resultados ensayos de permeabilidad al aire. ....	49
Tabla 16: Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función del coeficiente $kT$ . ..	49
Tabla 17: Comparación de resultados. ....	49





## 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  $4 \text{ g}/(\text{m}^2\text{s}^{1/2})$ , 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.



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

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

Además se realizaron visitas al Centro Tecnológico Corporativo de Holcim para la realización de 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, calibración de instrumentos de medición.
- Estudio de normas IRAM 1554 (penetración de agua a presión) y 1871 (succión capilar).
- 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.

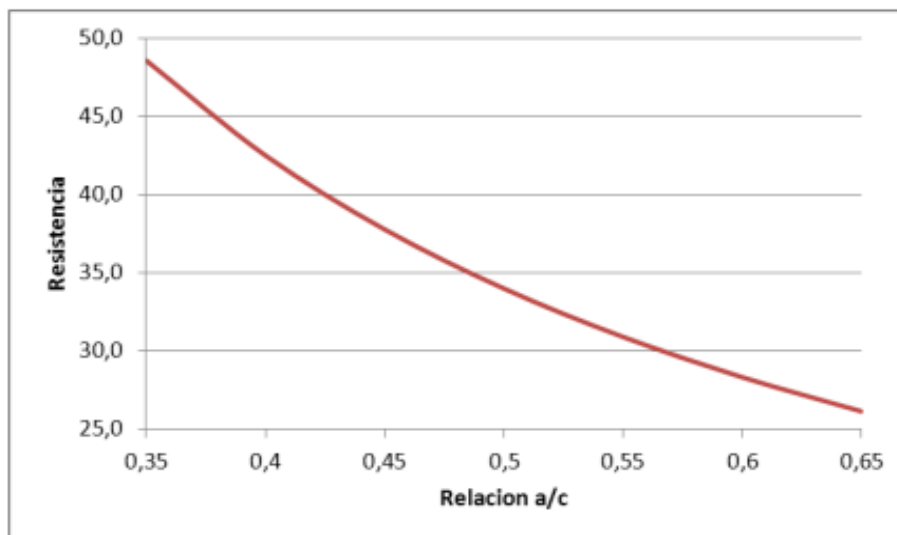


Figura 1: Resistencia vs. relación a/c.

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 ferroaluminatotetracálcico (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.

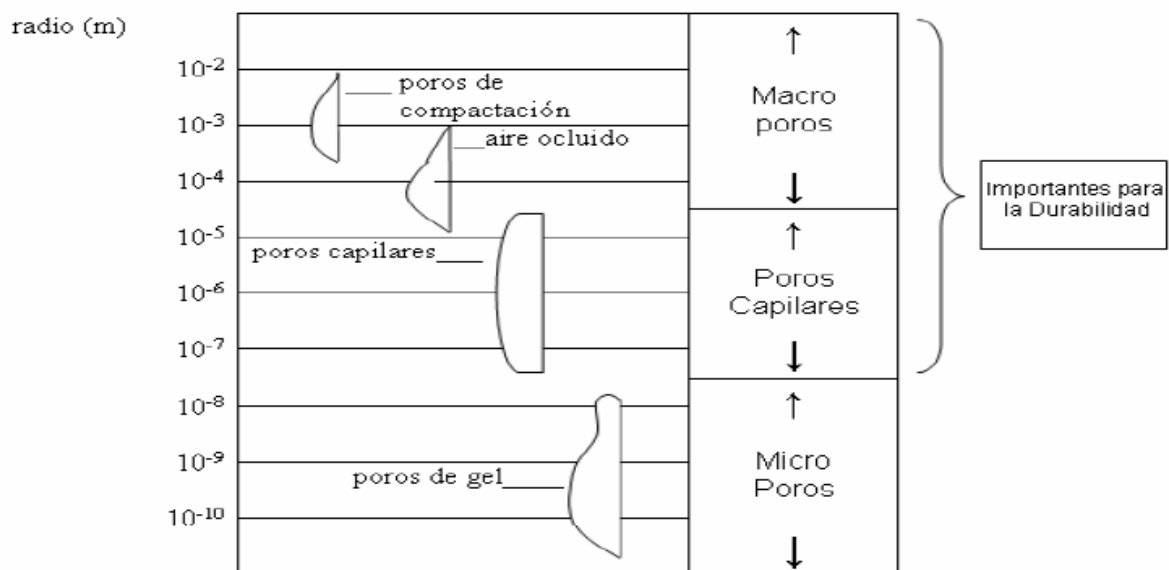


Figura 2: Estructura porosa del hormigón.

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 $\mu\text{m}$	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 0,7 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 0,4, 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.

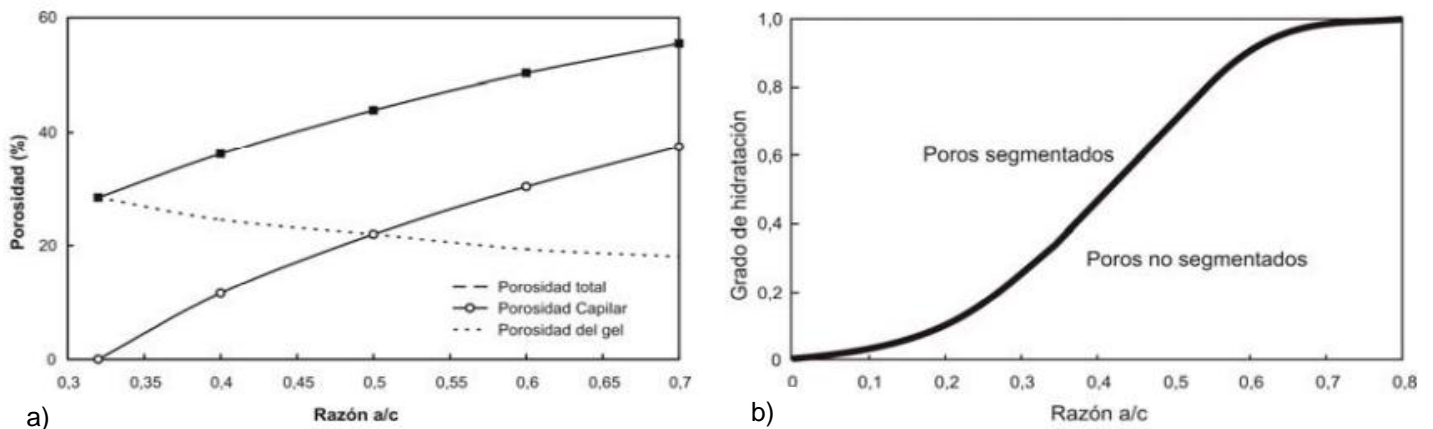


Figura 3: a) Variación de la porosidad en función de la relación a/c. b) Continuidad de los poros capilares en función de la relación a/c.

### 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.

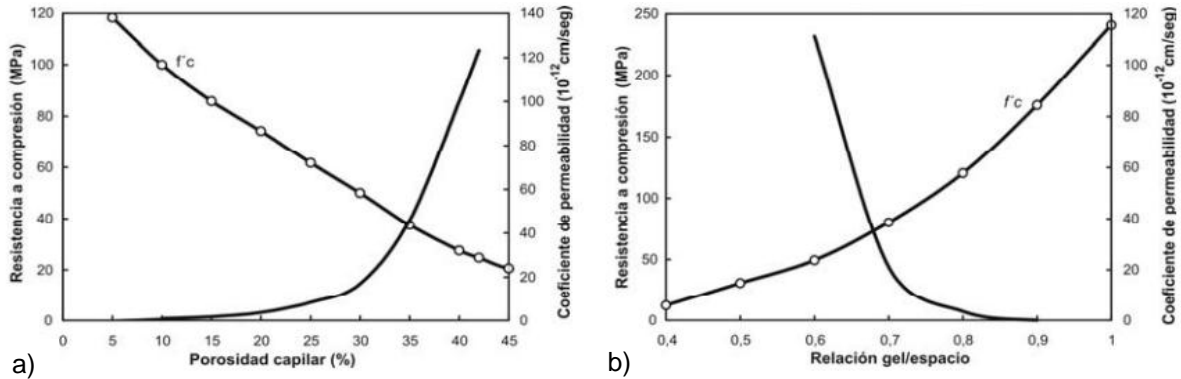


Figura 4: a) Relaciones resistencia - permeabilidad - porosidad capilar. b) Relaciones resistencia - permeabilidad - gel/espacio.

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).

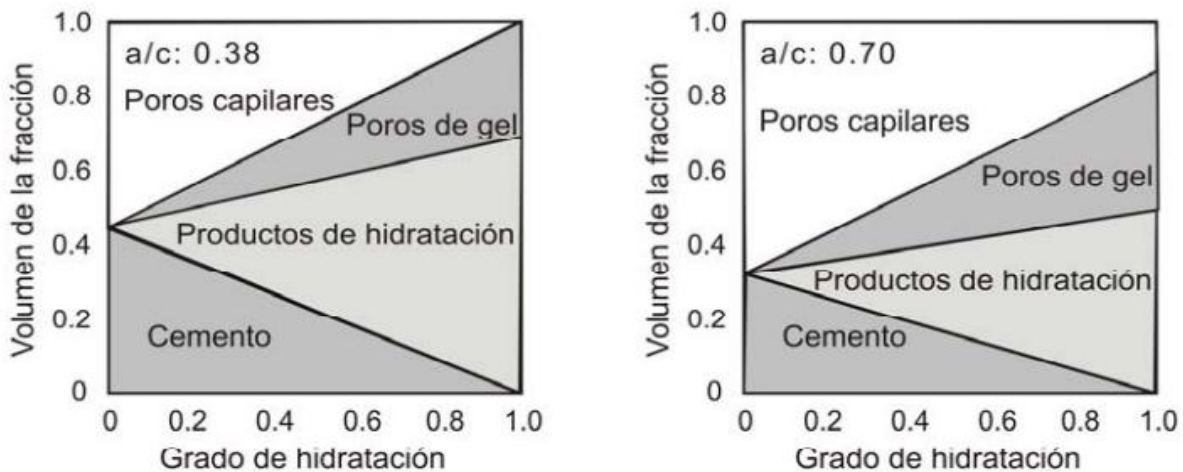


Figura 5: Relación entre la porosidad y el grado de hidratación para pastas con relación a/c de 0,38 y 0,70.

