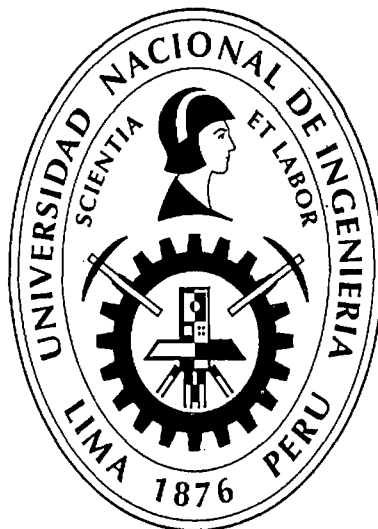


**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



**IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE PRESIÓN PARA
MEDIR LA PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

ANTONY JOSEF MORENO VÁSQUEZ

Lima- Perú

2015

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

ÍNDICE

RESUMEN	v
LISTA DE CUADROS.....	vi
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	xiii
INTRODUCCIÓN.....	xiv
CAPÍTULO I. PERMEABILIDAD Y DURABILIDAD EN EL CONCRETO.....	1
1.1 POROSIDAD DEL CONCRETO.	1
1.1.1 Permeabilidad y hermetismo del concreto.....	1
1.1.2 Tipos de poros que se encuentran en el concreto.....	2
1.1.3 Efectos de la porosidad en la resistencia a la compresión.	5
1.2 PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO.....	9
1.2.1 Definición de permeabilidad.....	9
1.2.2 Relación entre porosidad y permeabilidad.	9
1.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO.	10
1.3.1 Relación agua-cemento.	11
1.3.2 Porosidad de la pasta.	11
1.3.3 Curado del concreto.....	12
1.3.4 Otros factores.	13
1.4 CONSECUENCIAS DE LA PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO.....	13
1.4.1 Ataque de sulfatos.	13
1.4.2 Ataque de cloruros.....	15
1.4.3 Ataque de ácidos.	15
1.4.4 Carbonatación.....	16
1.4.5 Eflorescencia.	17
1.4.6 Otros procesos patológicos.....	18

1.5	MODELOS PARA LA POROSIDAD Y PERMEABILIDAD DEL CONCRETO.	19
1.5.1	Modelos empíricos.	19
1.5.2	Modelos de redes.	20
1.5.3	Modelos basados en la teoría de la filtración.	22
1.6	MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN Y MEDICIÓN DE LA PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO.	26
1.6.1	Métodos basados en las propiedades eléctricas del concreto.	26
1.6.2	Métodos basados en la medida del ingreso de sustancias al interior de la matriz cementante.	31
1.6.3	Métodos basados en la aplicación de presión.	33
1.7	DURABILIDAD.	34
1.7.1	Concepto de durabilidad en el concreto.	34
1.7.2	Requisitos de durabilidad.	37
CAPÍTULO II. FABRICACIÓN DEL EQUIPO PARA MEDIR LA PERMEABILIDAD.		45
2.1	MECANISMOS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS EN EL INTERIOR DEL CONCRETO.	45
2.1.1	Difusión de vapor de agua.	47
2.1.2	Adsorción de agua.	47
2.1.3	Condensación capilar.	48
2.1.4	Succión capilar.	48
2.1.5	Interacción del concreto con el microclima próximo.	51
2.2	PERMEABILIDAD DEL CONCRETO AL AGUA.	55
2.2.1	Procedimiento de medición por método de presión.	55
2.3	DISEÑO DEL EQUIPO.	58
2.3.1	Celda contenedora del espécimen.	58
2.3.2	Fuente suministradora de presión.	60
2.3.3	Medio de distribución y transporte.	63

2.3.4	Prueba de ensayo y error.....	65
CAPÍTULO III. DISEÑO EXPERIMENTAL.....		67
3.1	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	67
3.1.1	Cemento Portland.....	67
3.1.2	Agregados.....	68
3.1.3	Aditivo.....	73
3.2	DISEÑO DE MEZCLA.....	73
3.2.1	Procedimiento del diseño.....	73
3.3	ENSAYOS EN LABORATORIO.....	78
3.3.1	Resistividad eléctrica.....	78
3.3.2	Experimento de Darcy.....	79
3.3.3	Permeabilidad al agua por método de presión.....	80
3.4	RESULTADO OBTENIDOS.....	83
3.4.1	Resistividad eléctrica (método de Wenner).....	83
3.4.2	Permeabilidad al agua por método de presión.....	84
CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....		90
4.1	RESULTADOS PRELIMINARES.....	90
4.1.1	Análisis de resultados preliminares de ensayo de resistividad eléctrica.	90
4.1.2	Cálculo del coeficiente de permeabilidad y análisis de resultados preliminares de ensayo de permeabilidad.....	91
4.2	RESULTADOS FINALES.....	94
4.2.1	Cálculo del coeficiente de permeabilidad.....	94
4.2.2	Identificación de valores atípicos, Test de Grubbs.....	100
4.2.3	Resultados de resistencia a la compresión.....	106
4.2.4	Análisis de resultados finales.....	106
4.2.5	Comparación de resultados obtenidos.....	119
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		129

5.1	CONCLUSIONES.	129
5.2	RECOMENDACIONES.	130
	BIBLIOGRAFÍA	131
	ANEXOS	136

RESUMEN

El agua está generalmente involucrada en muchas formas de deterioro en los sólidos porosos. Para el caso del concreto. La velocidad del deterioro del material está muy relacionada con la permeabilidad del concreto.

A pesar de la gran cantidad de estudios sobre permeabilidad, no existe aceptación de un procedimiento único para medir la permeabilidad del concreto al agua, ni factores que permitan comparar los resultados obtenidos en los distintos métodos. Tampoco valores de referencia que permitan establecer comparaciones y clasificaciones de concretos y morteros en función de su permeabilidad.

En la presente investigación se propone implementar un método para cuantificar la permeabilidad del concreto. Básicamente es una analogía a la experiencia de Darcy, que consiste en aplicar una presión de agua directamente sobre el concreto, y así poder calcular el coeficiente de permeabilidad "k", con el cual podremos comparar muestras de concreto elaboradas en laboratorio o testigos extraídos en campo, de distintas calidades utilizadas en cualquier proyecto.

LISTA DE CUADROS

Cuadro N° 1.1.	Resistencia a la penetración de ión cloruro para cada rango de carga transmitida a través de la matriz del concreto	28
Cuadro N° 1.2	Categorías y clases de exposición para ataque de congelamiento y deshielo	38
Cuadro N° 1.3	Categorías y clase de exposición para ataque de congelamiento y deshielo	38
Cuadro N° 1.4	Requisitos para el concreto, según su clase de exposición	39
Cuadro N° 1.5	Requisitos para el concreto, según su clase de exposición	39
Cuadro N° 1.6	Categorías y clase de exposición a sulfatos	40
Cuadro N° 1.7	Categorías y clase de exposición a sulfatos	40
Cuadro N° 1.8	Requisitos para el concreto, según su clase de exposición	41
Cuadro N° 1.9	Requisitos para el concreto, según su clase de exposición	41
Cuadro N° 1.10	Clase de exposición para corrosión inducida por carbonatación.	42
Cuadro N° 1.11	Requisitos para el concreto, según su clase de exposición	42
Cuadro N° 1.12	Categorías y clase de exposición a cloruros.....	43
Cuadro N° 1.13	Categorías y clase de exposición a cloruros (no marino).....	43
Cuadro N° 1.14	Categorías y clase de exposición a cloruros (no marino).....	44
Cuadro N° 1.15	Requisitos para el concreto, según su clase de exposición	44
Cuadro N° 1.16	Requisitos para el concreto, según su clase de exposición	44
Cuadro N° 3.1	Requisitos químicos de la composición del cemento portland tipo I.....	67
Cuadro N° 3.2	Requisitos físicos para el cemento portland tipo I.....	68
Cuadro N° 3.3	Lista de normas seguidas para determinar las propiedades físicas de los agregados.....	69
Cuadro N° 3.4	Resultados del análisis granulométrico del agregado fino	69
Cuadro N° 3.5	Propiedades del agregado fino	70
Cuadro N° 3.6	Resultados del análisis granulométrico del agregado grueso .	71
Cuadro N° 3.7	Propiedades del agregado grueso.....	72
Cuadro N° 3.8	Resumen de diseños utilizados, se muestra pesos secos para cada dosificación.....	78
Cuadro N° 3.9	Identificación de las muestras ensayadas	80

Cuadro Nº 3.10	Resultados de resistencia obtenidos de diferentes tipos de probetas	83
Cuadro Nº 3.11	Resultados de resistencia eléctrica obtenidos de probetas elaboradas con los mismos materiales pero difieren en la resistencia y la edad de ensayo	83
Cuadro Nº 3.12	Resultados obtenidos del caudal obtenido al ensayar las probetas, medidas realizadas para un total diario de 8 horas .	84
Cuadro Nº 3.13	Resultados obtenidos de la profundidad de penetración de muestras, para su comprobación con las mediciones de resistividad eléctrica	85
Cuadro Nº 3.14	Resultados obtenidos para determinar el contenido de vacíos (adimensional), medidas tomadas según ASTM C 642	85
Cuadro Nº 3.15	Resultados obtenidos de las 90 probetas ensayadas	86
Cuadro Nº 3.16	Resultados obtenidos para determinar el contenido de vacíos, medidas tomadas según ASTM C 642	89
Cuadro Nº 4.1	Resultados de resistividad para probetas tomadas aleatoriamente con más de 28 días de curado	90
Cuadro Nº 4.2	Resultados de resistividad para probetas seleccionadas, se conoce su resistencia a la compresión de diseño y la edad de los especímenes.....	91
Cuadro Nº 4.3	Resultados de permeabilidad, en este caso la muestra quedo saturada de agua y se midió el caudal.....	92
Cuadro Nº 4.4	Coefficiente de permeabilidad, para probetas del grupo 2.....	92
Cuadro Nº 4.5	Comparación del coeficiente de permeabilidad con la resistividad eléctrica	93
Cuadro Nº 4.6	Resultados del coeficiente de permeabilidad, en rojo se observan los posibles valores atípicos.....	94
Cuadro Nº 4.7	Análisis de valores anómalos, notamos la fuerte implicación en los resultados al calcular la media y la desviación estándar de no considerar estos resultados.....	101
Cuadro Nº 4.8	Resultados de resistencia a la compresión después de 28 días de curado húmedo.....	106

LISTA DE FIGURAS

Figura Nº 1.1	Conformación de la estructura del concreto según Setzer.....	3
Figura Nº 1.2	Relación porosidad-resistencia en cementos.....	5
Figura Nº 1.3	Morteros de cemento portland con diferentes proporciones.....	6
Figura Nº 1.4.	Relación entre la porosidad y la resistencia en el concreto.....	8
Figura Nº 1.5	Efectos de la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento con la velocidad de evaporación del agua.	12
Figura Nº 1.6	Cristal de etringita, visto a través del microscopio electrónico...	14
Figura Nº 1.7	Cristales de etringita relleno un poro (izquierda) y etringita rompiendo una partícula de árido (derecha).	14
Figura Nº 1.8	Bloque de concreto en estado natural (izquierda) y Bloque de concreto expuesto al ataque de sulfatos (derecha).....	14
Figura Nº 1.9	Muro de concreto afectado por eflorescencia.	18
Figura Nº 1.10	Elemento de una red de poros, en donde los tamaños del poro pueden ser muy variables.....	21
Figura Nº 1.11	Elemento de una red de poros, en donde los tamaños de los poros pueden ser muy variados.....	23
Figura Nº 1.12	Esquema del equipo para medir la carga transmitida por el concreto.....	27
Figura Nº 1.13	Esquema del generador de alto voltaje.....	28
Figura Nº 1.14	Los electrones se desplazan con menor resistencia entre los capilares llenos de agua.	29
Figura Nº 1.15	Ubicación de los electrodos para la medición de la resistividad eléctrica por el método de Wenner	30
Figura Nº 1.16	Diagrama esquemático de la celda de permeabilidad UAE y la configuración de la prueba.....	33
Figura Nº 1.17	Factores que afectan la durabilidad en el concreto.....	36
Figura Nº 2.1	Proceso de transporte de gases, agua y agentes disueltos en el concreto.....	46
Figura Nº 2.2	Esquema del fenómeno de fijación de agua por adsorción en los poros del concreto.....	47
Figura Nº 2.3	Esquema del fenómeno de fijación del agua por condensación capilar en los poros del concreto	48

Figura N° 2.4	Relación entre la concentración a presión de las moléculas de un gas y su difusión.....	51
Figura N° 2.5	Esquema del fenómeno de absorción de agua de lluvia en los poros superficiales del concreto.....	52
Figura N° 2.6	Esquema del fenómeno de succión capilar en los poros del concreto causada por energía superficial	53
Figura N° 2.7	Esquema de los ciclos de humedecimiento y secado del concreto en función del tiempo	54
Figura N° 2.8	Representación de los mecanismos de transporte del agua en el concreto sumergido	54
Figura N° 2.9	Plato superior, con la válvula de desfogue instalada (lado izquierdo) y entrada de agua a presión (centro del plato)	59
Figura N° 2.10	Se observa la celda completa, de arriba hacia abajo: plato superior, empaquetaduras de neopreno, pernos de sujeción y plato inferior.....	60
Figura N° 2.11	Se observa la muestra de concreto en la celda, lista para ser ensayada.....	60
Figura N° 2.12	Fuente que administra presión, se observa el tanque presurizado, la bomba jet, el presostato y el manómetro, instalados y conectados al tablero	61
Figura N° 2.13	Presostato instalado en la bomba y conectado al tablero de control.....	61
Figura N° 2.14	Tablero de control, con una cubierta a prueba de polvo y salpicaduras (Izquierda) y vista del interior del mismo (derecha).....	62
Figura N° 2.15	Manómetro, instalado en la bomba.....	62
Figura N° 2.16	Medio de transmisión desde la bomba, se observa el tubo de acero con las 6 válvulas conectadas (izquierda) y la reducción tipo campana (derecha).....	64
Figura N° 2.17	Medio de transmisión desde la bomba hasta las celdas, se observa el tubo de acero con las 6 válvulas conectadas y las mangueras unidas a las celdas, completando el equipo	64
Figura N° 2.18	Aquí se observa el tubo de PVC para succión de agua al interior de la bomba (izquierda) y la canastilla de bronce para evitar el ingreso de aire al interior de la bomba (derecha).....	65

Figura N° 3.1	Curva granulométrica del agregado fino y huso granulométrico 70	
Figura N° 3.2	Curva granulométrica del agregado grueso y huso granulométrico n° 67.....	72
Figura N° 3.3	Permeámetro de carga constante.....	80
Figura N° 4. 1	Valor crítico de comparación para determinar si son valores atípicos	100
Figura N° 4.2	Evolución del coeficiente de permeabilidad en el tiempo, para el diseño 1, relación $a/c=0.65$	107
Figura N° 4.3	Evolución del coeficiente de permeabilidad en el tiempo, para el diseño 2, relación $a/c=0.55$	108
Figura N° 4.4	Evolución del coeficiente de permeabilidad en el tiempo, para el diseño 3, relación $a/c=0.45$	109
Figura N° 4.5	Coeficiente de permeabilidad vs edad de las muestras. En azul para una relación $a/c=0.65$, en rojo $a/c=0.55$ y en verde $a/c=0.45$	110
Figura N° 4.6	Gráfica coeficiente de permeabilidad vs relación agua cemento para 28 días de curado	111
Figura N° 4.7	Gráfica coeficiente de permeabilidad vs relación agua cemento para 49 días de curado	111
Figura N° 4.8	Gráfica coeficiente de permeabilidad vs relación agua cemento para 70 días de curado	112
Figura N° 4.9	Gráfica coeficiente de permeabilidad vs relación agua cemento para 91 días de curado	112
Figura N° 4.10	Gráfica coeficiente de permeabilidad vs relación agua cemento para 112 días de curado	113
Figura N° 4.11	Resumen de las curvas Coeficiente de permeabilidad vs relación a/c antes mencionadas.....	114
Figura N° 4.12	Resumen de las curvas Coeficiente de permeabilidad vs relación a/c antes mencionadas, excluyendo la curva de 28 días, para una mejor visualización de las demás.....	115
Figura N° 4.13	Resumen de las curvas Coeficiente de permeabilidad vs contenido de cemento por metro cúbico de concreto.....	116
Figura N° 4.14	Resumen de las curvas Coeficiente de permeabilidad vs contenido de cemento por metro cúbico de concreto,	

	excluyendo la curva de 28 días, para una mejor visualización de las demás	117
Figura N° 4.15	Gráfica resistencia a la compresión $f'c$ vs relación agua-cemento, para 28 días de curado	118
Figura N° 4.16	Gráfica resistencia a la compresión $f'c$ vs contenido de cemento por metro cúbico de concreto, para 28 días de curado	118
Figura N° 4.17	Comparación de tres conjuntos de datos, para relación $a/c=0.65, 0.55$ y 0.45 para 28 días de curado. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare"	119
Figura N° 4.18	Comparación de tres conjuntos de datos, para relación $a/c=0.65, 0.55$ y 0.45 para 49 días de curado. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare"	120
Figura N° 4.19	Comparación de tres conjuntos de datos, para relación $a/c=0.65, 0.55$ y 0.45 para 70 días de curado. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare"	121
Figura N° 4.20	Comparación de tres conjuntos de datos, para relación $a/c=0.65, 0.55$ y 0.45 para 91 días de curado. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare"	122
Figura N° 4.21	Comparación de tres conjuntos de datos, para relación $a/c=0.65, 0.55$ y 0.45 para 112 días de curado. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare"	123
Figura N° 4.22	Comparación de cinco conjuntos de datos, para relación $a/c=0.65$, evaluada a 28, 49, 70, 91 y 112 días. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare"	124
Figura N° 4.23	Comparación de cinco conjuntos de datos, para relación $a/c=0.55$, evaluada a 28, 49, 70, 91 y 112 días. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare"	125

Figura N° 4.24 Comparación de cinco conjuntos de datos, para relación $a/c=0.45$, evaluada a 28, 49, 70, 91 y 112 días. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare" 126

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

S	: Resistencia de un material con porosidad "p"
S ₀	: Resistencia del mismo material con porosidad cero.
ρ	: Porosidad del material.
k	: Constante experimental
f _c	: Resistencia a la compresión
a	: Resistencia del material a porosidad cero pero con porosidad real "p"
X	: Relación sólido/espacio o la cantidad de fracción de sólidos
a/c	: Relación agua-cemento
ρ_f	: Gravedad específica del agregado fino
ρ_g	: Gravedad específica del agregado grueso
k	: Coeficiente de permeabilidad
Q	: Caudal
μ	: Viscosidad del fluido
δ	: Densidad del fluido
dh/dz	: Gradiente hidráulico en la dirección del flujo z.
θ	: Ángulo de contacto sólido - líquido.
γ_w	: Densidad del agua
erf	: Función error de Gauss.
D	: Coeficiente de difusión.
S _a	: Capacidad de absorción.
ν	: Porosidad del concreto.
C3A	: Aluminato tri cálcico
C4AF	: Ferro aluminato tetra cálcico
C2S	: Silicato di cálcico.
C3S	: Silicato tri cálcico

INTRODUCCIÓN

Actualmente se está considerando el parámetro de durabilidad al realizar los diseños de concreto, a diferencia de años anteriores que solo se tenía como objetivo la especificación y verificación de la capacidad y estabilidad estructural, que está estrechamente relacionada con la resistencia a la compresión del concreto. Sin embargo las especificaciones de la resistencia a las acciones mecánicas son insuficientes para garantizar la durabilidad de un tipo de concreto, lo que hace importante, brindar especial atención a los aspectos de verificación y cuantificación de las propiedades de durabilidad, así como también el periodo de vida útil, estableciendo especificaciones y recomendaciones en este campo.

La durabilidad del concreto de cemento portland se define como su capacidad para resistir a la acción del clima, los ataques químicos, la abrasión, o cualquier otro proceso de deterioro. Los procesos de deterioro más importantes en el concreto están relacionados con el contenido de humedad en el interior. Las moléculas de agua son capaces de penetrar poros o cavidades extremadamente finos en el concreto, estas moléculas contienen agentes agresivos para el concreto o el acero, formando así la patología.

En el caso de la corrosión de las armaduras de hormigón. El concreto proporciona un ambiente alcalino que mantiene al acero en un estado pasivo, la presencia de agentes agresivos en la superficie del acero puede causar la pérdida de pasividad, el principal causante es el ingreso de iones cloruro. Los iones cloruros pueden penetrar desde el exterior a través de la red de poros del hormigón o se incorporan al hormigón como contaminantes de alguno de los componentes de la mezcla (agregados fino o grueso, agua, aditivos, etc.). En ese sentido, existen 3 mecanismos principales que son la base para determinar la penetrabilidad del hormigón.

Permeabilidad: Transporte de sustancias a través de la estructura de poros del hormigón por gradientes de presión (Ley de Darcy).

Succión capilar: Captación de líquidos por fuerzas capilares debido a la diferencia de presión entre el agua y el aire (Capacidad de absorción).

Migración de iones: Transporte de iones debido a la acción simultánea de un gradiente de concentración y un campo eléctrico como fuerzas de conducción (Ecuaciones de Nernst-Planck).

El mecanismo a estudiar es el de permeabilidad, existen muchas normas que describen el proceso para medir la permeabilidad en función de la cantidad de agua que penetra al concreto. En la norma UNE EN 12390-8 Consisten en aplicar presión de agua de 500 ± 50 kPa durante tres días, finalmente romper las muestras longitudinalmente y medir la profundidad de penetración, siendo este el resultado reportado.

En otras normas como la NCh 2262, se aplican presiones diferentes, aumentando en el tiempo, 0.1 MPa por 48 horas, luego 0.3 MPa por 24 horas y finalmente 0.7 MPa por otras 24 horas, con un rango de tolerancia del 10%.

También la NTC 4483. En donde se aplica la presión de agua a 0.5 ± 0.05 MPa durante 4 días, sin embargo dependiendo de lo que ocurre durante el ensayo es que considera dos casos, cuando el agua atraviesa por completo la muestra, se mide el caudal de agua que atraviesa el concreto; y el segundo caso cuando el agua solo penetra hasta cierta profundidad, en donde se mide la profundidad media de penetración.

El objetivo de esta investigación es validar un método apropiado para medir la permeabilidad al agua del concreto, y así poder calcular el coeficiente de permeabilidad, lo que nos ayudará a comparar de forma cuantitativa la permeabilidad de los distintos tipos de concreto.

Esta investigación consta de 5 capítulos, a continuación mostraremos una breve descripción de cada uno:

Capítulo I: Aquí presentamos el fundamento teórico de la investigación, empezando por definir la porosidad en el concreto para luego poder definir lo que

es permeabilidad. También expondremos los distintos ensayos para medir la permeabilidad en el concreto, la influencia de la permeabilidad sobre la durabilidad del concreto

Capítulo II: En este capítulo analizaremos los diferentes tipos de mecanismos de transporte, ya sea de agentes contaminantes en el agua o en el aire, hacia el interior del concreto, entre los cuales se encuentra la permeabilidad. Posteriormente estudiaremos los componentes del equipo fabricado, su funcionamiento y el método de ensayo seguido.

Capítulo III: En este capítulo mostraremos los resultados de los ensayos realizados a los agregados, las propiedades del cemento y aditivo, utilizados en el concreto, así como también el diseño de mezcla con el que elaboramos las probetas para ensayo. Adicionalmente presentamos los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad, contenido de vacíos y resistencia a la compasión obtenidos.

Capítulo IV: Es donde hacemos el análisis de los datos obtenidos, mediremos la variación en el tiempo del coeficiente de permeabilidad y la influencia de la relación agua-cemento sobre la misma. Realizaremos también un análisis estadístico para comprobar si los resultados obtenidos pueden validar la implementación de este método como un ensayo de laboratorio.

Capítulo V: Presentamos las conclusiones de los resultados obtenidos de la presente investigación y algunas recomendaciones para mejorar el método o la construcción del equipo.

CAPÍTULO I. PERMEABILIDAD Y DURABILIDAD EN EL CONCRETO.

1.1 POROSIDAD DEL CONCRETO.

El diccionario de la lengua española, define poro como intersticio que hay entre las partículas de los sólidos de estructura discontinua.

En el concreto, que habitualmente es una mezcla de agregados, cemento y agua; durante el proceso de mezcla una cierta cantidad de aire se mezcla en el concreto, esta junto con el agua invaden un espacio dentro del concreto aún después que el concreto sea colocado en el lugar y durante las primeras etapas del fraguado.

Después de que el concreto es colocado y empieza el proceso de fraguado, los componentes más pesados tienden a asentarse en el fondo mientras los más livianos emergen a la superficie (tales como el agua o el aire). Consecuentemente, el agua al ser más liviana que los agregados y la pasta de cemento, tiende a flotar (exudación) y posteriormente a evaporarse. Durante el proceso de exudación y evaporación, pequeñas cantidades de agua se mueven en todas direcciones, las mismas que al terminar de evaporarse dejan millones de intersticios entrecruzados en todas direcciones.

De forma similar sucede con el aire, al escapar de concreto, deja intersticios en el interior de su estructura. Estos intersticios dejados por el agua o el aire se atan entre sí, creando los capilares y generando así la porosidad en el concreto.

1.1.1 Permeabilidad y hermetismo del concreto.

El concreto empleado en estructuras de retención de agua, que estén expuestas a mal tiempo u otras condiciones severas de exposición del entorno, debe ser un sistema impermeable y hermético. La hermeticidad se define a menudo como la capacidad del concreto de retener el agua sin escapes visibles, en el caso de sistemas impermeables o herméticos, se refiere a que la cantidad de agua que atraviesa el concreto es menor a la que se evapora dentro del mismo. La permeabilidad se refiere a la capacidad de un material de permitir que un fluido

lo atraviere sin alterar o modificar su estructura interna, entonces el concreto al ser menos permeable también se vuelve hermético.

La permeabilidad total del concreto al agua es una función de la permeabilidad de la pasta, del agregado y su granulometría, así como también de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado. La disminución de permeabilidad mejora la resistencia del concreto a la restauración, al ataque de sulfatos y otros productos químicos y a la penetración del ion cloruro. La permeabilidad también afecta a la capacidad del concreto para resistir los ciclos de congelación y deshielo en condiciones de saturación.

La permeabilidad de la pasta depende de la relación agua-cemento y del grado de hidratación del cemento o duración del curado húmedo. La inclusión de aire en el concreto, ayuda a la hermeticidad del mismo aunque tiene un efecto mínimo sobre la permeabilidad. Las relaciones agua-cemento bajas también reducen la segregación y la exudación, contribuyendo adicionalmente a la hermeticidad. Para ser hermético, el concreto también debe estar libre de agrietamientos y de celdillas (Neville, 1998).

1.1.2 Tipos de poros que se encuentran en el concreto.

Hay una variedad de tipos de poros en el concreto. Estos tipos pueden ser clasificados por lo que se refiere a su origen o por lo que se refiere a su efecto anticipado en los parámetros mensurables como la fuerza o permeabilidad (Figura N° 1.1). Las fuentes de porosidad en el concreto son:

- Poros en el gel de cemento
- Poros capilares pequeños
- Poros capilares grandes
- Vacíos grandes (también incluidos en esta categoría pueden estar los vacíos intencionalmente agregados por ejemplo por el arrastre del aire.)
- Porosidad asociada con las zonas de interfaz de pasta-agregado
- Micro vacíos y discontinuidades asociadas con inestabilidades dimensionales que ocurren durante el curado
- Porosidad del agregado

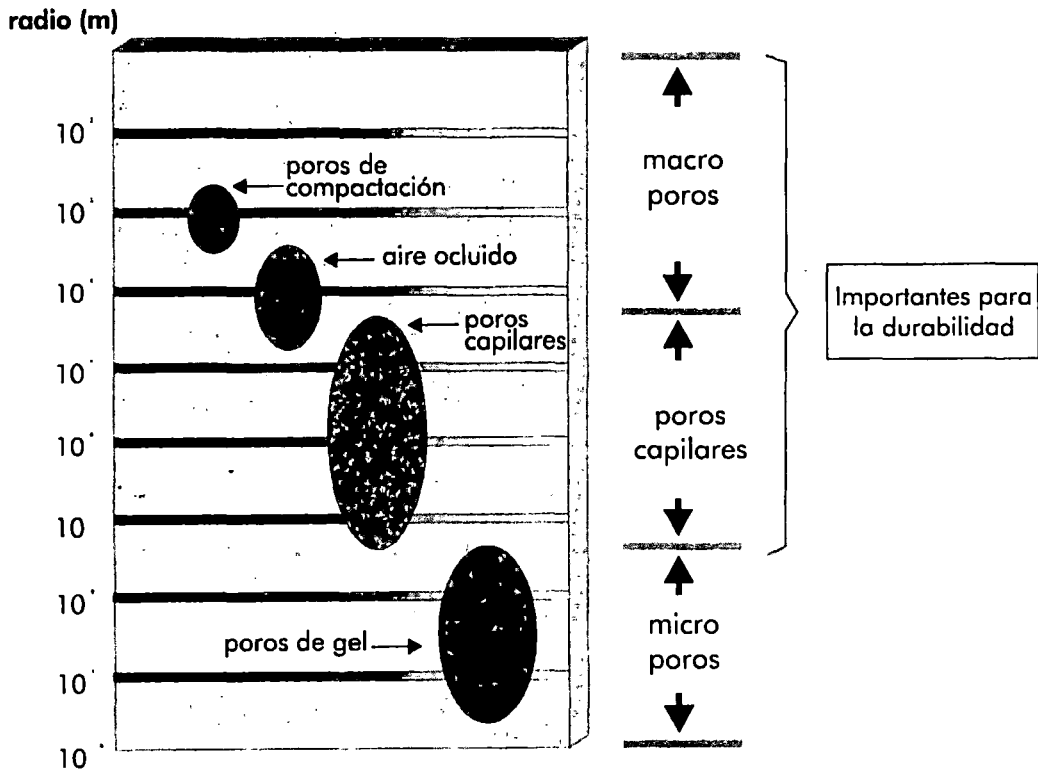


Figura N° 1.1 Conformación de la estructura del concreto según Setzer. Fuente: Comisión IV, Grupo Español de Hormigón, Durabilidad de estructuras de hormigón 1993.

Se asume que el diámetro de un poro de gel estable es de aproximadamente 2 nm, La selección de estos valores es basado en la suposición que los productos de hidratación no pueden precipitar en poros que tienen los diámetros más pequeños que el descrito anteriormente, porque la porosidad de gel reside en la hidratación de productos que se acumulan entre la fase líquida y los granos anhídridos del cemento. La porosidad del gel tiene un efecto mayor en la hidratación pero sólo un efecto menor en procesos de transporte que involucran los líquidos. Sin embargo, no hay en la actualidad ninguna justificación por ignorar los otros tipos de poros listados anteriormente. Así, la contribución de cada uno de los tipos restantes de porosidad a la permeabilidad debe ser considerada.

Se puede subdividir la porosidad en el concreto en dos clases:

- a) En la matriz de pasta
- b) En la asociación entre el agregado e interfaz de pasta.

La fuente principal de la porosidad de la matriz que contribuye a la permeabilidad está asociada con el espacio residual entre granos de cemento que estaban originalmente llenos de agua.

La contribución de la porosidad asociada con las zonas de interfaz entre pasta y agregados, es debido a las microgrietas que se desarrollan en esta región y que posteriormente se extienden dentro de la pasta al ser sometidas a esfuerzos, estas grietas pueden cambiar la permeabilidad del concreto, por lo cual es recomendable hacer el análisis del concreto cuando está sometido a esfuerzos.

Puede considerarse que dos tipos de porosidad forman la red de porosidad capilar en el cemento y concreto: la porosidad capilar tanto grande como pequeña. Una razón por categorizar la porosidad de esta manera se relaciona a la influencia química y las mezclas minerales en los dos tipos. Se asume que la porosidad capilar tiene un efecto mayor en los procesos de transporte pero sólo un efecto menor en las proporciones de hidratación. Sin embargo, ha sido propuesto que el más bajo límite del diámetro de porosidad capilar es 100 nm., hay que notar una diferencia clara entre el tamaño de un poro del gel (2 nm) y el límite más bajo en el tamaño del poro capilar.

La IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) establece una clasificación del tamaño de los poros, según sea el valor de su diámetro promedio, así se señalan los siguientes tres grupos:

- Microporos: poros con diámetros medios inferiores a 2 nm.
- Mesoporos: Poros con diámetros medios comprendidos entre 2 y 50 nm.
- Macroporos: poros con diámetros medios superiores a 500 nm.

En el rango de tamaño de los mesoporos se dan las interacciones electrostáticas entre las paredes del poro y el líquido que se filtra y se extiende por encima de un fragmento del área de sección transversal. Es por estas interacciones que los mecanismos de transporte a través de este diámetro de poros son obstaculizados por efectos electrostáticos.

1.1.3 Efectos de la porosidad en la resistencia a la compresión.

Según lo descrito P. Kumar Mehta existe una relación inversa entre la porosidad y la resistencia de los sólidos que para los materiales homogéneos simples (Figura N° 1.2), puede expresarse de la siguiente forma:

$$S = S_0 e^{-k\rho} \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

Dónde:

S: Resistencia de un material con porosidad "ρ"

S₀: Resistencia del mismo material con porosidad cero.

ρ: Porosidad del material.

k: Constante experimental

Para muchos materiales, la relación "S/S₀" graficada contra la porosidad, sigue la misma curva descrita a continuación:

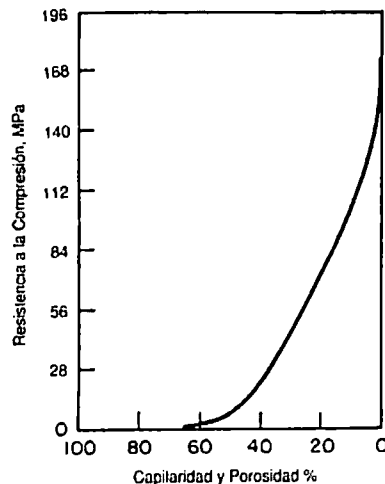


Figura N° 1.2 Relación porosidad-resistencia en cementos. Fuente: P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro, CONCRETO, Estructura, propiedades y materiales, 1998.

Powers encontró que la resistencia a la compresión a los 28 días "f_c", de tres mezclas de morteros diferentes, estaba relacionada con la relación gel/espacio, o con la relación entre la hidratación de los productos sólidos en el sistema y el espacio total:

$$f_c = aX^3$$

(Ecuación 1.2)

Dónde:

a: Es la resistencia del material con porosidad real "ρ" (Valor de S₀ de la ecuación 1.1, cuando tiene una porosidad "ρ")

X: La relación sólido/espacio o la cantidad de fracción de sólidos (1- ρ)

Los datos que Powers encontró se muestran en la siguiente figura, y confirman lo planteado en la ecuación 1.2:

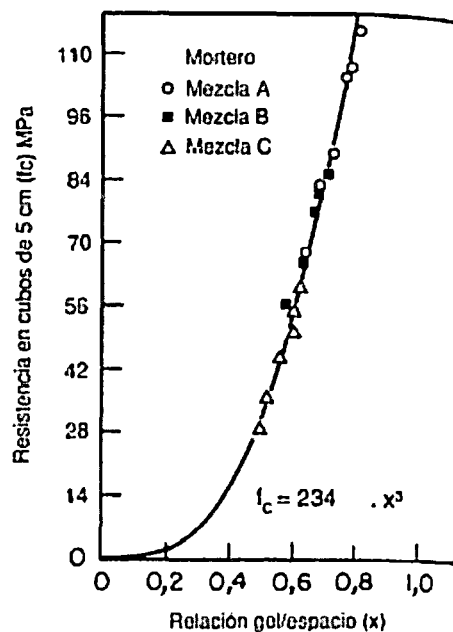


Figura N° 1.3 Morteros de cemento Portland con diferentes proporciones. Fuente: P. Kumar Mehta, Paulo J.M. Monteiro, CONCRETO, Estructura, propiedades y materiales, 1998

Mientras que en la pasta endurecida de cemento o mortero, la porosidad puede relacionarse con la resistencia, en el concreto la situación no es tan simple. La presencia de microgrietas en la zona de transición entre el agregado grueso y la matriz de la pasta de cemento hace que el concreto sea un material demasiado complejo para predecir su resistencia por medio de relaciones con la porosidad, no obstante se sigue manteniendo su relación inversa. Sin embargo hay modelos que relacionan la porosidad del concreto no solo con la relación agua-cemento sino también con otros factores como el grado de hidratación del

concreto, el contenido de aire incorporado, la relación arena piedra el contenido de cemento y más.

A continuación presentamos el modelo matemático propuesto por Solís y Moreno, 2006:

$$P = \frac{\frac{a}{c} - 0.36h + \frac{A}{C}}{0.317 + \frac{1}{\rho_f} \frac{A_f}{C} + \frac{1}{\rho_g} \frac{A_g}{C} + \frac{A}{C}} \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

Donde:

P: Porosidad del concreto

a/c: Relación agua-cemento

h: Grado de hidratación del concreto

A: Volumen de aire atrapado

A_f: Cantidad de agregado fino

A_g: Cantidad de agregado grueso

C: Cantidad de cemento

ρ_f: Gravedad específica del agregado fino

ρ_g: Gravedad específica del agregado grueso

Existen diferentes modelos para relacionar la porosidad y la resistencia a la compresión, en la Figura N° 1.4 presentaremos algunos:

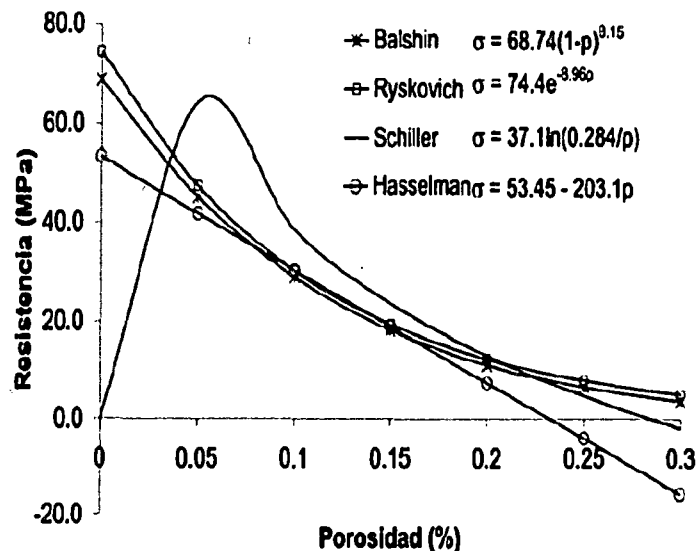


Figura N° 1.4. Relación entre la porosidad y la resistencia en el concreto. Fuente: Kumar, R., Bhattachrjee, B., Porosity, size distribution of pore an insitu strength in concrete, 2003.

La respuesta del concreto al esfuerzo aplicado no solo depende del tipo de esfuerzo, sino también de una combinación de varios factores que afecta a la porosidad de los distintos componentes estructurales del concreto. Los factores están influenciados por las propiedades, las proporciones de los materiales que constituyen la mezcla del concreto, el grado de compactación y las condiciones del curado. Desde el punto de vista de la resistencia, la relación entre el coeficiente agua/cemento y la porosidad es el factor más importante, porque independientemente de otros factores afecta la porosidad de ambos, la matriz de la pasta de cemento y de la zona de transición entre la matriz y el agregado grueso.

La determinación directa de la porosidad de los componentes estructurales individuales del concreto: la matriz y la zona de transición es impráctica, y por lo tanto, no se pueden desarrollar modelos precisos para predecir la resistencia del concreto. Sin embargo, en los últimos tiempos se han encontrado muchas relaciones empíricas útiles, que en forma práctica proporcionan información indirecta pero suficiente acerca de la influencia de numerosos factores en la resistencia a la compresión (siendo la resistencia a la compresión ampliamente usada como un índice de todos los otros tipos de resistencia).

1.2 PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO.

1.2.1 Definición de permeabilidad.

La permeabilidad es la capacidad que tiene un material de permitir que un flujo lo atraviese sin alterar su estructura interna. En construcción, se considera a un material como permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado (mayor a 10^{-10} m/s), y se puede considerar también que es impermeable, si la cantidad de fluido es despreciable (menor a 10^{-12} m/s).

La permeabilidad total del concreto al agua es una función de la permeabilidad de la pasta (la misma que está en función del grado de hidratación del cemento), de la permeabilidad y granulometría del agregado, y de la proporción relativa de la pasta con respecto al agregado. La disminución de permeabilidad mejora la resistencia del concreto al ataque de los agentes externos.

El concreto empleado en estructuras que retengan agua o que estén expuestas a mal tiempo o a otras condiciones de exposiciones severas debe tener un coeficiente de permeabilidad muy bajo y ser hermético. La hermeticidad se define a menudo como la capacidad del concreto de retener el agua sin escapes visibles. La permeabilidad se refiere a la cantidad de migración de agua a través del concreto cuando el agua se encuentra a presión, o a la capacidad del concreto de resistir la penetración de agua u otras sustancias (líquido, gras, iones, etc.). Generalmente las mismas propiedades que convierten al concreto menos permeable también lo vuelven hermético.

1.2.2 Relación entre porosidad y permeabilidad.

Para ser permeable, un material debe ser poroso, es decir, debe contener espacios vacíos o poros que le permitan absorber fluido. A su vez, tales espacios deben estar interconectados para que el fluido disponga de caminos para pasar a través del material.

Por causa de la existencia de poros de diferentes clases, de los cuales algunos contribuyen a la permeabilidad y otros no, es importante distinguir entre porosidad y permeabilidad. La porosidad es una medida de la proporción del

volumen total del concreto ocupado por poros, y se acostumbra expresar en porcentaje. Si la porosidad es alta y los poros están interconectados, éstos contribuyen al transporte de los fluidos a través del concreto, de manera que su permeabilidad es también alta. Por otro lado, si los poros son discontinuos o inefectivos de otra manera con respecto al transporte, entonces la permeabilidad del concreto es baja, aun si su porosidad es alta.

1.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PERMEABILIDAD DEL CONCRETO.

En general, se puede decir que los factores que influyen en la permeabilidad de concretos se originan en sus materiales constituyentes, en los métodos empleados en su preparación y en el grado y calidad de los procesos de curado. Los factores de mayor influencia en la permeabilidad de los concretos se podrían agrupar, por ejemplo, en los relacionados con el ambiente y los relacionados con las características propias del concreto. Para los primeros, podrían influir las condiciones climáticas del lugar y algunas condiciones especiales como exposición a altas temperaturas, posibilidades de incendio, sometimiento a ciclos de hielo y deshielo, humedecimiento-secado, etc. Para los segundos, se tendrían en cuenta condiciones especiales del proyecto en cuanto a materiales constitutivos del concreto, procesos constructivos, diseños especiales, detalles arquitectónicos, mantenimiento.

Las principales variables que influyen, en menor o mayor medida, en la permeabilidad de los concretos son:

- ✓ Relación agua/cemento
- ✓ Finura del cemento
- ✓ Tiempo de curado
- ✓ Presencia de aditivos
- ✓ Geometría de la probeta estándar
- ✓ Porosidad de los agregados
- ✓ Presión de agua a la que está sometido el concreto
- ✓ Humedad del ambiente
- ✓ Vacíos por compactación

El análisis de la influencia que estos factores tienen sobre la permeabilidad se ve afectado por la complejidad del fenómeno, ya que el coeficiente de permeabilidad no es constante a través de toda la pasta. Además, existen otros efectos relacionados de manera indirecta, como el hecho de que el elemento esté o no sometido a cargas, lo que aumenta en forma considerable la permeabilidad de los concretos

1.3.1 Relación agua-cemento.

A medida que disminuye la relación agua/cemento, genera disminución de la porosidad y el concreto se vuelve menos permeable, bajo adecuados procesos de mezcla, transporte, colocación y curado del concreto. Además, una baja relación agua/cemento aumenta la resistencia del concreto y por consiguiente su tendencia al agrietamiento disminuye.

1.3.2 Porosidad de la pasta.

La permeabilidad del concreto no es sólo función de la porosidad (sumatoria de los poros de la pasta de cemento y de los agregados), sino que también depende del tamaño, distribución y continuidad de los poros; además el concreto es por naturaleza un material poroso, lo cual puede explicarse por el hecho de que aproximadamente el 70% del agua empleada para su elaboración no es utilizada en el proceso de hidratación y, al evaporarse, deja en la mezcla una red de poros que puede servir de entrada futura de agentes agresores. De otro lado, los poros que existen en el concreto pueden proceder de la estructura interna de los granos de cemento, el aire que intencionalmente se puede incorporar, la estructura interna de los agregados, el asentamiento de la mezcla, los capilares originados en la interface de los diferentes componentes, el gel producto de las transformaciones químicas y de la evaporación de parte del agua.

Existen algunos casos en que la porosidad no es directamente proporcional a la permeabilidad: es posible introducir en el concreto una red de poros microscópicos no conectados entre sí, que protegen el concreto y mejoran la impermeabilidad. Sin embargo, en general, puede afirmarse que, a mayor porosidad, mayor permeabilidad de la pasta.

1.3.3 Curado del concreto.

El curado es el proceso que busca mantener en el concreto una temperatura y un contenido de humedad adecuados durante los primeros días después del vaciado, para que puedan desarrollarse las propiedades deseadas. Un buen curado se ve reflejado en unas adecuadas condiciones de resistencia y durabilidad. Aunque la cantidad de agua que se utiliza en la mezcla es mayor que la que es necesario retener en el proceso de curado, la pérdida excesiva de agua en las primeras horas posteriores al vaciado puede reducir la cantidad retenida de esta hasta niveles inferiores de los necesarios para la hidratación.

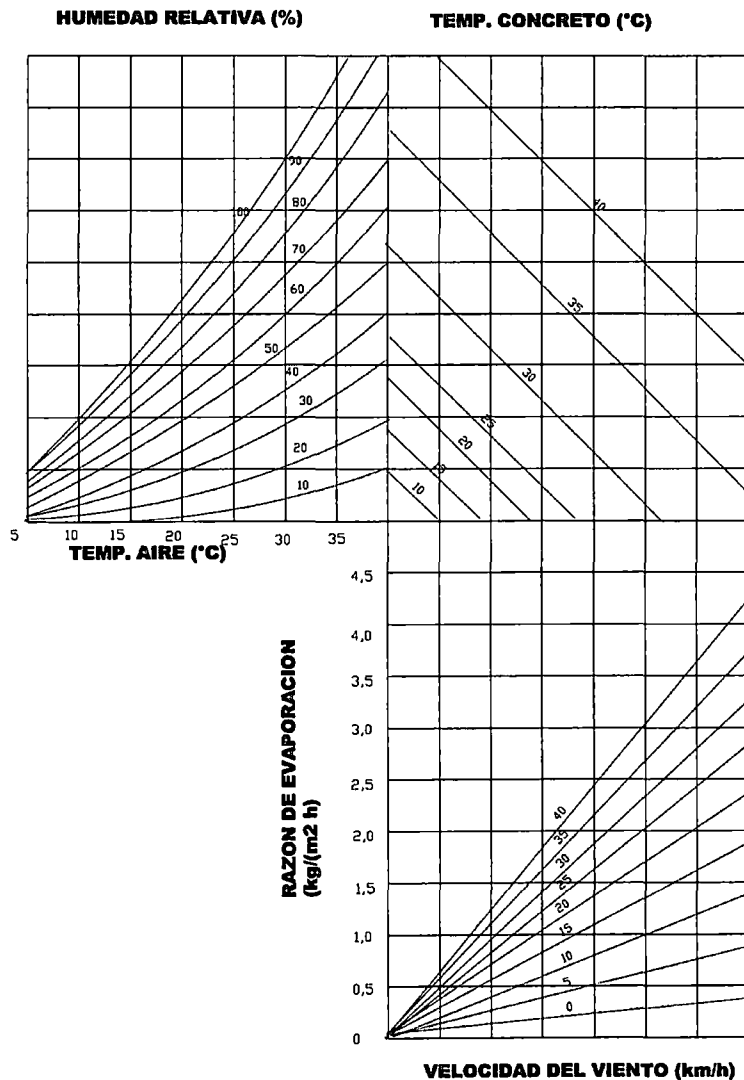


Figura N° 1.5 Efectos de la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento con la velocidad de evaporación del agua. Fuente: Martialay, Rafael Muñoz. Permeabilidad al aire del hormigón, 1975

A mayor tiempo de curado menor permeabilidad de los concretos, ya que permite una buena hidratación y disminución de la cantidad y tamaño de los vacíos. La pérdida de agua por evaporación es, a su vez, función de la temperatura y la humedad relativa ambiente, la temperatura del concreto y la velocidad del viento a que esté expuesto el concreto. En la Figura N° 1.5 se presenta un diagrama con el que puede estimarse la tasa de evaporación con base en estas variables.

1.3.4 Otros factores.

La presencia de aditivos y adiciones en el concreto permiten el desarrollo de algunas propiedades, que mejoran las características del concreto ante ciertas condiciones (en algunos casos desfavorecen otras características), es así como el humo de sílice ha sido quizás la adición más representativa en lo que refiere a la búsqueda de concretos impermeables.

Adicionalmente, debe tenerse en cuenta que la permeabilidad al agua, del concreto, está influenciada también por el grado de compactación, la presencia de juntas, fisuras o heterogeneidades, así como la forma del mantenimiento de la estructura en el tiempo.

1.4 CONSECUENCIAS DE LA PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO.

1.4.1 Ataque de sulfatos.

La reacción de los sulfatos con el concreto es perjudicial debido a que forman los compuestos de sulfato de calcio (yeso) y sulfoaluminato de calcio (etringita) (ver Figura N° 1.6) estos componentes ocupan mayor volumen que sus precedentes, se expanden, esta expansión produce esfuerzos en la estructura interna del concreto produciendo su agrietamiento (Figura N° 1.7). Estas reacciones ocurren en medio acuoso, es decir que evitando el flujo de agua dentro del concreto (disminuyendo su permeabilidad), se minimizan las reacciones entre los sulfatos y el concreto, adicionalmente se debe tener en cuenta el tipo de cemento a utilizar.

Uno de los sulfatos más dañinos es el sulfato de magnesio que adicionalmente descompone los silicatos (Hidroxido de calcio y Aluminato tricalcico hidratado), formando silicato de magnesio el cual no tiene propiedades aglutinantes.

Los indicios de esta reacción es una apariencia blanquecina y posteriormente se forman grietas y astillamientos en los bordes y esquinas (Figura N° 1.8).

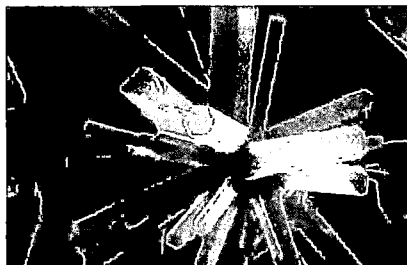


Figura N° 1.6 Cristal de etringita, visto a través del microscopio electrónico. Fuente: <http://www.construmatica.com/construpedia>

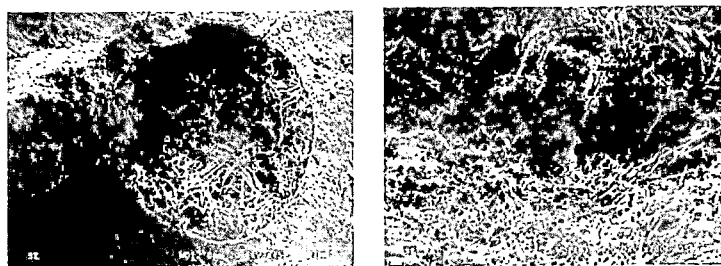


Figura N° 1.7 Cristales de etringita relleno un poro (izquierda) y etringita rompiendo una partícula de árido (derecha). Fuente: ingenierodelacrisis.wordpress.com

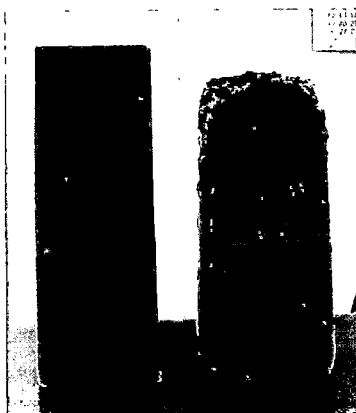


Figura N° 1.8 Bloque de concreto en estado natural (izquierda) y Bloque de concreto expuesto al ataque de sulfatos (derecha). Fuente: <http://blogdocumento.blogspot.com>

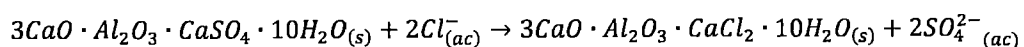
1.4.2 Ataque de cloruros.

Los cloruros en sí son inofensivos para el concreto pero al ser el concreto un material permeable los cloruros disueltos en agua atraviesan la estructura hasta llegar al acero, el acero de refuerzo al estar en contacto con los iones cloruro se producen reacciones de reducción en el acero (corrosión).

El tipo de cemento y su capacidad de retener o combinar cloruros es uno de los parámetros relevantes en el proceso de corrosión de la barra interna de la estructura de concreto, como también, las bajas relaciones de agua/cemento son una garantía de una difusión lenta de los cloruros hacia el interior de la estructura.

El contenido de cloruro libre para reaccionar con el acero depende de varios factores, entre ellos, el contenido de aluminato tricálcico (C3A) y de ferroaluminato tetracálcico (C4AF) del cemento. La ecuación 1.3 muestra la reacción donde los iones cloruros reemplazan a los iones sulfato que se hayan enlazado al cemento rico en C3A.

La formación de cloro aluminatos de calcio inhibe la difusión de iones cloruro hacia el interior, debido a la formación de esta sal, que deja a los iones cloruros ligados, no libres. Por esta razón cuando se realizan análisis de determinación de cloruros dentro del hormigón, se hace para los iones cloruro libres, ya que los ligados solo pueden liberarse con adición de ácidos en el análisis, debido a la estabilidad que presenta este tipo de sal, llamada sal de Friedel. Por este motivo, un cemento con mayor contenido de aluminato tricálcico, debe tener un mejor comportamiento frente a la difusión de los iones cloruro.



(Ecuación 1.4)

1.4.3 Ataque de ácidos.

El concreto es débil contra los ácidos, lo que se debe evitar es la formación de los mismos en el interior del concreto, los componentes nocivos más habituales

son principalmente el dióxido de azufre y dióxido de carbono encontrados en el medio ambiente, estos componentes combinados con agua forman ácidos que disuelven y remueven la pasta de cemento, produciéndose una masa suave y débil. Estas reacciones se vuelven considerables cuando los niveles de pH se reducen hasta 6.5 y los efectos serían severos cuando este desciende hasta 4.5 o menos.

1.4.4 Carbonatación.

Esta reacción se da entre el dióxido de carbono del medio ambiente y el agua atrapada en el concreto, solo se requiere una pequeña concentración de CO₂ (0.03%) que normalmente se encuentra en la atmósfera, al estar en contacto estos componentes, se forma ácido carbónico que reacciona con el hidróxido de calcio formando carbonato de calcio (sal insoluble) con lo cual el concreto pierde pH (tiende a ser ácido) esta pérdida de pH destruye la protección que se logra con la formación de una capa pasiva homogénea de óxido sobre la superficie del acero y que permanece estable en medio alcalino. Como resultado el acero se corroe.

Las reacciones básicas de la carbonatación en el concreto se manifiestan de la siguiente forma:

Los poros de un concreto ordinario, bajo condiciones cíclicas de humedad, contienen agua (H₂O) e hidróxido de calcio o cal [Ca(OH)₂]

Cuando el CO₂ del aire entra en contacto con el agua contenida en los poros del concreto, se forma ácido carbónico de acuerdo a:



El ácido carbónico neutraliza el hidróxido de calcio y forma carbonato de calcio sólido, de pH neutro.



Generalmente, el agua contiene calcio y magnesio en forma de bicarbonatos (como $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$), encontrándose el primero en mayor cantidad. Este compuesto aparece en el agua, constituyendo el siguiente equilibrio:

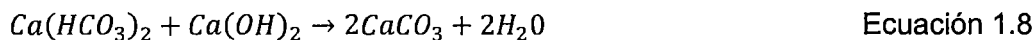


En la ecuación, se constata que es necesaria la presencia de una cantidad libre de CO_2 para mantener el equilibrio, que definiremos como CO_2 de equilibrio, y que no es perjudicial para el concreto. No obstante, si la cantidad de CO_2 libre existente, es mayor que la correspondiente de equilibrio, se rompería el equilibrio y se podría disolver más cal, provocando que el agua se transforme en agresiva.

El mecanismo del ataque de las aguas con CO_2 agresivo es el siguiente:

Sobre la superficie del concreto existe CaCO_3 , como consecuencia de la reacción del CO_2 de la atmósfera con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$, el cual disminuye la permeabilidad del concreto, ya que actúa como sellador debido a su baja solubilidad.

Sin embargo, en presencia de una elevada humedad (producto de la lluvia, condensaciones, etc.) y CO_2 agresivo, se efectuará la reacción:



El carbonato de calcio obstruye los poros, pero después es atacado nuevamente por el agua agresiva, constituyéndose un proceso dinámico. El agua con CO_2 agresivo puede aparecer en aguas subterráneas, embalses, etc. El agua que contiene más de 20 ppm de CO_2 agresivo, puede generar una carbonatación rápida de la pasta de cemento hidratada.

1.4.5 Eflorescencia.

La eflorescencia es una apariencia blanquecina en algunas áreas del concreto (Ver Figura N° 1.9) debido a que el hidróxido de calcio es extraído por lixiviación estos al combinarse con el dióxido de carbono del ambiente deja un depósito de

carbonato de calcio, al evaporarse el agua queda esa marca blanquecina característica. Esto nuevamente puede evitarse al controlar la permeabilidad del concreto evitando la pérdida de hidróxido de calcio.



Figura Nº 1.9 Muro de concreto afectado por eflorescencia. Fuente:
<http://www.preguntaleasherwin.cl>

1.4.6 Otros procesos patológicos.

- **Criptoefflorescencias:** igual a la eflorescencia pero la evaporación y cristalización se produce al interior de los paramentos especialmente porosos, generándose expansiones produciendo desprendimientos del recubrimiento.
- **Procesos orgánicos:** la acción del viento y el aire traslada semillas y esporas que germinan produciendo musgos, líquenes, algas y hongos en exteriores y mohos y colonias de bacterias en superficies interiores.
- **Disgregación por congelamiento:** aumento de volumen por congelamiento del agua infiltrada o condensada intersticialmente en un elemento poroso. El aumento es de aproximadamente 9%. Si la pieza está lejos del grado de saturación existen poros vacíos para expandirse, pero de lo contrario, pueden generarse presiones suficientes para agrietar la matriz de concreto.
- **Pérdida de capacidad aislante:** la presencia de aire confinado en la masa guarda una relación directa con su capacidad aislante: si los poros se encuentran saturados con agua, actúa como un sólido de elevada conductividad térmica.

1.5 MODELOS PARA LA POROSIDAD Y PERMEABILIDAD DEL CONCRETO.

1.5.1 Modelos empíricos.

En general, la permeabilidad es una medida de la facilidad con que pasan los fluidos a través de un cuerpo poroso, a continuación se describen algunos de los métodos usados para determinar la permeabilidad (no obstante existen muchos más métodos basados en otras teorías). La expresión más usada que describe la permeabilidad "k", es la ley de Darcy:

$$k = \frac{\mu Q}{A \delta g (dh/dz)} \quad \text{Ecuación 1.9}$$

Donde:

Q: Volumen de fluido descargado por unidad de tiempo a través de A.

A: Área de sección perpendicular.

μ : Es la viscosidad del fluido.

δ : Es la densidad del fluido.

g: la aceleración de la gravedad.

dh/dz : El gradiente hidráulico en la dirección del flujo z.

Otro modelo simple es el de Poiseuille. La ley de Poiseuille indica que el volumen que atraviesa un tubo capilar de diámetro "r" es:

$$Q = - \frac{\pi r^4}{8\mu (dP/dl)} \quad \text{Ecuación 1.10}$$

Donde:

μ : Viscosidad del fluido.

dP/dl : Es el gradiente de presión que causa el flujo a lo largo de un tubo de longitud "l".

Los dos modelos anteriores simples pueden combinarse para desarrollar una expresión para la permeabilidad. Asumiendo que la porosidad en una sección

perpendicular a través de un material con el fragmento de porosidad total “ ε ” son el resultado de las interacciones de poros que tienen diámetros diferentes “ r_i ”, el término “ A ” en la ley de Darcy puede expresarse como “ S/ε ”. “ S ” es el área de la sección del poro. En este caso, el flujo de volumen total puede expresarse en ambas leyes, ley de Darcy y ley de Poiseuille así:

$$Q = - \left(\frac{(S/\varepsilon)k}{\mu(dP/dl)} \right) \quad \text{Ecuación 1.11}$$

$$Q = - \sum \frac{\pi(r_i)^4}{8\mu(dP/dl)} \quad \text{Ecuación 1.12}$$

(Los términos “ g ” y “ δ ” resultan con la única diferencia de unidades), y combinando las dos ecuaciones anteriores se obtiene que:

$$k = \frac{\varepsilon}{S \sum \pi(r_i)^4 / 8} = \varepsilon \frac{\sum (S_i(r_i)^2 / 8)}{S}$$

$$k = \varepsilon \langle r^2 \rangle / 8 \quad \text{Ecuación 1.13}$$

Donde:

S_i : Es el área de la sección transversal del poro de radio “ r_i ”

$\langle r^2 \rangle$: Es la media del cuadrado del radio del poro, o el segundo momento de la distribución del radio-poro.

Este modelo relaciona la permeabilidad, la porosidad y el promedio del tamaño del poro asumiendo que los poros son tubos y no están interconectados.

1.5.2 Modelos de redes.

El modelo de Darcy-Poiseuille, y algunos otros modelos desarrollados intentan relacionar la permeabilidad con un cierto medio descriptor de porosidad, o con la porosidad total. No consideran las estructuras en una red de poros. A pesar de esta limitación estos modelos pueden, en algunos casos, predecir

cualitativamente la permeabilidad del concreto. Sin embargo, las predicciones basadas en estos modelos se consideran con frecuencia inadecuadas. Estudios en las geociencias condujeron a desarrollar un modelo de red para describir la permeabilidad. Desde entonces, los modelos de red que describían sistemas de poros se han desarrollado en las áreas de la geofísica, geología del petróleo, los suelos, y la ingeniería química. Sin embargo, ninguno parece haber sido desarrollado específicamente en el área del cemento y del concreto, pero se pueden asemejar por las características porosas que tienen los materiales que se han usado en el concreto.

Los modelos de red se basan en la analogía de la ley de Darcy para flujo de fluidos y la ley de Ohm para el flujo actual. En un modelo basado en rocas, Seeburger y Nur (1984), investigaron los efectos de confinar la presión del módulo de permeabilidad y de vacíos en rocas usando un modelo de espacio de poro de red como herramienta.

En dicho modelo de red, los elementos son tubos capilares de longitud, sección transversal, y forma dada. El cambio de la permeabilidad con la presión hidrostática confinada es causado por el efecto del campo de tensión en la forma y las características de flujos constantes de cada elemento. En un modelo desarrollado por Dullien, una red consiste en muchas subredes de poros que tienen el tamaño de entrada del poro más pequeño (Figura N° 1.10)

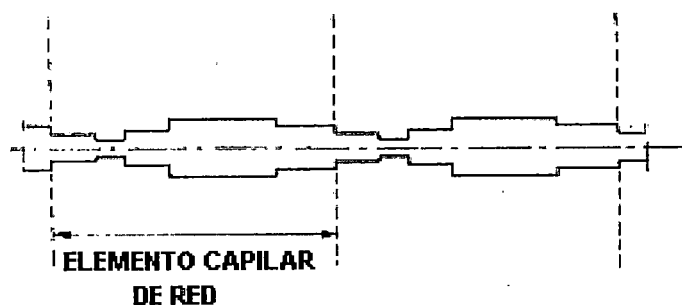


Figura N° 1.10 Elemento de una red de poros, en donde los tamaños del poro pueden ser muy variables. Fuente: Jan Skalny, and Sydney Mindess, Materials Science of Concrete II, 1991

Cada subred se trata como un canal de flujo. El flujo de volumen en cada canal es determinado por el cuadrado del diámetro de los poros en ese canal. El

volumen de flujo total es la suma de los flujos en todos los canales de flujo. El modelo de Dullien se escribe como sigue:

$$k = \frac{\varepsilon \langle D^2 \rangle}{96} \quad \text{Ecuación 1.14}$$

Donde “D²” es la medida del diámetro al cuadrado del poro y “ε” la porosidad. El valor de la constante en la ecuación anterior difiere en el modelo clásico de Poiseuille (Ecuación 1.13), por un factor de 3. Dullien interpretó estas diferencias en un factor de tortuosidad.

1.5.3 Modelos basados en la teoría de la filtración.

A finales de los años 50 se introdujo un término dentro de esta rama llamado “teoría de la filtración” que describe un fenómeno crítico, o conducta de transición de fase. Las bases para la teoría de la filtración pueden ser consideradas en términos de la ocupación del sitio de un enrejado. Una primera suposición es que cada sitio cualquiera está ocupado o vacío basado en el proceso completamente aleatorio que es independiente de la ocupación de los sitios vecinos. La probabilidad de un sitio ocupado es “p” y “(1-P)” es la probabilidad de un sitio vacío.

Los sitios ocupados se aíslan de un adyacente vacío para formar racimos. Si la ocupación del sitio tiende a cero, más de los sitios ocupados se aislarán. Si, por otro lado, la ocupación del sitio está cerca de la unidad, entonces casi todos los sitios ocupados se conectan entre sí para formar un racimo grande que se extiende de un lado al otro del enrejado.

Este racimo grande representa una trayectoria infinita. Se filtra a través del enrejado de manera semejante a la manera que el líquido se filtra a través de los materiales porosos a lo largo de la red de poros conectados, aumentando la ocupación del sitio de cero a la unidad, y produciendo así un punto crítico (lo máximo de la filtración), “P_c”, sobre el cuál puede formar una trayectoria infinita. La ocurrencia de una trayectoria infinita se ilustra en la Figura N° 1.11, para un modelo simple del líquido que atraviesa un medio poroso.

La filtración descrita anteriormente es llamada filtración del sitio. Hay contrapartes llamadas filtración en enlace. En este caso, cada sitio dentro del racimo es ocupado y las interconexiones entre los sitios vecinos son estimadas como enlaces. En este caso, "p" es la probabilidad que un enlace esté abierto y "(1-p)" la probabilidad de que un enlace esté cerrado. Un racimo es un grupo de sitios vecinos conectados por las ataduras abiertas. La filtración máxima, "Pc", es la fracción de ataduras abiertas alrededor de un camino infinito que no puede formarse como un racimo. El líquido que atraviesa los materiales porosos se puede modelar en términos de su paso a través de poros de una interconexión de la red.

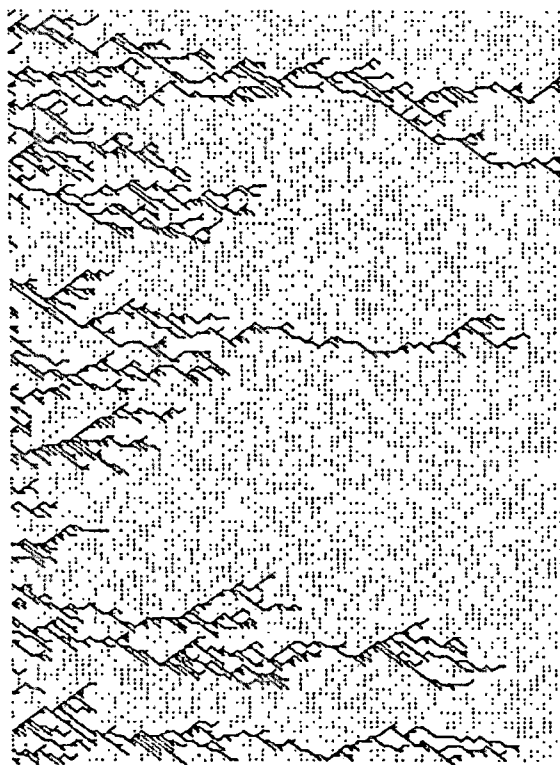


Figura N° 1.11 Elemento de una red de poros, en donde los tamaños de los poros pueden ser muy variados. Fuente: Jan Skalny, and Sydney Mindess, Materials Science of Concrete II, 1991.

Entre la filtración del sitio y la filtración del enlace hay un tipo de filtración llamado sitio-enlace de filtración. Los sitios del enrejado no son largamente ocupados al igual que la filtración en el enlace. En el sitio-enlace de filtración, "p" es la probabilidad que haya una atadura entre los sitios vecinos. Un racimo es entonces un grupo de sitios ocupados vecinos conectados por enlaces. El

umbral (máxima) en enlace de la filtración disminuye de la unidad, cuando la porción de sitios ocupados iguala el umbral (máxima) de la filtración del sitio, al umbral (máxima) en enlace normal de la filtración, cuando la fracción de sitios ocupados es la unidad.

Este tipo de filtración parece representar lo más de cerca posible la naturaleza del líquido que atraviesa los materiales porosos. La fracción de sitios ocupados es equivalente a la porosidad, los enlaces representan los canales que conectan poros y un racimo representa los poros de la trayectoria infinita. Los canales pueden consistir en entradas y grietas del poro.

En la teoría de la filtración, "P" se define como la fuerza de la red infinita. La fuerza "P", es la probabilidad de la filtración que un sitio pertenece a la trayectoria infinita. Es realmente la fracción del número total de los sitios del enrejado que están en una red infinita. Una expresión de la ley de la energía puede ser escrita así:

$$P = (p - p_c)^t \quad \text{Ecuación 1.15}$$

Si "p" se acerca a "p_c" de donde anteriormente "p" es la concentración del sitio o de enlaces ocupados, y "p_c" es la concentración crítica. Las características del transporte son proporcionales a "(p-p_c)^α", donde "α" es el exponente de transporte. Sin embargo, "t" usualmente difiere de "α" porque "P" cuenta para la columna principal y los callejones sin salida. Los callejones sin salida contribuyen a la masa de la red infinita pero no transportan características. Sin embargo, los callejones sin salida encierran el líquido.

Desde el punto de vista del flujo en materiales porosos, una red infinita consiste en dos porciones: columna principal y callejones sin salida. El líquido atraviesa un material poroso a lo largo de las columnas principales y se encierra en callejones sin salida. La medida de la permeabilidad trata generalmente solamente del flujo que atraviesa; sin embargo, el líquido encerrado puede afectar perceptiblemente características, tales como la resistencia hielo-deshielo del concreto. Es necesario considerar fenómenos asociados al flujo de columnas principales y callejones sin salida. La simulación de computadora se puede

utilizar para distinguir callejones sin salida de las columnas principales y para calcular fracciones de las columnas principales y de callejones sin salida con respecto a la red infinita; con los estudios numéricos se pueden cuantificar las columnas principales.

Varios de los modelos descritos previamente se pueden considerar en términos de los conceptos de filtración. La teoría de la filtración y la ley de Archie utilizan una ley de energía para describir el fenómeno crítico. Así, la ley de Archie se puede mirar como caso especial en el cual la mínima filtración sea cero. Para los materiales densos todavía permeables, el mínimo de filtración puede acercarse a un valor muy bajo. Por ejemplo, la sal de la roca tiene una porosidad de solamente 0.6% pero una permeabilidad de Darcy de 7.9×10^{-6} .

Dullien observó que la permeabilidad de la piedra arenisca al mercurio depende del grado del poro que se pre-llena por el mercurio. Es decir, los poros de un tamaño dado que fueron llenados previamente de mercurio contribuyeron a la permeabilidad mientras que los que no fueron llenados no contribuyeron al flujo a granel.

Dullien concluyó que en una saturación baja de mercurio debe haber canales continuos del flujo en el medio. En la saturación baja, solamente los poros de entrada más grandes son penetrados por el mercurio. Es decir, que estos canales de flujo consisten solamente en poros con las entradas grandes que pueden estorbarse por el mercurio. Sin embargo, si la saturación se reduce a un nivel muy bajo, no se registra ninguna permeabilidad. Esta saturación baja se debe relacionar con el mínimo de la filtración. Así, el modelo de Dullien y otro modelo estadístico desarrollado por Juang (no descrito en este trabajo) puede considerarse como los modelos de transición entre los modelos no filtrados-basados y los modelos filtrados-basados.

1.6 MÉTODOS PARA LA CUANTIFICACIÓN Y MEDICIÓN DE LA PERMEABILIDAD EN EL CONCRETO.

1.6.1 Métodos basados en las propiedades eléctricas del concreto.

Estos métodos aprovechan las propiedades eléctricas, como la resistividad eléctrica del concreto y del agua contenida en los capilares, también en la difusión a través del concreto que generan cargas que se pueden medir y comparar. Algunos métodos para cuantificar la permeabilidad son:

1.6.1.1 *Permeabilidad rápida de cloruros (Norma ASTM C 1202: Standard test for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration).*

El perfil de ingreso de cloruro en el concreto es una función que depende del tiempo, las condiciones ambientales, y el diseño, construcción y propiedades del material. Los mecanismos de transporte de cloruro en el concreto son complicados y se producen en forma combinada.

Los ensayos de difusión de cloruro demandan tiempos prolongados de evaluación y resultan poco apropiados como práctica de control del material. Para acelerar el proceso se aplica un campo eléctrico a través del material. El campo eléctrico afecta a los iones de tal manera que migran en dirección al electrodo de carga opuesta. El valor del potencial eléctrico impuesto debe ser limitado, ya que altos gradientes de potencial eléctrico aumenta el calor que incrementa la temperatura de la muestra.

Las velocidades de transporte que surgen de ensayos de difusión y de migración resultan diferentes, en la teoría y en los valores obtenidos, pero en principio pueden ser comparados.

Este ensayo está normalizado por la ASTM C1202 y la AASHTO T277. Consiste en valorar la habilidad del concreto para resistir la penetración de los cloruros mediante una inducción eléctrica. El ensayo consiste en preparar una probeta de concreto, con un espesor de 50 mm y un diámetro de 100 mm la que se somete

a un voltaje de 60V de corriente directa durante 6 horas, usando un montaje descrito en la Figura N° 1.12.

La probeta de concreto se coloca entre dos reservorios el primero contiene una solución de cloruro de sodio (NaCl) al 3% y el segundo contiene una solución de hidróxido de sodio (NaOH) 0.3M. La carga total que es transmitida por este sistema es determinada y usada para valorar la permeabilidad del concreto.

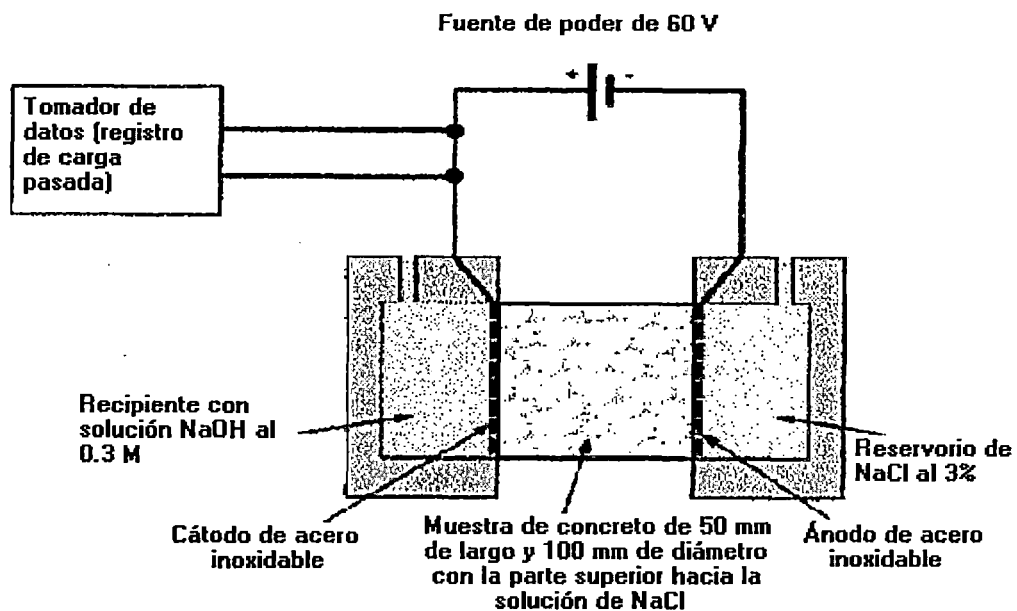


Figura N° 1.12 Esquema del equipo para medir la carga transmitida por el concreto. Fuente: Cortes, M. Penetración de cloruros en el hormigón influencia de la composición del cemento y de la pasta aglomerante, 1997.

Este ensayo a pesar de conocerse como "Ensayo rápido de permeabilidad del cloruro", en realidad no mide la permeabilidad sino el intercambio iónico. Al aplicar una excitación eléctrica al sistema no solo hay transporte de los iones cloruro sino que también existe movimiento de los demás iones presentes dentro de los poros y capilares del concreto.

A continuación en el Cuadro N° 1.1 se muestran los criterios establecidos en la norma ASTM C1202 para evaluar la resistencia de penetración del ion cloruro del concreto en función de la carga transmitida a través de él.

Cuadro N° 1.1. Resistencia a la penetración de ión cloruro para cada rango de carga transmitida a través de la matriz del concreto. Fuente ASTM C 1202

Carga que pasa (C)	Penetrabilidad al ión cloruro
>4000	Alta
2000 – 4000	Moderada
1000 – 2000	Baja
100 – 1000	Muy baja
<100	Despreciable

1.6.1.2 Voltaje crítico del concreto (CVC).

El principio de la prueba CVC es que la corriente siempre transita a través de la trayectoria más débil en el interior de los materiales y esa trayectoria, más débil, establece la permeabilidad del hormigón.

Se elaboran prismas de concreto de 100x100x300mm y se dejan curar por 4 semanas (28 días). Se extrajeron de los prismas muestras de aproximadamente 10 mm de espesor y se calentó a 75 ° C hasta que su peso fue constante (aproximadamente de 4 a 7 días).

La prueba de CVC se lleva a cabo a temperatura ambiente usando un generador de alto voltaje, con rango de 50kV, 2mA, DC. La representación experimental se ilustra en la figura 1.12. Los electrodos de cobre puro eran de 50 mm de diámetro. Después se coloca la muestra entre los electrodos, y se aplica el voltaje a los electrodos a una cierta velocidad en el rango de 10-1 kV/s. El voltaje crítico es registrado en el límite de la densidad de corriente, por lo general 5 mA/cm². La duración de esta prueba es por lo general menos de 5 min.

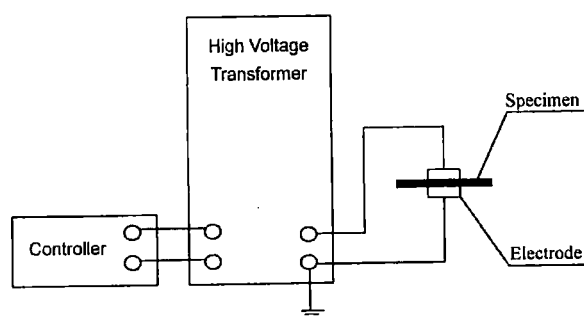


Figura N° 1.13 Esquema del generador de alto voltaje. Fuente: Xinying Lu, Meixia Chen, Fang Yuan – Cement and concrete research, 2000.

1.6.1.3 Resistividad eléctrica – método de Wenner.

La resistividad es una propiedad volumétrica de los materiales que indica la resistencia de la estructura interna del material al paso de las cargas eléctricas (Figura N° 1.14), como indica la ley de Ohm:

$$R = \frac{V}{I} = \rho \frac{l}{A} \quad \text{Ecuación 1.16}$$

Donde:

R: Resistencia eléctrica

V: Voltaje inducido

I: Intensidad del corriente

ρ : Resistividad

l: Distancia entre electrodos

A: Área transversal de paso de la corriente

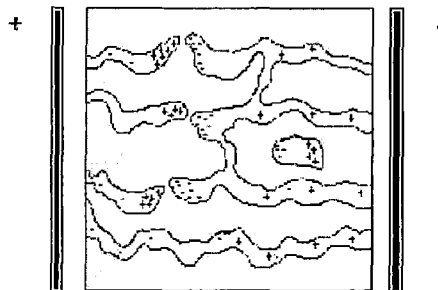


Figura N° 1.14 Los Electrones se desplazan con menor resistencia entre los capilares llenos de agua. Fuente: www.interempresas.net

Cuanto mayor es la resistividad menor es la porosidad del concreto y mayor su resistencia mecánica, al tener más fase sólida por volumen. Además si el hormigón no está saturado de agua la resistividad crece, por lo que es un indicador de su grado de saturación y la interconexión entre los poros con lo que nos daría una idea de la permeabilidad del concreto.

Método de Wenner:

Para medir la resistividad del concreto se introduce 4 electrodos en la superficie lateral de la muestra. Los cuatro electrodos se colocan en línea recta y a una misma profundidad de penetración, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia entre electrodos y de la resistividad del concreto, no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, aunque sí dependen de la clase de contacto (Figura N° 1.15).

El principio básico de este método es la inyección de una corriente directa o de baja frecuencia a través del concreto entre dos electrodos C1 y C2 mientras que el potencial que aparece se mide entre dos electrodos P1 y P2. Estos electrodos están enterrados en línea recta y a igual separación entre ellos. La razón V/I es conocida como la resistencia aparente. La resistividad aparente del terreno es una función de esta resistencia y de la geometría del electrodo.

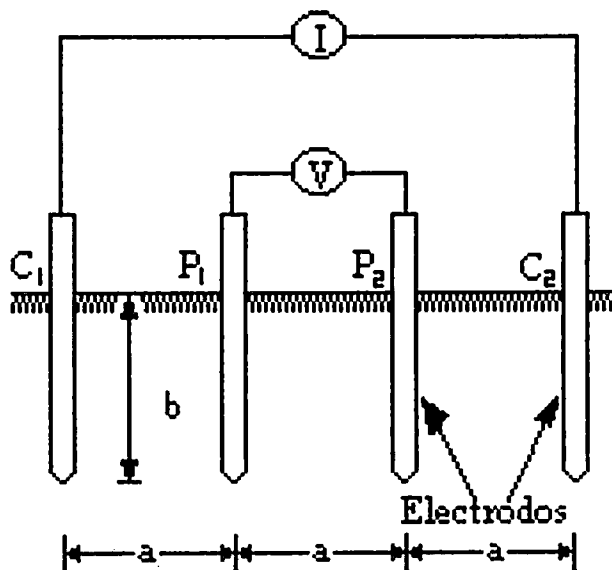


Figura N° 1.15 Ubicación de los electrodos para la medición de la resistividad eléctrica por el método de Wenner. Fuente: <http://www.ruelsa.com/>

La resistividad aparente está dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{\left[1 + \frac{2a}{(a^2 + 4b^2)^{0.5}}\right] \frac{2a}{(4a^2 + 4b^2)^{0.5}}}$$

Ecuación 1.17

Donde:

ρ : Resistividad promedio a la profundidad a ($\Omega \cdot m$)

a : Distancia entre electrodos (m)

b : Profundidad de entierro de los electrodos (m)

R : Lectura del terrómetro (Ω)

La resistividad obtenida como resultado de las ecuaciones representa la resistividad promedio de un hemisferio contenido entre los electrodos centrales (P_1 y P_2) y de un radio igual a la separación de los electrodos (a).