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.

Un hormigón permeable es propenso a su desintegración, porque el agua que penetra en sus poros se expande por congelación sometiendo 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.

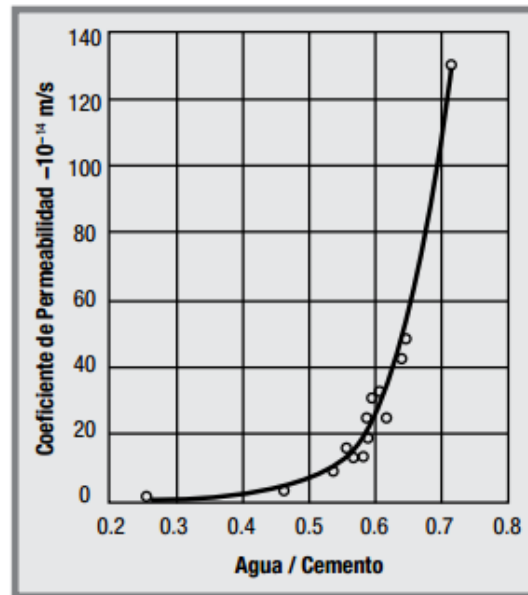


Figura 6: Coeficiente de permeabilidad al agua en función de la relación a/c.

#### 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.

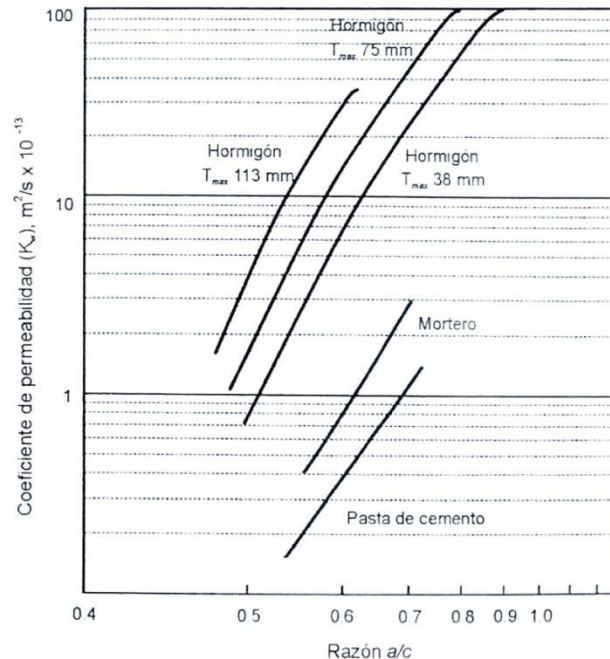


Figura 7: Variación del coeficiente de permeabilidad en función de la relación a/c para hormigones de distinto tamaño máximo, mortero y pasta de cemento.

#### 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:

$$Q = -\frac{KA dP}{\mu dz} \quad \text{Ec. 1}$$

donde Q es el caudal de un fluido de viscosidad cinemática  $\mu$ , 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:

$$\frac{dP}{dz} = \gamma_w \frac{dh}{dz} \quad \text{Ec. 2}$$

donde  $\gamma_w$  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:

$$v = -\frac{K}{\mu_w} \gamma_w \frac{dh}{dz} \quad \text{Ec. 3}$$

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

$$v = -K_w \frac{dh}{dz} \quad \text{Ec. 4}$$

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  $\gamma_w$  y  $\mu_w$ .



### 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:

$$J_x = D_f \frac{dC}{dx} \quad \text{Ec. 5}$$

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  $\text{CO}_2$  y  $\text{O}_2$ .

### 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  $\theta$ , se expresa como  $r = R \cos \theta$ .

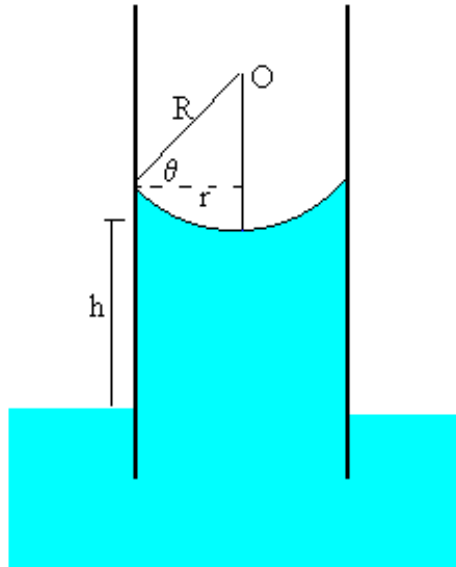


Figura 8: Ascensión del líquido en un tubo capilar.

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:

$$\Delta P = \frac{2\gamma}{R} = \frac{2\gamma}{r} \cos \theta \quad \text{Ec. 6}$$

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

$$\Delta p = \rho gh \quad \text{Ec. 7}$$

donde  $\rho$  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:

$$h = \frac{2\gamma}{rg\rho} \cos \theta \quad \text{Ec. 8}$$

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:

$$v = \frac{r\gamma \cos \theta}{4d\mu} \quad \text{Ec. 9}$$

donde  $d$  es la profundidad de penetración del líquido, y  $\mu$  es la viscosidad del fluido.



Tanto la ecuación 8 como la ecuación 9, 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 (Ec.1) y de Laplace (Ec.6), es posible deducir que el peso de agua absorbida por unidad de superficie ( $W/A$ ) en el tiempo  $t$  se expresa:

$$\frac{W}{A} = S t^{1/2} \quad \text{Ec. 10}$$

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.

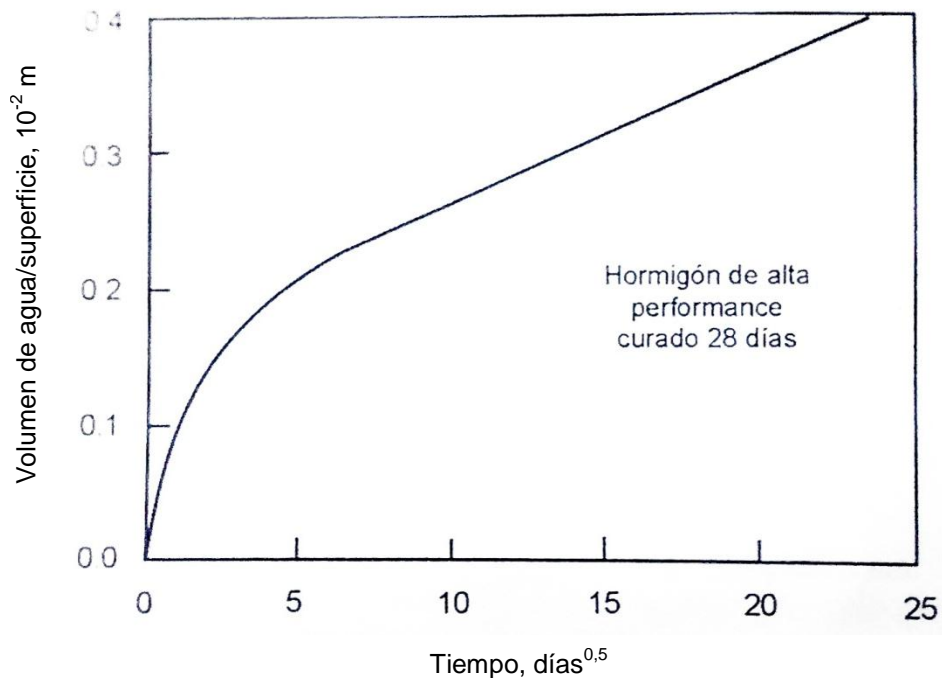


Figura 9: Volumen de agua absorbida por un hormigón en función del tiempo.



## 8. MATERIALES Y DOSIFICACIÓN

Se elaboraron nueve pastones, para los cuales se empleó cemento Portland compuesto (CPC40), agregados convencionales, 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.

En la tabla 2 se detallan los resultados de los ensayos químicos, físicos y mecánicos efectuados sobre el cemento, emitidos por el Centro Tecnológico Corporativo de Holcim. Se observa que todos los parámetros de estudio cumplen con los valores establecidos en la norma IRAM 50000.

Las propiedades y granulometría de los agregados se especifican en las tablas 3 y 4. En la figura 10 puede observarse la curva de la mezcla, comparada con las curvas límites establecidas en la norma IRAM 1627.

Finalmente, en la tabla 5 se muestran las características del aditivo.

Tabla 2: Características del cemento.

Identificación	Cemento Portland Compuesto CPC40 granel ("Filler Calcáreo" / Escoria)		Planta de origen: Malagueño, Córdoba		
<b>Análisis Químicos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Medio</b>	<b>Requisitos IRAM 50000</b>		
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) (IRAM 1504)	%	3,1	≤ 3,5		
Pérdida por calcinación (IRAM 1504)	%	4,2	≤ 14,5		
<b>Ensayos Físicos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Medio</b>	<b>Requisitos IRAM 50000</b>		
Retenido tamiz 75μ (IRAM 1621)	%	1,2	≤ 15,0		
Superficie especif. Blaine (IRAM 1623)	m <sup>2</sup> /Kg	373,0	≥ 250,0		
Expansión en autoclave (IRAM 1620)	%	0,1	≤ 0,8		
Tiempo fraguado inicial (IRAM 1619)	minutos	235,0	≥ 60,0		
<b>Ensayos Mecánicos</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor Medio</b>	<b>Coef. de Variación (%)</b>	<b>Requisitos IRAM 50000</b>	
Resistencia a la compresión (IRAM 1622)	2 días	MPa	27,9	3,7	≥ 10,0
	28 días	MPa	50,6	3,8	≥ 40,0 y ≤ 60,0

Tabla 3: Propiedades de los agregados.

Identificación	Arena Marchisone	Triturado 6-19 Pétreos
<b>Densidad (Kg/m<sup>3</sup>)</b>	2640	2735
<b>Absorción (%)</b>	0,7	0,8





Tabla 4: Granulometría de los agregados y la mezcla.