1.6.2 Métodos basados en la medida del ingreso de sustancias al interior de la matriz cementante.

Estos métodos consisten en hacer ingresar sustancias, principalmente agua, en el concreto, pero sin la aplicación de presión por medios externos, una desventaja de estos métodos es que el agua no logra ingresar completamente en la matriz cementante y por eso son considerados como absorción, sin embargo pueden ser usados como formas comparativas, y más rápidas, para medir la permeabilidad en el concreto.

1.6.2.1 Método de la succión capilar (ASTM C 1585: Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes).

Este método es usado para determinar el radio de absorción o sortividad de agua en el concreto, midiendo el incremento de la masa del espécimen como resultado de la absorción de agua en función del tiempo, cuando una superficie del espécimen está en contacto con el agua. Esta superficie está sumergida en agua la cual ingresa al interior del concreto insaturado.

Las muestras usadas en este ensayo son de 10cm de diámetro y 5cm de altura, deben estar insaturadas. La norma recomienda dejarlas en un ambiente controlado a temperatura de 50°C y humedad relativa de 80% por tres días y luego colocarlos en un recipiente cerrado de polietileno por al menos 15 días a una temperatura de 23°C.

1.6.2.2 *Absorción de agua (ASTM C 642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete).*

Este método es usado para determinar el contenido de vacíos en el concreto, midiendo indirectamente la permeabilidad del mismo.

Tomamos una muestra de concreto con un volumen no menor de 350 cm³.

Se pone a secar al horno a 80°C hasta peso constante, dejamos enfriar y registramos el peso como peso seco.

Sumergimos la muestra durante mínimo 48 horas hasta peso constante, pesamos la muestra y registramos el peso como peso saturado, luego pesamos la muestra sumergida en agua y registramos el peso como peso saturado sumergido.

Colocamos la muestra nuevamente en agua, calentamos el agua hasta que hierva, dejamos en este estado durante 5 horas y luego dejamos enfriar dentro del agua por otras 14 horas. Registramos el peso como peso saturado-hervido, luego pesamos la muestra sumergida en agua y registramos el peso como peso saturado-hervido sumergido.

1.6.2.3 *Permeabilidad de concretos y morteros (ingreso de metanol).*

Este método se basa en el hecho de que en un contenedor cerrado, a temperatura y presión específica se puede tener fluidos en tres estados diferentes, sólido líquido y vapor, esta fase queda descrita por la ecuación de gases ideales.

El equipo necesario consiste en una celda de aluminio dividida en dos partes, la superior que es la de mayor diámetro y la inferior, de menor diámetro, como se nota en la Figura N° 1.16

El procedimiento consiste en introducir metanol en la zona inferior de la celda y la muestra de concreto en la parte superior, usando un sello de silicona de tal forma que la celda quede completamente sellada (Figura N° 1.16-a).

Se introduce la celda en un contenedor y se le agrega agua, con temperatura conocida, hasta cubrir 2/3 de la parte inferior de la celda. (Figura N° 1.16-b).

Finalmente se mide la cantidad de metanol que se va evaporando y que atraviesa la muestra de concreto hasta que el flujo sea constante.

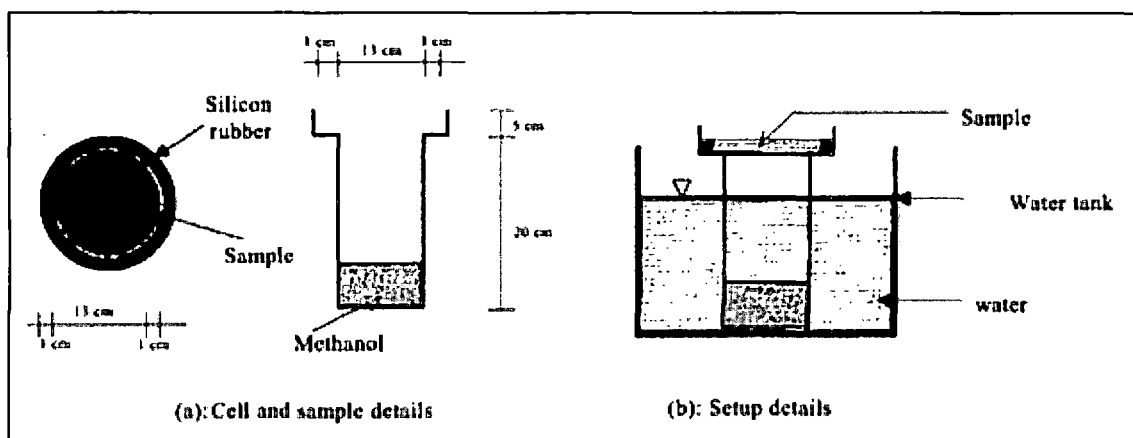


Figura N° 1.16 Diagrama esquemático de la celda de permeabilidad UAE y la configuración de la prueba. Fuente: Abdullah M. Alshamsi, Hassan D.A. Imran, Development of a permeability apparatus for concrete and mortar, 2001

1.6.3 Métodos basados en la aplicación de presión.

Estos métodos consisten en hacer ingresar un fluido en el interior del concreto, a una presión controlada y en un área definida, y así comparar la velocidad con que el fluido atraviesa la matriz de cada tipo de concreto.

1.6.3.1 Método por ingreso de agua a presión (Descrito en la NTC 4483 Y UNE EN 12390-8).

Es el método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto en agua. Este método donde se somete la muestra a una presión constante durante cuatro días, después de los cuales se entra a determinar si el fluido atravesó todo el espesor de la muestra, caso en el cual se determina la velocidad de flujo

relacionándolo con el volumen que atraviesa en ciertos intervalos de tiempo; si el flujo no atraviesa la muestra, se hace un corte perpendicular y se mide la profundidad de penetración, la cual se considera como parámetro para definir el nivel de permeabilidad o impermeabilidad de la masa de concreto. Trataremos más a fondo este método en el capítulo II.

1.6.3.2 Porosimetría por intrusión de mercurio.

El método de la porosimetría por intrusión de mercurio, es muy usado en el mundo, se basa en inundar las muestras con mercurio mientras se someten a intervalos crecientes de presión. Para cada escalón de presión, se mide el volumen de mercurio introducido en los poros. Este método permite en forma sencilla conocer la distribución de los tamaños de los poros en el concreto. Sin embargo, a medida que la presión se incrementa, existe el riesgo de modificar la estructura del concreto, induciendo una medida no representativa de la permeabilidad de la matriz afectada. Este riesgo es inversamente proporcional a la resistencia del concreto en el momento del ensayo.

Corroborando esta afirmación, Feldman (1985) y posteriormente Suryavanshi et al. (1995), acotan que las distribuciones y el tamaño de poros obtenidos por esta técnica son solamente útiles para realizar medidas comparativas, en un mismo material.

1.7 DURABILIDAD

1.7.1 Concepto de durabilidad en el concreto.

La durabilidad del concreto hidráulico puede definirse como su capacidad para resistir la acción del medio ambiente que lo rodea, de los ataques químicos o biológicos, de la abrasión y/o de cualquier otro proceso de deterioro.

Sobre este particular, afortunadamente los reglamentos como el ACI-201.2R o el EN 206, contemplan una guía para la durabilidad del concreto. De tal manera, que las acciones del medio ambiente y las condiciones de exposición de una

estructura se deben considerar como factores de diseño y construcción de las estructuras.

Los factores determinantes de la durabilidad de una estructura de concreto pueden ser: el diseño y el cálculo de la estructura (geometría y cuantía de acero de refuerzo); los materiales empleados (concreto, acero y productos de protección); las practicas constructivas (calificación de la mano de obra y control de calidad); y, los procedimientos de protección y curado (condiciones de humedad y de temperatura).

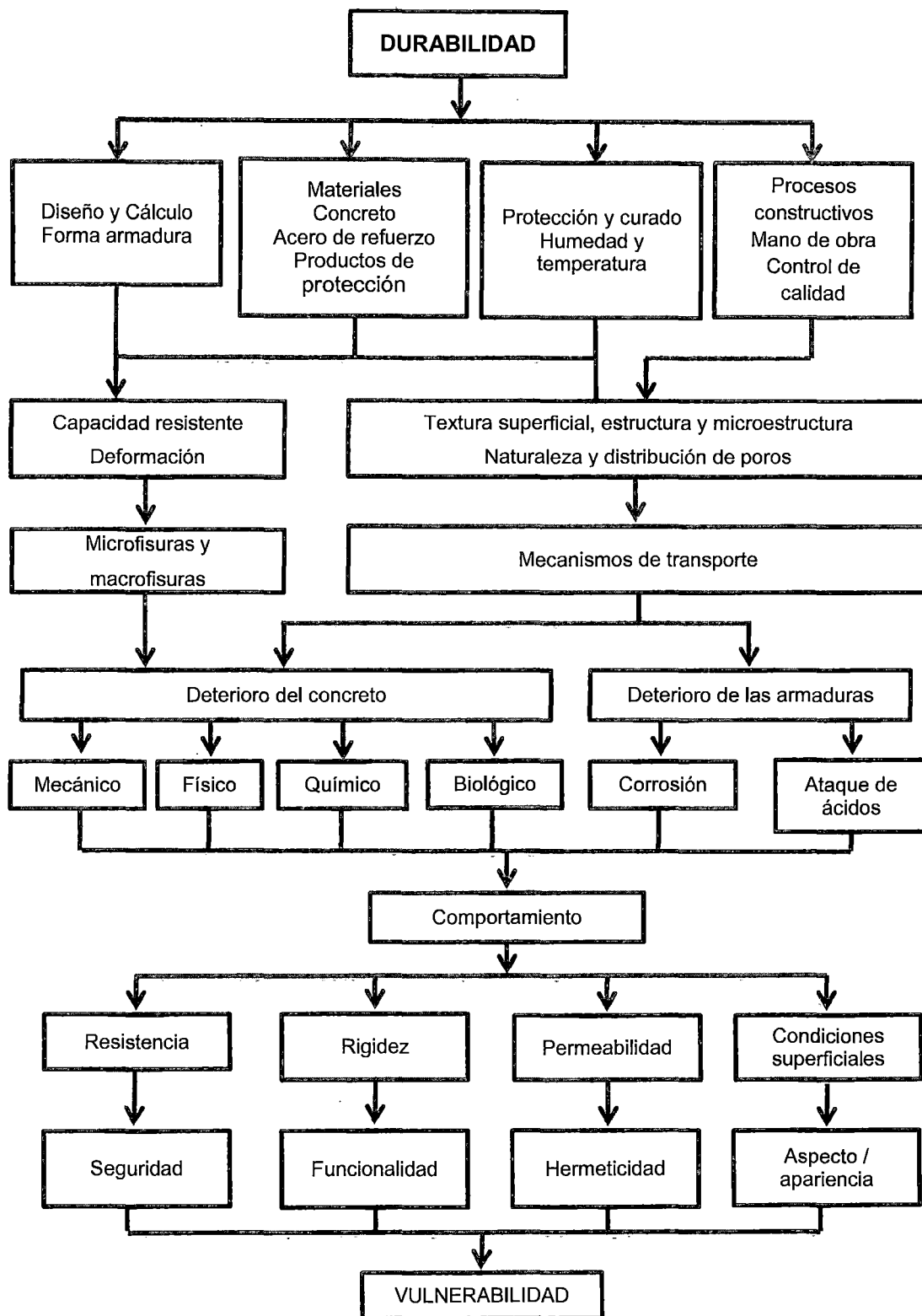


Figura Nº 1.17 Factores que afectan la durabilidad en el concreto. Fuente: Comisión IV, Grupo Español de Hormigón, Durabilidad de estructuras de hormigón 1993.

1.7.2 Requisitos de durabilidad.

El hormigón al estar expuesto a ambientes agresivos puede presentar procesos de deterioro. Estos pueden ser clasificados como: físicos, causados por la exposición a cambios ambientales extremos tales como ciclos de hielo/deshielo o cambios artificiales como la exposición al fuego; deterioros químicos, causados por ataques por ácidos y/o sulfatos, agua, o reacción álcali-árido; deterioros biológico y estructural (presencia de bacterias, sobrecargas, ciclos de cargas, etc.). La corrosión del acero de refuerzo está ligada con los procesos de deterioro del hormigón, debido a que conduce al agrietamiento y delaminación del material y además reduce su adhesión al refuerzo. Algunos de los fenómenos mencionados se presentan a continuación.

1.7.2.1 Requisitos de congelamiento y deshielo.

La acción del congelamiento ocurre principalmente en el agua que se encuentra en los poros capilares, de hecho, no afecta los espacios interlaminares en el gel C-S-H debido a su tamaño reducido, al menos que la temperatura esté por debajo de -35° C. Por otra parte, la presencia de espacios con aire puede reducir el efecto causado por la formación de hielo en el concreto. Se han considerado los siguientes mecanismos para explicar este fenómeno:

Presión hidráulica, que explica que el agua congelada dentro del poro capilar genera una resistencia hidráulica al paso del agua que aún se encuentra en estado líquido, generando una presión, la cual solo se libera si hay poros vecinos libres

Presión osmótica, al ocurrir el congelamiento en los poros capilares existe una diferencia de concentración entre el hielo y el agua remanente, generando el flujo del agua desde los espacios interlaminares del gel hacia los poros capilares, incrementando así la presión interna.

Sobrepresión del hielo, desde poros pequeños el agua se transporta hacia poros ya congelados, generando un incremento del volumen de hielo y consecuentemente la presión.

En el capítulo del ACI 318 y en la norma europea EN206 (Ver Cuadro N° 1.2, Cuadro N° 1.3, Cuadro N° 1.4 y Cuadro N° 1.5), se clasifican los tipos de exposición al congelamiento y deshielo. También se recomiendan valores límites para hacer al concreto resistente a la exposición.

Cuadro N° 1.2 Categorías y clases de exposición para ataque de congelamiento y deshielo.
Fuente: ACI 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2011.

Categoría	Severidad	Clase	Condición
F Congelamiento y deshielo	No aplicable	F0	Concreto no expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo.
	Moderada	F1	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento, deshielo y exposición ocasional a la humedad.
	Severa	F2	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y en contacto continuo con la humedad.
	Muy severa	F3	Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo y en contacto continuo con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes.

Cuadro N° 1.3 Categorías y clase de exposición para ataque de congelamiento y deshielo. Fuente:
CSN EN206, Concrete - Specification, performance, production and conformity, 2013.

Clase	Descripción	Ejemplo
XF1	Saturación de agua moderada, sin agentes de deshielo.	Superficies verticales de concreto expuestas a la lluvia y helada.
XF2	Saturación de agua moderada, con agentes de deshielo.	Superficies verticales de concreto de estructuras de carreteras expuestas a la helada y al aire que transporta a los agentes de deshielo
XF3	Saturación de agua elevada, sin agentes de deshielo.	Superficies horizontales de concreto expuestas a la lluvia y helada.

XF4	Saturación de agua elevada, con agentes de deshielo.	Carreteras y puentes expuestos a agentes de deshielo y superficies verticales expuestas directamente a salpicaduras de agentes de deshielo y a la helada. Zonas de estructuras marinas sometidas a salpicaduras y la helada
-----	--	---

Cuadro N° 1.4 Requisitos para el concreto, según su clase de exposición. Fuente: ACI 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2011.

Clase de exposición	Relación a/mc max.	f'c min. (MPa)	Requisitos mínimos adicionales (Contenido de aire)
F0	N/A	17	N/A
F1	0.45	31	3.5 – 6.0%
F2	0.45	31	4.5 - 7.5%
F3	0.45	31	4.5 - 7.5%

Cuadro N° 1.5 Requisitos para el concreto, según su clase de exposición. Fuente: CSN EN206, Concrete - Specification, performance, production and conformity, 2013.

Clase	Máxima relación a/c	Clase de resistencia	Contenido mínimo de cemento (kg/m3)	Contenido mínimo de aire (%)
XF1	0.55	C30/37	300	-
XF2	0.55	C25/30	300	4.0
XF3	0.55	C30/37	320	4.0
XF4	0.55	C30/37	340	4.0

1.7.2.2 Requisitos para exposición a sulfatos.

El ataque por sulfatos se manifiesta con una pérdida progresiva de la resistencia de la pasta de cemento debido a la pérdida de cohesión entre los productos de hidratación. Además, los productos expansivos generan agrietamientos en el

concreto; cuando esto sucede la permeabilidad del concreto se incrementa, permitiendo así la entrada de otros agentes que pueden acelerar el deterioro. La severidad del ataque depende principalmente de la concentración de los iones sulfatos en el suelo o agua que están en contacto con el hormigón, los requisitos del tipo de cemento, resistencia y relación a/c están indicados en el Cuadro N° 1.6, Cuadro N° 1.7, Cuadro N° 1.8 y Cuadro N° 1.9.

Cuadro N° 1.6 Categorías y clase de exposición a sulfatos. Fuente: ACI 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2011.

Categoría	Severidad	Clase	Condición	
S Sulfato			Sulfatos solubles en agua (SO ₄) en el suelo, % en peso	Sulfato (SO ₄) disuelto en agua, ppm
	No aplicable	S0	SO ₄ < 0.10	SO ₄ < 150
	Moderada	S1	0.10 ≤ SO ₄ < 0.20	150 ≤ SO ₄ < 1500 Agua marina
	Severa	S2	0.20 ≤ SO ₄ < 2.00	1500 ≤ SO ₄ < 10000
	Muy severa	S3	SO ₄ > 2.00	SO ₄ > 10000

Cuadro N° 1.7 Categorías y clase de exposición a sulfatos. Fuente: CSN EN206, Concrete - Specification, performance, production and conformity, 2013.

Clase	Descripción
XA1	Ambiente químico ligeramente agresivo
XA2	Ambiente químico moderadamente agresivo
XA3	Ambiente químico altamente agresivo

Cuadro N° 1.8 Requisitos para el concreto, según su clase de exposición. Fuente: ACI 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2011.

Clase	Relación a/c max.	f'c min. (MPa)	Tipo de material cementante			Aditivo de cloruro de calcio
			ASTM C 150	ASTM C 595	ASTM C 1157	
S0	N/A	17	S/R	S/R	S/R	S/R
S1	0.5	28	II	IP (MS)	MS	S/R
S2	0.45	31	V	IP (HS)	HS	No se permite
S3	0.45	31	V	IP (HS) y puzolanas o escorias	HS y puzolanas o escorias	No se permite

Cuadro N° 1.9 Requisitos para el concreto, según su clase de exposición. Fuente: CSN EN206, Concrete - Specification, performance, production and conformity, 2013.

Clase	Máxima relación a/c	Resistencia mínima	Contenido mínimo de cemento (kg/m ³)
XA1	0.55	C30/37	300
XA2	0.5	C30/37	320
XA3	0.45	C35/45	360
Otros requisitos	Cemento resistente a sulfatos.		

1.7.2.3 Requisitos para exposición a corrosión por carbonatación.

El proceso de carbonatación se debe al ingreso de CO₂ de la atmósfera al concreto; los ambientes urbanos e industriales y en general la contaminación ambiental son la fuente necesaria para que se dé este fenómeno.

El alto pH del hormigón (del orden promedio de 13) provee una protección natural contra la corrosión del acero de refuerzo como se mencionó anteriormente, sin embargo, el proceso de carbonatación decrece el valor del pH del concreto aproximadamente a 9. Para que la carbonatación tenga lugar es

necesario que el dióxido de carbono entre en contacto con el agua y los componentes alcalinos presentes en los poros del concreto, las cantidades mínimas de cemento y la relación a/c máxima están indicados en el Cuadro N° 1.10 y Cuadro N° 1.11.

Cuadro N° 1.10 Clase de exposición para corrosión inducida por carbonatación. Fuente: CSN EN206, Concrete - Specification, performance, production and conformity, 2013.

Clase	Descripción	Ejemplos
XC1	Seco o permanentemente húmedo	Hormigón en el interior de edificios con una humedad relativa del aire baja; Hormigón permanentemente sumergido en agua
XC2	Húmedo, rara vez seco	Superficies de hormigón en contacto con agua durante mucho tiempo; Un gran número de cimentaciones
XC3	Humedad moderada	Hormigón en el interior de edificios con una humedad relativa del aire media o alta
XC4	Ciclos de humedad y sequedad	Superficies sometidas al contacto con el agua, sin que puedan considerarse de la clase XC2

Cuadro N° 1.11 Requisitos para el concreto, según su clase de exposición. Fuente: CSN EN206, Concrete - Specification, performance, production and conformity, 2013.

Clase	Máxima relación a/c	Clase de resistencia mínima	Contenido mínimo de cemento (kg/m ³)
XC1	0.65	C20/25	260
XC2	0.6	C25/30	280
XC3	0.55	C30/37	280
XC4	0.5	C30/37	300

1.7.2.4 Requisitos para exposición a cloruros.

El ataque por cloruros al hormigón puede provenir de dos fuentes principales, en la primera los iones cloruros pueden estar presentes dentro de la mezcla del hormigón (p.e., áridos contaminados, agua de mar o contaminada, cemento y/o aditivos con contenidos altos de cloruros); en la segunda los cloruros ingresan desde el exterior. Esta última se puede dar por el uso de sales de deshielo, exposición a ambientes marinos, presencia de cloruros en sustancias químicas que puedan atacar al hormigón, entre otros, El ACI y la EN 206, nos da recomendaciones indicadas en el Cuadro N° 1.12, Cuadro N° 1.13, Cuadro N° 1.14, Cuadro N° 1.15 y Cuadro N° 1.16

Cuadro N° 1.12 Categorías y clase de exposición a cloruros. Fuente: ACI 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2011.

Categoría	Severidad	Clase	Condición
C Protección del refuerzo para la corrosión	No aplicable	C0	Concreto seco o protegido contra la humedad.
	Moderada	C1	Concreto expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros
	Severa	C2	Concreto expuesto a la humedad y a una fuente externa de cloruros provenientes de productos químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen.

Cuadro N° 1.13 Categorías y clase de exposición a cloruros (no marino). Fuente: CSN EN206, Concrete - Specification, performance, production and conformity, 2013.

Clase	Descripción	Ejemplos
XD1	Moderadamente húmedo	Superficies de hormigón expuestas a cloruros transportados por vía aérea
XD2	Húmedo, rara vez seco	Piscinas y hormigones en contacto con aguas industriales que contengan cloruros
XD3	Ciclos de humedad y sequedad	Elementos de puentes expuestos a salpicaduras que contengan cloruros; pavimentos; Losas de aparcamientos

Cuadro N° 1.14 Categorías y clase de exposición a cloruros (no marino). Fuente: CSN EN206, Concrete - Specification, performance, production and conformity, 2013.

Clase	Descripción	Ejemplos
XS1	Exposición que transporta sales marinas, pero sin contacto directo con el agua de mar.	Estructuras en la costa o en sus proximidades
XS2	Sumergido permanentemente	Elementos de estructuras marinas
XS3	Zonas sometidas a la marea, a la salpicadura y a la espuma de mar	Elementos de estructuras marinas

Cuadro N° 1.15 Requisitos para el concreto, según su clase de exposición. Fuente: ACI 318, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, 2011

Clase	Relación a/mc max.	f'c min. (MPa)	Contenido máx. de iones cloruro (Cl-) soluble en agua en el concreto, porcentaje por peso de cemento	
			Concreto reforzado	Concreto Pre-esforzado
C0	N/A	17	1.00	0.06
C1	N/A	17	0.30	0.06
C2	0.4	35	0.15	0.06

Cuadro N° 1.16 Requisitos para el concreto, según su clase de exposición. Fuente: CSN EN206, Concrete - Specification, performance, production and conformity, 2013.

Clase	Máxima relación a/c	Clase de resistencia mínima	Contenido mínimo de cemento (kg/m ³)
Otros cloruros distintos al agua de mar			
XD1	0.55	C30/37	300
XD2	0.55	C30/37	300
XD3	0.45	C35/45	320
Agua de mar			
XS1	0.50	C30/37	300
XS2	0.45	C35/45	320
XS3	0.45	C35/45	340

CAPÍTULO II. FABRICACIÓN DEL EQUIPO PARA MEDIR LA PERMEABILIDAD

2.1 MECANISMOS DE TRANSPORTE DE FLUIDOS EN EL INTERIOR DEL CONCRETO.

La interacción de la capa superficial del concreto con el ambiente externo, es un parámetro importante en muchos procesos de degradación (ingreso de cloruro y sulfatos, carbonatación, ciclos de hielo-deshielo, etc.). Independientemente de la naturaleza del sistema de poros de la pasta de cemento, las propiedades de los mecanismos de transporte de sustancias en el interior del concreto gobiernan las características de durabilidad de un concreto determinado.

El alcance de la penetración, la velocidad y el efecto del transporte de agentes agresivos dentro del concreto, depende principalmente de: la estructura de los poros y fisuras dentro del concreto; de la presencia de humedad; y, de los mecanismos de transporte. Del mismo modo, la velocidad y magnitud de las reacciones que se puedan presentar entre los agentes agresivos y el concreto, depende a su vez de: el tipo y la concentración de las sustancias agresivas; la composición química del cemento y las propiedades químicas y mineralógicas de los agregados; de la temperatura y presión; de la humedad relativa efectiva; y, de la naturaleza y distribución de los poros y fisuras (Figura N° 2.1).

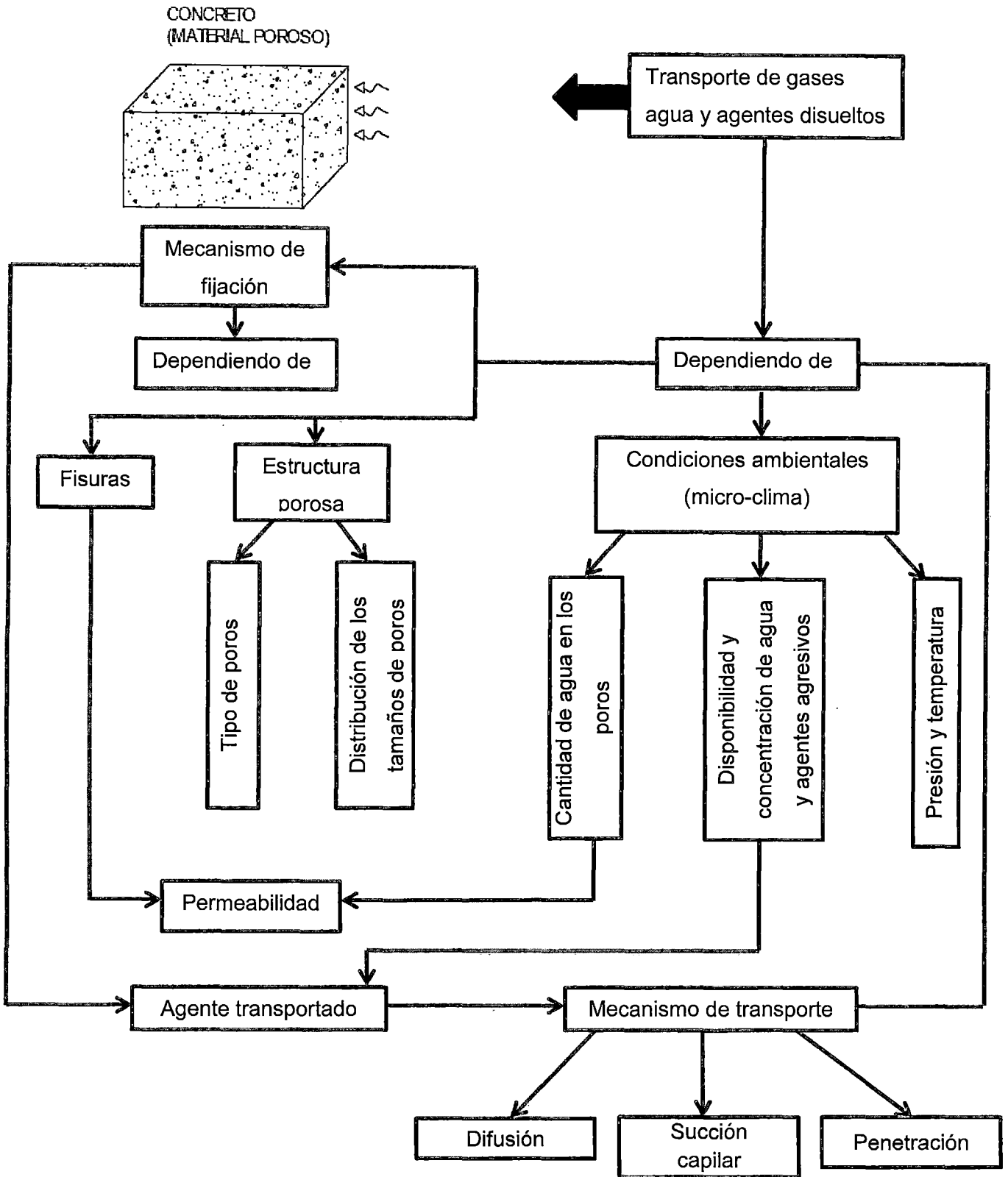


Figura Nº 2.1 Proceso de transporte de gases, agua y agentes disueltos en el concreto. Fuente: Comisión IV, Grupo Español de Hormigón, Durabilidad de estructuras de hormigón 1993.

2.1.1 Difusión de vapor de agua.

La difusión está definida como la dispersión de una sustancia dentro de un espacio o dentro de una segunda sustancia; por ejemplo, cuando las moléculas de un perfume se difunden dentro de una habitación; o cuando un líquido se dispersa dentro de otro.

Si la humedad relativa efectiva de un concreto es baja y hay presencia de gases, estos se difunden fácil y rápidamente por los poros del concreto. Pero, en la medida en que se da el proceso de condensación capilar, que produce el llenado de agua de los poros, se reduce el espacio disponible para la difusión de gases; y como consecuencia de ellos, la permeabilidad del concreto a los gases (p.e difusión de CO₂, O₂, etc.) se disminuye considerablemente.

2.1.2 Adsorción de agua.

La superficie libre de cualquier sólido, generalmente tiene un exceso de energía debido a la falta de enlaces con las moléculas cercanas. En los poros de la pasta de cemento, esta energía superficial tiende a compensarse adsorbiendo moléculas de vapor de agua sobre dichas superficies y el espesor de la capa de agua que se forma depende del grado de humedad en el interior de los poros (Figura 2.2). El término adsorción se refiere a la adherencia de moléculas a una superficie; y no es lo mismo que absorción, que se refiere a la incorporación de moléculas en el interior de otra sustancia o masa (como por ejemplo, cuando una esponja absorbe agua).

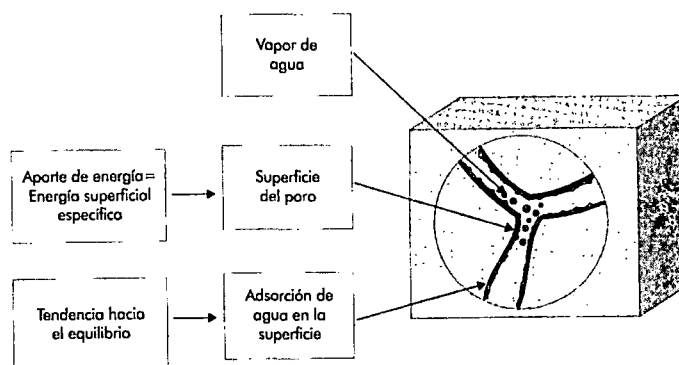


Figura Nº 2.2 Esquema del fenómeno de fijación de agua por adsorción en los poros del concreto.

Fuente: Comisión IV, Grupo Español de Hormigón, Durabilidad de estructuras de hormigón 1993.

2.1.3 Condensación capilar.

Como la relación que existe entre el área superficial y el volumen de los poros se incrementa en la medida en que los poros son más pequeños, el agua adsorbida también se incrementara en relación con la cantidad de poros, hasta un cierto y determinado diámetro de los poros para el cual estos se encontraran totalmente llenos de agua. Este proceso es lo que se le denomina condensación capilar. (Figura 2.3).

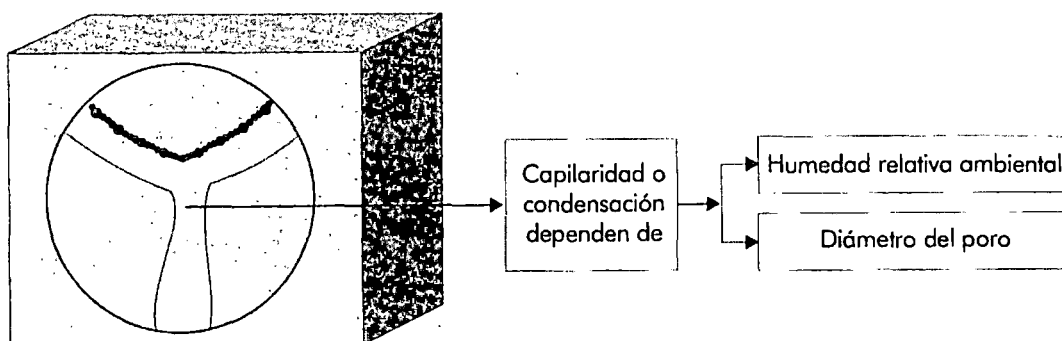


Figura Nº 2.3 Esquema del fenómeno de fijación del agua por condensación capilar en los poros del concreto. Fuente: Comisión IV, Grupo Español de Hormigón, Durabilidad de estructuras de hormigón 1993.

2.1.4 Succión capilar.

Proceso físico complejo que depende de la energía superficial de los poros del concreto y por ello, la tendencia a "adsorber" agua por parte de estas superficies crea una succión capilar, siempre que haya agua disponible. En poros verticales, la altura de la columna de agua dentro del poro, es regulada por un equilibrio entre las fuerzas de adsorción de la superficie de los poros y el peso de dicha columna de agua. Para el caso de succión capilar en dirección horizontal, la profundidad de penetración depende del exceso de agua en la superficie del concreto y de la duración de esta situación, es decir si hay inmersión o no y cuánto dura. (Enrique Rivva L., 2006)

En el caso de ensayos en laboratorio. La forma de medir este parámetro es un método gravimétrico, descrito en la norma de ensayo ASTM C1585 "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-

Cement Concretes”, la distribución de contenido de humedad puede considerarse a partir del balance de masa en estado estacionario de acuerdo a la Ecuación 2.1. Esta ecuación considera un primer término para el modelado de la difusión de vapor, y un segundo término para el modelado de la succión en los capilares. El tiempo de ensayo del método de succión capilar y la masa involucrada en el término difusivo hacen que el mismo pueda ser considerado en segundo plano, y asumir la hipótesis simplificada de que toda la ganancia de masa de la muestra es resultado de la absorción debido a la succión capilar (hipótesis del frente plano mojado). Esto conduce a las deducciones a partir de las ecuaciones de Darcy, de Laplace y de Kelvin-Laplace, que permiten calcular la longitud de ascensión capilar L en un tubo capilar de radio r .

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w(w) \frac{\partial w}{\partial x_m} \right) - \frac{S_p^2}{2p_i} \frac{\partial w}{\partial x_m} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

$$L = \left(\frac{\gamma \gamma_w \cos \theta}{2\mu} \right)^{1/2} \cdot t^{1/2} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde:

L : Longitud de ascensión capilar.

r : Radio de tubo capilar.

γ_w : Densidad del líquido del poro (agua)

μ : Viscosidad del líquido del poro (agua)

θ : Ángulo de contacto sólido-líquido.

La Ecuación 2.2 permite considerar, en forma simplificada, al coeficiente de velocidad de succión capilar dependiente del radio capilar, el ángulo de contacto, la densidad y la viscosidad del líquido de poro. Estas constantes resultan en realidad conceptos mucho más complejos, pero permiten aclarar que la velocidad de succión capilar depende de parámetros diferentes a los de la velocidad de difusión de vapor de agua. Lo indicado anteriormente permite considerar que la velocidad de succión capilar es un parámetro que puede describir la porosidad del hormigón. Una verificación posible es la relación del tamaño de poro con la condensación intersticial en el hormigón, y cómo esto

puede estar afectando la relación entre VSC y el contenido de solución de poro para condiciones climáticas determinadas.

Si el hormigón tiene en su masa una concentración inicial de humedad $h_{(x,0)} = h_0$, la solución a la Segunda Ley de Fick resulta la Ecuación 2.3.

$$h_{(x,t)} = h_0 + (h_s - h_0) \cdot \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right) \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

h: Concentración de humedad.

erf: Función error de Gauss.

D: Coeficiente de difusión.

T: Tiempo.

Una forma simplificada de la Ecuación 3 se obtiene analizando un contenido de humedad determinado (h_a). Puede agruparse los términos en un único coeficiente s_a , Ecuación 2.4. Donde erf^{-1} se define según la Ecuación 2.5.

$$2\sqrt{D} \cdot \operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{h_a}{h_s} \right) = s_a \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$x = \operatorname{erf}(\operatorname{erf}^{-1}(x)) \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Si el contenido de humedad inicial es despreciable, se obtiene la Ecuación 6, donde x_{ha} es la profundidad correspondiente a h_a . Esta expresión ha sido ampliamente divulgada y es aplicable al método experimental analizado mediante la interpretación de un frente.

$$x_{ha} = s_a \sqrt{t} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Donde:

Sa: Capacidad de absorción.

t: Tiempo.

2.1.5 Interacción del concreto con el microclima próximo.

Para que operen los mecanismos de transporte entre el concreto y el microclima que rodea su superficie, se pueden presentar tres situaciones: transporte en aire húmedo (por difusión); transporte por agua lluvia o salpicaduras de agua (por succión capilar); transporte por inmersión (por presión hidrostática).

2.1.5.1 Transporte de aire húmedo.

Los procesos de transporte de gases, agua o sustancias disueltas en el agua, son procesos de difusión que se dan en función de la humedad relativa del aire. Estos procesos de difusión, son inducidos por una tendencia al equilibrio cuando hay un gradiente de concentraciones.

Por ejemplo, la difusión del oxígeno avanza a través del concreto a medida que este es consumido durante la corrosión del acero de refuerzo, lo cual causa una diferencia de concentraciones de O_2 dentro de los poros del concreto. Del mismo modo, el dióxido de carbono se difunde en el concreto, en la medida en que se da una reacción química entre el CO_2 y la cal libre que hay en las paredes de los poros, reduciendo a su vez la concentración de CO_2 (Figura N° 2.4).

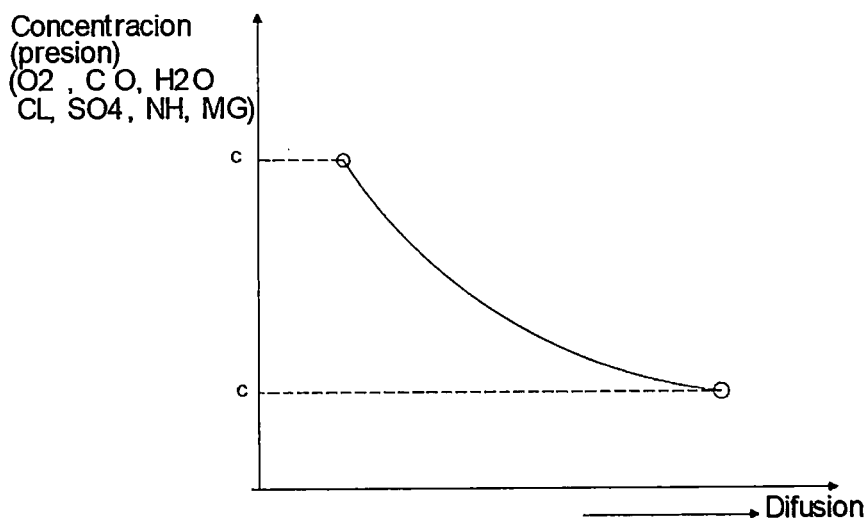


Figura N° 2.4 Relación entre la concentración a presión de las moléculas de un gas y su difusión.
Fuente: Comisión IV, Grupo Español de Hormigón, Durabilidad de estructuras de hormigón 1993.

La difusión del agua o el vapor de agua, ocurren cuando se producen cambios en la humedad del ambiente o cuando el concreto se seca, es decir cuando hay un diferencial de concentración.

Para el caso de las eventuales sustancias disueltas en el agua (carbonatos, cloruros, sulfatos, amonio, magnesio, etc.), su difusión se realiza a través de la capa de agua que recubre las paredes de los poros (agua de adsorción), o a través de los poros llenos de agua por condensación capilar. Desde luego, en la medida en que es menor el espesor de la capa de agua de adsorción a la cantidad de agua que llena los poros, la velocidad de difusión de las sustancias disueltas es menor.

Lo anterior significa, que la fuente de poder para que se dé este mecanismo de transporte (difusión) a través del concreto, es la diferencia de concentraciones que puedan tener el agua, o el gas presente en los poros del concreto.

2.1.5.2 Transporte de agua de lluvia o salpicaduras de agua.

Cuando la superficie del concreto se moja como consecuencia de la lluvia o de la salpicadura de agua, la saturación del material ocurre muy rápidamente porque el agua se absorbe por succión y por difusión capilar (Figura N° 2.5), y posteriormente se adsorbe por adherencia de moléculas de vapor sobre la superficie de los poros. En este caso, las sustancias disueltas en el agua son transportadas por la misma agua y la difusión de gases queda prácticamente bloqueada por la condición de saturación de los poros del concreto.