Identificación		Arena Marchisone	Triturado 6-19 Pétreos	Mezcla
% Tamiz ASTM	% Tamiz IRAM	46,0%	54,0%	100,0%
3"	76,0	100,0	100,0	100,0
2"	50,0	100,0	100,0	100,0
1 1/2"	37,5	100,0	100,0	100,0
1"	25,0	100,0	100,0	100,0
3/4"	19,0	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	4,8	98,4	1,9	46,3
8	2,4	90,4	0,6	41,9
16	1,2	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	0,2	0,5	0,0	0,2
<b>Mf Individuales</b>		3,1	6,6	5,0

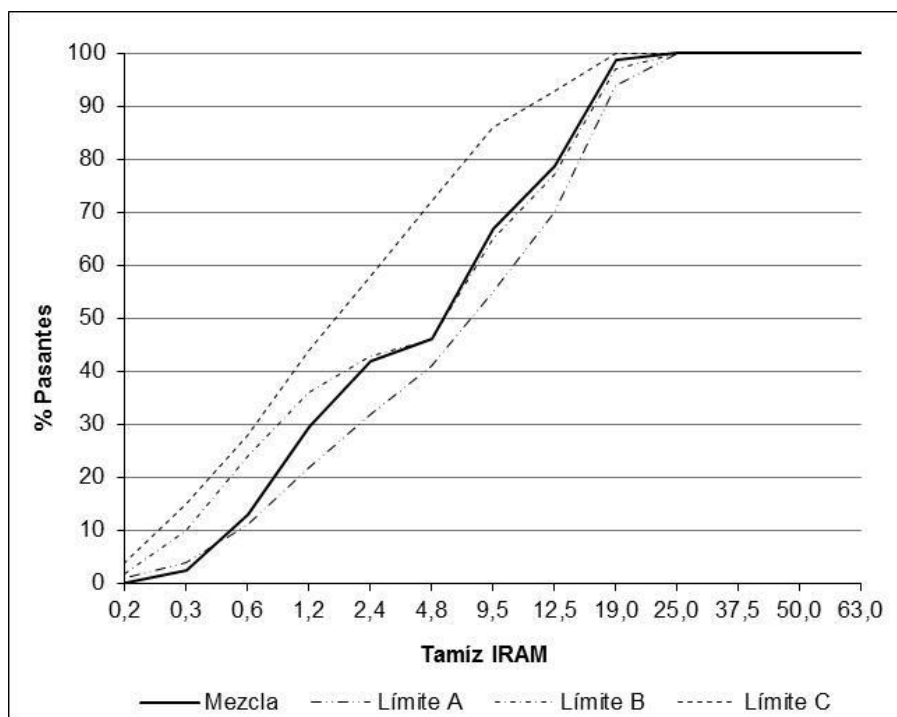


Figura 10: Curvas límites IRAM 1627 y curva de la mezcla.



Se observa que la curva de la mezcla está dentro de las curvas límites establecidas por la norma IRAM 1627.

Tabla 5: Características del aditivo.

<b>Identificación</b>	Sikament-90 E
<b>Descripción</b>	Aditivo polifuncional plastificante y superfluidificante
<b>Ventajas</b>	<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>
<b>Datos Técnicos</b>	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.

En cuanto a la resistencia, el reglamento determina la resistencia especificada a compresión que debe lograrse en función del tipo de hormigón a utilizar. En la figura 11 pueden observarse las relaciones a/c necesarias para alcanzar dichas resistencias, según el tipo de cemento a emplear.

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.

En la figura 6 se observa como el coeficiente de permeabilidad presenta su mayor variación entre las relaciones a/c 0,4 y 0,7.

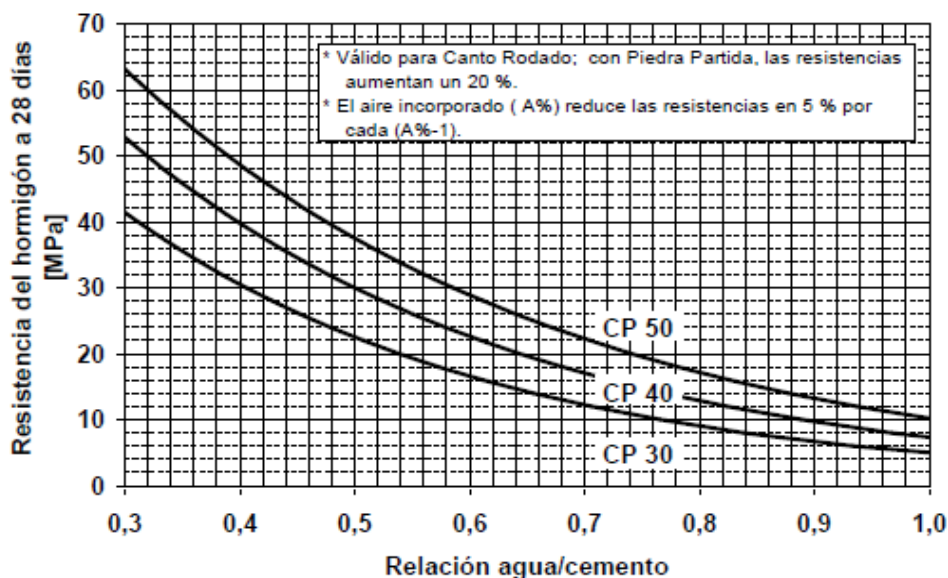


Figura 11: Relación a/c vs. resistencia del hormigón a 28 días.

Se realizaron inicialmente dos pastones de prueba para ajustar la dosificación.

Se elaboró en primer lugar el pastón sin aditivo, correspondiente a la relación a/c 0,7. Resultó un asentamiento muy bajo (5 cm) y se observó, además, que la mezcla contenía gran cantidad de piedra.

Luego se realizó el pastón con relación a/c 0,4, donde se obtuvo un asentamiento mayor al esperado (13,5 cm).

Se efectuaron las modificaciones necesarias en cada dosificación. En la tabla 6 se detallan los valores ajustados con los cuales se desarrollaron los pastones definitivos.

Tabla 6: 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. El pastón correspondiente a la relación 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 llevaron a cabo siguiendo una serie de pasos predeterminados, para homogeneizar el proceso y poder efectuar la comparación de resultados de manera representativa.

#### 9.1.1. Equipo

Se utilizaron bandejas metálicas, balanza, anafe, máquina mezcladora, pala y cuchara.

Antes de comenzar con la elaboración de los pastones, se realizó la calibración de la balanza a utilizar.

#### 9.1.2. Procedimiento

##### Corrección por Humedad de los Agregados

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

Se tomó 1 Kg de cada uno de los materiales en estado natural, se los colocó en bandejas metálicas y se los secó en anafe hasta masa constante.

A continuación 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

- 1) Con la máquina húmeda se incorporó el 100 % de la piedra.
- 2) Se agregó el 100 % del cemento y comenzó a mezclarse.
- 3) Se añadió el 80 % del agua durante el mezclado.
- 4) Se mezcló durante 30 segundos.
- 5) Se incorporó el 100 % de la arena gruesa y se volvió a mezclar durante 30 segundos.
- 6) Se agregó la arena fina y lo que restaba del agua con aditivo, en los casos correspondientes.
- 7) Se mezcló durante 2 minutos, se dejó reposar 2 minutos y se volvió a mezclar otros 2 minutos.

Aclaración: a modo de comprobar que la mezcla obtenida fuera correcta, se pasó una cuchara sobre la misma dentro de la máquina. La superficie debía quedar lisa.



## 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)

Con este ensayo se determinó la consistencia por 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 indicios 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.

#### Equipo

Se utilizó un molde con forma troncocónica recta, con sus dos bases abiertas y paralelas (figura 12), una varilla de acero de punta roma, y una cinta métrica.

#### Procedimiento

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

- 1) Se colocó el molde sobre una bandeja metálica, plana y rígida.
- 2) Se humedeció el molde y la superficie de apoyo.
- 3) El operador se posicionó sobre los soportes que posee el molde con el objeto de que el mismo se encontrara firmemente apoyado sobre la base.
- 4) Se introdujo el hormigón en tres capas de igual volumen, correspondientes a 6,5; 15 y 30 cm de altura respectivamente, compactando con la varilla por punzonado, distribuyendo 25 golpes por capa en forma regular y sin llegar a la capa subyacente (figura 12).
- 5) Se enrasó la superficie y se levantó el molde en forma vertical en aproximadamente 5 segundos. El movimiento no debe ser torsional ni lateral.
- 6) El asentamiento se midió tomando la distancia entre una varilla horizontal colocada sobre el cono y el nivel medio de la cara superior de la masa de hormigón asentado.

Aclaración: Se retiró de la máquina solo el material necesario para llenar el cono.

En los casos en que no se logró el asentamiento se repitió el ensayo. Uno de los pastones no alcanzó la consistencia establecida luego de dos repeticiones, con lo cual se elaboró nuevamente el pastón.

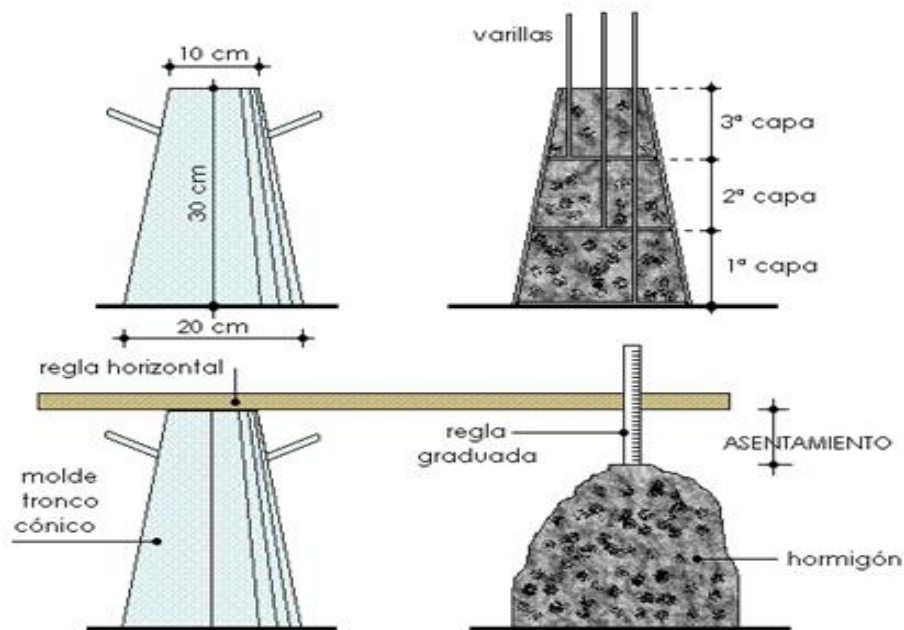


Figura 12: Ensayo cono de Abrams.

### 9.2.2. Temperatura

#### Equipo

Se utilizó un termómetro.

#### Procedimiento

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

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

### 9.2.3. Aire Incorporado

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.

#### Equipo

Se utilizó el aparato de Washington, el cual consta de un recipiente cilíndrico, metálico, y una tapa con una cámara de aire, comunicadas ambas con una válvula (figura 13); una varilla metálica de punta roma y una maza metálica forrada con goma.

Antes de comenzar con la elaboración de los pastones se realizó la calibración del aparato a utilizar.



### Procedimiento

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

1) Se vertió el hormigón fresco dentro del recipiente cilíndrico en tres capas, de aproximadamente la misma altura, y se compactó cada una de ellas con 25 golpes de punzonado, mediante la varilla metálica. Se golpearon suavemente con la maza las paredes exteriores del recipiente, luego de colocada cada capa.

Se enrasó al borde del mismo.

2) Se colocó la tapa y se inyectó aire a la cámara del aparato, a una cierta presión establecida por norma, que se encuentra tabulada en el cuadrante del manómetro.

3) Se abrió la válvula de conexión y, al poner en contacto el aire a presión con el hormigón, se manifestó un descenso del nivel del hormigón debido a la compresión de las burbujas de aire. Este descenso del nivel es proporcional a la cantidad de aire presente en la mezcla.

El aire pasó a ocupar una parte del volumen del recipiente inferior, con lo cual la presión en la cámara de la tapa descendió con respecto a la inicial. Esto quedó en evidencia en el registro del manómetro, cuyo cuadrante está graduado directamente en % de aire incorporado.

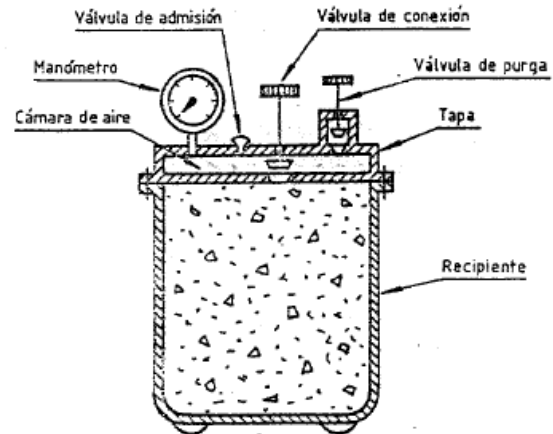


Figura 13: Aparato de Washington.

### **9.2.4. Densidad**

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

#### Equipo

Se utilizó un recipiente de volumen conocido (se empleó el correspondiente al aparato de Washington), y una balanza.

#### Procedimiento

Se pesó el aparato de Washington enrasado. Al conocer el volumen del mismo, se calculó la densidad con la relación peso/volumen.

Se comparó el valor obtenido con el teórico y se controló que no difiriera en  $\pm 2\%$ . 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 aseguró el alcance las propiedades previstas para el hormigón endurecido.



### 9.3. MOLDEO Y CURADO DE PROBETAS

#### 9.3.1. Número y Tamaño de Probetas

Se confeccionaron siete probetas por cada pastón, dos de ellas 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 7 se detallan los ensayos realizados con cada una de ellas.

Tabla 7: Ensayos a realizar con cada probeta.

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

#### Equipo

Se utilizaron moldes cilíndricos, no absorbentes, que mantienen su forma durante el moldeo, de altura igual al doble del diámetro; varillas cilíndricas de compactación, de acero y lisas; y una maza metálica forrada con goma.

#### Procedimiento

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

1) Antes de proceder al moldeo de las probetas, los moldes y sus bases fueron convenientemente aceitados con una delgada película de aceite mineral. La superficie de apoyo era rígida, horizontal y libre de vibraciones.

2) Se mezcló el hormigón con una pala para lograr uniformidad.

3) Se colocó el hormigón dentro de los moldes en el número de capas que correspondían, compactando cada una de ellas el número de veces que se indica en la tabla 8. Al compactar la primera capa, se atravesó con la varilla en todo su espesor, evitando golpear la base. Las introducciones de la varilla se distribuyeron uniformemente sobre la sección transversal del molde. Cada una de las capas siguientes también fueron compactaron en todo su espesor, haciendo penetrar la varilla, además, 20 mm en la capa anterior.

Tabla 8: Número de capas y varillados.

Diámetro del molde (mm)	Diámetro de la varilla (mm)	Número de capas	Números de varillados por capa
100	10	2	25
150	16	3	25

4) Se golpearon los costados del molde en el comienzo de cada capa con la maza, hasta lograr el cierre y la eliminación de los huecos.





El hormigón de la última porción se colocó de manera tal que la superficie superior del molde se llenara con un ligero sobrante, que se eliminó con la compactación de la última capa y el enrasado superficial.

5) Se identificó cada probeta.

6) La superficie se envolvió con una película de polietileno para evitar la evaporación del agua.

7) Durante las primeras  $24 \text{ h} \pm 2 \text{ h}$ , todas las probetas se mantuvieron protegidas de la intemperie bajo condiciones capaces de mantener su temperatura ambiente a  $23 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$ , evitando todo movimiento y pérdida de humedad.

8) Inmediatamente después, las probetas se almacenaron hasta el momento de ensayo, en una pileta con una solución saturada de hidróxido de calcio a la temperatura de  $23 \text{ °C} \pm 2 \text{ °C}$  (figura 14).

Aclaración: antes de comenzar con la elaboración de los pastones se realizó el control de las condiciones ambientales dentro de la cámara de curado, durante un período de 35 días. Los valores promedios de temperatura y humedad resgistrados fueron de  $23,8 \text{ °C}$  y  $94 \%$  respectivamente.



Figura 14: Curado de probetas.

#### 9.4. ASERRADO DE PROBETAS

Una vez finalizado el curado de las probetas, se realizó el aserrado de las correspondientes a los ensayos de penetración de agua a presión, succión capilar y permeabilidad al aire.

Se efectuó un primer corte 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 realizaron un segundo y tercer aserrado de 5 cm cada uno, a partir de la cara interna. Las dos rodajas se utilizaron para los ensayos de succión capilar y permeabilidad al aire (figura 15).

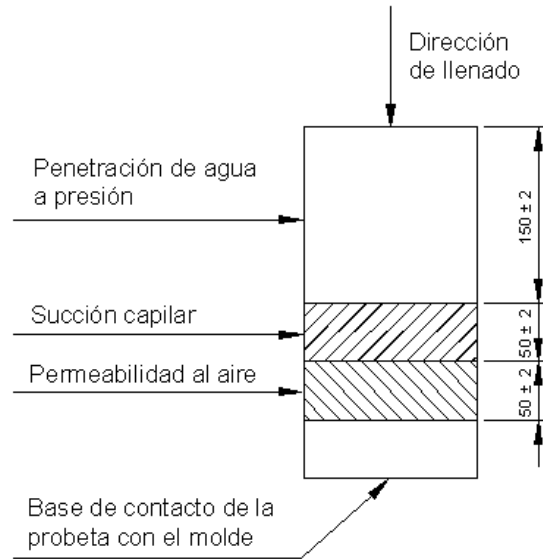


Figura 15: Usos de las probetas de ensayo (unidades en mm).



Figura 16: Aserrado de las probetas de ensayo.

## 9.5. PREPARACIÓN DE LAS BASES DE PROBETAS PARA ENSAYO DE COMPRESIÓN

Como paso previo a efectuar el ensayo a compresión de probetas, es imprescindible tratar sus bases, de modo que resulten superficies planas, paralelas entre sí y normales al eje longitudinal de la probeta. Este procedimiento, denominado normalmente como encabezado, no debe influir en el resultado del ensayo, es decir, no debe modificar la resistencia real que posee el hormigón.

### Equipo y Material

Se utilizaron placas metálicas, mecanizadas y planas, un equipo con fuente de calor, un recipiente metálico, un dispositivo de alineación y un cucharón.

El material empleado para la preparación de las bases fue mortero de azufre.



### Procedimiento

Las bases de las probetas fueron preparadas según la norma IRAM 1553.

1) Los extremos de las probetas estaban en estado saturado y superficie seca en el momento de recibir el preparado de mortero de azufre, para evitar que la humedad produjera burbujas debajo de la base preparada.

2) Se preparó el mortero de azufre, colocándolo en el recipiente metálico y elevando la temperatura hasta que se obtuvo su fusión.

3) Se aseguró la placa en posición horizontal y se vertió el material líquido sobre ella en la cantidad necesaria, cuidando que no queden sopladuras, oquedades o grumos.

4) Inmediatamente se colocó encima la probeta, bien apoyada en el dispositivo de alineación, para asegurar la perpendicularidad y el centrado de la misma entre las bases, con respecto a su eje longitudinal.

Una vez solidificado el material que conformaba las bases, se retiró la probeta, eliminando las rebabas remanentes.



Figura 17: Preparación de las bases de probetas.

## **9.6. ENSAYOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO ENDURECIDO**

### **9.6.1. Ensayo de Compresión**

La resistencia a la compresión se puede definir como la medida máxima de la resistencia a 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, éste 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.

### Equipo

Se utilizó una prensa, la cual consta de dos platos de carga perfectamente planos, y un sistema de regulación de velocidad de carga.



### Procedimiento

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

- 1) Se determinó la altura y el diámetro de cada probeta al milímetro, medido este último en dos secciones de la muestra.
- 2) Se limpiaron cuidadosamente las superficies planas de contacto de los platos superior e inferior de la máquina y también ambas bases de cada probeta.
- 3) Se colocó la probeta en el plato inferior de apoyo logrando que quede perfectamente centrada.
- 4) Se acercó en forma manual el plato superior de la prensa hasta que quedó en contacto con la probeta.
- 5) Se aplicó la carga en forma continua y sin choques a una velocidad entre 1,5 y 3,5 Kg/cm<sup>2</sup> por segundo hasta lograr la rotura de la probeta, registrando la carga máxima. En la figura 16 pueden verse los tipos de roturas típicas que pueden darse. En los ensayos realizados, la mayor parte de las probetas rompieron según el tipo 1, y en menor medida, según el tipo 3.