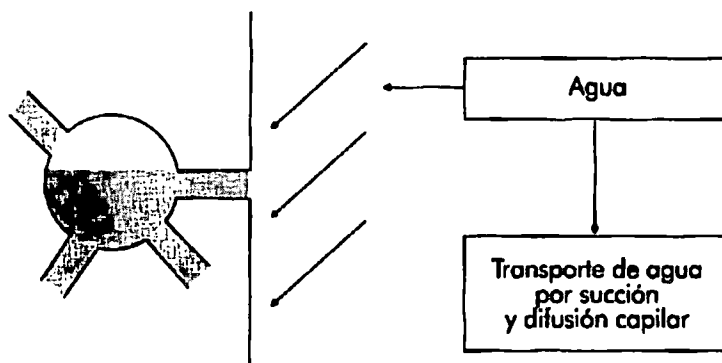


Figura N° 2.5 Esquema del fenómeno de absorción de agua de lluvia en los poros superficiales del concreto. Fuente: Comisión IV, Grupo Español de Hormigón, Durabilidad de estructuras de hormigón 1993.

El efecto de la succión capilar depende de la energía superficial de los poros del concreto y por ello, la tendencia a adsorber agua por parte de estas superficies crea una succión capilar, siempre que haya agua disponible. En poros verticales, la altura de la columna de agua dentro del poro, es regulada por un equilibrio entre las fuerzas de adsorción de la superficie de los poros y el peso de dicha columna de agua (ver Figura N° 2.6). Para el caso de succión capilar en dirección horizontal, la profundidad de penetración depende del exceso de agua en la superficie del concreto y del a duración de esa situación, es decir si hay inmersión o no y cuánto dura.

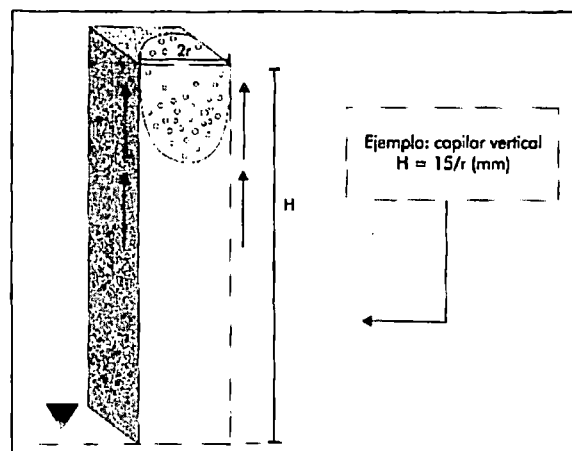


Figura N° 2.6 Esquema del fenómeno de succión capilar en los poros del concreto causada por energía superficial. Fuente: Comisión IV, Grupo Español de Hormigón, Durabilidad de estructuras de hormigón 1993.

Por lo anteriormente expuesto, el concreto absorbe agua del medio ambiente, a través de succión capilar, a una velocidad considerablemente mayor de lo que se pierde por evaporación; y en consecuencia, la humedad relativa efectiva (al interior del concreto) tiende a ser superior a la humedad relativa del ambiente que lo rodea (microclima) Figura N° 2.7

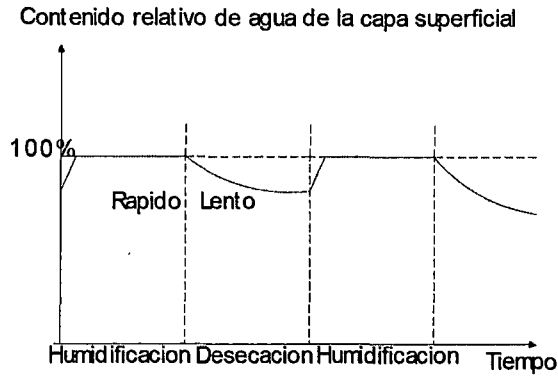


Figura N° 2.7 Esquema de los ciclos de humedecimiento y secado del concreto en función del tiempo. Fuente: Comisión IV, Grupo Español de Hormigón, Durabilidad de estructuras de hormigón 1993.

2.1.5.3 Transporte por inmersión.

Para estructuras sumergidas permanentemente en agua, la penetración de agua se da por succión capilar, la cual muy probablemente es acentuada por penetración inducida como consecuencia del aumento de la presión hidráulica.

Un transporte continuo de agua a través del concreto, ocurre solamente cuando el agua se puede evaporar de las superficies del concreto que están expuesta al aire. La intensidad de este transporte depende de la relación que se establezca entre la tasa de evaporación, la tasa de succión capilar, y la presencia y continuidad de la presión hidráulica.

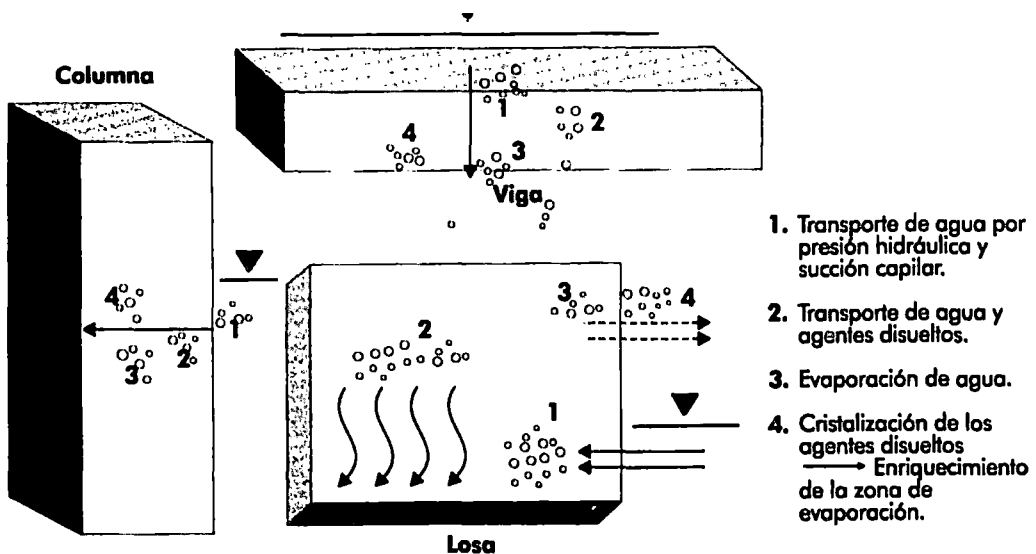


Figura N° 2.8 Representación de los mecanismos de transporte del agua en el concreto sumergido. Fuente: Comisión IV, Grupo Español de Hormigón, Durabilidad de estructuras de hormigón 1993.

Para estos casos, las eventuales sustancias disueltas y transportadas en el agua, tienden a depositarse en considerables concentraciones en aquellas zonas del concreto donde se produce la evaporación. Por ello, a veces aparecen eflorescencias y manchas en la superficie del concreto.

Por otra parte, los agentes agresores pueden cristalizarse y re-cristalizarse causando esfuerzos de tracción (por expansión dentro de los poros cercanos a la superficie del concreto), lo cual a su vez, puede fracturarlo, si el concreto es pobre o está carbonatado. Además, la cristalización de estos agentes usualmente genera depósitos de sales que pueden intensificar el ataque químico al concreto por su alta concentración.

2.2 PERMEABILIDAD DEL CONCRETO AL AGUA.

La permeabilidad del concreto, como la de cualquier material, consiste en que éste pueda ser atravesado por un fluido (líquidos, gases, iones) a causa de una diferencia de presión entre las dos superficies opuestas del material. Usualmente, la permeabilidad se determina por el caudal filtrado de agua, de acuerdo con la ley de Darcy (a través de un medio poroso), en la cual el flujo es laminar y permanente.

La permeabilidad del concreto al agua, depende de: la permeabilidad de la pasta de cemento (poros capilares); de la permeabilidad y granulometría de los agregados; de la proporción de pasta en relación a los agregados; y de los vacíos causados por una compactación deficiente o por los capilares del agua de exudación (macroporos). La velocidad, profundidad de penetración y efectos del fluido y/o los agentes agresivos disueltos, desde luego están regidos por la forma y estructura de los poros y por el microclima que rodea la superficie del concreto.

2.2.1 Procedimiento de medición por método de presión.

Este ensayo tiene como objetivo la determinación del coeficiente de permeabilidad (K) a partir de una probeta de concreto endurecido.

Para la realización de este ensayo se requieren tres probetas cilíndricas de 15cm de diámetro por 15cm de altura como mínimo, con un tiempo de curado mayor a 28 días, para asegurar que se haya completado la hidratación del cemento.

A continuación se desgasta las caras superior e inferior para evitar tomar datos errados, ya que tienen propiedades distintas que las del interior de la probeta.

Se deja que las muestras se sequen, hasta peso constante, en una estufa a 80°C, debido a que las probetas se mojan durante el proceso de aserrado, luego se impermeabiliza la superficie lateral de cada una de las muestras, mediante el uso de una pintura impermeabilizante.

Después se procede a colocarla en el equipo de ensayo, este aplicará una presión de agua de 0.5 MPa, se dejará la probeta a esta presión por 4d hasta que ocurran una de las dos opciones.

Caso 1: Si el agua atraviesa la muestra, se mide un flujo de agua.

Caso 2: Si el agua no atraviesa la muestra, se mide la profundidad de penetración de agua.

La aplicación de presión en el ensayo es para acelerar el tiempo de ensayo y en el caso de concretos de muy baja permeabilidad lograr hacer que el agua atraviese su estructura hasta un rango donde se pueda medir.

2.2.1.1 Caso 1: Cálculo del coeficiente de permeabilidad por flujo constante de agua.

En este primer caso el agua atraviesa por completo el espécimen, es decir se satura el espécimen y se nota un flujo de agua en la cara opuesta a la que se aplica la presión.

Una vez se establece flujo constante, se determina el volumen de agua que atraviesa el espécimen en un tiempo determinado, bien sea haciendo mediciones de nivel de agua en la probeta graduada o midiendo el flujo en un

recipiente contra el tiempo. Se puede calcular el coeficiente de permeabilidad con la siguiente ecuación.

$$K = \frac{\rho g L Q}{P A}$$

Donde:

K: Coeficiente de permeabilidad (m/s)

ρ : Densidad del agua (kg/m³)

g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

L: Longitud del espécimen (m)

Q: Caudal de agua (m³/s)

P: Presión de agua (N/m²)

A: Área transversal del espécimen (m²)

2.2.1.2 Caso 2: Cálculo del coeficiente de permeabilidad por profundidad de penetración de agua.

Una vez cumplidos los 4 días sin haber registrado flujo constante, inmediatamente se secciona el espécimen perpendicularmente a la cara sobre la cual se aplicó la presión de agua, mediante el ensayo de tracción indirecta (ASTM C496), y se mide la profundidad promedio de penetración.

Una vez se ha determinado la profundidad promedio de penetración, es posible deducir el coeficiente de permeabilidad por medio de la ecuación:

$$K = \frac{D^2 v}{2 T h}$$

Donde:

K: Coeficiente de permeabilidad (m/s)

D: Profundidad de penetración (m)

v: Porosidad (determinada por ASTM C642)

T: Tiempo necesario para penetrar la profundidad D (s)

h: Carga de presión de agua (m)

2.3 DISEÑO DEL EQUIPO.

El diseño del equipo está en función a las especificaciones requeridas por las normas consultadas, las cuales son un flujo de agua uniforme a una presión constante de 0.5 MPa (± 0.05 MPa).

El equipo consta principalmente de: celdas contenedoras del espécimen, fuente suministradora de presión y los medios de distribución y transporte.

2.3.1 Celda contenedora del espécimen.

Las características a tener en consideración para el diseño de esta celda, son las siguientes:

- Dimensiones: Capaces de contener una muestra de 6x12 pulgadas.
- Estructura metálica: Capaz de soportar la presión de 0.5 MPa (72.52 PSI) así como ser resistente al agua también.
- Tener un sistema de impermeabilización en la superficie de contacto entre el concreto y la celda.
- Permitir hacer mediciones de flujo de agua en la parte opuesta de la probeta que estará sometida a presión.
- Mantener el flujo uniforme de agua y el área de contacto de agua adecuada.

Se dividió la celda en tres partes: plato superior, plato inferior y bastidores de sujeción.

Para cumplir las dimensiones del plato superior e inferior se eligió la forma de las bridas tipo slip-on de 4" y para soportar la presión, se eligió la mínima para esas dimensiones que es de 150 psi, el material seleccionado es acero inoxidable.

Para el plato superior se adaptó la brida, soldando una placa circular de acero inoxidable de $\frac{1}{2}$ " de espesor en la parte superior. A esta placa se le perforó 2 orificios de $\frac{1}{2}$ ", uno para el ingreso de agua a presión, ubicado en el centro de la brida y el otro en un costado para instalar una válvula de bola, para el desfogue

de aire. En el caso del plato inferior se usó la brida tal como viene de fábrica (Figura N° 2.9).

Para el sellado entre estas celdas y el concreto se vio conveniente usar empaquetaduras de neopreno, de 1/8" de espesor, en la parte superior e inferior. Con esto aseguramos que al aplicar presión con los pernos quede totalmente sellado y a la vez no se dañe la muestra, adicionalmente será útil usar silicona en la unión con el plato superior para tener la certeza de que no haya filtraciones de agua (Figura N° 2.10).

Los bastidores de sujeción, fueron elaborados a partir de unos espárragos de acero inoxidable de 3/4", que es la medida de los orificios extremos de las bridas, se verificó que los pernos resistirán la presión (Figura N° 2.11).

$$\begin{aligned} \text{Área de contacto de agua a presión (A)} &= \pi \times (2 \times 2.54)^2 = 81.07 \text{ cm}^2 \\ \text{Presión (P)} &= 0.5 \text{ MPa} = 5.10 \text{ kg/cm}^2 \\ \text{Fuerza aplicada (F)} &= P \times A = 81.07 \times 5.10 = 413.45 \text{ kg} \\ \text{Fuerza por cada perno} &= 103.36 \text{ kg} \\ \text{Fuerza resistente mínima de cada perno} &= 14251.15 \text{ kg (si cumple)} \end{aligned}$$

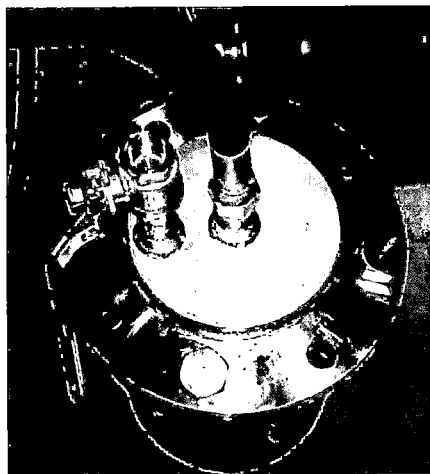


Figura N° 2.9 Plato superior, con la válvula de desfogue instalada (lado izquierdo) y entrada de agua a presión (centro del plato). Fuente: Elaboración propia.

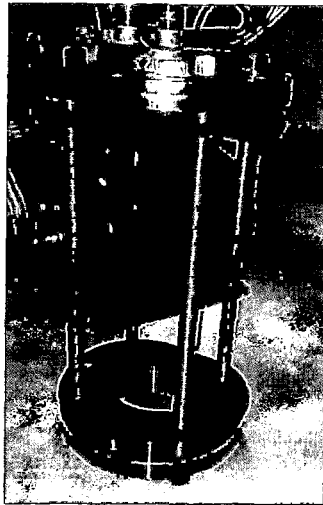


Figura N° 2.10 Se observa la celda completa, de arriba hacia abajo: plato superior, empaquetaduras de neopreno, pernos de sujeción y plato inferior. Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 2.11 Se observa la muestra de concreto en la celda, lista para ser ensayada. Fuente: Elaboración propia.

2.3.2 Fuente suministradora de presión.

Esta parte es la que aumenta, mantiene y regula la presión de agua para el equipo, desde aquí se distribuye el agua a presión a todo el sistema.

Para poder llegar y mantener la presión de agua a 0.5 MPa (5 bar) utilizamos un equipo hidroneumático que consta de una bomba monofásica tipo JET de 1 HP (Figura N° 2.12), un tanque presurizado con membrana que resiste como mínimo 10 bar de presión, un nanómetro de 0 a 6 bar (Figura N° 2.15) y para controlar la

bomba, utilizamos un presostato diferencial marca Danfoss de 0.2 hasta 8 bar y de 0.4 hasta 1.2 bar de diferencial (Figura N° 2.13) instalados sobre un tablero de control eléctrico con variador de sistema manual (controlado por el usuario) a automático (controlado por el presostato) (Figura N° 2.14)

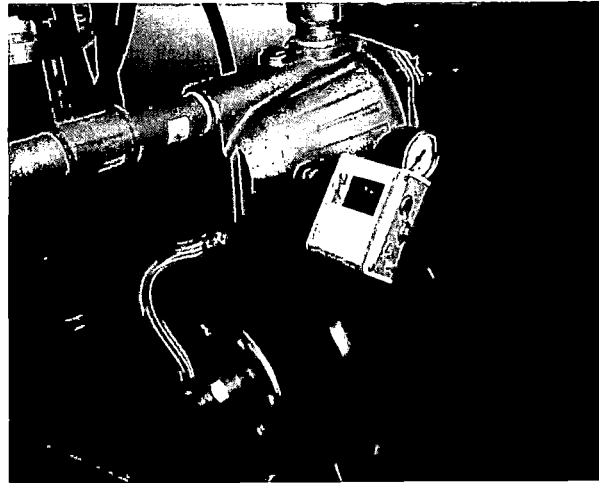


Figura N° 2.12 Fuente que administra presión, se observa el tanque presurizado, la bomba jet, el presostato y el manómetro, instalados y conectados al tablero. Fuente: elaboración propia

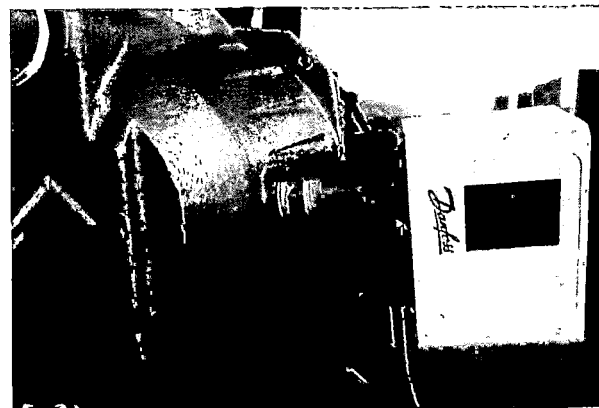


Figura N° 2.13 Presostato instalado en la bomba y conectado al tablero de control. Fuente: elaboración propia

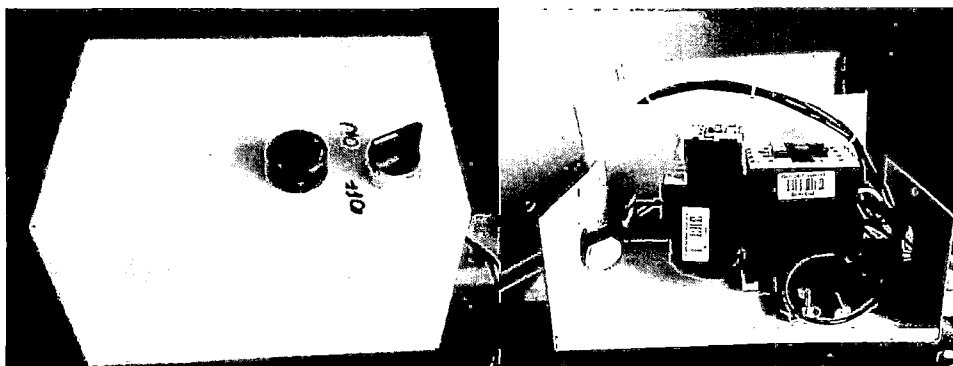


Figura N° 2.14 Tablero de control, con una cubierta a prueba de polvo y salpicaduras (Izquierda) y vista del interior del mismo (derecha). Fuente: elaboración propia

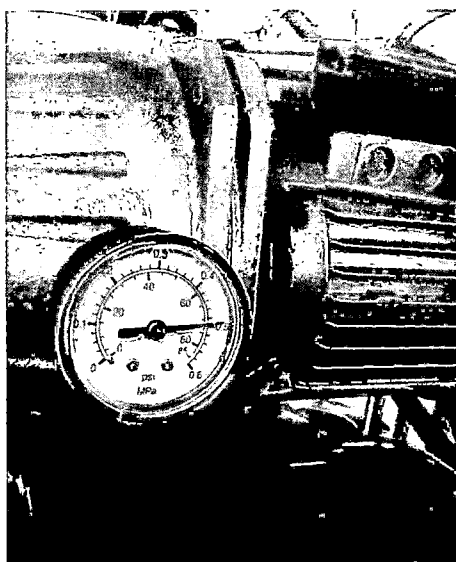


Figura N° 2.15 Manómetro, instalado en la bomba. Fuente: elaboración propia

Procedimiento de operación del equipo:

- Conectar el tablero a la corriente eléctrica, el presostato al no registrar la presión de apagado a la que fue regulado, en este caso 0.5 MPa, dejara fluir la corriente eléctrica.
- La corriente enciende la bomba que hace fluir el agua hacia el tanque presurizado.
- El agua presionará la membrana (que está llena de aire) hasta llegar a la presión requerida de 0.5 MPa.

- Al llegar a esa presión el presostato interrumpe el circuito, con lo cual se apaga la bomba.
- Al apagarse la bomba, la presión se mantiene porque la membrana de aire intenta expandirse y presiona el agua, que al estar confinada, mantiene la presión.
- Durante el ensayo el agua que atraviesa el concreto hace disminuir la presión, esta presión solo podrá disminuir hasta 0.46 MPa, en ese momento el presostato vuelve a encender la bomba y aumenta la presión a 0.5 MPa.

2.3.3 Medio de distribución y transporte.

En esta sección lo que se busca es llevar la presión de la bomba a cada una de las celdas, evitando filtraciones.

Se adaptó un tubo de 1 ½" con 6 salidas de ½" y una terminación en hemisferio (Figura N° 2.16), para que pueda ingresar en la salida de la bomba se le adaptó con una reducción tipo campana de 1 ½" a 1" todo elaborado en acero inoxidable de 1/16" de espesor. En cada salida se instaló una válvula de bola Φ ½" de 300 wog (20.7 bar) en acero inoxidable (Figura N° 2.16).

Para el transporte se eligió mangueras de caucho reforzadas con alambre de ½", que son capaces de resistir una presión de hasta 300 psi, con terminaciones roscadas macho en ambos lados (Figura N° 2.17).

Para el sellado de las uniones se usó cinta teflón de 0.12mm de grosor, esta cinta dio mejores resultados que las convencionales de 0.08mm.

Por otro lado también están las tuberías para la succión de agua de la bomba, lo más conveniente fue usar un tubo de PVC de 1", un codo roscado de 1", un niple de 1x4", dos uniones de roscado a presión de 1" y una válvula de pie con rejilla de 1" en bronce (Figura N° 2.18). En las uniones de PVC-PVC para un mejor sellado se usó un pegamento de secado rápido de alta presión para PVC y

en la entrada a la bomba y la unión de pie solo se le agregó cinta teflón de 0.08mm.

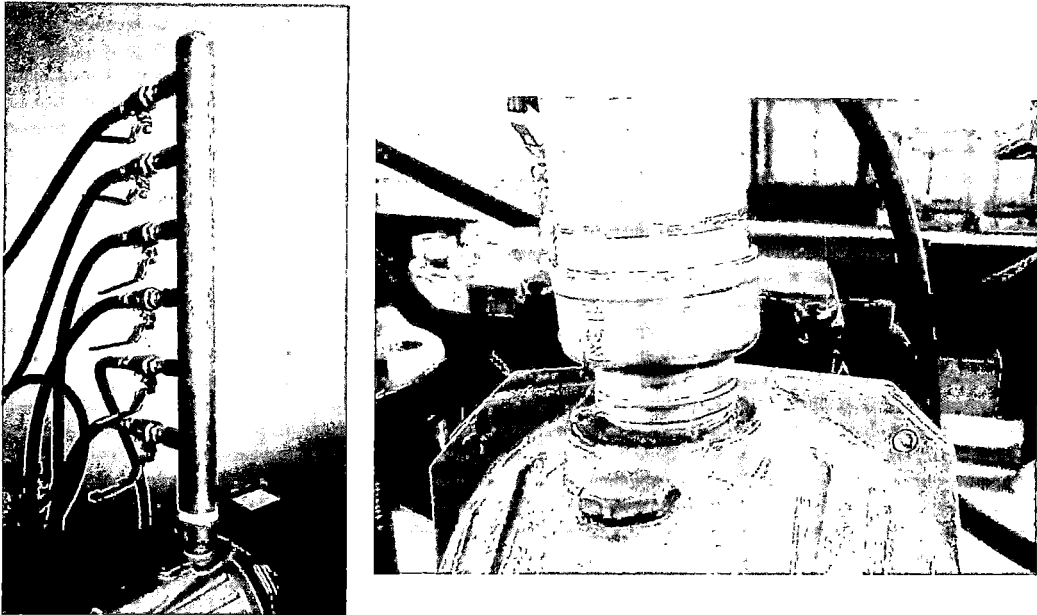


Figura N° 2.16 Medio de transmisión desde la bomba, se observa el tubo de acero con las 6 válvulas conectadas (izquierda) y la reducción tipo campana (derecha). Fuente: elaboración propia.

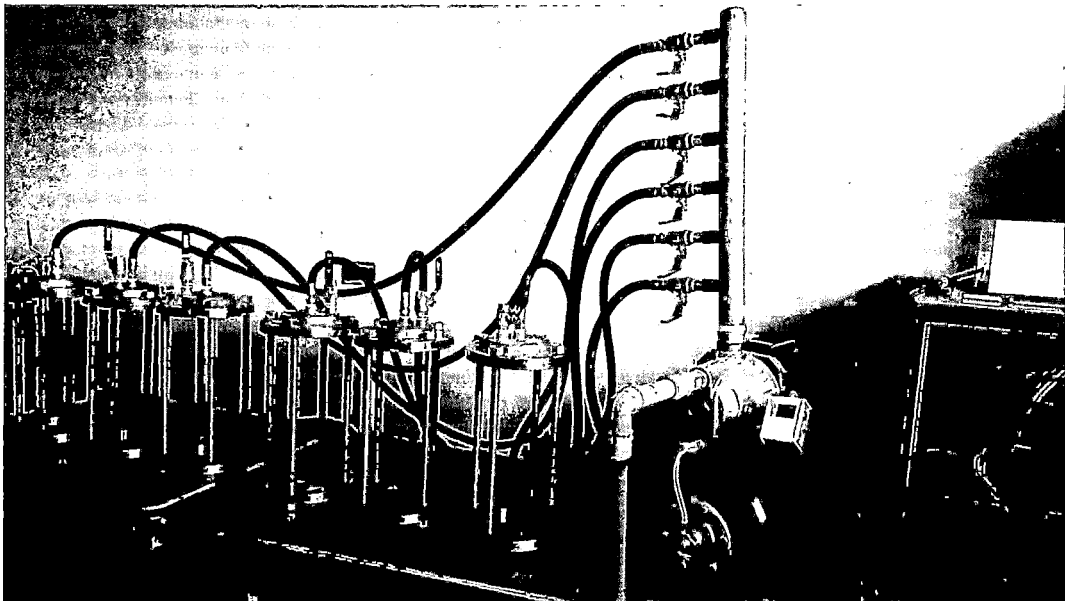


Figura N° 2.17 Medio de transmisión desde la bomba hasta las celdas, se observa el tubo de acero con las 6 válvulas conectadas y las mangueras unidas a las celdas, completando el equipo.

Fuente: elaboración propia.

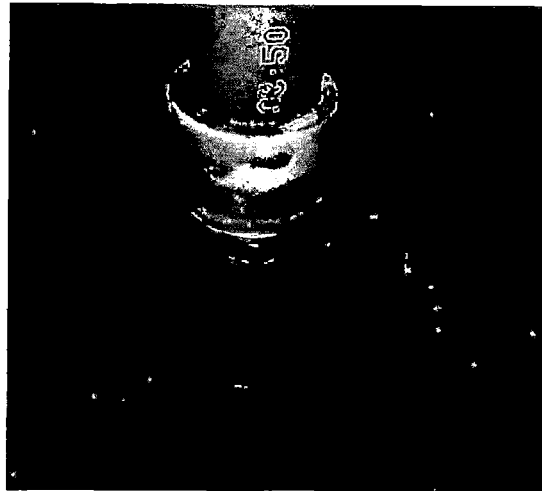
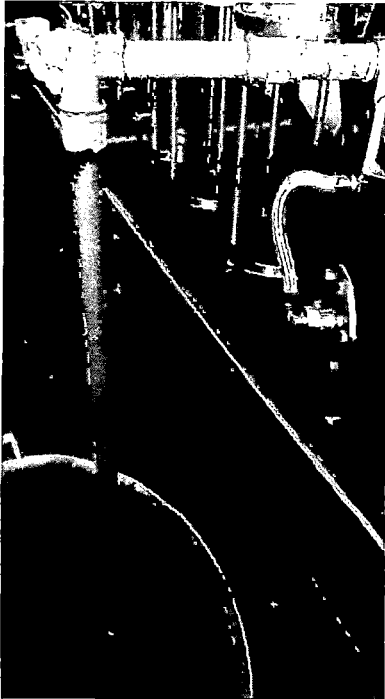


Figura N° 2.18 Aquí se observa el tubo de PVC para succión de agua al interior de la bomba (izquierda) y la canastilla de bronce para evitar el ingreso de aire al interior de la bomba (derecha).

Fuente: elaboración propia.

2.3.4 Prueba de ensayo y error.

Empezamos probando la bomba y el sistema de distribución, para su funcionamiento primero cebamos la bomba que consiste en llenar agua a todo el sistema de succión. Al realizar las pruebas a 0.2 MPa notamos que la cinta teflón de 0.08 mm era deficiente, se tenían filtraciones por todos lados, sin importar la cantidad de este tipo de cinta que se le ponga, ya que era poco resistente y al enroscar terminaba por descomponerse. Cambiamos a la cinta de 0.12 mm, para este caso si se notó la formación del sello entre los hilos de las uniones y no hubo filtraciones.

Pasamos a las pruebas a 0.3 MPa, la bomba llegó sin problemas hasta esta presión. Luego se notó una ligera filtración en la conexión entre la salida de la bomba y el tubo de distribución, se dejó toda la noche para comprobar la cantidad de agua perdida, la perdida en 19 horas fue de 0.32 a 0.16 MPa, no era aceptable y se procedió a ajustar más la salida.

Luego se subió la presión hasta los 0.5 MPa (presión requerida) a pesar de estar más ajustada la conexión aún se tenía las filtraciones de agua. Las pérdidas fueron de 0.49 a 0.30 MPa en 3 horas, muy lejos aún para dejarlos durante la noche sin el control del presostato. Fue necesario aplicar más cantidad de cinta teflón para quedar totalmente sellado. La bomba y el presostato aún estaban por ajustar ya que la precisión era inexacta, se hicieron pruebas ajustando el punto de desactivación del presostato hasta que coincida con el nanómetro en la presión de 0,5 MPa y también del diferencial para que cuando la presión caiga a 0.46 MPa vuelva a encenderse, estando así en todo momento dentro del límite establecido por la norma de 0.5 ± 0.05 MPa.

CAPÍTULO III. DISEÑO EXPERIMENTAL**3.1 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.****3.1.1 Cemento Portland.**

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que amasado con agua, forma una pasta que fragua y endurece por medio de reacciones y procesos de hidratación y que, una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad incluso bajo el agua.

El endurecimiento hidráulico del cemento se debe principalmente a la hidratación de los silicatos de calcio, aunque también pueden participar en el proceso de endurecimiento otros compuestos químicos, como por ejemplo, los aluminatos. La suma de las proporciones de óxido de calcio reactivo (CaO) y de dióxido de silicio reactivo (SiO₂) será al menos del 50% en masa. (Cuadro N° 3.1)

Los cementos están compuestos de diferentes materiales (componentes) que adecuadamente dosificadas mediante un proceso de producción controlado, le dan al cemento las cualidades físicas, químicas y resistencias adecuadas al uso deseado.

Cuadro N° 3.1 Requisitos químicos de la composición del cemento portland tipo I. Fuente: ASTM C 150.

REQUISITOS	Cemento Portland Tipo I
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃) %máx.	-
Oxido férrico (Fe ₂ O ₃) %máx.	-
Oxido de magnesio (MgO) %máx.	6.0
Trióxido de azufre (SO ₃) %máx., Cuando (C3A) es 8% o menos	3.0
Trióxido de azufre (SO ₃) %máx., Cuando (C3A) es más del 8%	3.5
Pérdida por ignición %máx.	3.0
Residuo insoluble % máx.	0.75
Silicato tricálcico (C3S) %máx.	-
Silicato dicálcico (C2S) %máx.	-
Aluminato tricálcico (C3A) %máx.	-
Suma de C3S+4.75C3A %máx.	-
Alumino-ferrito tetracálcico, más dos veces aluminato tricálcico C4AF+2(C3A) o solución sólida (C4AF+C2F) %máx.	-

Cuadro N° 3.2 Requisitos físicos para el cemento portland tipo I. Fuente: ASTM C 150.

REQUISITOS	Cemento Portland Tipo I
Contenido de aire del mortero volumen%	
Máx.	12
Min.	-
Finura superficie específica (m ² /kg) Ensayo de turbidímetro	
Min	150
Max	-
Ensayo de permeabilidad al aire	
Min	260
Max	-
Expansión en autoclave	
max (%)	0.80
Resistencia a la compresión, no menor que los valores mostrados para edades indicadas a continuación	
1 día	-
3 días	12.0
7 días	19.0
28 días	-
Tiempo de fraguado Ensayo de Vicat (minutos)	
Tiempo de fraguado, no menor que:	45
Tiempo de fraguado, no mayor que:	375

En el Cuadro N° 3.1 y Cuadro N° 3.2, se muestran los requisitos físicos y químicos que debe de cumplir el cemento portland tipo I utilizado, el cemento utilizado en esta investigación, cumple con los requisitos indicados.

3.1.2 Agregados.

Los agregados son materiales inorgánicos naturales o artificiales, son la fase discontinua que esta embebida en la pasta de cemento portland, y ocupan aproximadamente el 75% del volumen del concreto

Se clasifican los agregados de acuerdo al tamaño de sus partículas las cuales están comprendidas entre los límites fijados en la NTP 400.011, y se clasifican en agregados finos y agregados gruesos.

En el Cuadro N° 3.3 mostramos las normas utilizadas para obtener las propiedades físicas de los agregados, las mismas serán mencionadas más adelante.

Cuadro N° 3.3 Lista de normas seguidas para determinar las propiedades físicas de los agregados.

Fuente: ASTM y NTP.

Ensayo en agregados	NTP		ASTM	
	Ag. Grueso	Ag. Fino	Ag. Grueso	Ag. Fino
Análisis granulométrico	NTP 400.012		ASTM C 136	
P.U.S. y P.U.C.	NTP 400.017		ASTM C 29	
Peso específico y capacidad de absorción	NTP 400.021	NTP 400.022	ASTM C 127	ASTM C 128
Contenido de humedad	NTP 339.185		ASTM C 566	

3.1.2.1 Agregado fino.

Se define como agregado fino al material proveniente de la desintegración natural y/o artificial de rocas que pasa por el tamiz 3/8 y es retenido en tamiz N°200 según NTP 400.011.

Para esta investigación se usó agregado proveniente de la cantera de Jicamarca, ubicada en el distrito de Lurigancho-Chosica, en la provincia de Lima, que también fue lavada para disminuir la cantidad de partículas finas.

3.1.2.2 Propiedades del agregado fino

a) Análisis Granulométrico:

Cuadro N° 3.4 Resultados del análisis granulométrico del agregado fino. Fuente: ASTM C 136

TAMIZ		%	% RET.	%
(Pulg)	(mm)	RET.	ACUM.	PASA
1/2"	12.7	0.0	0.0	100.0
3/8"	9.5	0.0	0.0	100.0
N°4	4.75	1.9	1.9	98.1
N°8	2.38	12.9	14.8	85.2
N°16	1.19	24.9	39.7	60.3
N°30	0.6	20.8	60.5	39.5
N°50	0.3	18.2	78.7	21.3
N°100	0.15	12.5	91.3	8.7
FONDO	0.075	8.7	100.0	0.0

En el Cuadro N° 3.4, mostramos los resultados del análisis granulométrico realizado en laboratorio, en la Figura N° 3.1, mostramos la curva granulométrica, y notamos que está dentro de los requisitos del huso para agregado fino, indicado en la ASTM C 33.

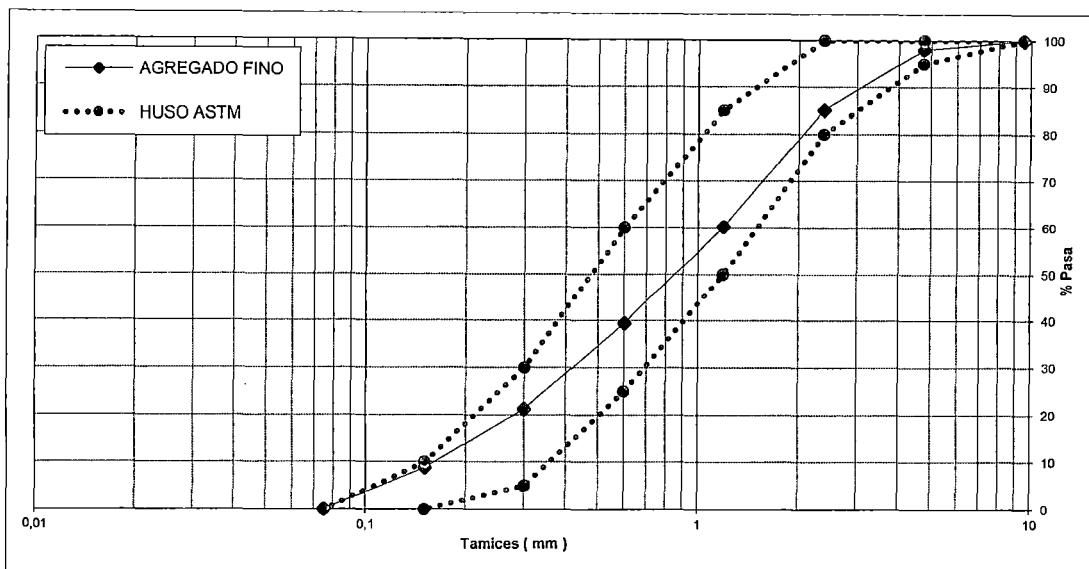


Figura N° 3.1, Curva granulométrica del agregado fino y huso granulométrico. Fuente: Elaboración propia – ASTM C 33

b) Propiedades físicas:

Cuadro N° 3.5 Propiedades del agregado fino. Fuente: Elaboración propia.

Ensayo	Resultado	Norma de ensayo
Humedad Total	% 0.3	ASTM C566
Peso Unitario Suelto	Kg/m ³ 1550	ASTM C29
Peso Unitario Compactado	Kg/m ³ 1750	ASTM C29
Contenido de Vacíos	% 34	ASTM C29
Material que pasa el tamiz de 75 µm	% 2.7	ASTM C117
Terrones arcilla y friables	% 0	ASTM C142
Gravedad Específica de masa (GEM)	g/cm ³ 2.67	ASTM C128
GEM saturada de superficie seca	g/cm ³ 2.7	ASTM C128
Gravedad Específica Aparente	g/cm ³ 2.73	ASTM C128
Absorción	% 0.8	ASTM C128
Densidad	Kg/m ³ 2660	ASTM C128
Módulo de fineza	- 2.87	ASTM C136

En el Cuadro N° 3.5, mostramos los resultados de los ensayos realizados en laboratorio para determinar las propiedades del agregado fino, utilizado en el diseño de mezcla.

3.1.2.3 Agregado grueso.

Se define como agregado grueso al material grueso proveniente de la desintegración mecánica retenido en el tamiz N° 4 según la NTP 400.011

Para esta investigación se usó agregado proveniente de la cantera de Jicamarca, ubicada en el distrito de Lurigancho-Chosica, en la provincia de Lima.

3.1.2.4 Propiedades del agregado grueso.

a) Análisis Granulométrico, según la norma ASTM C 136:

Cuadro N° 3.6 Resultados del análisis granulométrico del agregado grueso. Fuente: ASTM C 136

TAMIZ		%	% RET.	%
(Pulg)	(mm)	RET.	ACUM.	PASA
2 1/2"	63.5	0.0	0.0	100.0
2"	50.8	0.0	0.0	100.0
1 1/2"	38.1	0.0	0.0	100.0
1"	25.4	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.05	0.0	0.0	100.0
1/2"	12.7	36.9	36.9	63.1
3/8"	9.5	23.9	60.8	39.2
N°4	4.75	34.1	94.9	5.1
N°8	2.38	3.3	98.2	1.8
N°16	1.18	0.5	98.7	1.3
N°30	9.6	0.2	98.9	1.1
N°50	0.2	0.1	99.0	1.0
N°100	0.15	0.1	99.1	0.9
FONDO	0.075	0.9	100.0	0.0

En el Cuadro N° 3.6, mostramos los resultados del análisis granulométrico realizado en laboratorio, en la Figura N° 3.2, mostramos la curva granulométrica, y notamos que está dentro de los requisitos del huso N°67 para agregado grueso, indicado en la ASTM C 33.