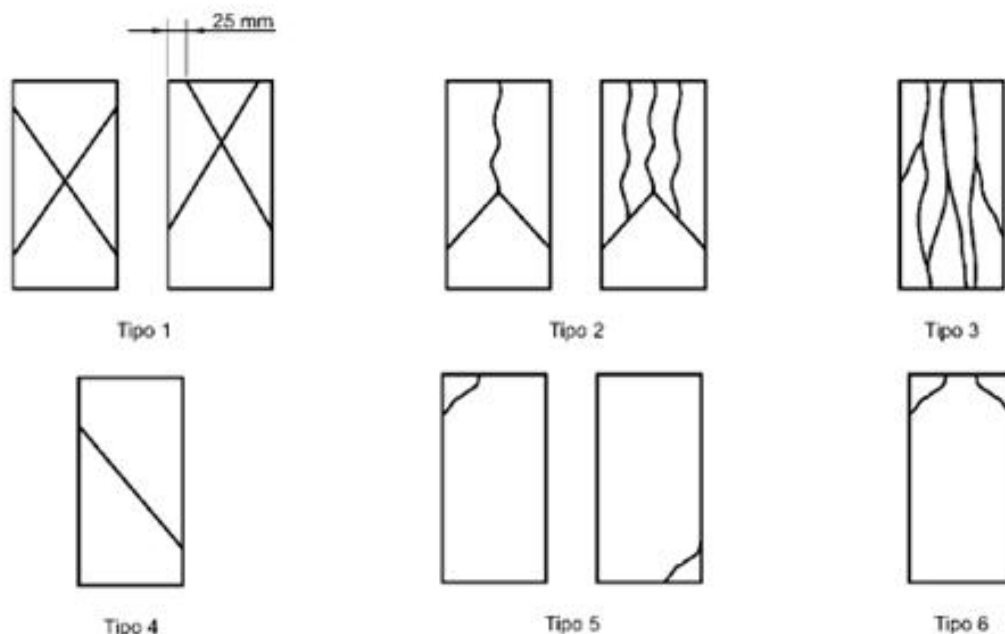
Figura 18: Compresión de probetas.

### Cálculo

La resistencia a la compresión de la probeta se calculó mediante la fórmula:

$$\sigma = \frac{4 Q}{\pi d^2} \quad \text{Ec. 11}$$

Siendo:  $\sigma$  la resistencia a la compresión, en MPa; Q la carga máxima alcanzada, en N; d el diámetro de la probeta, en mm.



- Tipo 1** Conos bien formados en ambos extremos.
- Tipo 2** Cono bien formado en un extremo y mal definido en el otro, con fisuras verticales (o columnares) que comienzan en la base.
- Tipo 3** Rotura en forma columnar (vertical) a través de ambas bases. Se pueden observar conos mal formados.
- Tipo 4** Rotura diagonal. Se debe golpear con un martillo para diferenciarla de la rotura Tipo 1.
- Tipo 5** Rotura usual cuando las bases de las probetas no están preparadas o cuando se utiliza encabezado de neopreno.
- Tipo 6** Fractura similar a la del Tipo 5, con la excepción de que el extremo de la probeta termina en forma de punta.

Figura 19: Tipos de roturas típicas.

### 9.6.2. Ensayo de Penetración de Agua a Presión

El método de ensayo permite determinar la penetración del agua sometida a presión en el hormigón endurecido.

#### Equipo

Se utilizó un dispositivo que permite la colocación de la probeta de manera tal que la presión de agua pueda actuar sobre la superficie plana que se somete al ensayo; y un anillo de goma para evitar la fuga de agua (figura 17).



Figura 20: Equipo de penetración de agua a presión.

### Procedimiento

El método de ensayo se realizó según la norma IRAM 1554.

- 1) Se marcó un círculo concéntrico con el eje de la probeta de la mitad del diámetro de la misma.
- 2) La superficie circundante al círculo marcado se selló con dos capas de pintura impermeabilizante.
- 3) Se armó el equipo. Se colocó el anillo de goma sobre el círculo concéntrico, con el fin de circunscribir la zona de aplicación del agua a presión. Se utilizó agua destilada coloreada con azul de metileno.
- 4) La secuencia y tiempo de mantenimiento de las presiones durante el ensayo fueron los establecidos en la tabla 9.

Tabla 9: Tiempo de mantenimiento de presiones.

Presión (MPa)	Tiempo (h)
0,1	48
0,3	24
0,7	24

- 5) Al finalizar el último ciclo, se retiraron las probetas y se les retiró el exceso de agua con una tela absorbente.
- 6) Las muestras se partieron en dos mitades aplicando, con una prensa, una carga perpendicular a la superficie sobre la que se incorporó el agua (figura 18).
- 7) Sobre la mitad visiblemente más afectada se resaltó el contorno del frente de penetración máxima de agua y se realizó la medición (figura 18).



Figura 21: Rotura de probetas y mediciones.

#### Resultados:

- 1) La medida de la penetración máxima del agua en el hormigón de cada probeta ensayada, estuvo dada por el valor medio del frente de penetración de agua en la misma.
- 2) El cálculo de la media aritmética se obtuvo del relevamiento del contorno del frente de penetración de agua, marcado en el plano de fractura.

#### **9.6.3. Ensayo de Succión Capilar**

El método de ensayo 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.

#### Equipo

Se utilizó un recipiente de base plana, con tapa hermética y base de apoyo para las probetas, de material resistente a la corrosión, que asegure una superficie mínima de contacto con el agua, debiendo estar perfectamente nivelada; bolsas de polietileno, películas de polietileno, una balanza y una estufa.

#### Procedimiento

El método de ensayo se realizó según la norma IRAM 1871.

- 1) Se determinó el diámetro y el área de la sección transversal de cada una de las probetas.
- 2) Se selló con pintura impermeabilizante (2 manos) toda la superficie lateral de las muestras, para evitar la absorción en ese sector no contemplado en los cálculos.



3) Previo al ensayo, la norma establece que las probetas se deben colocar y mantener sumergidas en agua, durante un período de 72 h. Debido a que en este caso el ensayo comenzó inmediatamente después del curado de las probetas, no fue necesario sumergirlas nuevamente.

4) Las muestras se secaron en estufa a  $50\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta masa constante (cuando la diferencia entre dos pesadas sucesivas efectuadas cada  $24\text{ h} \pm 1\text{ h}$  fue menor que 0,1 % de la última medición).

5) Antes de cada pesada, las probetas se dejaron enfriar hasta temperatura ambiente, guardándolas previamente en doble bolsa de polietileno.

6) Una vez secadas las probetas, se registró la masa seca ( $M_{si}$ ) y se recubrieron con doble pliego de una película de polietileno (film) durante 24 h, en ambiente de laboratorio.

7) Luego de extraerles la envoltura de polietileno, las probetas se introdujeron en forma inclinada (para facilitar la humectación de la superficie y evitar la formación de burbujas de aire) en el recipiente sobre la base apoyo, con una altura de agua respecto de la base de absorción de  $3\text{ mm} \pm 1\text{ mm}$ , y a una temperatura de  $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  (figura 19). Este instante se registró como el tiempo inicial del ensayo ( $t = 0$ ). El recipiente se cubrió para procurar alcanzar una humedad de equilibrio del aire mayor al 95 %, y para reducir la evaporación por las bases de las probetas en contacto con el aire.

8) En los tiempos  $t = 30\text{ min}$ ,  $t = 1\text{ h}$ ,  $t = 2\text{ h}$ ,  $t = 3\text{ h}$ ,  $t = 4\text{ h}$ ,  $t = 5\text{ h}$ ,  $t = 6\text{ h}$ ,  $t = 24\text{ h}$ ,  $t = 48\text{ h}$ , y a continuación cada  $24\text{ h} \pm 1\text{ h}$  hasta que la variación de masa de la probeta fue menor que 0,1 % entre dos determinaciones sucesivas, se retiró cuidadosamente cada probeta, se enjuagó con el paño la base de absorción, la superficie lateral, y se determinó la masa húmeda ( $M_{hit}$ ).



Figura 22: Ensayo de succión capilar.

### Resultados

1) Para cada probeta (i) en el instante de lectura (t) se determinó el incremento de masa por unidad de área ( $C_{it}$ ), mediante la fórmula siguiente:

$$C_{it} = \frac{M_{hit} - M_{si}}{A_i} \quad \text{Ec. 12}$$

Siendo:  $C_{it}$  el incremento de masa por unidad de área de la sección transversal de la probeta (i) en el instante de lectura (t), en  $\text{g}/\text{m}^2$ ;  $M_{hit}$  la masa húmeda de la probeta (i) en el instante de lectura (t), en g;  $M_{si}$  la masa seca de la probeta (i), en g;  $A_i$  el área de la sección transversal de la probeta (i), en  $\text{m}^2$ .





2) La capacidad de succión capilar de cada probeta ( $C_i$ ), en  $\text{g/m}^2$ , 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 ( $M_{hi}$ ).

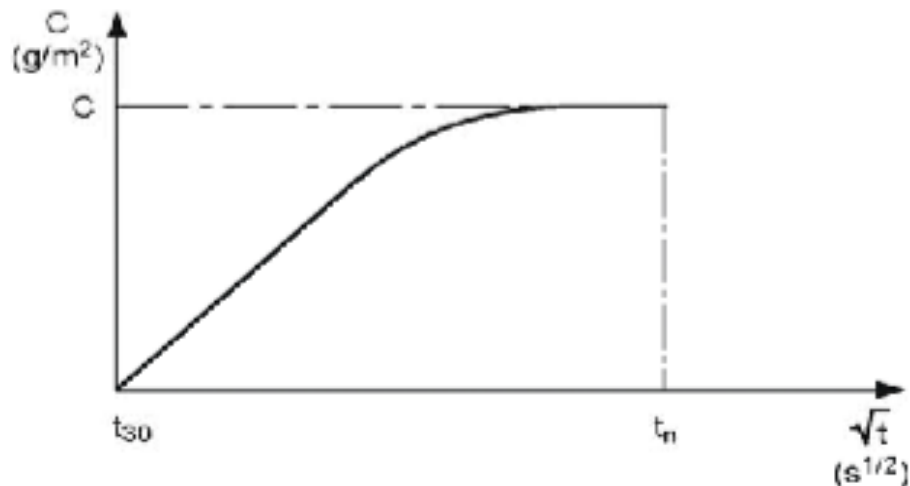


Figura 23: Gráfico de succión capilar.