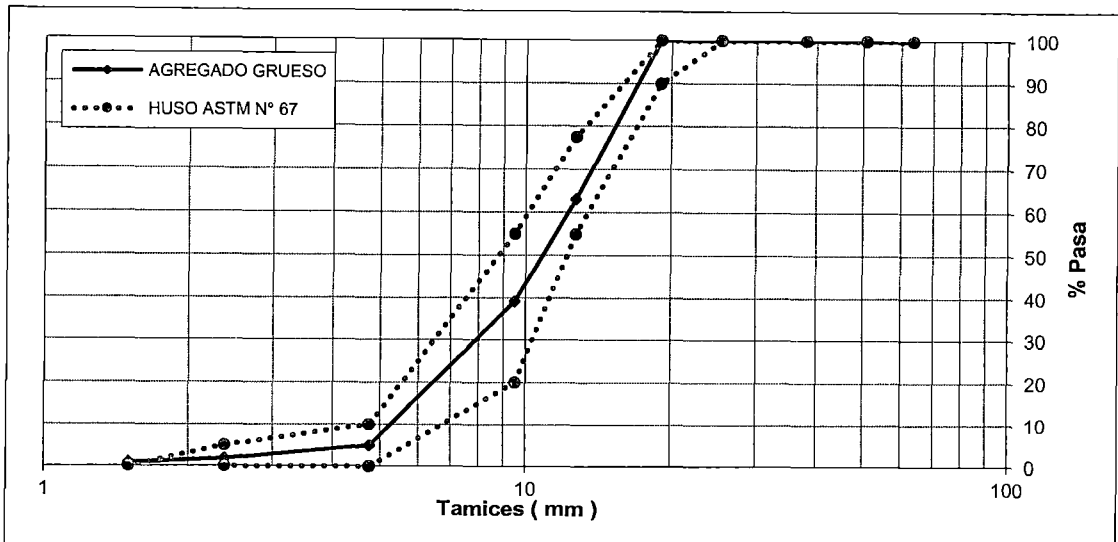


Figura N° 3.2 Curva granulométrica del agregado grueso y huso granulométrico n° 67. Fuente: Elaboración propia – ASTM C 33

b) Propiedades físicas:

Cuadro N° 3.7 Propiedades del agregado grueso. Fuente: Elaboración propia.

Ensayo		Resultado	Norma de ensayo
Humedad Total	%	0.3	ASTM C566
Peso Unitario Suelto	Kg/m ³	1450	ASTM C29
Peso Unitario Compactado	Kg/m ³	1600	ASTM C29
Contenido de Vacíos	%	40	ASTM C29
Material que pasa la malla N200	%	0.6	ASTM C117
Terrones arcilla y friables	%	0	ASTM C142
Gravedad Esp. De masa	g/cm ³	2.67	ASTM C127
GEM superficie sat. Seca	g/cm ³	2.69	ASTM C127
Gravedad Esp. Aparente	g/cm ³	2.73	ASTM C127
Absorción	%	0.9	ASTM C127
Densidad	Kg/m ³	2660	ASTM C127
Módulo de fineza	-	6.5	ASTM C136

En el Cuadro N° 3.7, mostramos los resultados de los ensayos realizados en laboratorio para determinar las propiedades del agregado fino, utilizado en el diseño de mezcla.

3.1.3 Aditivo.

Los aditivos utilizados para el diseño de mezcla fueron 2, el Rheobuild 1000 y el Viscocrete 1110 PE.

3.1.3.1 Rheobuild 1000

Es un aditivo reductor de agua de alto rango, de segunda generación, sin retardo, por lo cual no afectará la fragua del concreto. Está clasificado según la norma ASTM C 494 como tipo F, reductor de agua de alto rango.

La dosis recomendada está entre 0.8% y 2.0 %

3.1.3.2 Viscocrete 1110 PE

Es un aditivo reductor de agua de alto rango, de tercera generación, a base de policarboxilatos, que no afecta la fragua. Está clasificado según la norma ASTM C 494 como tipo F, reductor de agua de alto rango.

La dosis recomendada está entre 1.0% y 2.0%, se hicieron pruebas, obteniendo mejores resultados con el Rheobuild 1000.

3.2 DISEÑO DE MEZCLA

3.2.1 Procedimiento del diseño.

En este estudio se han utilizado 90 probetas de concreto, 30 de cada diseño, fabricadas bajo las mismas condiciones y mismos materiales, tomando como referencia la norma ASTM C192/C 192M, con la diferencia que las dimensiones de la probeta cilíndrica es de 6" de diámetro por 6" de altura. Se han considerado 3 diseños de mezcla con la variación de la cantidad de cemento y la relación agua-cemento como indica la tabla 1, se ha tratado de que la variación en el contenido de cemento sea mínima, para concentrarnos en la variación de las relaciones agua-cemento.

Muestra	Relación a/c	Cantidad de cemento (kg)
1	0.65	320
2	0.55	350
3	0.45	380

Tabla 3.7: Contenido de cemento por m³ de concreto y relación agua-cemento(a/c).

En los diseños elaborados se trató de mantener al mínimo la cantidad de cemento a utilizar, para poder estudiar de manera más aislada el efecto que tiene la relación agua-cemento en la permeabilidad. Para poder disminuir la cantidad de cemento por metro cúbico de concreto, fue necesario utilizar aditivos superplastificantes, sin retardante, para no afectar de manera negativa el fraguado del concreto.

Para el curado de las muestras, se sumergieron en agua por 28 días, luego fueron retiradas, las 6 primeras muestras a ensayar, de cada diseño, se secaron en un horno a 80°C, midiendo la masa cada 24 horas hasta que dos medidas consecutivas sean constantes, las demás por el tiempo de demora del ensayo se dejaron secar a temperatura ambiente.

Entonces tenemos los siguientes diseños de mezcla, el resumen de los diseños, son presentados en el Cuadro N° 3.8:

Diseño 1:

Relación a/c=0.65

Cantidad de cemento (por m³)=320kg

Tipo de cemento: Cemento Portland Tipo I (marca Sol)

Se usó como aditivo plastificante el Rheobuild 1000, que no tiene ningún efecto retardante ni acelerante, la dosis usada fue del 1.6% del peso del cemento.

D-01: Cemento Sol TI (a/c=0.65)											
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES Y DE LA MEZCLA DE PRUEBA											
M.F. Arena	2.73		Volumen de tanda	0.025		Código	D-01	Fecha	05/02/2014		
M.F. Piedra # 57	0.00		Cementante total	320	kg	Técnicos		R a/cto	0.650		
M.F. Piedra # 67	7.20		Adición	0	%						
M.F. Global	4.74										
Dosificación			Rheobuild 1000			ENSAYOS A REALIZAR			R a/cte 0.65		
Vol. Agregados	0.66		1.60%	% =	13.33	cc	6 prob. De 15x15				
Arena	55	%	0.00%	% =	0.00	cc	1 prob de 15x30				
Piedra # 67	45	%	0.00%	% =	0.00	cc	1 prob de 10x10				
Piedra #57	0	%	0.00%	% =	0.00	cc					
100					0.00	kg/m ³					
MATERIALES	PROCEDENCIA	P. ESP kg/m ³	HUM. %	ABS. %	%H-%A	PESO SECO kg/m ³	VOL.	PESO S.S.S. kg/m ³	CORRECCIÓN POR HUMEDAD	TANDA PRUEB DOSIF. (Kg)	Dos. Hum. Real (Kg/m ³)
Cemento Sol Tipo I	Lima	3150				320	0.10159	320	320.0	8.00	320
Agua	LEM UNI	1000				208	0.20800	208.00	195.4	4.89	195
Arena	Jicamarca	2660	2.44	0.80	1.64	967.26	0.36363	974.99	990.9	24.77	991
Piedra # 67	Jicamarca	2683	0.49	0.90	-0.41	798.23	0.29752	805.42	802.1	20.05	802
Rheobuild 1000	-	1200				5.120	0.00427	5.1200	5.1	128.0	5.12
Aire						2.50%	0.0250				
TOTAL						2299	1.0000	2313.53	2313.5	57.84	2314

Diseño 2:

Relación a/c=0.55

Cantidad de cemento (por m³)=350kg

Tipo de cemento: Cemento Portland Tipo I (marca Sol)

Se usó como aditivo plastificante el Rheobuild 1000, que no tiene ningún efecto retardante ni acelerante, la dosis usada fue del 1.8% del peso del cemento.

D-02 Cemento Sol TI I (a/c=0.55)											
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES Y DE LA MEZCLA DE PRUEBA											
M.F. Arená	2.73		Volumen de tanda	0.027		Código	D-02	Fecha	12/02/2014		
M.F. Piedra # 57	0.00		Cementante total	350	kg	Técnicos		R a/cto	0.550		
M.F. Piedra # 67	7.20		Adición	0	%						
M.F. Global	4.74										
			Dosificación			ENSAYOS A REALIZAR			R a/cte	0.55	
Vol. Agregados	0.67		Rheobuild 1000	1.80%	% =	15.00	cc	6 prob. De 15x15			
Arena	55	%		0.00%	% =	0.00	cc	1 prob de 15x30			
Piedra # 67	45	%		0.00%	% =	0.00	cc	1 prob de 10x10			
Piedra #57	0	%		0.00%	% =	0.00	cc				
	100					0.00	kg/m3				
MATERIALES	PROCEDENCIA	P. ESP	HUM.	ABS.	%H-%A	PESO SECO	VOL.	PESO S.S.S.	CORRECCIÓN	TANDA PRUEB	Dos. Hum.Real
		kg/m ³	%	%		kg/m ³		kg/m ³	POR HUMEDAD	DOSIF. (Kg)	(Kg/m ³)
Cemento Sol Tipo I	Lima	3150				350	0.11111	350	350.0	9.45	350
Agua	LEM UNI	1000				193	0.19250	192.50	179.18	4.84	179
Arena	Jicamarca	2660	2.20	0.80	1.40	974.56	0.36638	982.36	996.00	26.89	996
Piedra # 67	Jicamarca	2683	0.86	0.90	-0.04	804.26	0.29976	811.50	811.18	21.90	811
Rheobuild 1000	-	1200				6.300	0.00525	6.3000	6.3000	170.1	6.30
Aire						2.50%	0.0250				
TOTAL						2328	1.0000	2342.66	2342.66	63.25	2343

Diseño 3:

Relación a/c=0.45

Cantidad de cemento (por m³)=380kg

Tipo de cemento: Cemento Portland Tipo I (marca Sol)

Se usó como aditivo plastificante el Rheobuild 1000, que no tiene ningún efecto retardante ni acelerante, la dosis usada fue del 2.0% del peso del cemento.

D-03: Cemento Sol Tipo I (a/c=0.45)											
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LOS MATERIALES Y DE LA MEZCLA DE PRUEBA											
MF. Arena	2.73	Volumen de tanda	0.027	Código	D-03	Fecha	19/02/2014				
MF. Piedra # 57	0.00	Cementante total	380 kg	Técnicos		R a/cto	0.450				
MF. Piedra # 67	7.20	Adición	0 %			R a/cte	0.45				
MF. Global	4.74										
Vol. Agregados	0.68	Dosificación			ENSAYOS A REALIZAR						
Arena	55 %	Rheobuild 1000	2.00% % =	16.67	cc	6 prob. De 15x15					
Piedra # 67	45 %		0.00% % =	0.00	cc	1 prob de 15x30					
Piedra #57	0 %		0.00% % =	0.00	cc	1 prob de 10x10					
	100		0.00% % =	0.00	kg/m ³						
MATERIALES	PROCEDECENCIA	P. ESP kg/m ³	HUM. %	ABS. %	%H-%A	PESO SECO kg/m ³	VOL.	PESO S.S.S. kg/m ³	CORRECCIÓN POR HUMEDAD	TANDA PRUEB DOSIF. (Kg)	Dos. Hum.Real (Kg/m ³)
Cemento Sol Tipo I	Lima	3150				380	0.12063	380	380.0	10.26	380
Agua	LEMUNI	1000				171	0.17100	171.00	158.37	4.28	158
Arena	Jicamarca	2660	2.40	0.80	1.60	1000.74	0.37622	1008.74	1024.76	27.67	1025
Piedra # 67	Jicamarca	2683	0.49	0.90	-0.41	825.87	0.30781	833.30	829.91	22.41	830
Rheobuild 1000	-	1200				7.600	0.00633	7.6000	7.6000	205.2	7.60
Aire						1.80%	0.0180				
TOTAL						2385	1.0000	2400.64	2400.64	64.82	2401

Cuadro N° 3.8 Resumen de diseños utilizados, se muestra pesos secos para cada dosificación.

Fuente: Elaboración propia.

Pesos secos para cada dosificación usada			
Material	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
	Peso Seco (Kg)	Peso Seco (Kg)	Peso Seco (Kg)
Cemento	340	350	380
Agua	208	193	171
Arena	967	975	1001
Piedra	798	804	826
Aditivo	5.1	6.3	7.6
Relación Arena-Piedra	55 - 45	55 - 45	55 - 45
Relación a/c	0.65	0.55	0.45

3.3 ENSAYOS EN LABORATORIO.

3.3.1 Resistividad eléctrica.

Este método está descrito en la norma PNE 83988: Durabilidad del hormigón. Métodos de ensayo. Determinación de la resistividad eléctrica. Parte 2: Método de las cuatro puntas o de Wenner. Es un método usado inicialmente en suelos pero esta norma adapta el experimento para concreto.

- a) Elaborar y curar las muestras, según la norma ASTM C192, en este caso utilizamos probetas con más de 28 días de curado, se deben probar 3 probetas de 15x30cm para cada diseño como mínimo.
- b) Dejar secar en la estufa a 80°C durante el tiempo necesario hasta que dos medidas de masas consecutivas sean constantes.
- c) Se incrustan los 4 clavos de acero en la superficie lateral de la probeta, espaciados 5 cm y a 0.3cm de profundidad.
- d) Se aplica una intensidad de corriente conocida en los pines extremos
- e) Se procede a medir la resistencia entre los pines centrales con la fórmula siguiente, se repite este procedimiento en tres zonas diferentes, distribuidas en la superficie lateral de la probeta:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{\left[1 + \left[\frac{2a}{(a^2 + 4b^2)^{0.5}}\right] - \frac{2a}{(4a^2 + 4b^2)^{0.5}}\right]}$$

Ecuación 3.1

Donde:

ρ : Resistividad promedio a la profundidad a ($\Omega \cdot m$)

a : Distancia entre electrodos (m)

b : Profundidad de entierro de los electrodos (m)

R : Lectura del terrómetro (Ω)

3.3.2 Experimento de Darcy.

En 1856, en la ciudad francesa de Dijon, el ingeniero Henry Darcy fue encargado del estudio de la red de abastecimiento a la ciudad. Al diseñar unos filtros de arena para purificar el agua, estudió los factores que influían en el flujo de agua a través de materiales arenosos (porosos).

El experimento de Darcy consistía en un permeámetro (Figura N° 3.1), que básicamente es un recipiente de sección constante por el que se hace circular agua conectando a uno de sus extremos un depósito situado a un nivel de altura superior y constante. En el otro extremo se regula el caudal de salida mediante un grifo que en cada experimento mantiene el caudal constante. Midiendo el nivel de la columna de agua en distintos puntos.

Darcy, encontró que el caudal que atravesaba el permeámetro, era directamente proporcional al gradiente hidráulico y a la sección del tubo en el que se mide el flujo.

Darcy también descubrió que la constante de proporcionalidad dependía del tipo de arena, ya que, aunque se cumplía la proporción expresada anteriormente, el coeficiente no es el mismo para una y otra arena, Darcy llamó a esta constante "k" el coeficiente de Permeabilidad, aunque su denominación actual es conductividad hidráulica.

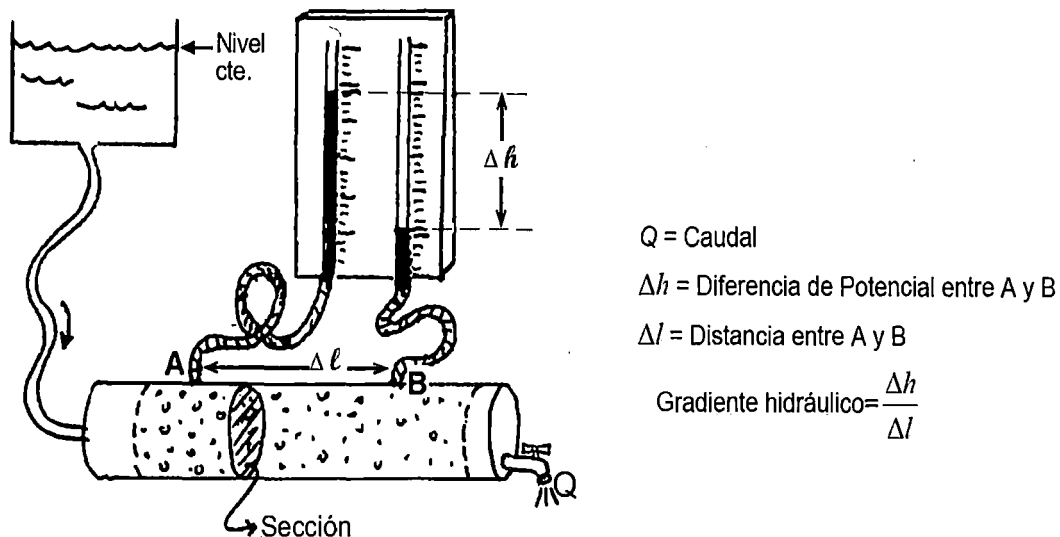


Figura N° 3.3 Permeámetro de carga constante. Fuente: <http://hidrologia.usal.es/>

En esta investigación, se va a realizar una analogía a lo realizado por Darcy para filtros de arena, en este caso la cabeza de presión va a ser mucho mayor, de ahí el uso de una bomba hidráulica, si bien el método está descrito en las normas consultadas, éstas están fundamentadas en el experimento de Darcy.

3.3.3 Permeabilidad al agua por método de presión.

Para el proceso de implementación, se realizaron un total de 30 muestras para cada diseño realizado (diseño 1, diseño 2, diseño 3). Por el tiempo que demora en realizarse cada ensayo, y la limitación del equipo, para realizar 6 ensayos simultáneamente es que las edades de ensayo serán: 28 días, 49 días, 70 días, 91 días, 112 días. Y fueron identificados como se indica en el Cuadro N° 3.9:

Cuadro N° 3.9 Identificación de las muestras ensayadas. Fuente: Elaboración propia

Identificación	Diseño	Edad	Número de probetas
0.65 - I	Diseño 1	28 días	06
0.65 - II	Diseño 1	49 días	06
0.65 - III	Diseño 1	70 días	06
0.65 - IV	Diseño 1	91 días	06
0.65 - V	Diseño 1	112 días	06
0.55 - I	Diseño 2	28 días	06
0.55 - II	Diseño 2	49 días	06
0.55 - III	Diseño 2	70 días	06

0.55 - IV	Diseño 2	91 días	06
0.55 - V	Diseño 2	112 días	06
0.45 - I	Diseño 3	28 días	06
0.45 - II	Diseño 3	49 días	06
0.45 - III	Diseño 3	70 días	06
0.45 - IV	Diseño 3	91 días	06
0.45 - V	Diseño 3	112 días	06

Este ensayo está descrito en la norma NTC 4483 y la UNE EN 12390-8 a continuación haremos una descripción paso a paso del ensayo propuesto para calcular el coeficiente de permeabilidad:

- a) Después de curar las muestras, según la norma ASTM C192, en este caso utilizamos probetas con 28 días de curado húmedo y luego se retiró de la inmersión y se ensayó a 49, 70, 91 y 112 días; hicimos 6 probetas de 15x15cm por cada edad de ensayo.
- b) Dejar secar en la estufa a 80°C durante el tiempo necesario hasta que dos medidas de masas consecutivas sean constantes.
- c) Se coloca impermeabilizante por ambos extremos de la probeta y una pequeña parte por el borde de la cara superior (por donde ingresa el agua).
- d) Colocamos el espécimen en las celdas, aplicamos algún tipo de pegamento impermeable, en este caso usamos silicona, en la unión concreto-empaquetadura para evitar filtraciones.
- e) Abrimos la llave de paso y dejamos abierta la llave de desfogue, que es por donde saldrá el aire atrapado en la manguera, encendemos el equipo sin aplicar mucha presión para facilitar el ingreso de agua, cuando empiece a salir agua por las válvulas de desfogue, cerramos la llave y repetimos el procedimiento para las demás celdas.
- f) Una vez expulsado todo el aire de las celdas, procedemos a encender la bomba, la cual bombeara agua a la membrana del tanque, cuando llegue a la presión requerida (en este caso 0.5 Mpa) el presostato detendrá la bomba.

g) Dejamos las muestras por 4 días, las revisamos constantemente para observar si hay infiltración de agua por la cara opuesta, de ser así se toma medidas del caudal, se toman las medidas en intervalos de una hora, hasta que dos medidas consecutivas se mantengan constantes. Entonces calculamos el coeficiente de permeabilidad "k" con la siguiente expresión:

$$K = \frac{\rho g L Q}{P A} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

K: Coeficiente de permeabilidad (m/s)

ρ : Densidad del agua (kg/m³)

g: Aceleración de la gravedad (m/s²)

L: Longitud del espécimen (m)

Q: Caudal de agua (m³/s)

P: Presión de agua (N/m²)

A: Área transversal del espécimen (m²)

h) De no atravesar por completo el agua a la muestra se procede a aplicar una carga de compresión diametral, partiendo la muestra a la mitad, en un plano longitudinal. Medimos la profundidad de penetración promedio y máxima. Entonces con la profundidad de penetración promedio obtenemos el coeficiente de permeabilidad "k" con la siguiente expresión:

$$K = \frac{D^2 v}{2 T h} \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde:

K: Coeficiente de permeabilidad (m/s)

D: Profundidad de penetración promedio (m)

v: Porosidad (determinada por ASTM C642)

T: Tiempo necesario para penetrar la profundidad D (s)

3.4 RESULTADO OBTENIDOS.

3.4.1 Resistividad eléctrica (método de Wenner).

Se usaron probetas del Laboratorio N°1 de ensayo de materiales de la UNI, con más de 28 días de ser elaboradas y se procedió a realizar el ensayo descrito anteriormente, los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Cuadro N° 3.10 Resultados de resistencia obtenidos de diferentes tipos de probetas. Fuente: Elaboración propia

Grupo 1	Tipo de Cemento	a/c	Resistencia 1	Resistencia 2	Resistencia 3
	T-I	0.6	893 KΩ	857 KΩ	690 KΩ
	T-V	0.8	599 KΩ	319 KΩ	576 KΩ
	T-I	0.75	833 KΩ	772 KΩ	795 KΩ
	T-IPM	0.74	962 KΩ	321 KΩ	593 KΩ
	T-IPM	0.65	605 KΩ	462 KΩ	358 KΩ
	T-I	0.7	305 KΩ	457 KΩ	166 KΩ

Los resultados en rojo, son medidas que están muy alejadas de las otras.

Luego se hicieron pruebas con muestras, donde indicaban la resistencia y su composición, es conocido también que tenían un porcentaje de microsilíce.

Cuadro N° 3 11 Resultados de resistencia eléctrica obtenidos de probetas elaboradas con los mismos materiales pero difieren en la resistencia y la edad de ensayo Fuente: Elaboración propia

Id.	f _c (Kg/cm ²)	Edad (días)	Resistencia 1 (KΩ)	Resistencia 2 (KΩ)	Resistencia 3 (KΩ)
1-B	210	120	326.0	302.0	291.0
2-B	210	120	301.0	315.0	318.0
3-B	250	120	383.0	327.0	322.0
4-B	250	120	294.8	357.0	329.0
5-B	250	82	282.2	284.0	261.3
6-B	250	82	275.0	267.1	296.0

A estas muestras también se le hicieron ensayos para medir la permeabilidad.

3.4.2 Permeabilidad al agua por método de presión.

3.4.2.1 Resultados preliminares.

Estos ensayos fueron realizados para hacer una comprobación previa del correcto funcionamiento del equipo, así como también, con los resultados obtenidos, poder demostrar anticipadamente que el coeficiente de permeabilidad obtenido con este método obedece a lo ya mencionado teóricamente en capítulos anteriores.

Los resultados obtenidos, para cada caso son los siguientes:

- a) Caso I: El agua atraviesa completamente la muestra, se mide el caudal de salida.

Para estos resultados, se usaron probetas con más de 28 días de curado, no se pudo realizar el ensayo a las mismas probetas a las que se le midió la resistividad eléctrica.

En el Cuadro N° 3.12, presentamos los resultados de un ciclo de ensayo, 6 celdas, de las cuales en una no se logró obtener una medición.

Cuadro N° 3.12 Resultados obtenidos del caudal obtenido al ensayar las probetas, medidas realizadas para un total diario de 8 horas. Fuente: Elaboración propia.

Prob	Q (l/s)	Cantidad de agua escurrida, por día (ml)					Total diario	Q (ml/h)	L(m)	A(m ²)
1	1.389E-08	0	0.3	0.1			0.4	0.050	0.3	0.0182
2	2.083E-07	0	1.2	2.7	2.1		6.0	0.750	0.3	0.0182
3	5.139E-07	0	4.0	5.3	5.5		14.8	1.850	0.3	0.0182
4	2.431E-08	0	0.3	0.4			0.7	0.088	0.3	0.0182
5	9.020E-06	0	37.6	32.8	101.7	55.2	227.3	32.471	0.3	0.0182

Para este ensayo, la presión promedio fue de 460000 N/m².

La temperatura y la densidad del agua fueron de 27°C y 996.59 Kg/m³.

b) Caso II: El agua no atraviesa la muestra, se mide la profundidad de penetración.

Se hizo el ensayo en probetas con un porcentaje de microsílíce, las mismas a las que se le midió la resistividad eléctrica. Los resultados se muestran en el Cuadro N° 3.13 y en el Cuadro N° 3.14

Cuadro N° 3.13 Resultados obtenidos de la profundidad de penetración de muestras, para su comprobación con las mediciones de resistividad eléctrica. Fuente: Elaboración propia.

Muestras		Díámetro	Presión de ensayo		Tiempo de ensayo		
Prob.	Id.	d prom. (cm)	P (N/m ²)	h (mH ₂ O)	T(s)	Días	Horas
1	1-B	0.1319	460000	46.91	43200	5	0
2	2-B	0.1395					
3	3-B	0.1086					
4	4-B	0.1007					

Cuadro N° 3.14 Resultados obtenidos para determinar el contenido de vacíos (adimensional), medidas tomadas según ASTM C 642. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso saturado sumergido (g)	Contenido de vacíos
1-B	6052.1	6454.5	3756.8	0.149
2-B	6060.8	6414.3	3710.9	0.131
3-B	6129.3	6402.5	3674.7	0.100
4-B	6157.0	6396.9	3657.7	0.088

3.4.2.2 Resultados finales.

Estos resultados corresponden a las mediciones de las probetas para la implementación del ensayo, se hicieron mediciones de la presión y tiempo de ensayo, además de la profundidad de penetración que son los parámetros necesarios para calcular el coeficiente de permeabilidad "k", que lo desarrollaremos en el Capítulo IV. Los resultados obtenidos los presentamos en el Cuadro N° 3.15:

Cuadro N° 3.15 Resultados obtenidos de las 90 probetas ensayadas. Fuente: Elaboración propia.

Muestras		Profundidad de penetración de las muestras			Presión de ensayo		Tiempo de ensayo		
Prob.	Id.	d prom. (cm)	d1 (cm)	d2 (cm)	P (N/m ²)	h (mH ₂ O)	T(s)	Días	Horas
1	0.65 - I	8.158	8.205	8.110	460000	46.9062	345600	4	0
2	0.65 - I	8.470	8.585	8.355					
3	0.65 - I	8.248	8.120	8.375					
4	0.65 - I	9.880	10.045	9.715					
5	0.65 - I	9.663	9.555	9.770					
6	0.65 - I	9.538	9.865	9.210					
7	0.65 - II	5.127	5.065	5.189	460000	46.9062	345600	4	0
8	0.65 - II	6.860	6.860	6.860					
9	0.65 - II	5.725	5.725	5.725					
10	0.65 - II	6.070	6.320	5.820					
11	0.65 - II	6.585	6.585	6.585					
12	0.65 - II	∅	-	-					
13	0.65 - III	∅	-	-	460000	46.9062	345600	4	0
14	0.65 - III	6.145	6.145	6.145					
15	0.65 - III	6.000	6.000	6.000					
16	0.65 - III	5.920	5.920	5.920					
17	0.65 - III	5.870	5.870	5.870					
18	0.65 - III	5.740	5.740	5.740					
19	0.65 - IV	6.538	6.538	6.538	500000	50.985	345600	4	0
20	0.65 - IV	4.684	4.684	4.684					
21	0.65 - IV	5.276	5.276	5.276					
22	0.65 - IV	4.374	4.374	4.374					
23	0.65 - IV	7.138	7.138	7.138					
24	0.65 - IV	5.608	5.608	5.608					
25	0.65 - V	4.841	4.582	5.100	500000	50.985	410400	4	18
26	0.65 - V	7.625	7.470	7.779					
27	0.65 - V	5.700	5.700	5.700					
28	0.65 - V	5.539	5.577	5.500					
29	0.65 - V	5.611	5.360	5.862					
30	0.65 - V	5.511	5.564	5.457					

31	0.55 - I	13.565	13.515	13.615					
32	0.55 - I	6.503	6.500	6.505					
33	0.55 - I	6.535	6.465	6.605					
34	0.55 - I	9.398	9.395	9.400	460000	46.9062	345600	4	0
35	0.55 - I	6.418	6.660	6.175					
36	0.55 - I	7.260	6.910	7.610					
37	0.55 - II	3.085	3.160	3.010					
38	0.55 - II	3.380	3.310	3.450					
39	0.55 - II	3.463	3.475	3.450					
40	0.55 - II	3.504	3.504	3.504	460000	46.9062	349200	4	1
41	0.55 - II	3.420	3.420	3.420					
42	0.55 - II	3.570	3.570	3.570					
43	0.55 - III	∅	-	-					
44	0.55 - III	3.165	3.365	2.965					
45	0.55 - III	2.800	2.850	2.750					
46	0.55 - III	2.970	3.110	2.830	480000	48.9456	352800	4	2
47	0.55 - III	2.785	2.785	2.785					
48	0.55 - III	2.970	2.970	2.970					
49	0.55 - IV	2.500	3.000	2.000					
50	0.55 - IV	2.645	2.645	2.645					
51	0.55 - IV	4.015	3.765	4.265					
52	0.55 - IV	2.875	2.875	2.875	480000	48.9456	345600	4	0
53	0.55 - IV	2.655	2.655	2.655					
54	0.55 - IV	2.835	2.885	2.785					
55	0.55 - V	2.405	2.505	2.305					
56	0.55 - V	∅	-	-					
57	0.55 - V	2.680	2.630	2.730					
58	0.55 - V	2.740	2.740	2.740	500000	50.985	345600	4	0
59	0.55 - V	3.140	3.140	3.140					
60	0.55 - V	2.830	2.830	2.830					
61	0.45 - I	3.860	3.920	3.800					
62	0.45 - I	3.755	3.728	3.782					
63	0.45 - I	4.415	4.352	4.478	460000	46.9062	342000	3	23
64	0.45 - I	4.203	4.240	4.166					
65	0.45 - I	∅	-	-					
66	0.45 - I	4.550	4.542	4.558					

67	0.45 - II	2.555	2.555	2.555					
68	0.45 - II	3.100	3.100	3.100					
69	0.45 - II	2.485	2.610	2.360	460000	46.9062	406800	4	17
70	0.45 - II	3.090	3.090	3.090					
71	0.45 - II	2.560	2.640	2.480					
72	0.45 - II	2.575	2.575	2.575					
73	0.45 - III	4.515	4.478	4.552					
74	0.45 - III	1.864	1.870	1.858	480000	48.9456	356400	4	3
75	0.45 - III	1.420	1.421	1.419					
76	0.45 - III	2.475	2.463	2.487					
77	0.45 - III	1.881	1.739	2.023					
78	0.45 - III	1.467	1.340	1.593					
79	0.45 - IV	∅	-	-	500000	50.985	406800	4	17
80	0.45 - IV	1.535	1.535	1.535					
81	0.45 - IV	1.955	1.955	1.955					
82	0.45 - IV	1.575	1.575	1.575					
83	0.45 - IV	1.850	1.850	1.850					
84	0.45 - IV	1.890	1.890	1.890					
85	0.45 - V	1.580	1.580	1.580	500000	50.985	342000	3	23
86	0.45 - V	2.140	2.140	2.140					
87	0.45 - V	1.560	1.560	1.560					
88	0.45 - V	1.280	1.280	1.280					
89	0.45 - V	1.430	1.430	1.430					
90	0.45 - V	1.245	1.245	1.245					

Se puede observar posibles valores atípicos marcados en rojo, estos datos serán analizados en el capítulo IV, así como también los resultados obtenidos de permeabilidad.

Complementando estos resultados, tenemos los resultados del contenido de vacíos para cada tipo de muestra ().

Cuadro N° 3.16 Resultados obtenidos para determinar el contenido de vacíos, medidas tomadas según ASTM C 642. Fuente: Elaboración propia.

Muestra	Peso seco (g)	Peso saturado (g)	Peso saturado sumergido (g)	Contenido de vacíos
Diseño I 0.65	1940.5	2074.7	1210.1	0.155
	1755.5	1885.7	1172.8	0.183
	1888.3	2060.6	1172.8	0.194
Diseño II 0.55	2174.9	2292.4	1346.7	0.124
	1691.1	1793.3	1044.8	0.137
	2241.1	2368.4	1383.9	0.129
	1984.4	2097.6	1229.0	0.130
Diseño III 0.45	1334.6	1394.3	828.6	0.106
	1270.9	1328.6	789.8	0.107
	1303.5	1359.7	809.1	0.102
	1325.8	1383.1	821.3	0.102
	1335.9	1390.1	828.5	0.097

Los resultados obtenidos, nos servirán para determinar el coeficiente de permeabilidad en el Capítulo IV.

CAPÍTULO IV. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

4.1 RESULTADOS PRELIMINARES

4.1.1 Análisis de resultados preliminares de ensayo de resistividad eléctrica.

Al considerar que la relación entre la profundidad de penetración de los electrodos y la separación entre ellos es despreciable, la ecuación puede ser simplificada de la siguiente forma:

$$\rho = 2\pi * A * R \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Donde:

ρ : Resistividad eléctrica (K Ω .m)

A : Separación entre electrodos (m)

R : Resistencia eléctrica (K Ω)

Los resultados obtenidos para los dos grupos se indican en el Cuadro N° 4.1 para probetas aleatorias y en el Cuadro N° 4.2 para probetas seleccionadas. Las características de estas muestras están indicadas en el Capítulo III:

Cuadro N° 4.1 Resultados de resistividad para probetas tomadas aleatoriamente con más de 28 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

	a/c	Resistencia promedio (K Ω)	Separación entre electrodos (m)	Resistividad (K Ω .m)
Grupo 1	0.60	875.0	0.06	329.9
	0.80	587.5	0.06	221.5
	0.75	783.5	0.06	295.4
	0.74	457.0	0.06	172.3
	0.65	533.5	0.06	201.1
	0.70	381.0	0.06	143.6

Cuadro N° 4.2 Resultados de resistividad para probetas seleccionadas, se conoce su resistencia a la compresión de diseño y la edad de los especímenes. Fuente: Elaboración propia.

Grupo 2	Id.	f _c (Kg/cm ²)	Edad (días)	Resistencia promedio (KΩ)	Separación entre electrodos (m)	Resistividad (KΩ.m)
	1-B	210	120	306.3	0.06	115.5
	2-B	210	120	311.3	0.06	117.4
	3-B	250	120	344.0	0.06	129.7
	4-B	250	120	326.9	0.06	123.3
	5-B	250	82	275.8	0.06	104.0
	6-B	250	82	279.4	0.06	105.3

De estos dos resultados, observamos la gran diferencia en la resistividad eléctrica, a pesar que las probetas del grupo 2 (Cuadro N° 4.2) fueron elaboradas con un concreto de mayor calidad, la resistividad obtenida es mucho mayor en el grupo 1 (Cuadro N° 4.1).

Para resultados de un mismo diseño, se observa una mayor correlación entre la resistividad y la permeabilidad, lo vamos a ver en más detalle en el subcapítulo siguiente.

A pesar de tener buenos resultados para concretos de un mismo diseño, no pudimos llegar a hacer una comparación entre concretos de diferentes diseños.

4.1.2 Cálculo del coeficiente de permeabilidad y análisis de resultados preliminares de ensayo de permeabilidad.

Tenemos resultados de probetas tomadas aleatoriamente, todas las cuales han sido ensayadas en el Caso I (Ver Cuadro N° 4.3), el agua atraviesa completamente la muestra, debido a su alta permeabilidad. A continuación los resultados:

Cuadro N° 4.3 Resultados de permeabilidad, en este caso la muestra quedo saturada de agua y se midió el caudal. Fuente: Elaboración propia.

Prob.	Q (L/s)	L (m)	A (m ²)	P (N/m ²)	ρ agua (Kg/m ³)	g (m/s ²)	K (m/s)
1	1.389E-08	0.3	0.0182	460000	996.59	9.81	4.87E-09
2	2.083E-07	0.3	0.0182	460000	996.59	9.81	7.30E-08
3	5.139E-07	0.3	0.0182	460000	996.59	9.81	1.80E-07
4	2.431E-08	0.3	0.0182	460000	996.59	9.81	8.51E-09
5	9.020E-06	0.3	0.0182	460000	996.59	9.81	3.16E-06

Las probetas ensayadas eran de similares características de resistencia, sin embargo se nota que la probeta 5 a pesar de tener resistencia similar a las demás, su coeficiente de permeabilidad es muy alto, esto es debido a que es mortero y está elaborado con una arena que su distribución de tamaños de granos es muy similar, teniendo muy poco contenido de partículas finas.

A continuación presentamos los resultados de coeficiente de permeabilidad, de las probetas del grupo 2 (Ver Cuadro N° 4.4), donde se conoce la resistencia de diseño además de la adición de microsilíce.

Cuadro N° 4.4 Coeficiente de permeabilidad, para probetas del grupo 2. Fuente: Elaboración propia.

Id.	Profundidad de penetración d (m)	Presión de ensayo h (mH ₂ O)	Tiempo de ensayo T (s)	Contenido de vacíos γ	K (m/s)
1-B	0.1319	50.98	421200	0.149	6.04E-11
2-B	0.1395	50.98	421200	0.131	5.93E-11
3-B	0.1086	50.98	421200	0.100	2.75E-11
4-B	0.1007	50.98	421200	0.088	2.07E-11

Ahora realizaremos una comparación con los resultados obtenidos de resistividad eléctrica, indicadas en el Cuadro N° 4.5:

Cuadro N° 4.5 Comparación del coeficiente de permeabilidad con la resistividad eléctrica. Fuente:
Elaboración propia.

Grupo 2	Id.	f'c (Kg/cm ²)	Edad (días)	Resistividad (KΩ.m)	K (m/s)
	1-B	210	120	115.5	6.04E-11
	2-B	210	120	117.4	5.93E-11
	3-B	250	120	129.7	2.75E-11
	4-B	250	120	123.3	2.07E-11
	5-B	250	82	104.0	-
	6-B	250	82	105.3	-

Como se observa se guarda una relación que a mayor resistividad eléctrica, menor será la permeabilidad del concreto, de momento solo podemos afirmar que hay una relación inversa, no se realizaron más medidas de resistividad porque no encontramos una relación entre probetas de diferentes diseños, haciendo inviable esta comparativa.

Es importante mencionar que el equipo utilizado es una adaptación de un equipo usado para medir la resistividad eléctrica en suelos, lo más adecuado sería un equipo diseñado para medir la resistividad eléctrica en el concreto, con diferentes valores de intensidad de corriente.

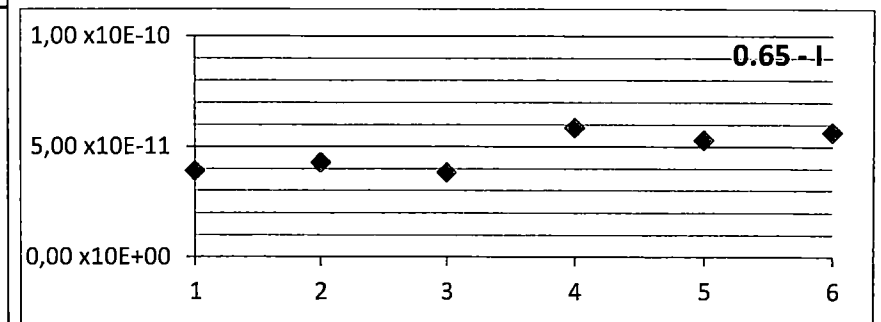
4.2 RESULTADOS FINALES.

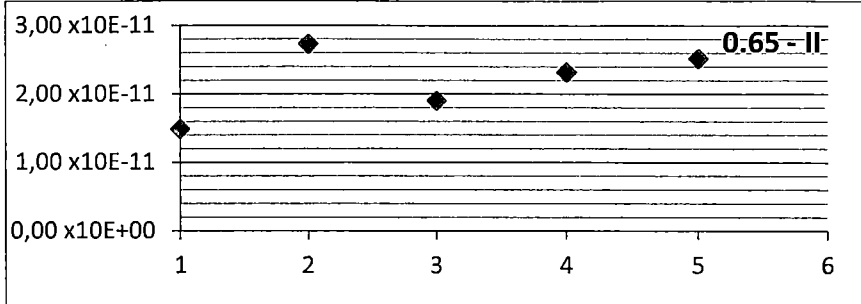
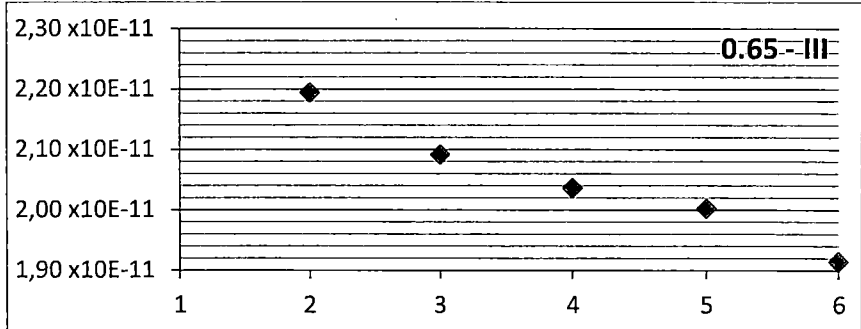
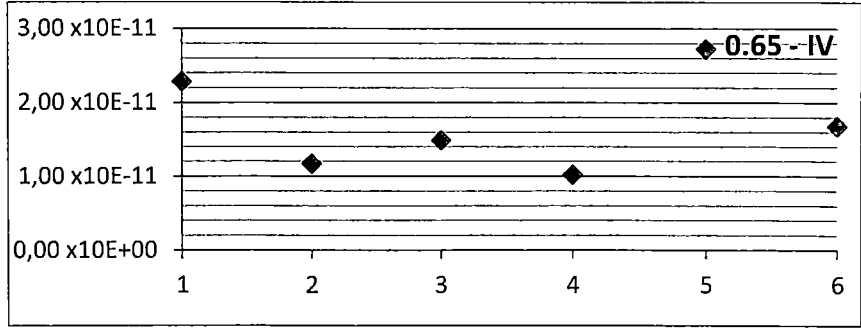
4.2.1 Cálculo del coeficiente de permeabilidad.