3) La velocidad de succión capilar del hormigón ( $S$ ) correspondiente a la serie de ensayo, en  $\text{g/m}^2\text{s}^{1/2}$ , es la pendiente de la recta obtenida mediante ajuste por cuadrados mínimos de la serie de puntos (figura 21).

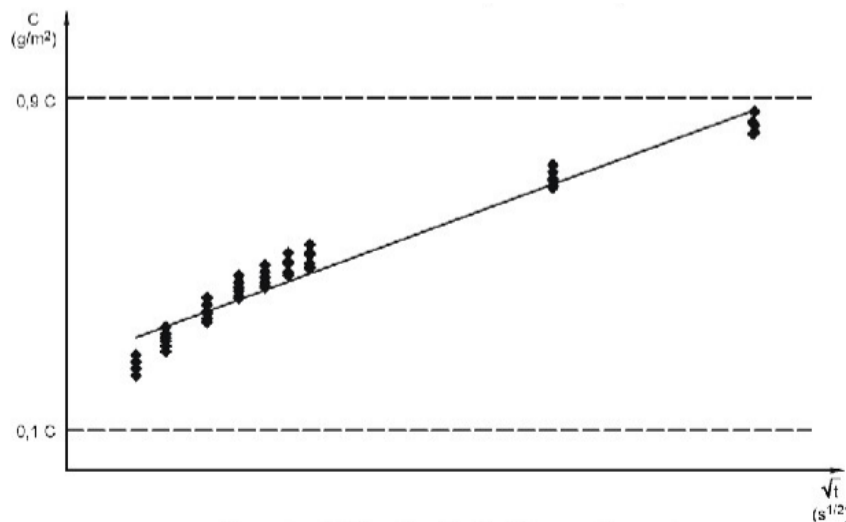


Figura 24: Gráfico de velocidad de succión capilar.

#### 9.6.4. Ensayo de Permeabilidad al Aire

La medición in situ de la permeabilidad al aire es una técnica rápida, completamente 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.



### Equipo

Se utilizó el aparato de Torrent, el cual consta de una celda con doble cámara (una interna y otra externa), y un regulador de presión a membrana, cuya función es mantener a ambas cámaras siempre a la misma presión ( $P_i=P_e$ ).

La disposición del instrumental del dispositivo se esquematiza en la figura 22.

### Procedimiento

1) Con la válvula 1 cerrada y la 2 abierta, se creó vacío en ambas cámaras mediante la bomba.

2) Cuando la presión  $P_i$  bajó a 30 mbar se cerró 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 el exceso de aire que ingresó lateralmente en la cámara externa fue evacuado por la cámara exterior. Así se logró que el flujo de aire hacia la cámara central fuera básicamente unidireccional.

3) La evolución de la presión  $P_i$  se midió a partir de los 60 segundos por un sensor de presión, comandado por un microprocesador que tiene integrado un cronómetro. El microprocesador almacenó la información y efectuó los cálculos para mostrar automáticamente, al final del ensayo, el valor del coeficiente de permeabilidad al aire  $K_t$  ( $m^2$ ).

4) El fin del ensayo aconteció cuando la elevación de la presión en la cámara interna  $P_i$  alcanzó 20 mbar o, en el caso de hormigones muy impermeables, cuando transcurrieron 360 segundos desde el comienzo del ensayo.

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

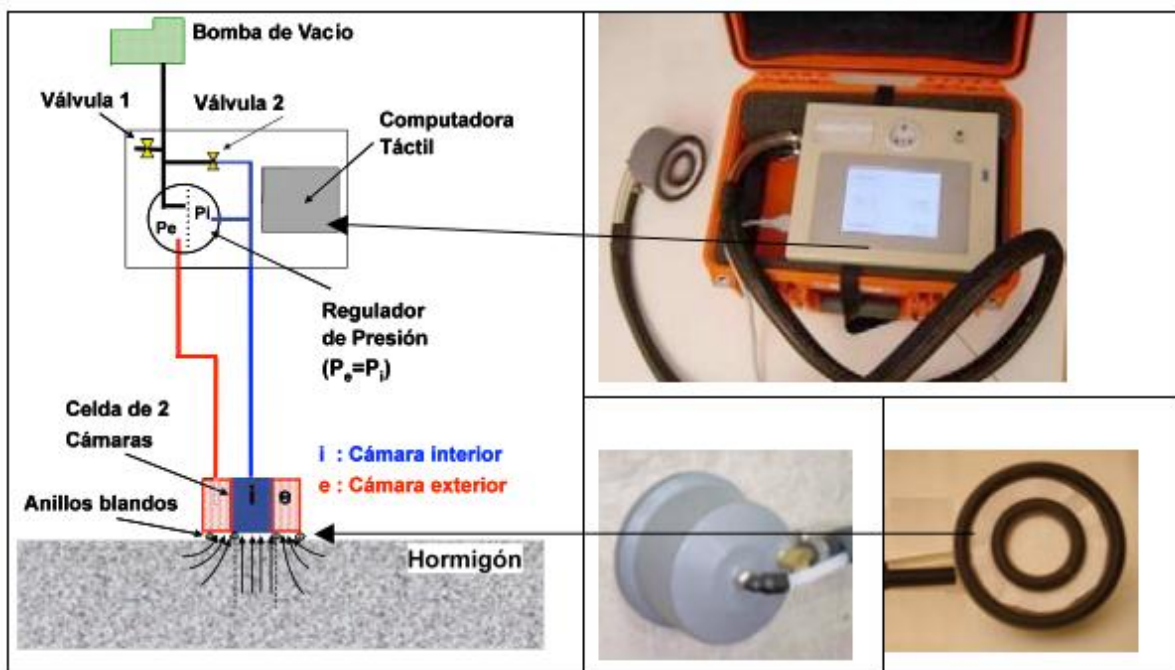


Figura 25: Aparato de Torrent.



Dado que en este método la geometría del problema está bien definida, mediante un modelo teórico es posible calcular el coeficiente de permeabilidad, aplicando la siguiente ecuación:

$$k_T = \left( \frac{V_c}{A} \right)^2 \frac{\mu}{2\varepsilon p_a} \left( \frac{\ln \left( \frac{p_a + p}{p_a - p} \frac{p_a - p_o}{p_a + p_o} \right)}{\sqrt{t} - \sqrt{t_o}} \right)^2$$

Siendo:  $k_T$  el coeficiente de permeabilidad al aire, en  $m^2$ ;  $V_c$  el volumen de la cámara interior, en  $m^3$ ;  $A$  el área de la cámara interior, en  $m^2$ ;  $\mu$  la viscosidad dinámica del aire, en  $Ns/m^2$ ;  $\varepsilon$  la porosidad del hormigón;  $p_a$  la presión atmosférica, en  $N/m^2$ ;  $p_o$  la presión en la cámara interior al inicio del ensayo ( $t_o = 60$  s), en  $N/m^2$ ;  $p$  la presión en la cámara interior al final del ensayo  $t$  ( $t \leq 360$  s), en  $N/m^2$ .

El conocimiento del coeficiente  $k_T$  permite estimar la profundidad de hormigón afectada por el ensayo, la cual también es indicada por el equipo.



## 10. RESULTADOS

### 10.1. ENSAYOS DEL HORMIGÓN EN ESTADO FRESCO

En la tabla 10 se detallan los resultados de los ensayos realizados sobre el hormigón en estado fresco.

Tabla 10: 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 <sup>3</sup> )
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	2370
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 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. ENSAYO DE COMPRESIÓN

En la tabla 11 se observan los resultados de los ensayos de compresión a 7 y 28 días de los hormigones estudiados. Además se detalla la evolución en 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 dos probetas.

Tabla 11: 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	98,8	16,6	16,4
0,4 B	36,5	45,0	123,3	14,6	18,0
0,5 A	32,0	36,5	114,1	16,0	18,3
0,5 B	32,0	38,0	118,8	16,0	19,0
0,5 C	27,5	35,0	127,3	13,8	17,5
0,6 A	22,0	27,5	125,0	13,2	16,5
0,6 B	23,0	26,5	115,2	13,8	15,9
0,7 A	20,0	25,0	125,0	14,0	17,5
0,7 B	18,5	25,0	135,1	13,0	17,5

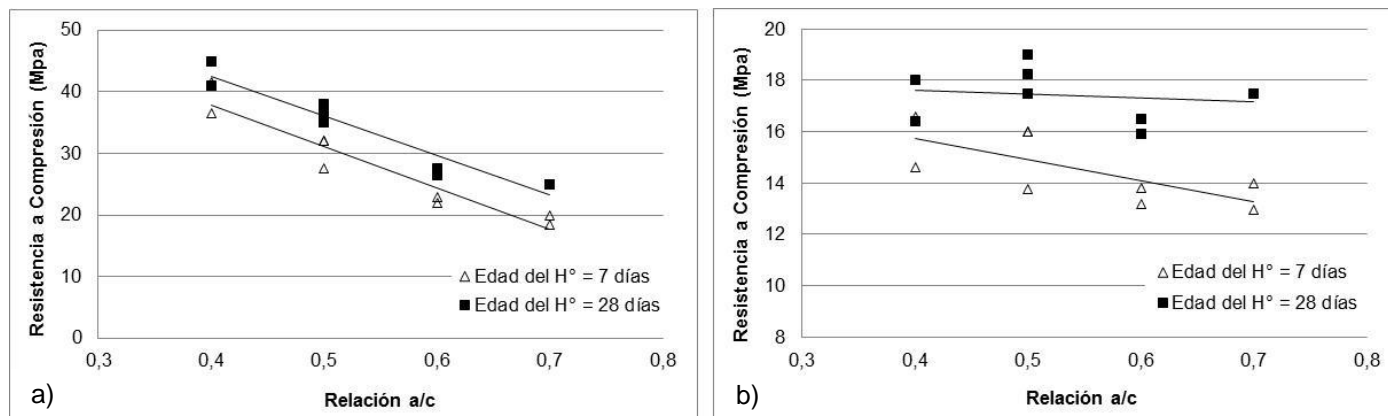


Figura 26: a) Resistencia a la compresión vs. relación a/c. b) Factor de resistencia vs. relación a/c.

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 incrementa 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 analizará la influencia de los resultados mencionados en los próximos ensayos.

### 10.3. ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA A PRESIÓN

En la tabla 12 se muestran los resultados de penetración media y máxima correspondientes a los ensayos de penetración de agua a presión en el hormigón endurecido. En las figuras 24a y 24b se observa la variación de dichos valores en función de la relación a/c.

Tabla 12: 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

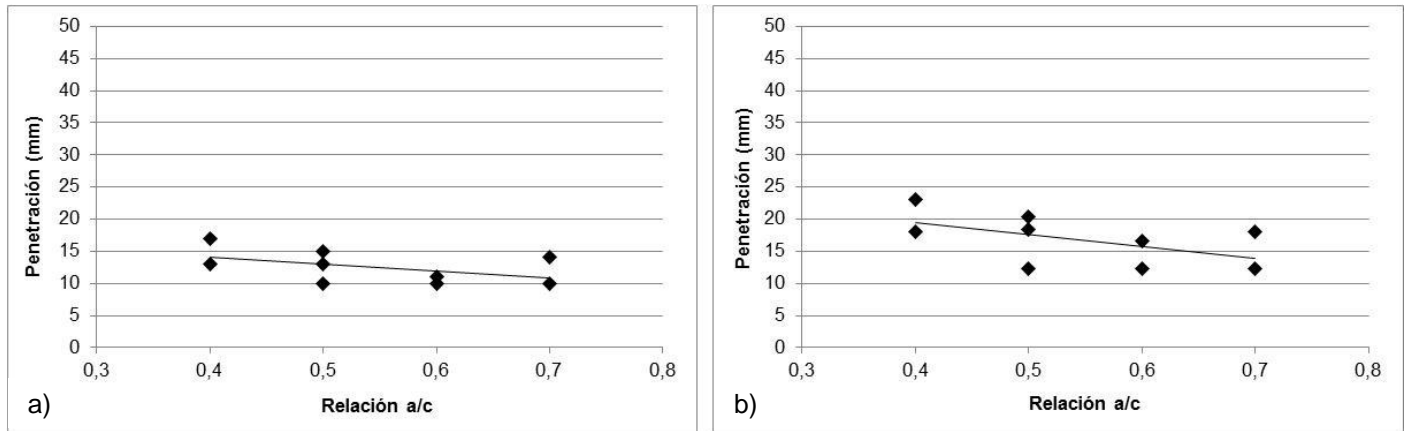


Figura 27: a) Penetración de agua media vs. relación a/c. b) Penetración de agua máxima vs. relación a/c.

En las figuras 24a y 24b 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

Los resultados de los ensayos de succión capilar se muestran en la tabla 13.

En las figuras 25 y 26 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 13: Resultados ensayos de succión capilar.

Pastón - a/c	Capacidad de Succión Capilar Individual (g/m <sup>2</sup> )			Capacidad de Succión Capilar C (g/m <sup>2</sup> )	Velocidad de Succión Capilar S (g/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> )
	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	3,00
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

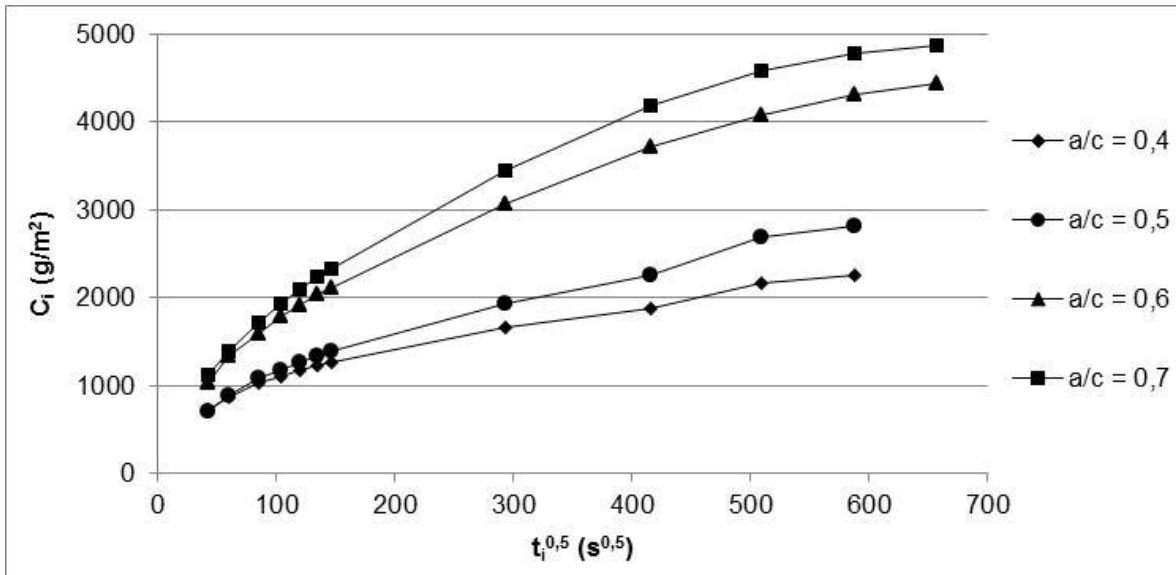


Figura 28: Capacidad de succión capilar en función de la raíz cuadrada del tiempo.

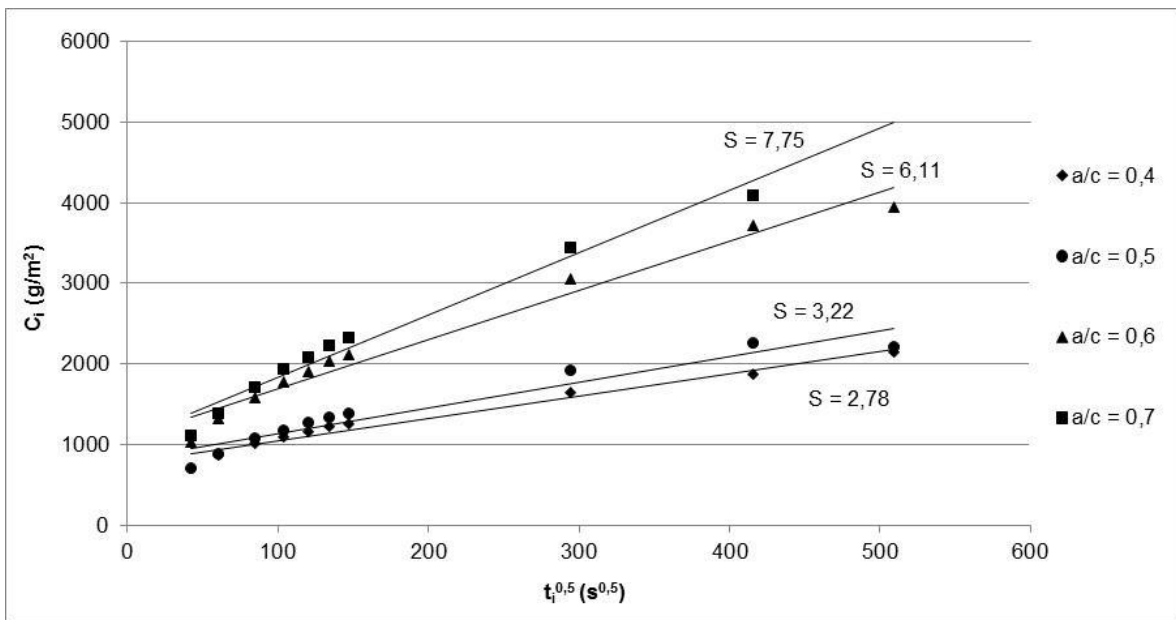


Figura 29: Velocidad de succión capilar.

Tabla 14: Resumen de resultados obtenidos.

Relación a/c	Capacidad de Succión Capilar C (g/m <sup>2</sup> )	Velocidad de Succión Capilar S (g/m <sup>2</sup> )
0,4	2259	2,75
0,5	2822	3,83
0,6	4442	6,11
0,7	4866	7,75

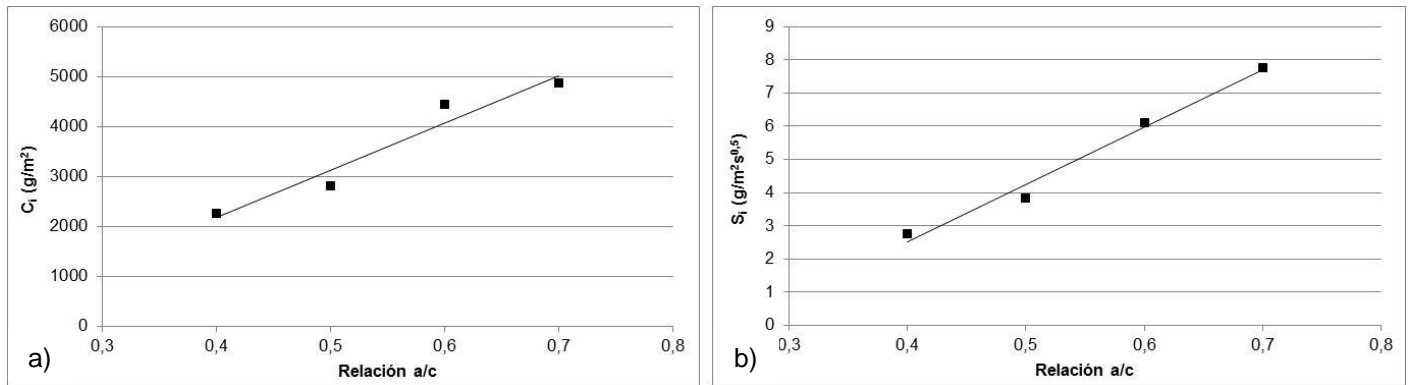


Figura 30: a) Capacidad de succión capilar vs. relación a/c. b) Velocidad de succión capilar vs. relación a/c.

En las figuras 27a y 27b 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.