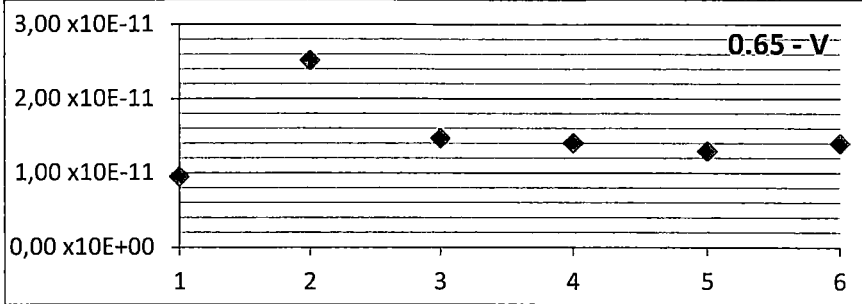
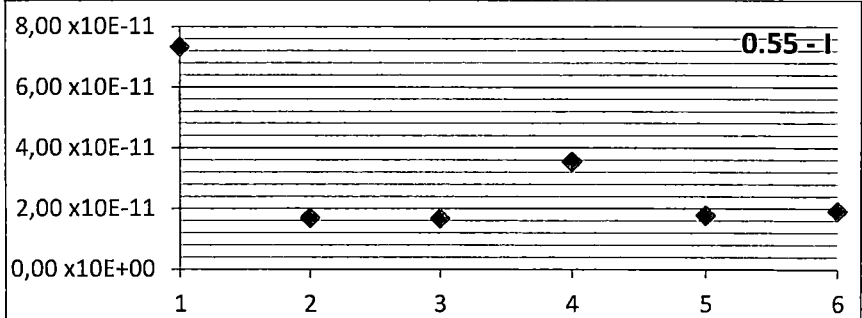
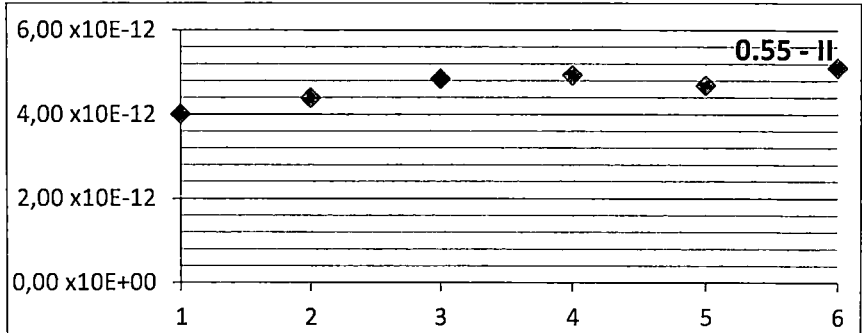
Se realizaron ensayos de 90 probetas cilíndricas de concreto, el tiempo de curado fue de 28 días sumergido en agua, los días restantes el curado fue a condiciones ambientales, los resultados son presentados en el Cuadro N° 4. 6, muestran La profundidad de penetración promedio (d prom), La presión de ensayo en N/m^2 (P) y en metros de columna de agua (H), también el tiempo de ensayo (T), el contenido de vacíos (γ) y finalmente el coeficiente de permeabilidad (k). Se graficaron la distribución de los resultados obtenidos del coeficiente de permeabilidad en el lado izquierdo.

Cuadro N° 4. 6 Resultados del coeficiente de permeabilidad, en rojo se observan los posibles valores atípicos. Fuente: Elaboración propia.

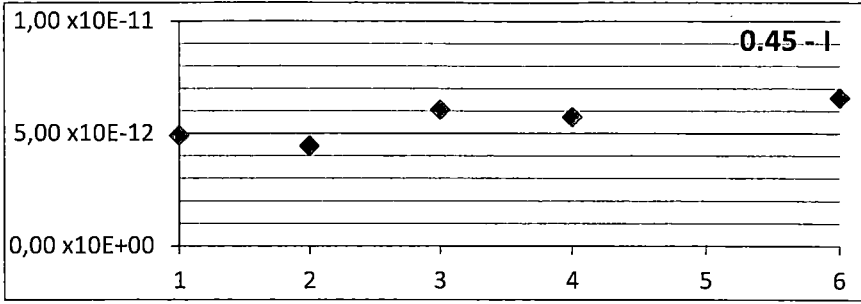
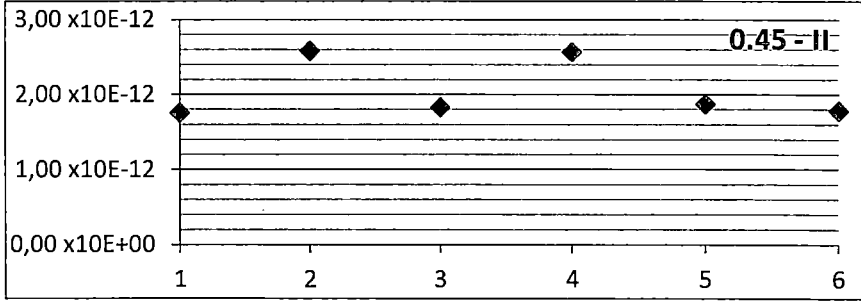
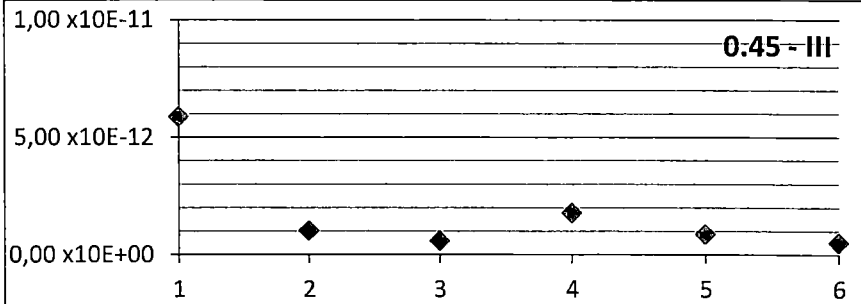
Id.	d prom. (cm)	P (N/m^2)	H (mH_2O)	T(s)	γ	K (m/s)
0.65 - I	8.158					3.91 x10E-11
0.65 - I	8.470					4.28 x10E-11
0.65 - I	8.248					3.83 x10E-11
0.65 - I	9.880	460000	46.9062	345600	0.188	5.86 x10E-11
0.65 - I	9.663					5.30 x10E-11
0.65 - I	9.538					5.65 x10E-11

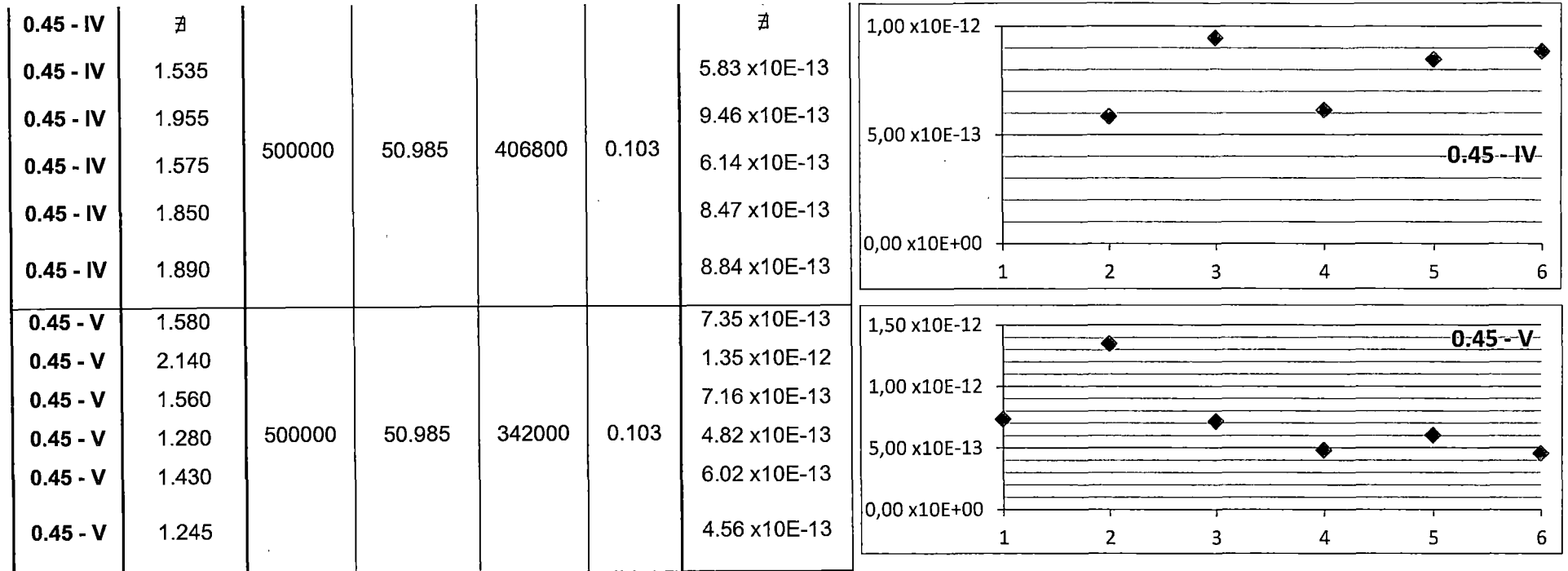


0.65 - II	5.127	460000	46.9062	345600	0.188	1.49 x10E-11	
0.65 - II	6.860					2.73 x10E-11	
0.65 - II	5.725					1.90 x10E-11	
0.65 - II	6.070					2.32 x10E-11	
0.65 - II	6.585					2.52 x10E-11	
0.65 - II	∅					∅	
0.65 - III	∅	460000	46.9062	345600	0.188	∅	
0.65 - III	6.145					2.19 x10E-11	
0.65 - III	6.000					2.09 x10E-11	
0.65 - III	5.920					2.04 x10E-11	
0.65 - III	5.870					2.00 x10E-11	
0.65 - III	5.740					1.91 x10E-11	
0.65 - IV	6.538	500000	50.985	345600	0.188	2.28 x10E-11	
0.65 - IV	4.684					1.17 x10E-11	
0.65 - IV	5.276					1.49 x10E-11	
0.65 - IV	4.374					1.02 x10E-11	
0.65 - IV	7.138					2.72 x10E-11	
0.65 - IV	5.608					1.68 x10E-11	

0.65 - V	4.841	500000	50.985	410400	0.188	9.45 x10E-12	
0.65 - V	7.625					2.51 x10E-11	
0.65 - V	5.700					1.46 x10E-11	
0.65 - V	5.539					1.40 x10E-11	
0.65 - V	5.611					1.29 x10E-11	
0.65 - V	5.511					1.39 x10E-11	
0.55 - I	13.565	460000	46.9062	345600	0.130	7.33 x10E-11	
0.55 - I	6.503					1.70 x10E-11	
0.55 - I	6.535					1.68 x10E-11	
0.55 - I	9.398					3.54 x10E-11	
0.55 - I	6.418					1.78 x10E-11	
0.55 - I	7.260					1.92 x10E-11	
0.55 - II	3.085	460000	46.9062	349200	0.130	4.01 x10E-12	
0.55 - II	3.380					4.40 x10E-12	
0.55 - II	3.463					4.85 x10E-12	
0.55 - II	3.504					4.93 x10E-12	
0.55 - II	3.420					4.69 x10E-12	
0.55 - II	3.570					5.11 x10E-12	

0.55 - III	∅	480000	48.9456	352800	0.130	∅	
0.55 - III	3.165					$4.54 \times 10E-12$	
0.55 - III	2.800					$3.26 \times 10E-12$	
0.55 - III	2.970					$3.88 \times 10E-12$	
0.55 - III	2.785					$3.11 \times 10E-12$	
0.55 - III	2.970					$3.54 \times 10E-12$	
0.55 - IV	2.500	480000	48.9456	345600	0.130	$3.32 \times 10E-12$	
0.55 - IV	2.645					$2.58 \times 10E-12$	
0.55 - IV	4.015					$5.23 \times 10E-12$	
0.55 - IV	2.875					$3.05 \times 10E-12$	
0.55 - IV	2.655					$2.60 \times 10E-12$	
0.55 - IV	2.835					$3.07 \times 10E-12$	
0.55 - V	2.405	500000	50.985	345600	0.130	$2.32 \times 10E-12$	
0.55 - V	∅					∅	
0.55 - V	2.680					$2.55 \times 10E-12$	
0.55 - V	2.740					$2.77 \times 10E-12$	
0.55 - V	3.140					$3.64 \times 10E-12$	
0.55 - V	2.830					$2.96 \times 10E-12$	

0.45 - I	3.860	460000	46.9062	342000	0.103	4.92 x10E-12	
0.45 - I	3.755					4.45 x10E-12	
0.45 - I	4.415					6.06 x10E-12	
0.45 - I	4.203					5.75 x10E-12	
0.45 - I	∅					∅	
0.45 - I	4.550					6.60 x10E-12	
0.45 - II	2.555	460000	46.9062	406800	0.103	1.76 x10E-12	
0.45 - II	3.100					2.58 x10E-12	
0.45 - II	2.485					1.83 x10E-12	
0.45 - II	3.090					2.57 x10E-12	
0.45 - II	2.560					1.87 x10E-12	
0.45 - II	2.575					1.78 x10E-12	
0.45 - III	4.515	480000	48.9456	356400	0.103	5.90 x10E-12	
0.45 - III	1.864					1.03 x10E-12	
0.45 - III	1.420					5.94 x10E-13	
0.45 - III	2.475					1.78 x10E-12	
0.45 - III	1.881					8.90 x10E-13	
0.45 - III	1.467					5.28 x10E-13	



Debido a la presencia de valores atípicos no podemos hacer el análisis de los resultados obtenidos, será necesario encontrar que valores no van a ser considerados en el análisis.

4.2.2 Identificación de valores atípicos, Test de Grubbs.

Este test compara la desviación del valor en análisis respecto a la media, con la desviación típica, el valor resultante se compara con los valores mostrados (Ver Figura N° 4. 1)

Valores críticos de G ($P = 0.05$) para un contraste de dos colas.

<i>Tamaño de muestra</i>	<i>Valor crítico</i>
3	1.155
4	1.481
5	1.715
6	1.887
7	2.020
8	2.126
9	2.215
10	2.290

Tomados de *Outliers in Statistical data*, Vic Barnett and Toby Lewis, 2nd Edition, 1984, John Wiley & Sons Limited.

Figura N° 4. 1 Valor crítico de comparación para determinar si son valores atípicos. Fuente: Vic Barnett and Toby Lewis, *Outliers in Statistical data*, 1984

En el Cuadro N° 4.7, se muestran los valores anómalos obtenidos para los datos tomados.

Cuadro N° 4.7 Análisis de valores anómalos, notamos la fuerte implicación en los resultados al calcular la media y la desviación estándar de no considerar estos resultados. Fuente: Elaboración propia.

Id.	Media	Desviación Estándar	Valores atípicos	Tamaño de muestra	Test de Grubbs (G)	Valor crítico	Resultado	Datos corregidos	Media	Desviación Estándar
0.65 - I 0.65 - I 0.65 - I 0.65 - I 0.65 - I 0.65 - I	4.81 x10E-11	9.07 x10E-12		6		1.887		3.91 x10E-11 4.28 x10E-11 3.83 x10E-11 5.86 x10E-11 5.30 x10E-11 5.65 x10E-11	4.81 x10E-11	9.07 x10E-12
0.65 - II 0.65 - II 0.65 - II 0.65 - II 0.65 - II 0.65 - II	2.19 x10E-11	4.98 x10E-12		5		1.715		1.49 x10E-11 2.73 x10E-11 1.90 x10E-11 2.32 x10E-11 2.52 x10E-11 ∅	2.19 x10E-11	4.98 x10E-12
0.65 - III 0.65 - III	2.05 x10E-11	1.04 x10E-12		5		1.715		∅ 2.19 x10E-11	2.05 x10E-11	1.04 x10E-12

0.65 - III								2.09 x10E-11		
0.65 - III								2.04 x10E-11		
0.65 - III								2.00 x10E-11		
0.65 - III								1.91 x10E-11		
0.65 - IV			2.28 x10E-11		0.845		FALSO	2.28 x10E-11		
0.65 - IV								1.17 x10E-11		
0.65 - IV	1.73 x10E-11	6.58 x10E-12		6		1.887		1.49 x10E-11	1.73 x10E-11	6.58 x10E-12
0.65 - IV								1.02 x10E-11		
0.65 - IV			2.72 x10E-11		1.511		FALSO	2.72 x10E-11		
0.65 - IV								1.68 x10E-11		
0.65 - V								9.45 x10E-12		
0.65 - V			2.51 x10E-11		1.912		VERDADERO	Anómalo		
0.65 - V	1.50 x10E-11	5.29 x10E-12		6		1.887		1.46 x10E-11	1.30 x10E-11	2.07 x10E-12
0.65 - V								1.40 x10E-11		
0.65 - V								1.29 x10E-11		
0.65 - V								1.39 x10E-11		
0.55 - I			7.33 x10E-11		1.935		VERDADERO	Anómalo		
0.55 - I								1.70 x10E-11		
0.55 - I	2.99 x10E-11	2.24 x10E-11		6		1.887		1.68 x10E-11	2.12 x10E-11	7.99 x10E-12
0.55 - I			3.54 x10E-11		0.246		FALSO	3.54 x10E-11		
0.55 - I								1.78 x10E-11		

0.55 - I								1.92 x10E-11		
0.55 - II								4.01 x10E-12		
0.55 - II								4.40 x10E-12		
0.55 - II	4.66 x10E-12	4.02 x10E-13		6		1.887		4.85 x10E-12	4.66 x10E-12	4.02 x10E-13
0.55 - II								4.93 x10E-12		
0.55 - II								4.69 x10E-12		
0.55 - II								5.11 x10E-12		
0.55 - III								∅		
0.55 - III			4.54 x10E-12		1.980		VERDADERO	Anómalo		
0.55 - III	1.50 x10E-11	5.29 x10E-12		5		1.715		3.26 x10E-12	3.45 x10E-12	3.39 x10E-13
0.55 - III								3.88 x10E-12		
0.55 - III								3.11 x10E-12		
0.55 - III								3.54 x10E-12		
0.55 - IV								3.32 x10E-12		
0.55 - IV								2.58 x10E-12		
0.55 - IV	3.31 x10E-12	9.85 x10E-13	5.23 x10E-12	6	1.952	1.887	VERDADERO	Anómalo	2.93 x10E-12	3.23 x10E-13
0.55 - IV								3.05 x10E-12		
0.55 - IV								2.60 x10E-12		
0.55 - IV								3.07 x10E-12		
0.55 - V	2.85 x10E-12	5.03 x10E-13		5		1.715		2.32 x10E-12	2.85 x10E-12	5.03 x10E-13
0.55 - V								∅		

0.55 - V								2.55 x10E-12		
0.55 - V								2.77 x10E-12		
0.55 - V								3.64 x10E-12		
0.55 - V								2.96 x10E-12		
0.45 - I								4.92 x10E-12		
0.45 - I								4.45 x10E-12		
0.45 - I								6.06 x10E-12		
0.45 - I	5.55 x10E-12	8.69 x10E-13		5		1.715		5.75 x10E-12	5.55 x10E-12	8.69 x10E-13
0.45 - I								∅		
0.45 - I								6.60 x10E-12		
0.45 - II								1.76 x10E-12		
0.45 - II								2.58 x10E-12		
0.45 - II								1.83 x10E-12		
0.45 - II	2.07 x10E-12	3.97 x10E-13		6		1.887		2.57 x10E-12	2.07 x10E-12	3.97 x10E-13
0.45 - II								1.87 x10E-12		
0.45 - II								1.78 x10E-12		
0.45 - III			5.90 x10E-12		1.992		VERDADERO	Anómalo		
0.45 - III			1.03 x10E-12		0.368		FALSO	1.03 x10E-12		
0.45 - III	1.79 x10E-12	2.06 x10E-12		6		1.887		5.94 x10E-13	9.65 x10E-13	5.02 x10E-13
0.45 - III			1.78 x10E-12		0.001		FALSO	1.78 x10E-12		
0.45 - III								8.90 x10E-13		

0.45 - III								5.28 x10E-13		
0.45 - IV								#		
0.45 - IV								5.83 x10E-13		
0.45 - IV	7.75 x10E-13	1.65 x10E-13		5		1.715		9.46 x10E-13	7.75 x10E-13	1.65 x10E-13
0.45 - IV								6.14 x10E-13		
0.45 - IV								8.47 x10E-13		
0.45 - IV								8.84 x10E-13		
0.45 - V.								7.35 x10E-13		
0.45 - V			1.35 x10E-12			1.911	VERDADERO	Anómalo		
0.45 - V	7.23 x10E-13	3.27 x10E-13		6		1.887		7.16 x10E-13	5.98 x10E-13	1.29 x10E-13
0.45 - V								4.82 x10E-13		
0.45 - V								6.02 x10E-13		
0.45 - V								4.56 x10E-13		

4.2.3 Resultados de resistencia a la compresión.

Si bien el coeficiente de permeabilidad está relacionado con la resistencia a la compresión, pero no siempre es así, en este caso solo reportaremos los resultados obtenidos de 4 probetas a los 28 días (ver Cuadro N° 4.8), no realizaremos un estudio más profundo de los resultados de resistencia a la compresión ya que este trabajo está enfocado sobre el coeficiente de permeabilidad.

Cuadro N° 4.8 Resultados de resistencia a la compresión después de 28 días de curado húmedo.

Fuente: Elaboración propia.

Id	Díámetro promedio (cm)	Área (cm ²)	Fuerza (Kg)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia promedio (Kg/cm ²)
0.45	15.35	184.94	87 226	471.7	452.7
	15.17	180.62	79989	442.8	
	15.37	185.54	80 768	434.8	
	15.31	184.03	84 951	461.6	
0.55	15.28	183.25	77 766	424.4	398.1
	15.43	186.87	72 508	388.0	
	15.22	181.82	70 663	388.6	
	15.38	185.78	72 871	392.2	
0.65	15.34	184.70	49 872	270.0	255.0
	15.4	186.20	44 972	241.3	
	15.33	184.64	49 350	267.3	
	15.38	185.78	44 873	241.5	

4.2.4 Análisis de resultados finales.

Del total de 90 datos, hemos obtenido entre 4 y 6 datos para cada conjunto, si bien la muestra de datos no es muy extensa si nos da un buen indicio del comportamiento de la permeabilidad en el concreto. Hemos hecho el análisis y los gráficos tomando en consideración las medias de los resultados obtenidos, el análisis considerando la dispersión de los datos se realizará en la siguiente sección.

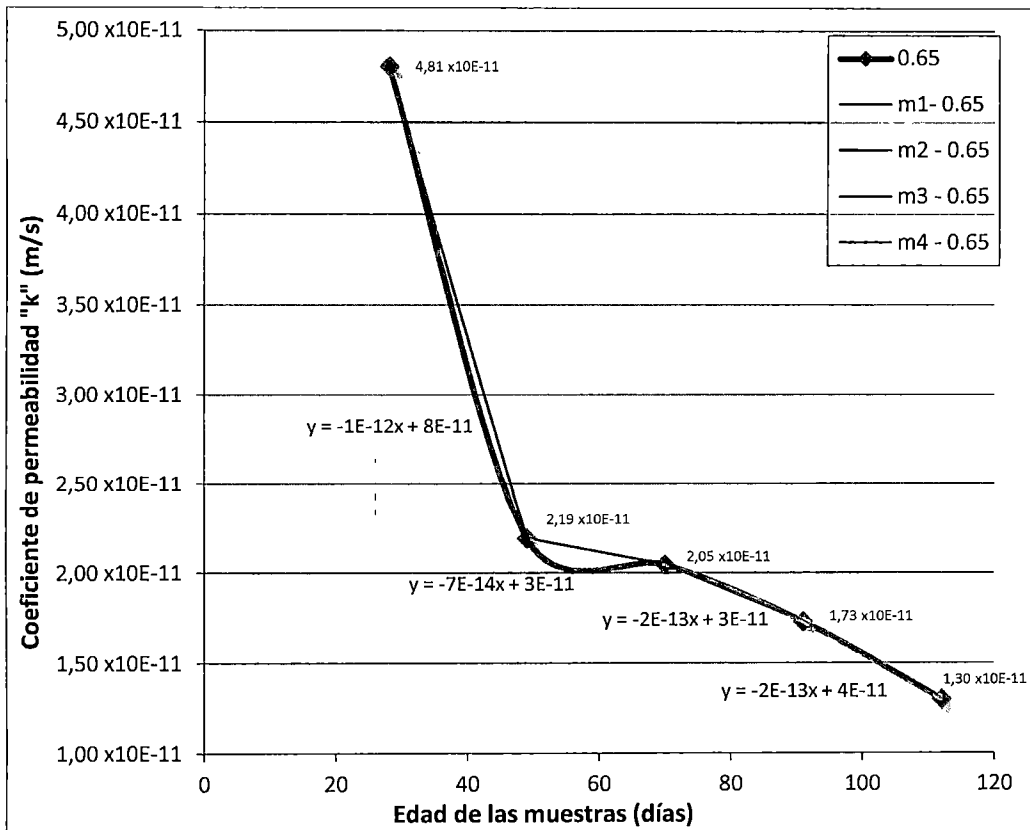


Figura Nº 4.2 Evolución del coeficiente de permeabilidad en el tiempo, para el diseño 1, relación a/c=0.65. Fuente: Elaboración propia

En la Figura Nº 4.2 notamos la disminución del coeficiente de permeabilidad, aún después de los 28 días de curado, lo que nos indica que continúa la hidratación del cemento, incluso disminuyendo aún después de los 112 días, pero en menor medida.

Se muestra también la pendiente entre dos mediciones consecutivas, notamos una gran variación entre las pendientes m1 y m2, correspondientes a los 28, 49 y 70 días. Lo que nos indica una posible estabilización de la disminución del coeficiente de permeabilidad, sin embargo las siguientes pendientes (m3 y m4) aumentan con respecto a la m2, dando indicios de una posible continuación de la hidratación del cemento aún después de los 112 días.

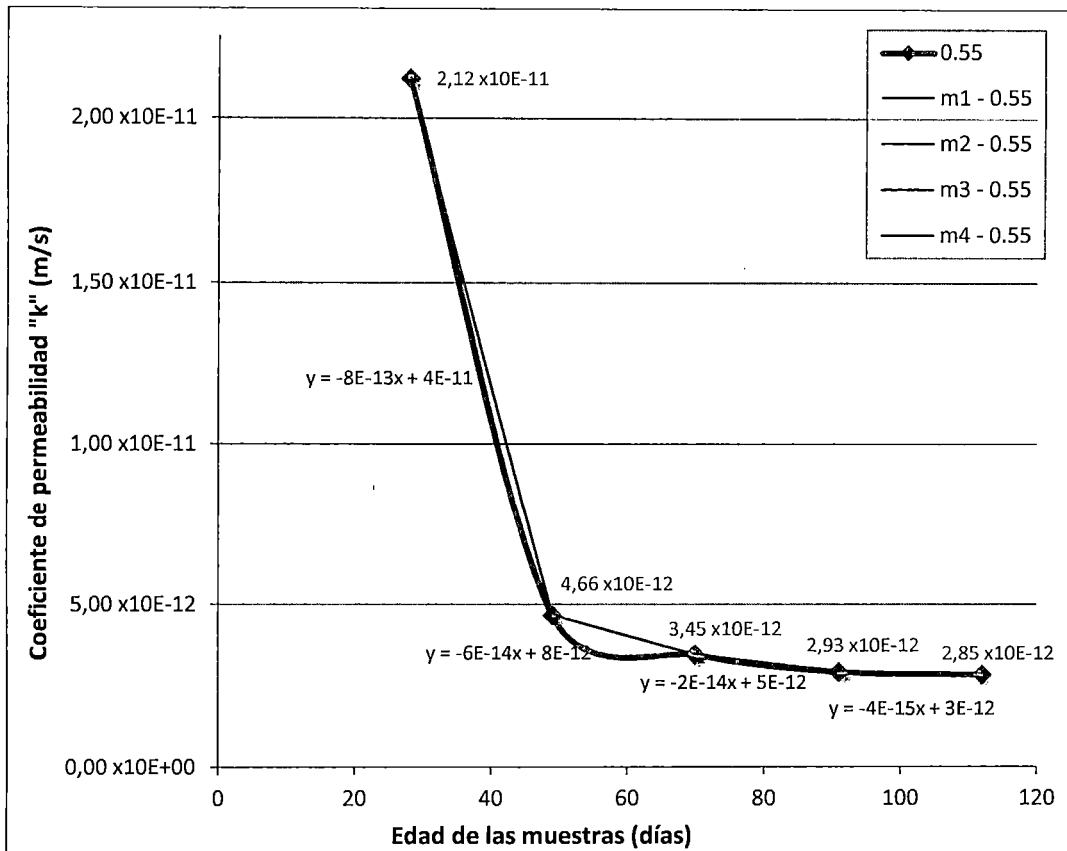


Figura Nº 4.3 Evolución del coeficiente de permeabilidad en el tiempo, para el diseño 2, relación $a/c=0.55$. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura Nº 4.3 Cuadro Nº 4.8 notamos la disminución del coeficiente de permeabilidad, aún después de los 28 días de curado, lo que nos indica que continúa la hidratación del cemento, a diferencia del caso anterior, aquí observamos una estabilización en la disminución del coeficiente de permeabilidad entre los 50 y 60 días.

Se muestra también la pendiente entre dos mediciones consecutivas. Notamos una gran variación entre las pendientes m_1 y m_2 , correspondientes a los 28, 49 y 70 días. Lo que nos indica un posible punto de equilibrio en la disminución del coeficiente de permeabilidad, ya que esta tendencia continúa con las pendientes sucesivas, se puede llegar a considerar que las mediciones no son diferentes.

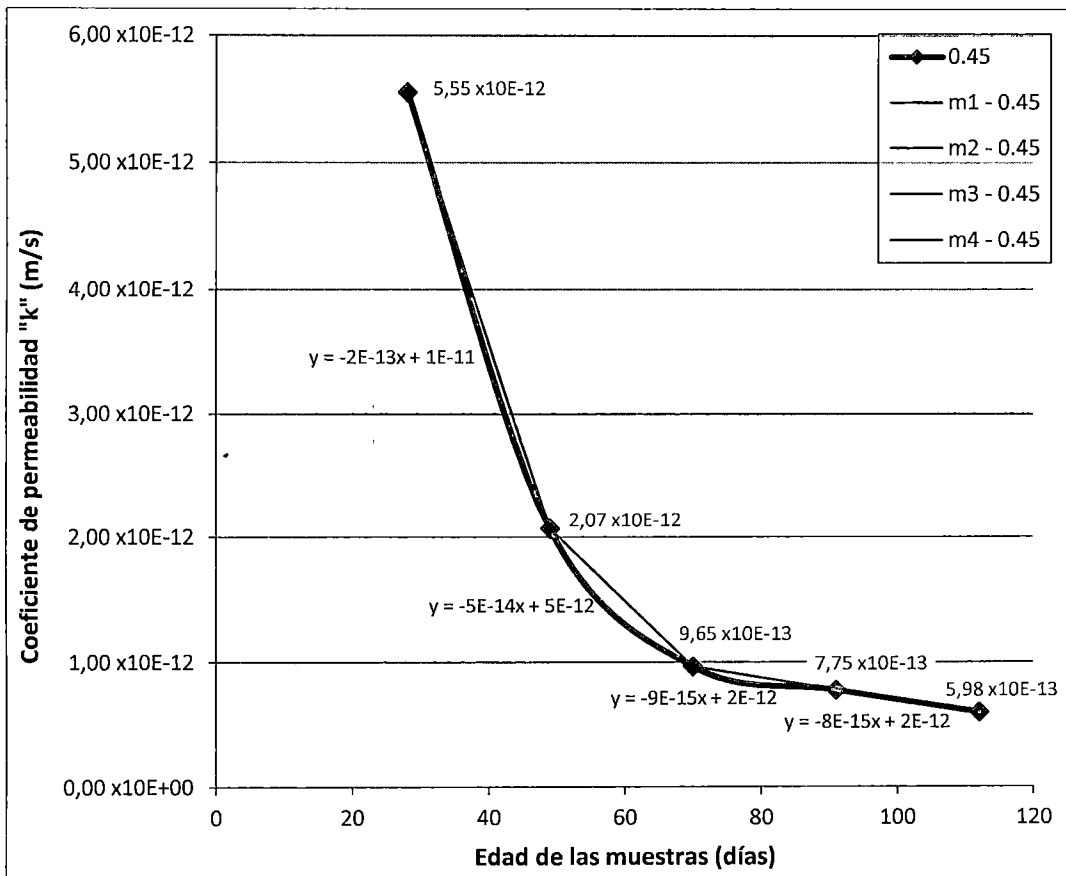


Figura N° 4.4 Evolución del coeficiente de permeabilidad en el tiempo, para el diseño 3, relación a/c=0.45. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 4.4 notamos la disminución del coeficiente de permeabilidad, aún después de los 28 días de curado, lo que nos indica que continúa la hidratación del cemento, a diferencia del caso anterior, aquí observamos una estabilización en la disminución del coeficiente de permeabilidad entre los 50, 60 o incluso 70 días.

Se muestra también la pendiente entre dos mediciones consecutivas, notamos una gran variación entre las pendientes m1 y m2, correspondientes a los 28, 49 y 70 días. Lo que nos indica un posible punto de equilibrio en la disminución del coeficiente de permeabilidad, ya que esta tendencia continúa con las pendientes sucesivas, se puede llegar a considerar que las mediciones no son diferentes.

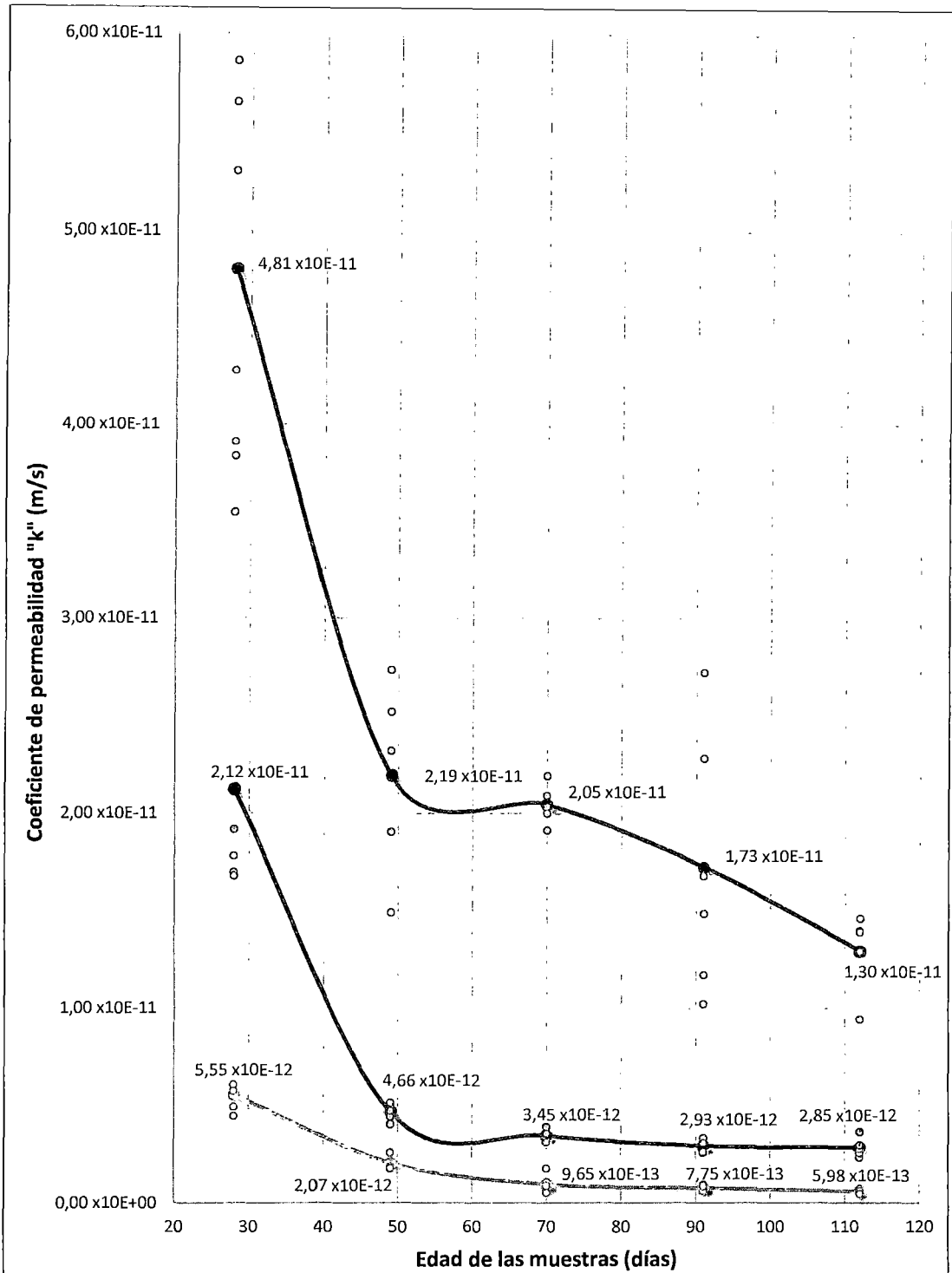


Figura Nº 4.5 Coeficiente de permeabilidad vs edad de las muestras. En azul para una relación $a/c=0.65$, en rojo $a/c=0.55$ y en verde $a/c=0.45$. Fuente: Elaboración propia.

Los puntos de la Figura Nº 4.5 corresponden a las medidas obtenidas, donde se puede observar la distribución de los datos y la desviación desde la media (punto que pertenece a la curva).

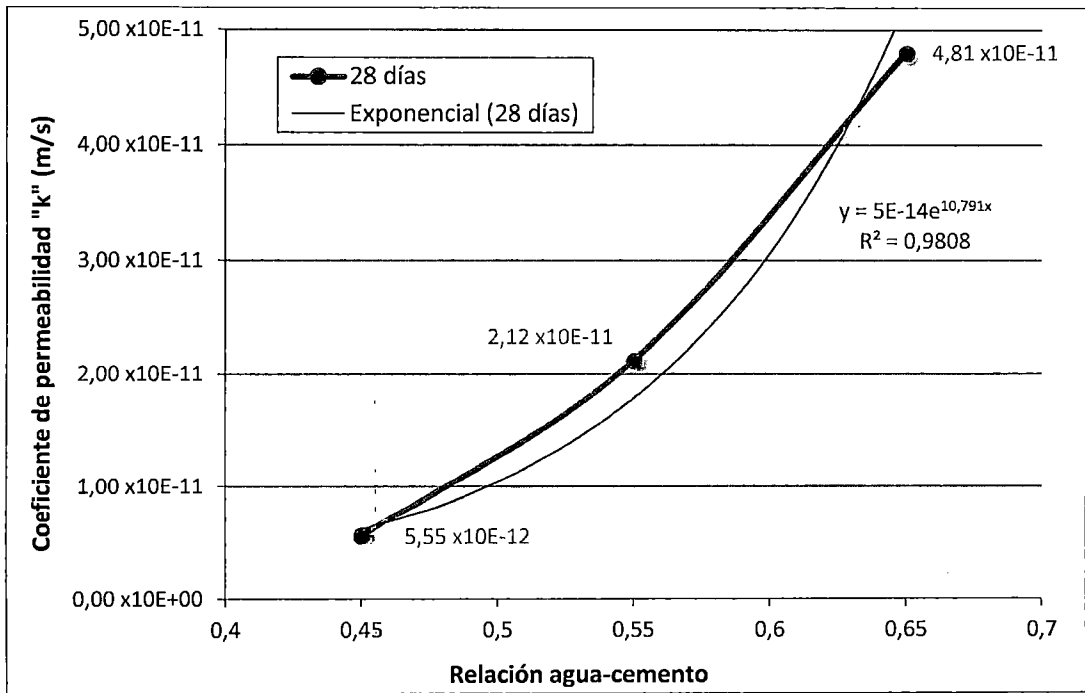


Figura Nº 4.6 Gráfica coeficiente de permeabilidad vs relación agua cemento para 28 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

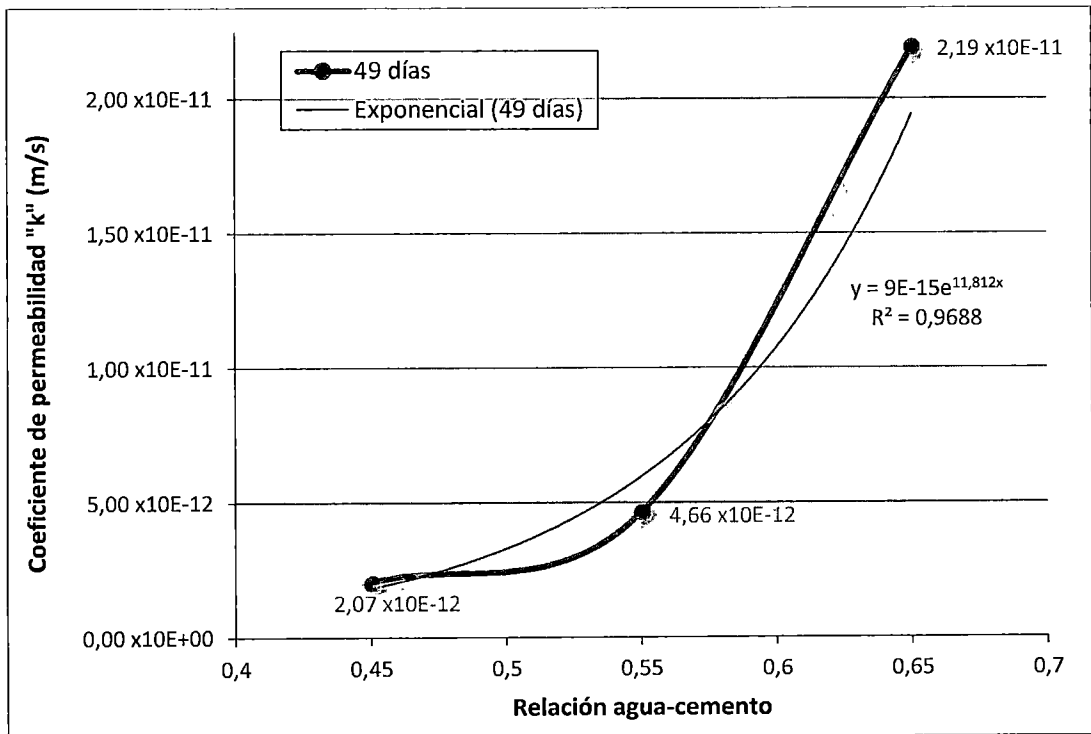


Figura Nº 4.7 Gráfica coeficiente de permeabilidad vs relación agua cemento para 49 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

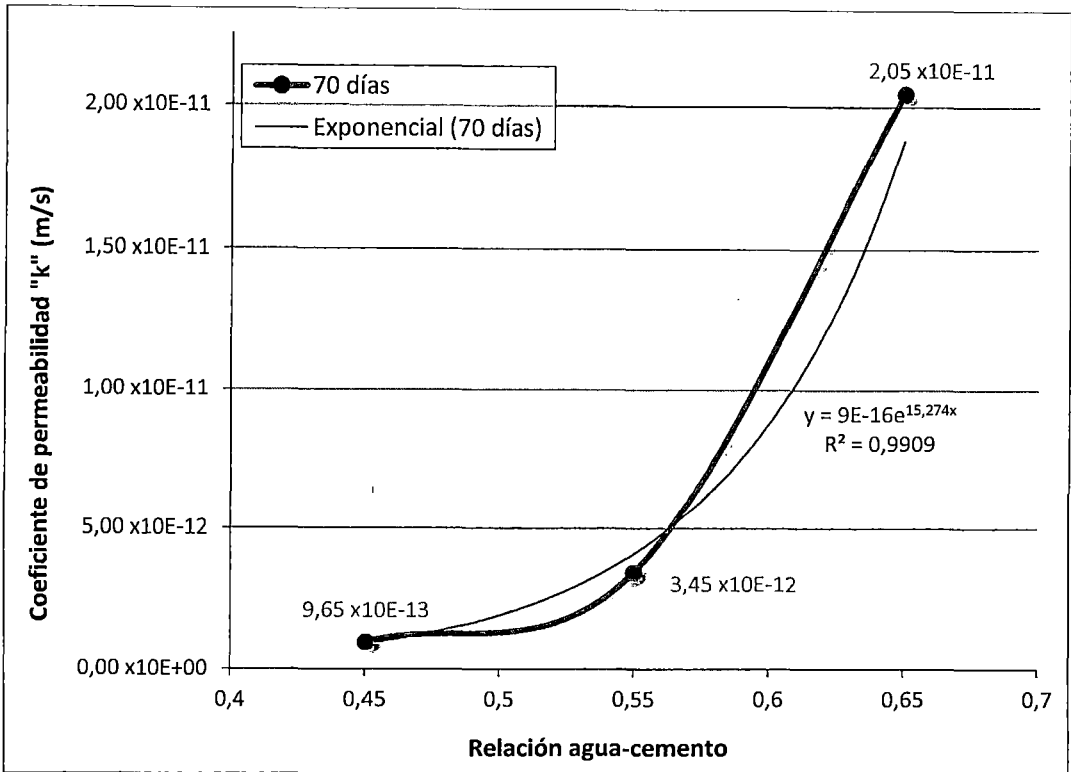


Figura N° 4.8 Gráfica coeficiente de permeabilidad vs relación agua cemento para 70 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

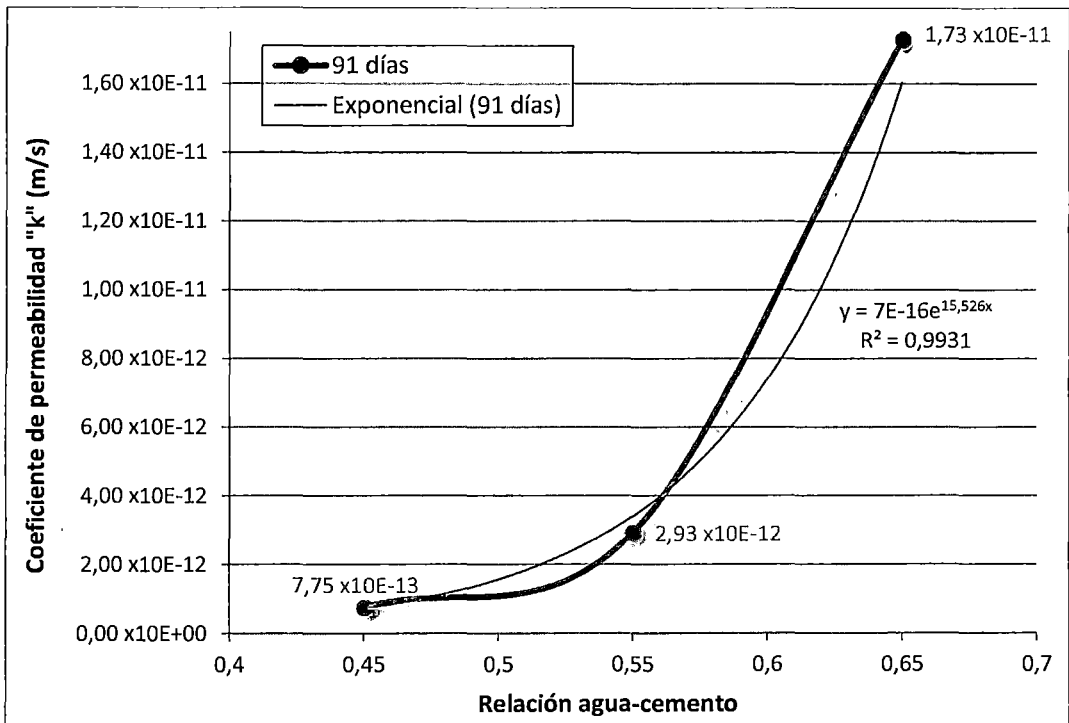


Figura N° 4.9 Gráfica coeficiente de permeabilidad vs relación agua cemento para 91 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

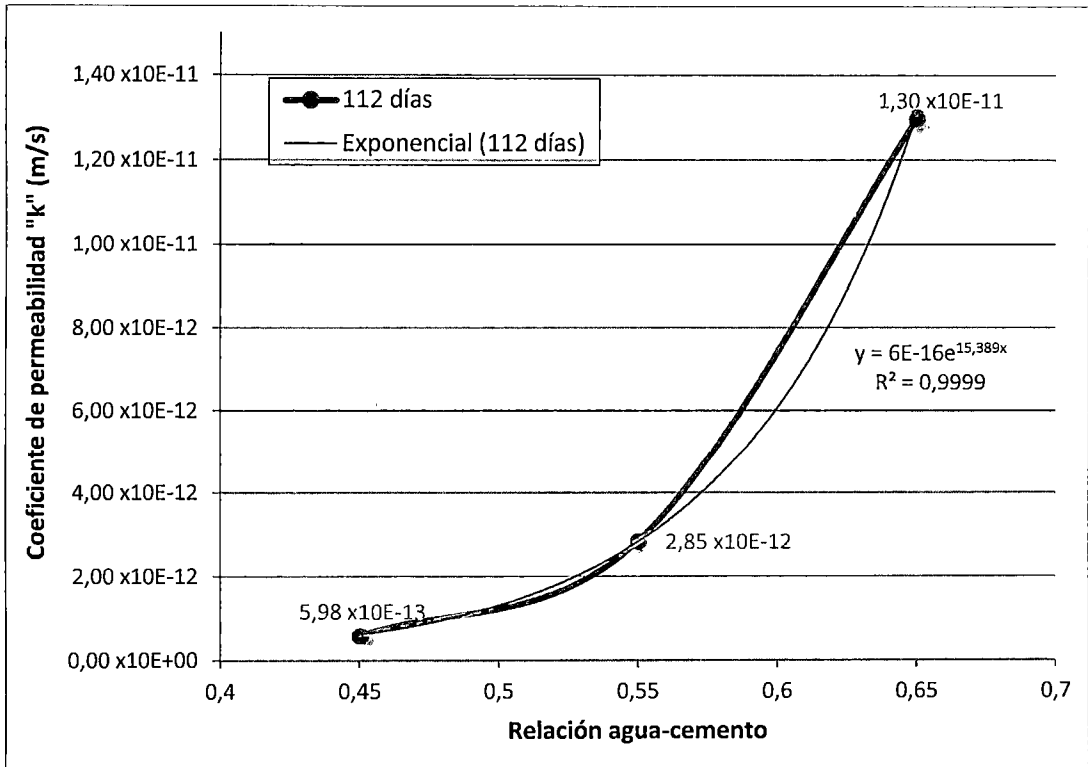


Figura N° 4.10 Gráfica coeficiente de permeabilidad vs relación agua cemento para 112 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

En todas las gráficas (Figura N° 4.6, Figura N° 4.7, Figura N° 4.8, Figura N° 4.9, Figura N° 4.10) presentadas anteriormente notamos una gran diferenciación de los coeficientes de permeabilidad de cada diseño, pero al aumentar el tiempo de curado la diferenciación disminuye, esto está reflejado en el decremento del coeficiente de las curvas de ajuste exponencial. Esta aproximación se nota en mayor medida entre los resultados del diseño 2 ($a/c=0.55$) y el diseño 3 ($a/c=0.45$).

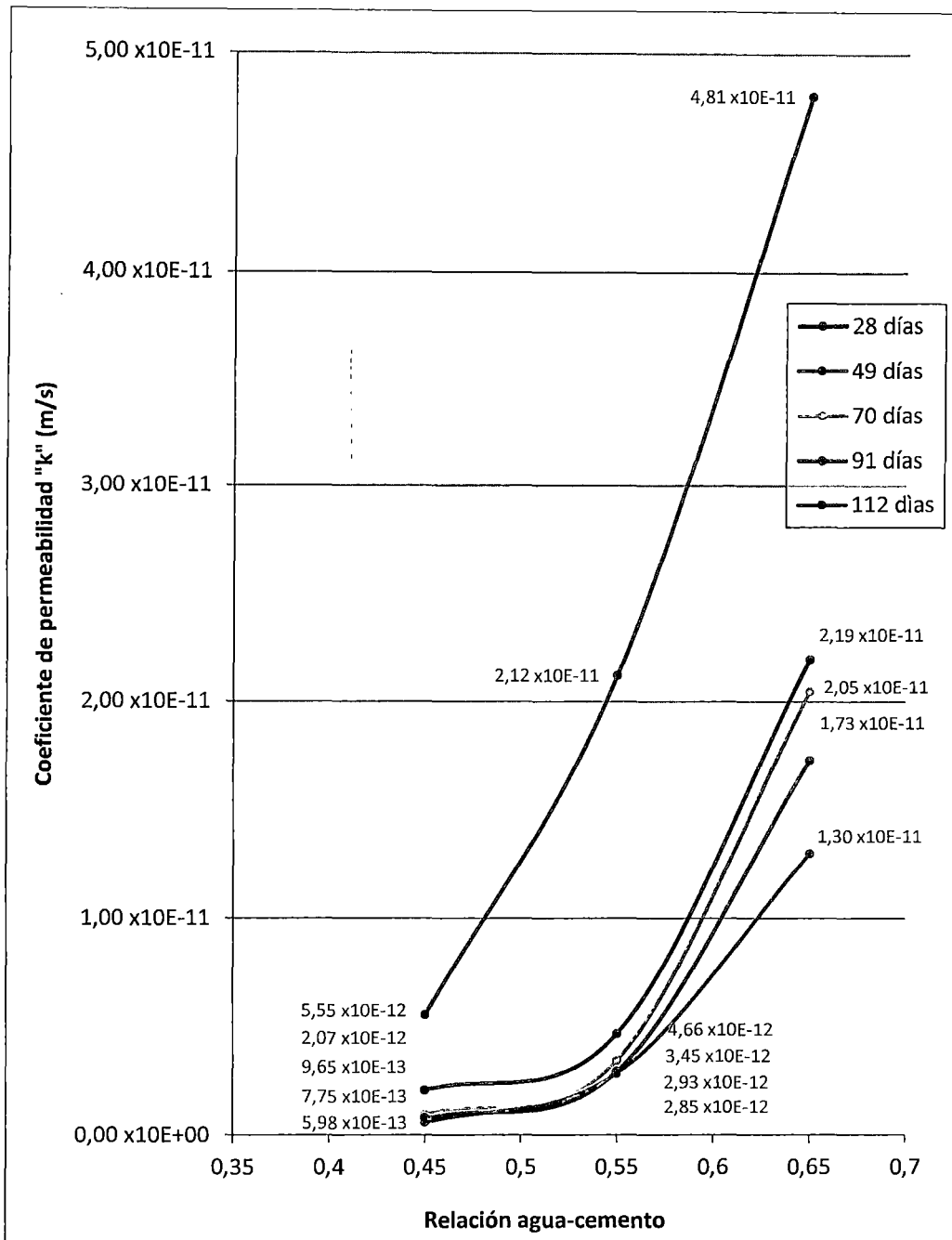


Figura Nº 4.11 Resumen de las curvas Coeficiente de permeabilidad vs relación a/c antes mencionadas. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura Nº 4.11 se nota la disminución de la pendiente de las curvas coeficiente de permeabilidad vs relación a/c para cada edad, a una misma escala. Nótese que al final las curvas prácticamente se superponen debido a la proximidad de los valores obtenidos.

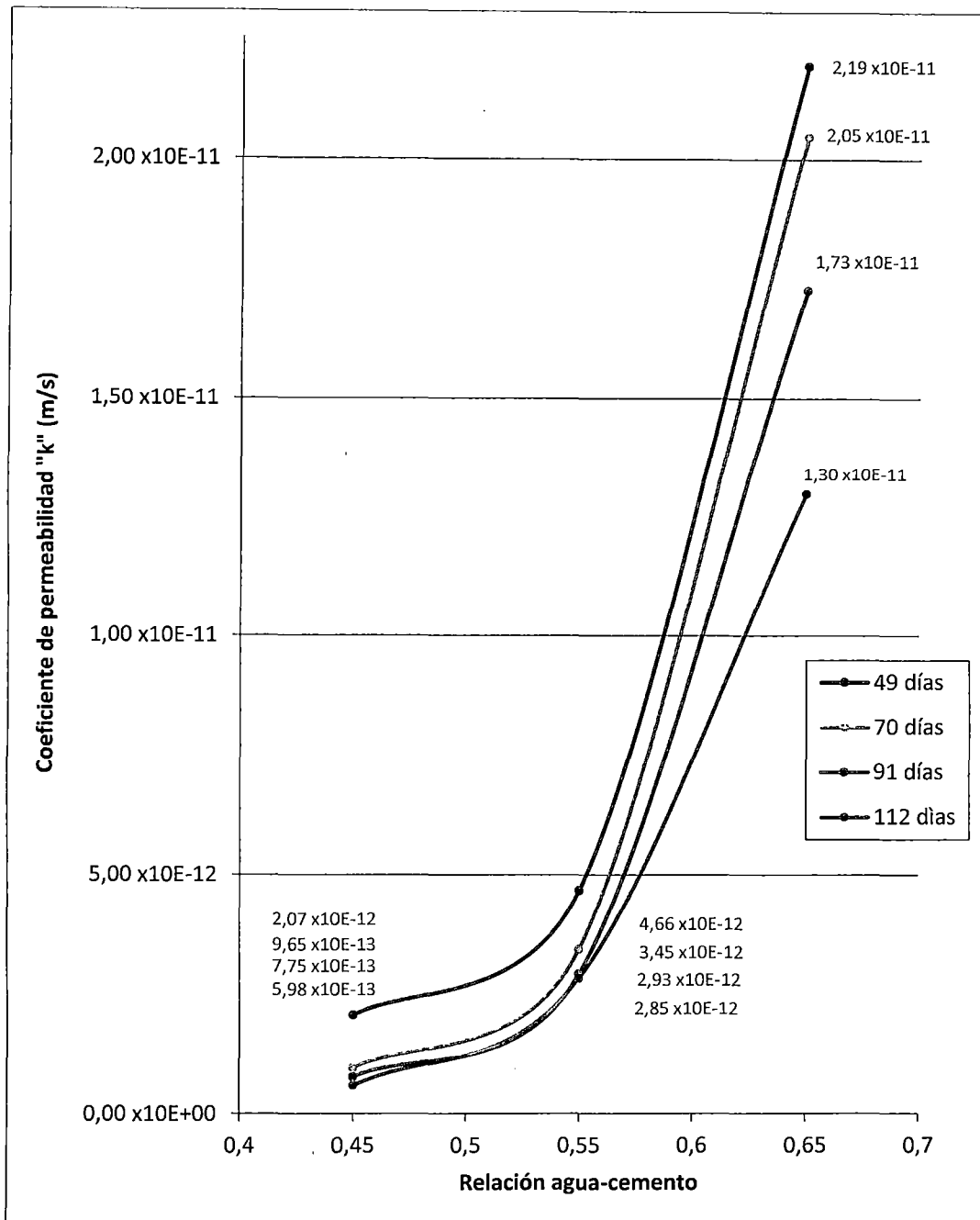


Figura N° 4.12 Resumen de las curvas Coeficiente de permeabilidad vs relación a/c antes mencionadas, excluyendo la curva de 28 días, para una mejor visualización de las demás. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 4.12, se nota en mejor medida la disminución de la pendiente de las curvas coeficiente de permeabilidad vs relación a/c para las edades de 49, 70, 91 y 112 días. Nótese que al final, a pesar de haber disminuido la escala, las curvas prácticamente se superponen debido a la proximidad de los valores obtenidos.

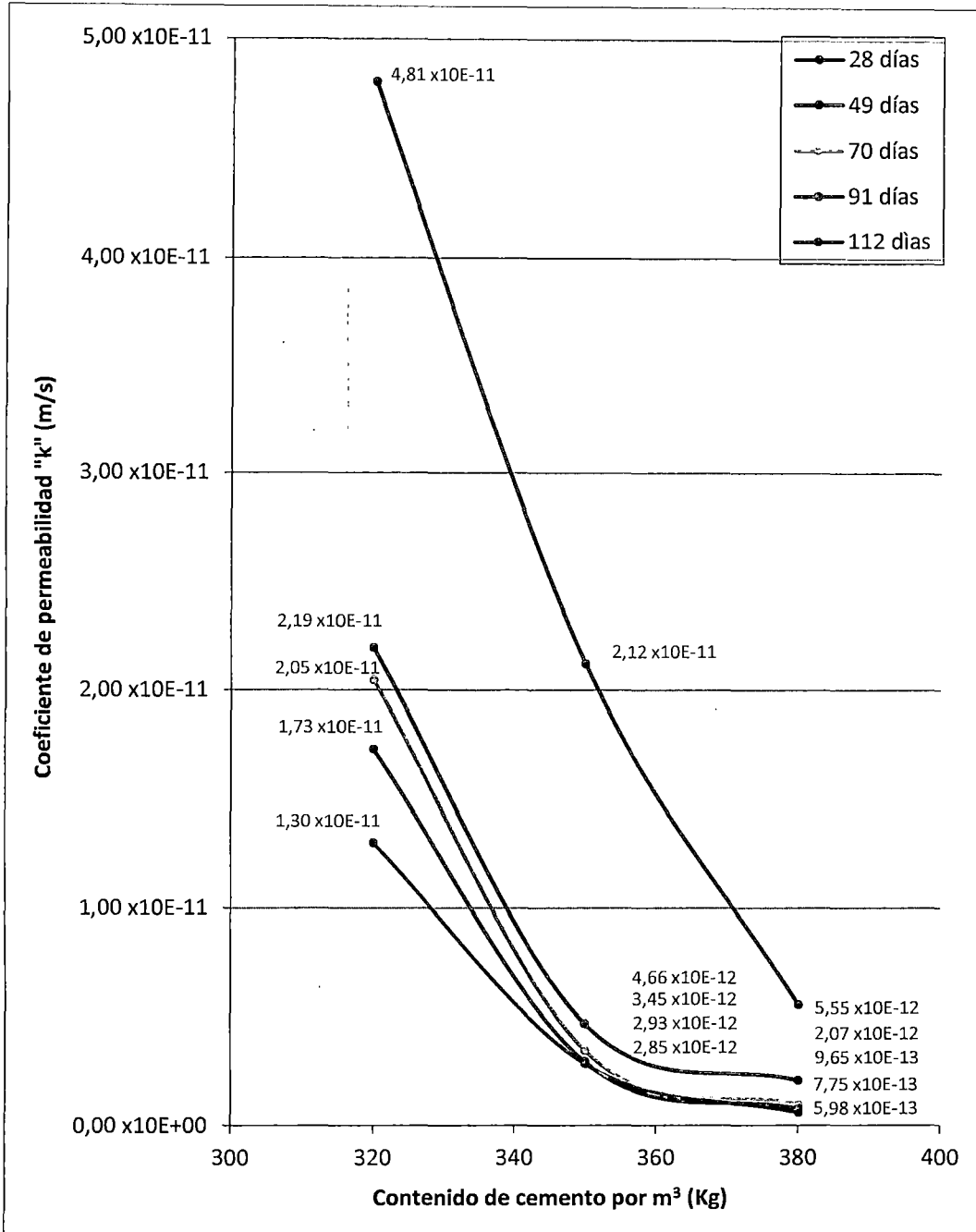


Figura Nº 4.13 Resumen de las curvas Coeficiente de permeabilidad vs contenido de cemento por metro cúbico de concreto. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura Nº 4.13, no se hizo un análisis de cada curva por separado, ya que el comportamiento es similar al de las gráficas Coeficiente de permeabilidad vs relación a/c.

En la Figura N° 4.14, mostraremos las curvas de coeficiente de permeabilidad vs contenido de cemento, excluyendo los resultados a 28 días, para poder mostrar mejor los resultados siguientes y notar adecuadamente el cambio en la pendiente de las curvas obtenidas.

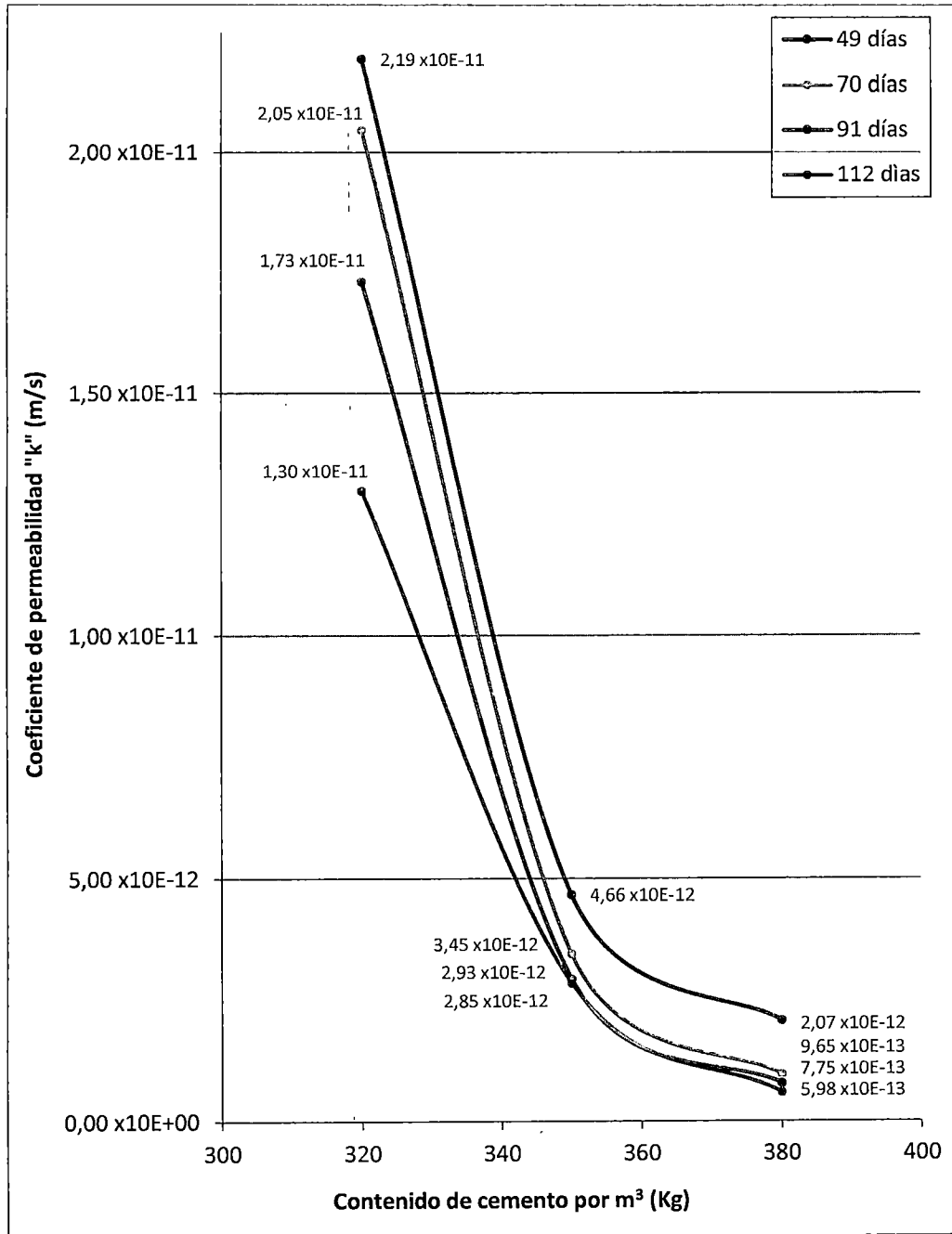


Figura N° 4.14 Resumen de las curvas Coeficiente de permeabilidad vs contenido de cemento por metro cúbico de concreto, excluyendo la curva de 28 días, para una mejor visualización de las demás. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura N° 4.15 y en la Figura N° 4.16, mostramos las gráficas correspondientes a los resultados de compresión del concreto.

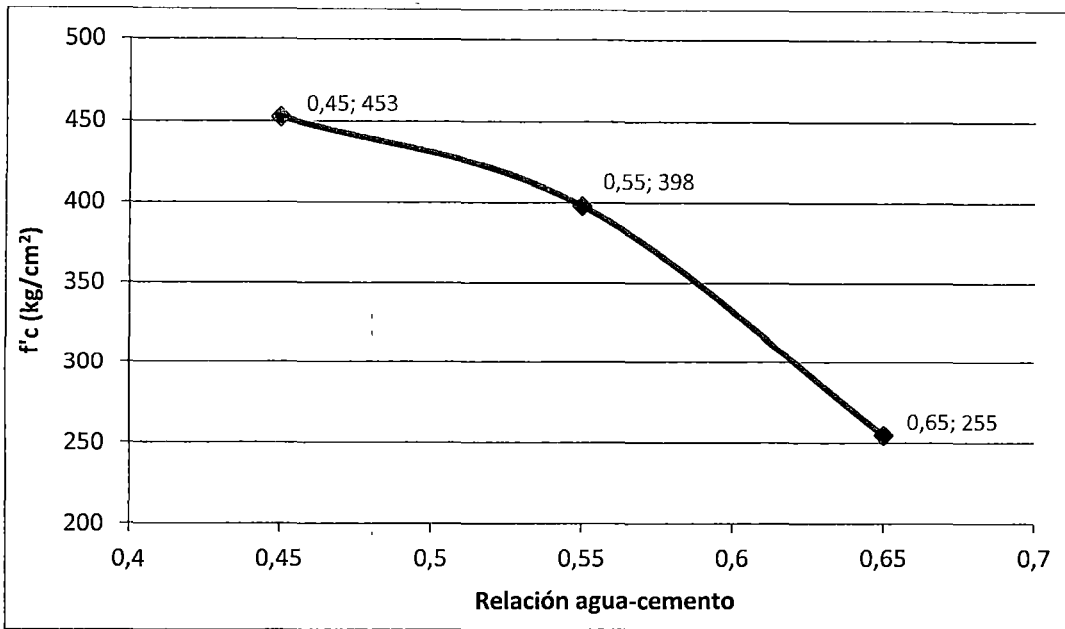


Figura N° 4.15 Gráfica resistencia a la compresión $f'c$ vs relación agua-cemento, para 28 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

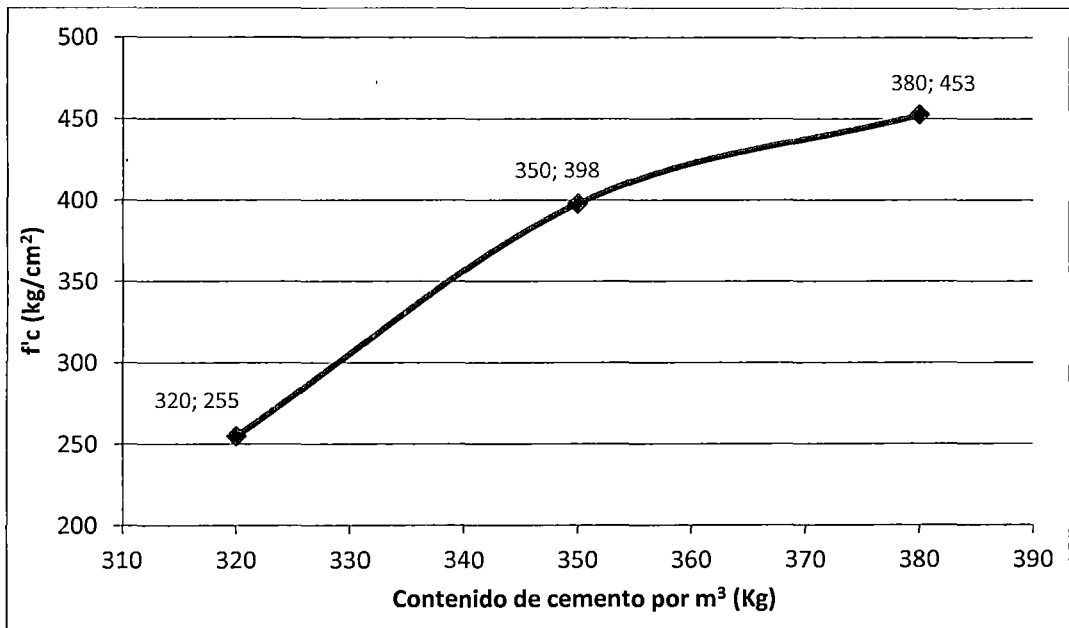


Figura N° 4.16 Gráfica resistencia a la compresión $f'c$ vs contenido de cemento por metro cúbico de concreto, para 28 días de curado. Fuente: Elaboración propia.

4.2.5 Comparación de resultados obtenidos.

En esta sección hemos realizado el análisis estadístico con el programa Matlab, utilizando los comandos "Anova" y Multcompare". Lamentablemente no se pudieron realizar la cantidad mínima de datos por punto de comparación (20 datos), solo se tomaron 6 datos para condición analizada, dando un total de 90 datos analizados.

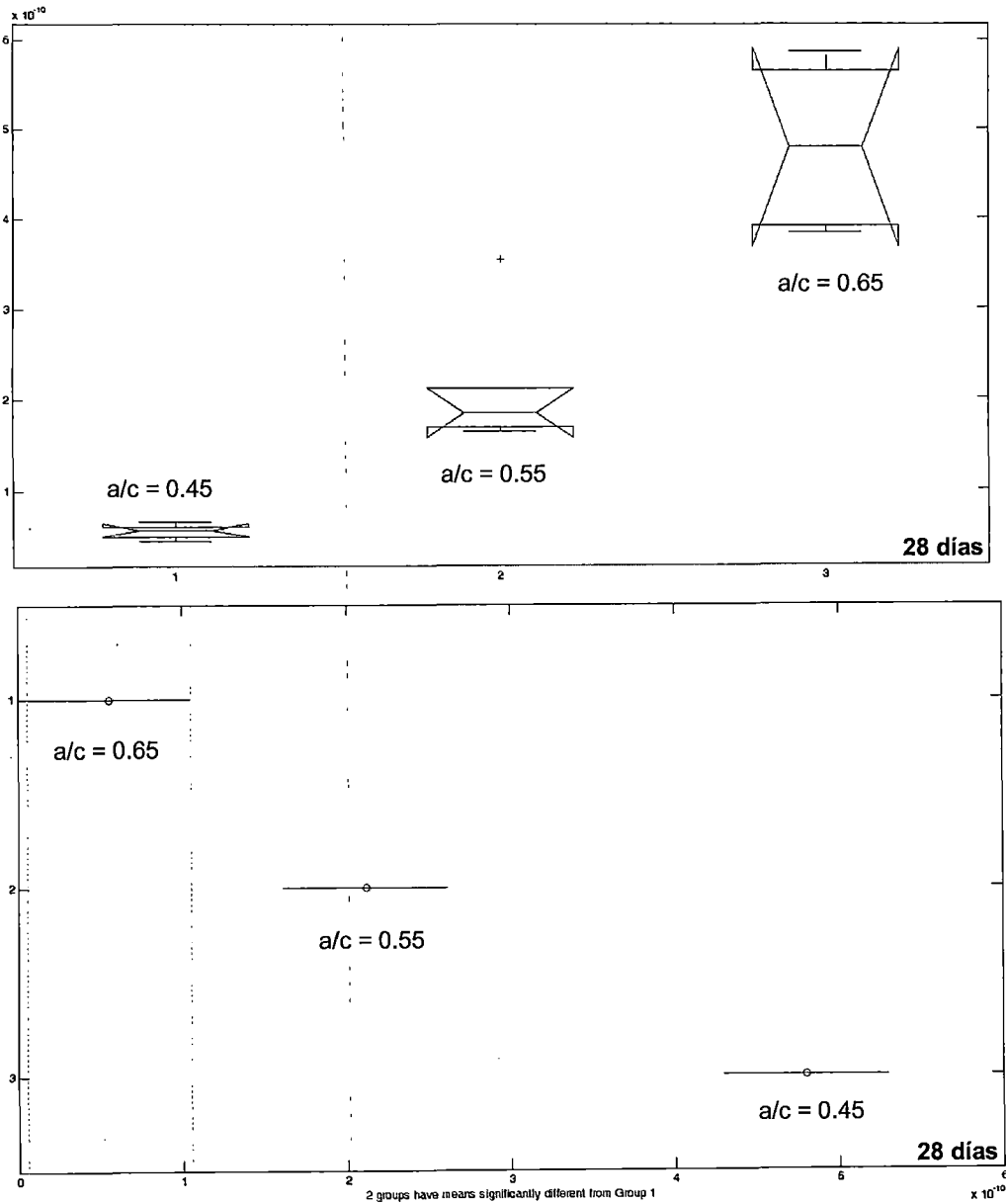


Figura N° 4.17 Comparación de tres conjuntos de datos, para relación $a/c = 0.65, 0.55$ y 0.45 para 28 días de curado. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare". Fuente: Elaboración propia.

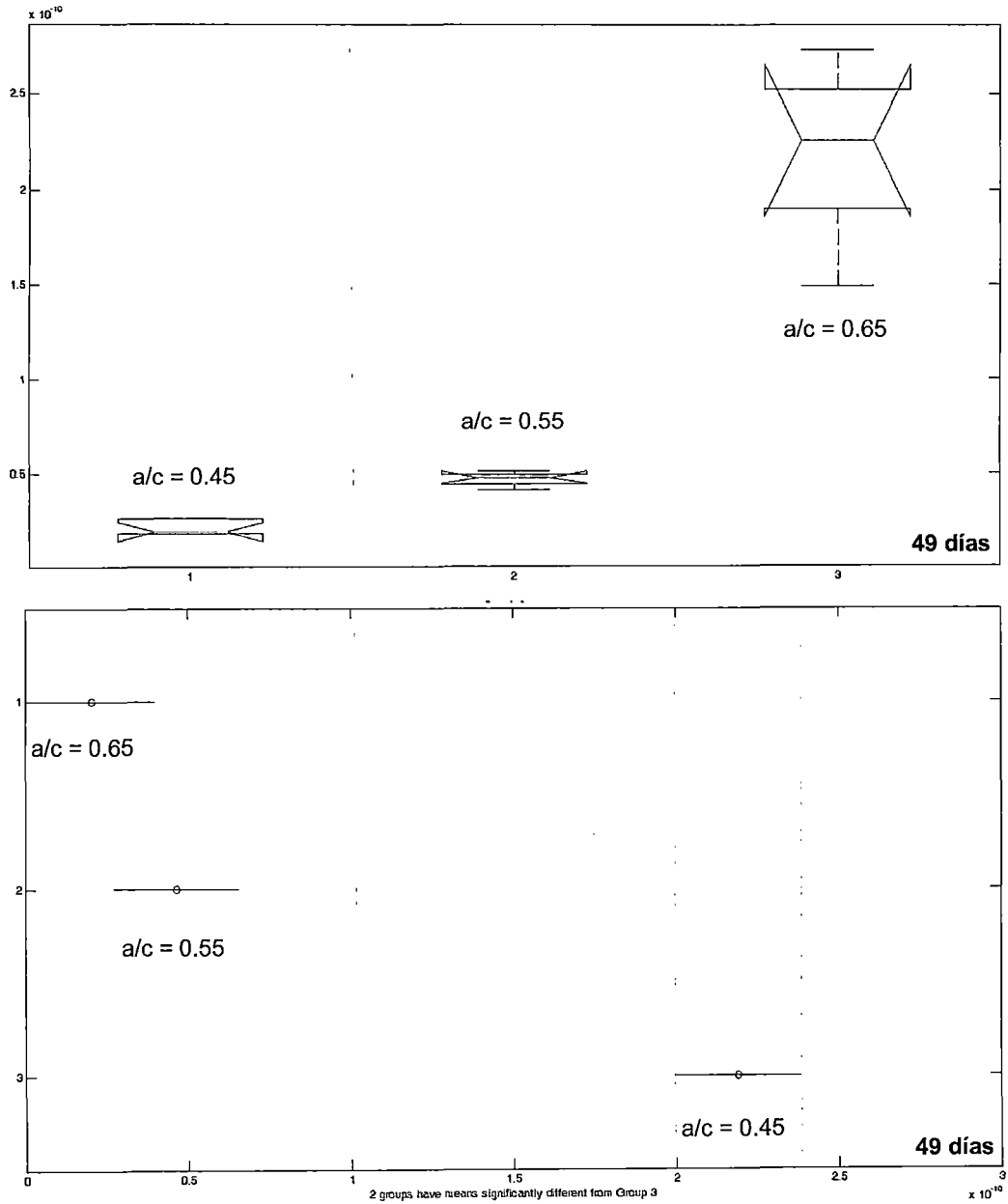


Figura N° 4.18 Comparación de tres conjuntos de datos, para relación $a/c = 0.65, 0.55$ y 0.45 para 49 días de curado. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare". Fuente: Elaboración propia.