#### 10.4.1. Comparación con Antecedentes Encontrados

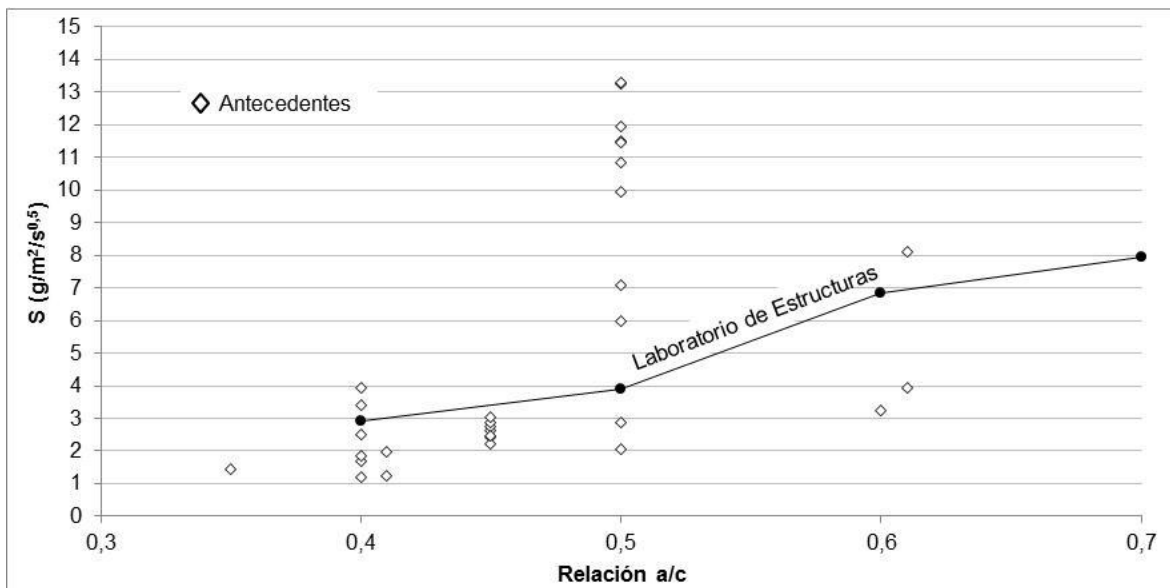


Figura 31: Relación a/c vs. velocidad de succión capilar en antecedentes encontrados.

La figura 28 refleja las diferencias obtenidas entre el Laboratorio de Estructuras y los 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.





### 10.4.2. Análisis del Secado de las Probetas

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

Se efectuó el control de la pérdida de peso de cada probeta (figura 32), pero no se registró la condición de humedad dentro de la estufa.

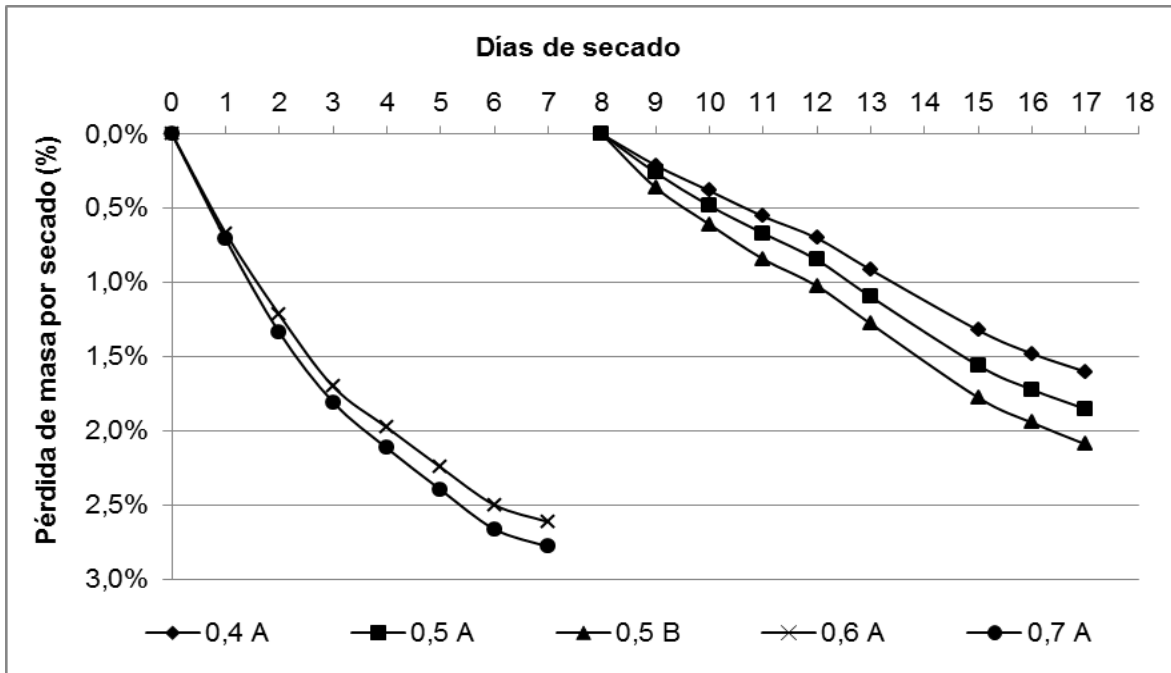


Figura 32: Pérdida de agua en función del tiempo.

Es interesante observar que, independientemente de la relación a/c y de los días de secado, todas las probetas que se encontraban en la estufa en un momento determinado alcanzaron su masa de equilibrio al mismo tiempo. Esto genera el interrogante de si la pérdida de masa (agua) se realizó en forma completa en cada una de las probetas y, por lo tanto, si las mismas contaban con iguales condiciones de humedad al inicio de la absorción.



## 10.5. ENSAYO DE PERMEABILIDAD AL AIRE

Se realizó el ensayo de permeabilidad al aire en el Centro Tecnológico de Holcim, donde disponen del instrumental necesario para aplicar el método de Torrent.

Tabla 15: Resultados ensayos de permeabilidad al aire.

Pastón - a/c	Valores Unitarios			Valor kT (10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )	Permeabilidad
	kT (10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )	kT (10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )	kT (10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )		
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	0,74	0,617	Moderada

En la tabla 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 16.

Tabla 16: Clasificación de la permeabilidad del hormigón en función del coeficiente kT.

Clase	kT (10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )	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 29a se muestra la variación del coeficiente de permeabilidad kT en función de la relación a/c. Luego se realizó una comparación con los resultados de velocidad de succión capilar (figura 29b).

Tabla 17: Comparación de resultados.

Pastón - a/c	kT (10 <sup>-16</sup> m <sup>2</sup> )	S (g/m <sup>2</sup> s <sup>0,5</sup> )
0,4 A	0,065	2,77
0,4 B	-	2,73
0,5 A	0,139	4,34
0,5 B	0,104	3,00
0,5 C	0,121	4,16
0,6 A	0,124	6,11
0,6 B	1,510	-
0,7 A	0,286	7,75
0,7 B	0,617	-

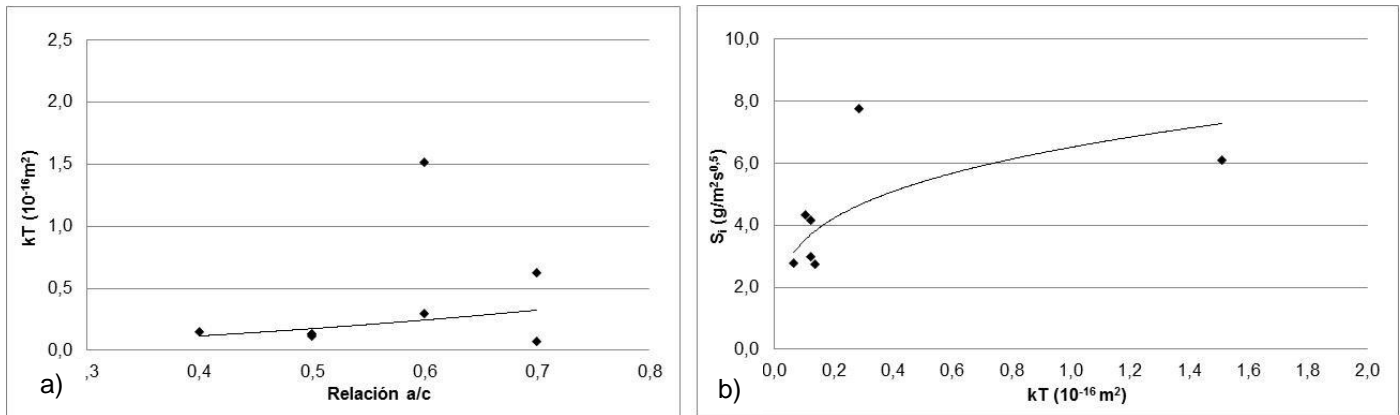


Figura 33: a)  $kT$  vs. relación a/c. b) Velocidad de succión capilar vs.  $kT$ .

Los resultados expresados en la figura 29a evidencian un aumento de la permeabilidad al aire a mayor relación a/c, al igual que ocurrió con la velocidad de succión capilar. Si bien se observa un valor 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 la variación encontrada.

La figura 29b 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.

Es preciso realizar un análisis profundo de las diferentes variables que pueden afectar el ensayo. Se recomienda el estudio de las condiciones de secado, y con ello, de humedad que poseen las probetas en el momento de iniciar la absorción, ya que es un punto no contemplado en la norma IRAM 1871.

- 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 adecuadamente 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. (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. Piñturi. “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?”.
- M. Gonzalez, A. Montealgre. “Influencia del tipo de anión y del tipo de catión sobre la succión capilar de hormigones”.
- Cristian Sakurai. (2010). Absorción por Succión Capilar en el Hormigón Endurecido. LEMAC UNLP.
- Francisco Ríos Merino. Efecto en la impermeabilidad de hormigones con un alto contenido de finos.
- Sika. Hormigón Impermeable, una mirada reciente. 32 p.
- ICPA. (1990). Importancia de la permeabilidad en los hormigones. Como elaborar hormigones menos permeables y más durables.
- 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 NEA.
- IRAM 1627. (1997). Agregados. Granulometría de los agregados para hormigones. 23 p.
- Método ICPA. Diseño racional de mezclas de hormigón. 26 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. Hormigón. (2004). Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral. 15 p.
- IRAM 1553. (2008). Hormigón de cemento. Preparación de las bases de probetas cilíndricas y testigos cilíndricos, para ensayo de compresión. 20 p.
- IRAM 1546. Hormigón de Cemento. (2013). 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. 12 p.
- Luis Ebensperger y Roberto Torrent. (2010) “Medición in situ de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo”. Revista Ingeniería de Construcción, Volumen 25 N° 3.