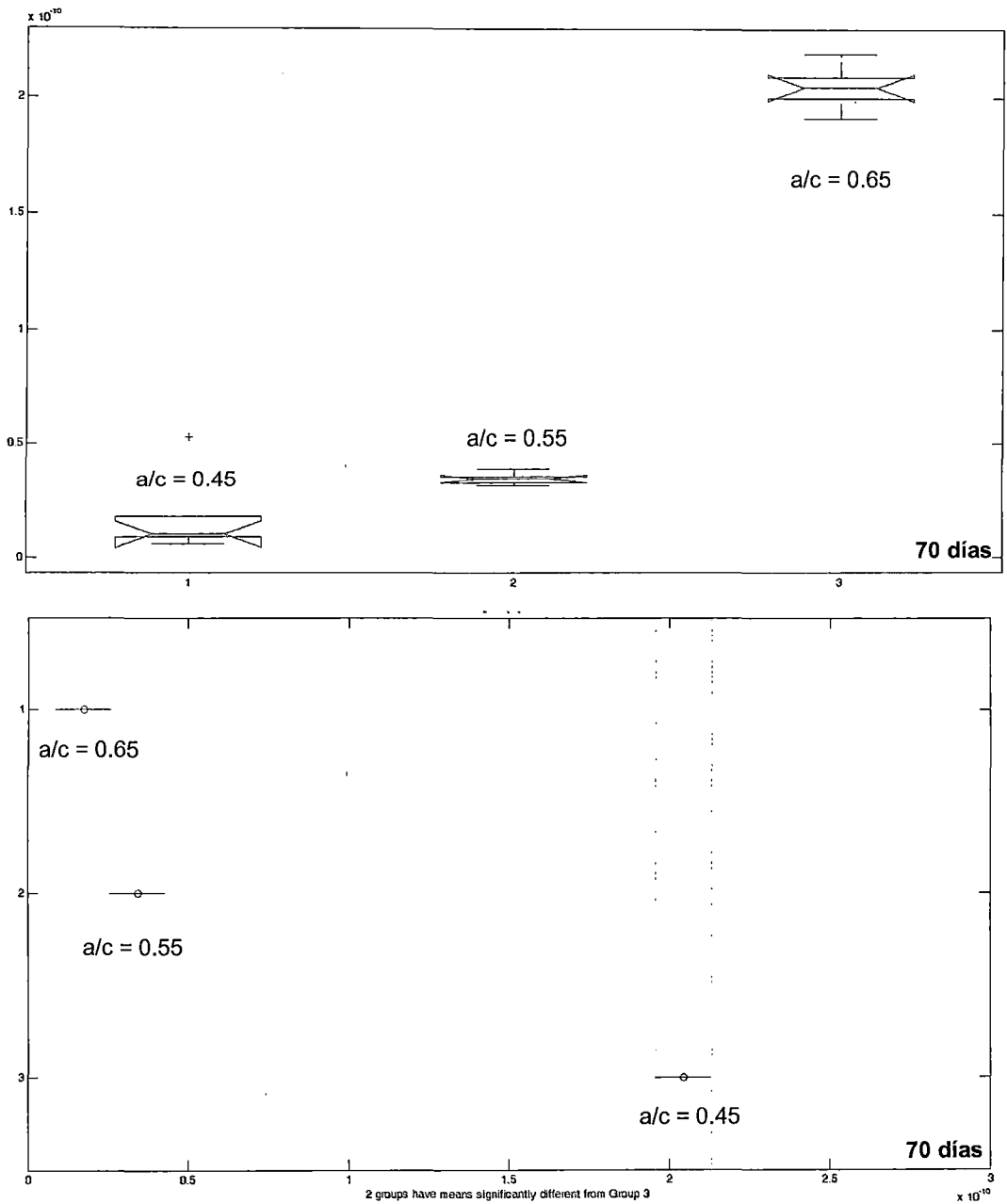


Figura N° 4.19 Comparación de tres conjuntos de datos, para relación $a/c= 0.65, 0.55$ y 0.45 para 70 días de curado. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare". Fuente: Elaboración propia.

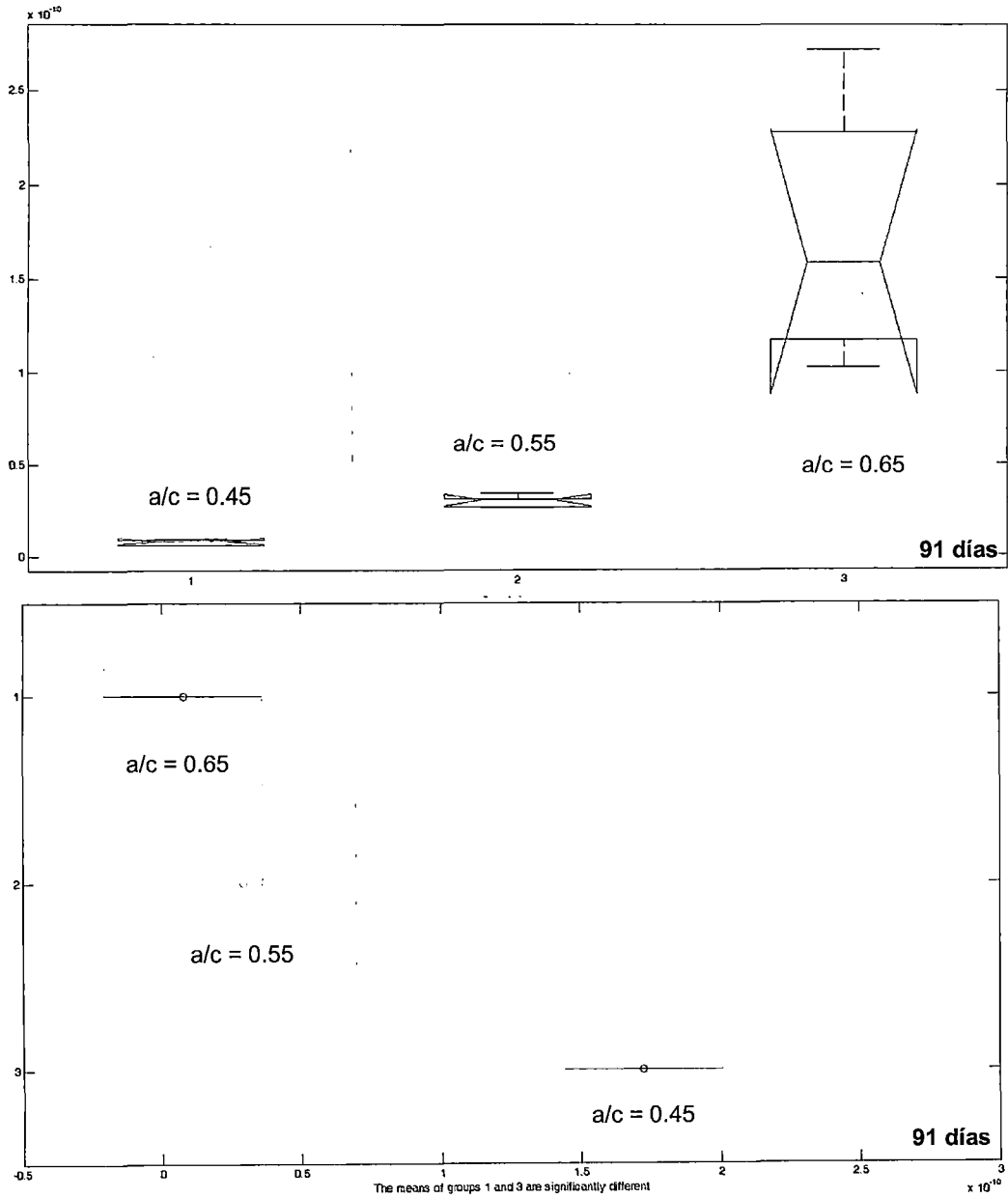


Figura N° 4.20 Comparación de tres conjuntos de datos, para relación $a/c = 0.65, 0.55$ y 0.45 para 91 días de curado. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare". Fuente: Elaboración propia.

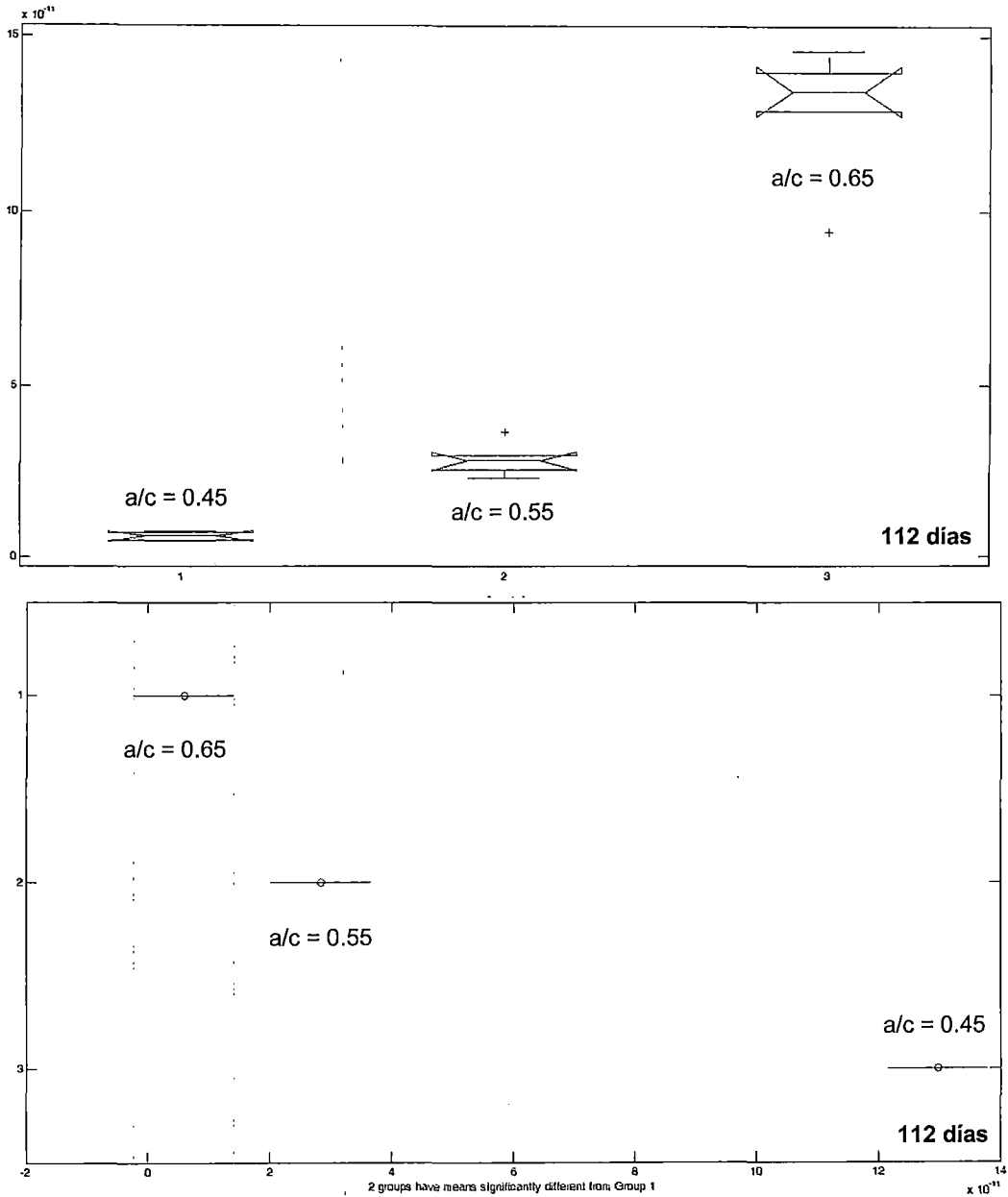


Figura N° 4.21 Comparación de tres conjuntos de datos, para relación $a/c = 0.65, 0.55$ y 0.45 para 112 días de curado. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare". Fuente: Elaboración propia.

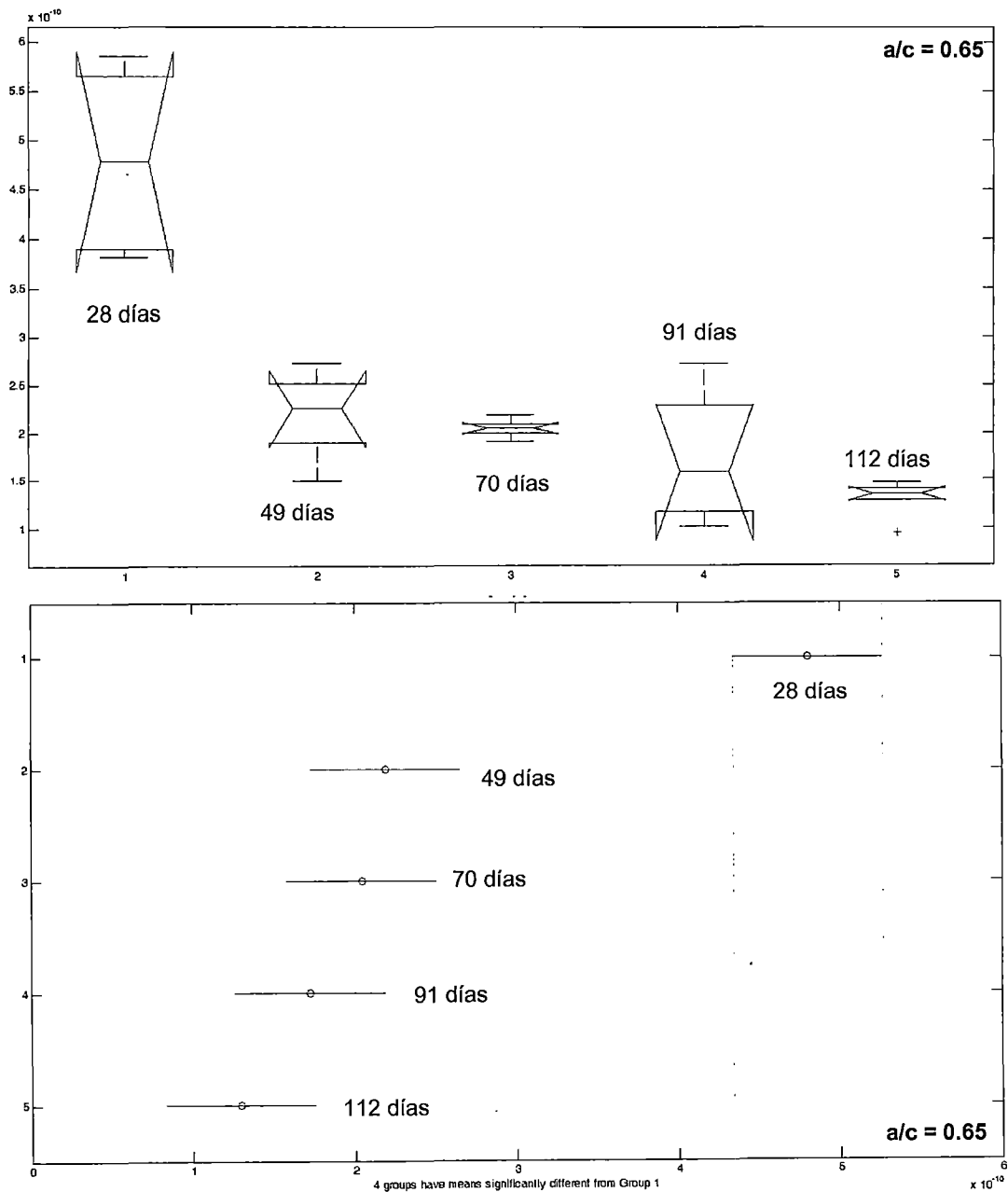


Figura N° 4.22 Comparación de cinco conjuntos de datos, para relación $a/c= 0.65$, evaluada a 28, 49, 70, 91 y 112 días. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare". Fuente: Elaboración propia.

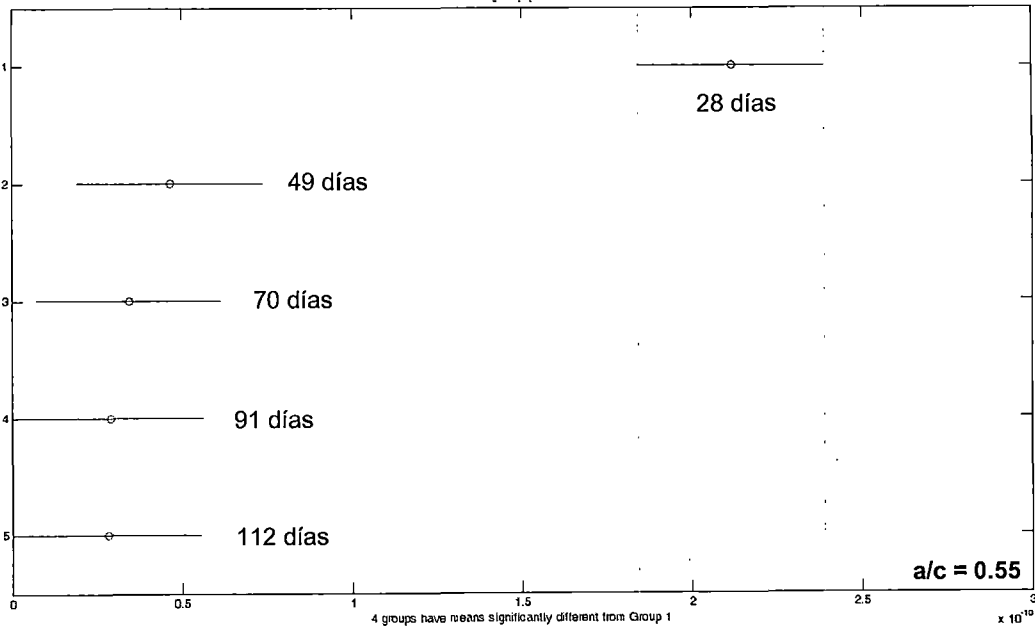
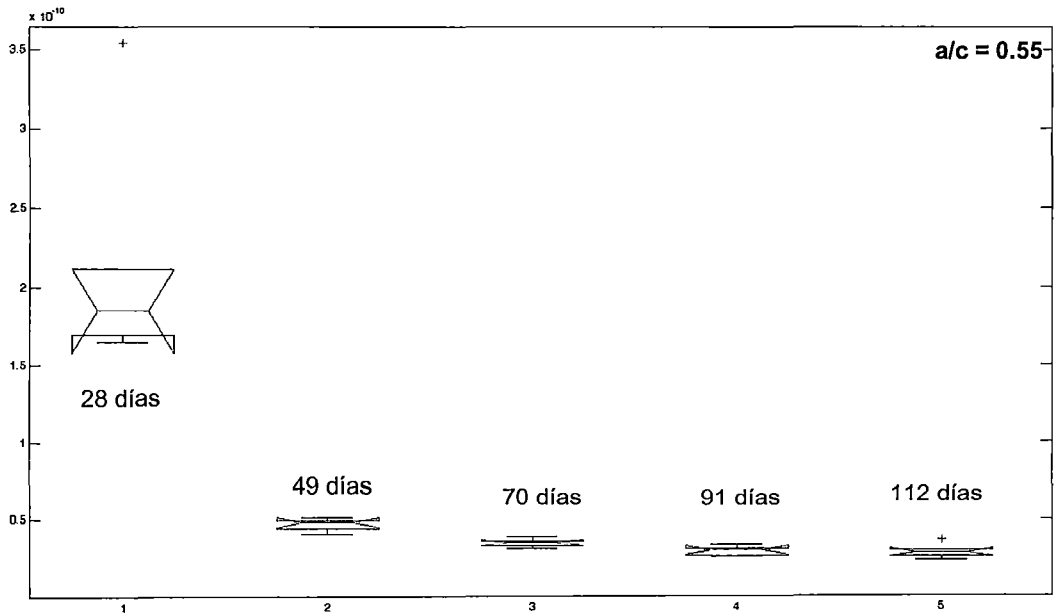


Figura N° 4.23 Comparación de cinco conjuntos de datos, para relación $a/c = 0.55$, evaluada a 28, 49, 70, 91 y 112 días. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare". Fuente: Elaboración propia.

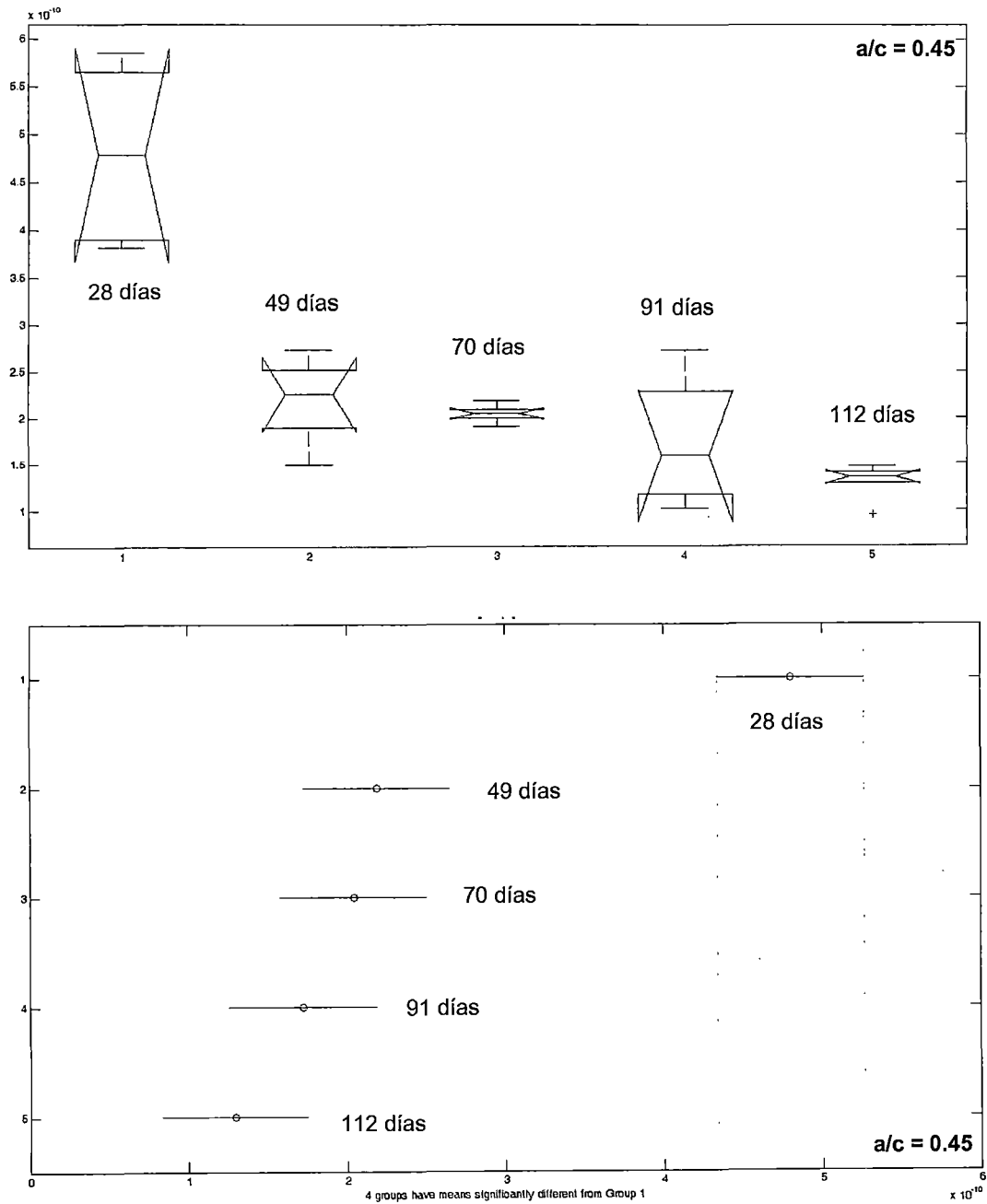


Figura N° 4.24 Comparación de cinco conjuntos de datos, para relación $a/c = 0.45$, evaluada a 28, 49, 70, 91 y 112 días. Vista superior, comparación usando el comando "ANOVA"; vista inferior, comparación usando el comando "Multcompare". Fuente: Elaboración propia.

El análisis fue elaborado tomando en consideración los datos obtenidos, sin considerar los valores atípicos encontrados en el subcapítulo 4.2.2, con una probabilidad de ocurrencia del 95%, en las figuras se muestra la representación gráfica de la variación de datos, para el caso del análisis "ANOVA", nos muestra la media, el percentil 25 y 75, además de los valores máximo y mínimo probables; el análisis "multcompare" nos entrega de forma simplificada los resultados nos muestra la media y la amplitud de la varianza de los datos, mediante barras horizontales. En ambos casos podemos definir que dos grupos son significativamente diferentes cuando no se superponen los valores de varianza registrados para cada caso.

En la Figura N° 4.17, Al realizar el análisis de los resultados obtenidos para los 28 días, en ambos análisis realizados, se nota una marcada diferencia entre conjunto de datos medidos, esto a pesar de tener una gran dispersión es debido a que para 28 días la diferencia de los coeficientes de permeabilidad es muy grande, aproximadamente el doble de la anterior.

Para edades posteriores (49, 70, 91 días), en la Figura N° 4.18, Figura N° 4.19 y Figura N° 4.20, se tienen datos difusos para las relaciones agua-cemento de 0.45 y 0.55, pero bien diferenciados de la relación agua-cemento 0.65. Por lo cual no podemos hacer una afirmación sobre la diferencia en los valores encontrados para 0.45 y 0.55, pero si se puede afirmar que los resultados obtenidos para 0.55 y 0.65 son diferentes. Sin embargo a los 112 días (Figura N° 4.21), notamos que la diferencia entre 0.55 y 0.45 se hace más evidente, pudiéndose notar en la gráfica que se puede definir como valores diferentes los obtenidos para estas relaciones agua-cemento. Esto puede ocurrir debido a que para edades tempranas aún existe mucha dispersión entre los datos obtenidos y para el conjunto de datos limitado que tenemos esta dispersión se acentúa aún más sin embargo los resultados obtenidos para 112 días nos da un buen indicio de que con un mayor número de pruebas se puede lograr tener rangos diferenciados para cada relación agua-cemento.

Al hacer el análisis para cada relación a/c en el tiempo (Figura N° 4.22, Figura N° 4.23 y Figura N° 4.24), se observa que la mayor dispersión de datos se encuentra a los 28 días, y la menor dispersión a los 112 días, también se nota

que la diferencia entre el 28 días y las demás edades es significativa (no se intersectan las barras laterales o las cajas) en el caso del conjunto de valores que corresponden a los demás días (49, 70, 91 y 112 días) no se observa una diferenciación entre ellas, debido a la cercanía de los valores encontrados y a la variación encontrada, a pesar de la cercanía de los valores, no podemos afirmar aún que los conjuntos de datos tienden a ser iguales y alcanzar la estabilidad, sin embargo es un buen indicio el encontrado con los valores analizados.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Las conclusiones que se presentan, son resultado del análisis del ensayo de permeabilidad, realizado con un equipo de fabricación propia, a un espacio muestral de 90 resultados de coeficientes de permeabilidad, los cuales fueron divididos en 15 grupos de 6 muestras cada uno. La elaboración, curado y ensayo de las muestras fue realizado en condiciones de laboratorio; manteniendo y controlando la uniformidad del agregado y las condiciones del ensayo. Las relaciones agua-cemento fueron 0.45, 0.55 y 0.65.

5.1 CONCLUSIONES.

1. De los resultados obtenidos, el coeficiente de permeabilidad a 28 días es $5,55 \times 10^{-12}$, $2,12 \times 10^{-11}$ y $4,81 \times 10^{-11}$; para las relaciones agua-cemento 0.45, 0.55 y 0.65 respectivamente mientras que para los 49 días son $2,07 \times 10^{-12}$, $4,66 \times 10^{-12}$ y $2,19 \times 10^{-11}$, obteniendo una pendiente de 2×10^{-13} , 8×10^{-13} y 1×10^{-12} , esto comparado con las pendientes obtenidas para el periodo comprendido entre 49 y 70 días que son 5×10^{-14} , 6×10^{-14} y 7×10^{-14} , nos muestra que para medidas tomadas a los 28 días, el coeficiente de permeabilidad aún no logra estabilizarse y continúa disminuyendo de forma asintótica.
2. Para concretos con relación agua-cemento 0.55 y 0.45, el coeficiente de permeabilidad comienza a hacerse constante a partir de los 49 días, por tanto la edad recomendada para determinar el coeficiente de permeabilidad es a los 56 días.
3. Para concretos con relación agua-cemento 0.65, a los 49 días el coeficiente de permeabilidad aún no estabiliza, se continuó realizando medidas hasta los 112 días, sin encontrarse aún el punto donde el coeficiente de permeabilidad se estabiliza.
4. Para edades superiores a los 49 días, la variación del coeficiente de permeabilidad en el tiempo se estabiliza, hasta el punto de hacerse asintótico, haciendo posible definir el coeficiente de permeabilidad como:

Relación agua-cemento	Coefficiente de permeabilidad "k"
0.65	2.0×10^{-11}
0.55	4.0×10^{-12}
0.45	2.0×10^{-12}

5. La relación que existe entre el coeficiente de permeabilidad y la relación agua-cemento es directa y varía de forma exponencial.

5.2 RECOMENDACIONES.

1. Para realizar el ensayo, se debe evitar formaciones de partículas de óxido en el interior del equipo, para eso es necesario utilizar una bomba y un tanque de acero inoxidable, debido a que al estar el agua estancada durante el tiempo de ensayo, se comienza a formar una capa de óxido que puede contaminar el agua.
2. Si bien tenemos un buen indicio del comportamiento de las muestras, es recomendable concentrarse en una sola relación agua-cemento y ensayar un mayor número de muestras para comprobar los resultados obtenidos y tener menos incertidumbre de las proyecciones realizadas.
3. Para poder acelerar el tiempo de ensayo, sería recomendable hacer pruebas con mayores presiones de ensayo, sobre todo para concretos con coeficiente de permeabilidad bajo y resistencia elevada.
4. Al hacer pruebas en concretos con relación agua-cemento 0.6 o más, es recomendable realizar el ensayo a edades mayores a los 112 días, a fin de conocer en que instante se estabiliza el coeficiente de permeabilidad.
5. Probar diferentes cantidades y tipos de cemento, para iguales relaciones agua-cemento, a fin de evaluar la influencia de la inclusión del mismo en la permeabilidad del concreto.

BIBLIOGRAFÍA

1. ACI Committee 201, Guide to durable concrete, ACI 201.2 R-08, ACI Committee 201 Report, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan (MI), USA, 2010.
2. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02), ACI Committee 318 Report, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan (MI), USA, 2010.
3. Abdullah M. Alshamsi, Hassan D.A. Imran, "Development of a permeability apparatus for concrete and mortar", Cement and Concrete Research 32, 2012.
4. AENOR. Ensayos de hormigón endurecido, parte 8: Profundidad de penetración. UNE EN 12390-8. Asociación Española de Normalización y Certificación (AENOR). Madrid. España, 2001.
5. ASTM C 29/C 29M – 09: The American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Bulk Density (Unit Weight) and Voids in Aggregate, West Conshohocken (PA), USA, 2009.
6. ASTM C 33/C 33M - 13: The American Society for Testing Materials, Standard Specification for Concrete Aggregates, West Conshohocken (PA), USA, 2013.
7. ASTM C 39/C 39M – 14a: The American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens West Conshohocken (PA), USA, 2014.
8. ASTM C 117 - 13: The American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing, West Conshohocken (PA), USA, 2013.

9. ASTM C 127 - 07: The American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate, West Conshohocken (PA), USA, 2007.
10. ASTM C 128 - 12: The American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate, West Conshohocken (PA), USA, 2012.
11. ASTM C 136 - 14: The American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, West Conshohocken (PA), USA, 2014.
12. ASTM C 142/C 142M -10: The American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates, West Conshohocken (PA), USA, 2010.
13. ASTM C 150/C 150M - 12: The American Society for Testing Materials, Standard Specification for Portland Cement, West Conshohocken (PA), USA, 2012.
14. ASTM C 192/C 192M - 14: The American Society for Testing Materials, Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory, West Conshohocken (PA), USA, 2014.
15. ASTM C 494/C 494M - 13: The American Society for Testing Materials, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, West Conshohocken (PA), USA, 2013.
16. ASTM C 496/C 496M - 11: The American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, West Conshohocken (PA), USA, 2011.
17. ASTM C 566 – 13: The American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying, West Conshohocken (PA), USA, 2013.

18. ASTM C 642 - 13: The American Society for Testing Materials, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, West Conshohocken (P.A), USA, 2013.
19. Berszakiewicz, B. and Konecny, J. "In search of reliable in-situ methods for development of performance-based specifications for concrete in highway structures", Ministry of Transportation Ontario, Engineering Standards Branch. Materials Engineering and Research Office, Concrete Section, 2008.
20. Bertolini, L.; Elsener, B.; Pedferri, P.; Polder, R. "Corrosion of Steel in Concrete", WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, Weinheim, 2004.
21. C. Andrade, R. D'Andrea. "La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad" Revista ALCONPAT, Volumen 1, Número 2, Mayo-Agosto, 2011
22. COE CRD-C 48-92, "Method of Test for Water Permeability of Concrete", U.S. Army Corps of Engineers, Estados Unidos, 1992.
23. EN 206-1. "Hormigón - Parte 1. Especificación, comportamiento, fabricación y conformidad", CEN, 2000.
24. Gómez Cano, Juan Camilo, "Identificación y cuantificación de algunos factores en la permeabilidad de concretos y morteros", Universidad Nacional de Colombia Facultad de Minas, Colombia, 2008.
25. González Sersen, Alvaro Mauricio, "Estudio experimental de la relación entre la resistividad eléctrica del hormigón y su resistencia a la penetración de iones cloruro", Universidad de Chile, Santiago, Chile, 2011.
26. Grupo Español del Hormigón, "Durabilidad de Estructuras de Hormigón, Guía de Diseño CEB", GEHO-CEB. Boletín N° 12, Madrid, España, 1993
27. INCONTEC, "Ingeniería civil y arquitectura. Concretos: Método de ensayo para determinar la permeabilidad del concreto al agua", NTC 4483, Instituto

- Colombiano de normas técnicas y certificación (ICÓNTEC), Bogotá, Colombia, 1998.
28. INN-Chile, "Hormigón y mortero – Método de ensayo – Determinación de la impermeabilidad al agua – Método de la penetración de agua bajo presión", NCh 2262.of97, Instituto Nacional de Normalización (INN-Chile), Santiago, Chile, 1997.
 29. IRAM 1871, Hormigon, Método de ensayo para determinar la capacidad y velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido, Argentina, 2004
 30. Ligia M. Vélez, "Permeabilidad y Porosidad en Concreto", Instituto Tecnológico Metropolitano, Revista Tecno Lógicas No. 25, ISSN 0123-7799, Colombia, 2010.
 31. López Orozco, Juan Orlando, "Porosidad del concreto", Universidad de San Carlos de Guatemala, Guatemala, 2004.
 32. Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. M.: Concrete Microstructure, Properties, and Materials, McGraw Hill, New York, Estados Unidos, 2006.
 33. Neville, Adam. Tecnología del concreto. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A. C., IMCYC, México, 1999.
 34. Peña Medrano Herbert, Juan Moises, "Estudio del estado de permeabilidad del concreto de alta resistencia: Fabricación de equipo y aplicaciones", UNIFIC, Lima 2010.
 35. Sakurai, Cristian, "Absorción por succión capilar del hormigón endurecido", LEMaC Centro de investigaciones viales, Argentina, 2010.
 36. Skalny Jan, And Mindess, "Materials, Science of Concrete II", The American Ceramic Society, Inc, Pennsylvania USA, 1991.

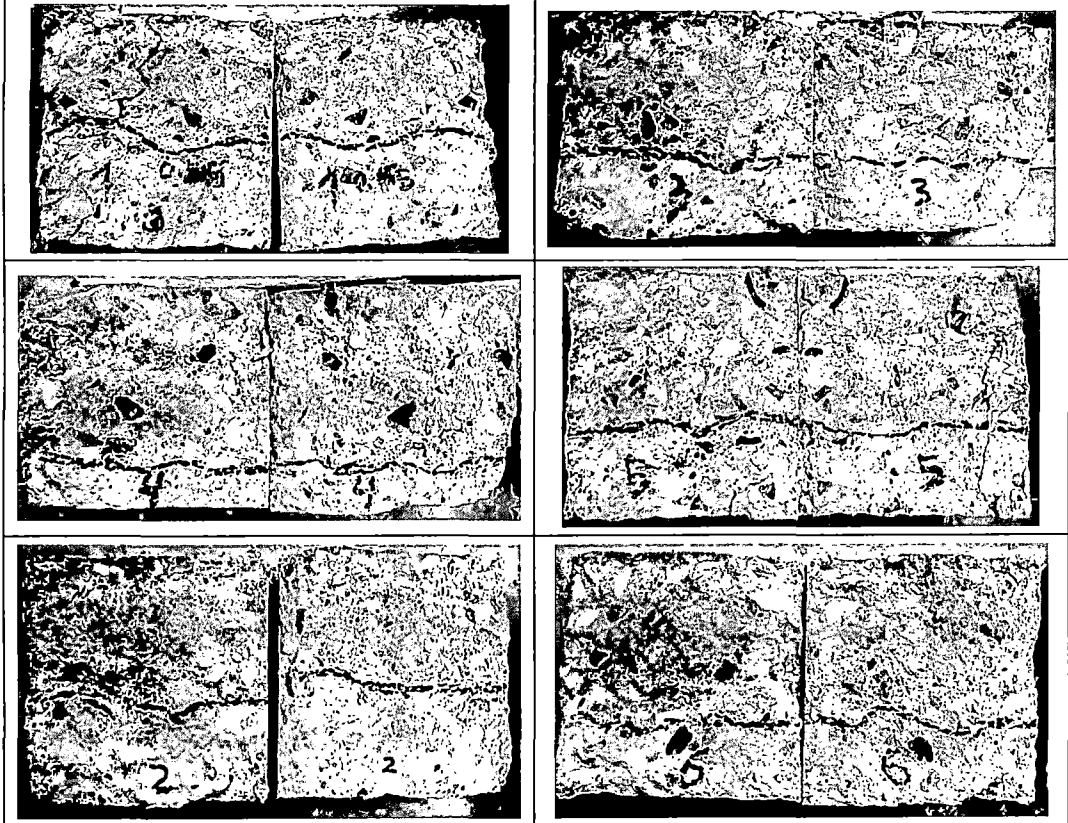
37. Xinying Lu, Meixia Chen, Fang Yuan, "Evaluation of concrete permeability by critical voltaje", Cement and Concrete Research 30, 2000.

ANEXOS

ANEXO 1: PANEL FOTOGRÁFICO

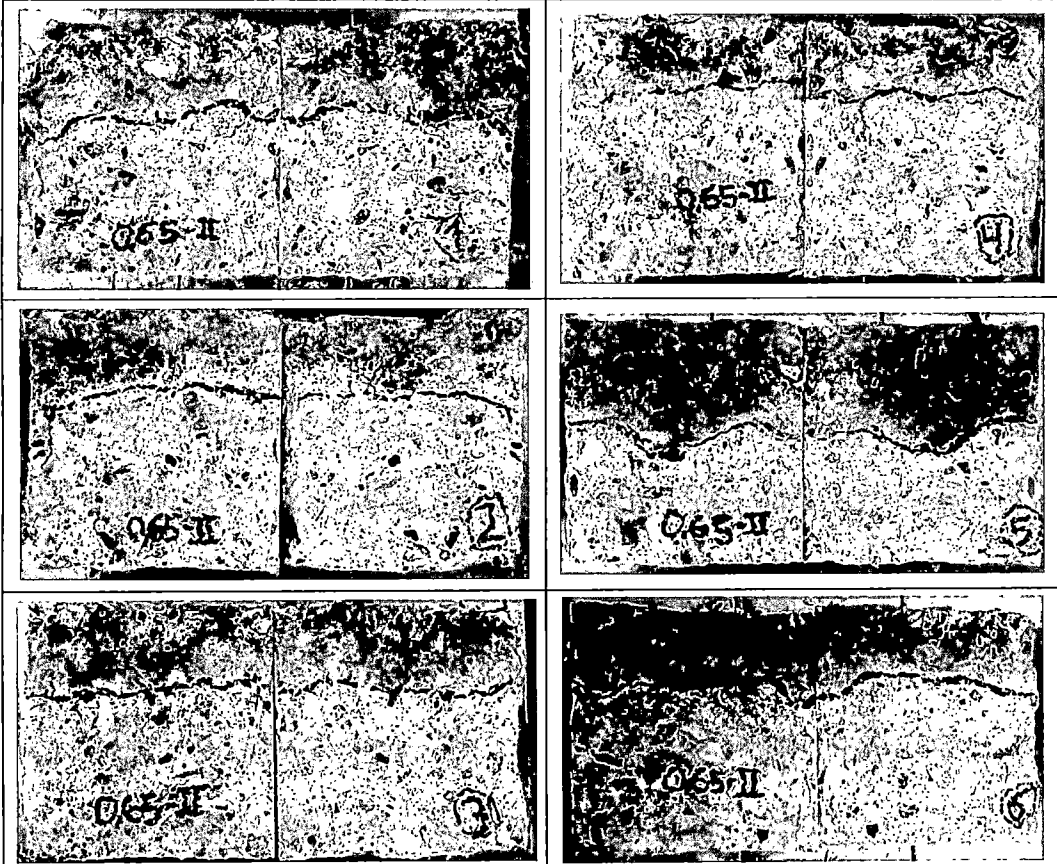
0.65-I

Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.65 y ensayada a los 28 días.



0.65- II

Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.65 y ensayada a los 49 días.



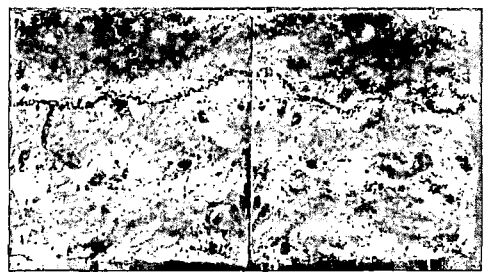
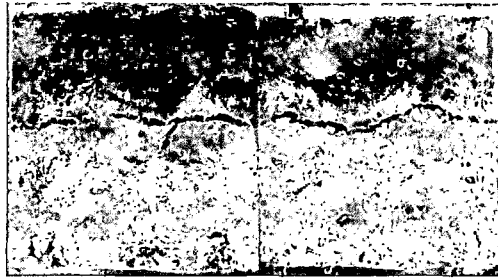
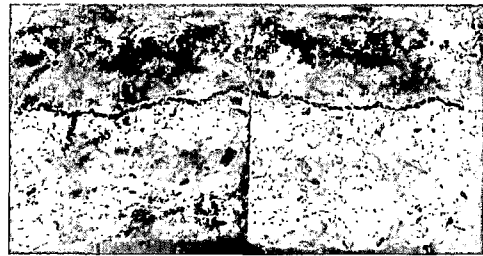
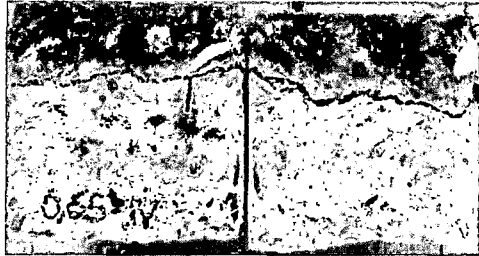
0.65 III

Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.65 y ensayada a los 70 días.



0.65 IV

Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.65 y ensayada a los 91 días.

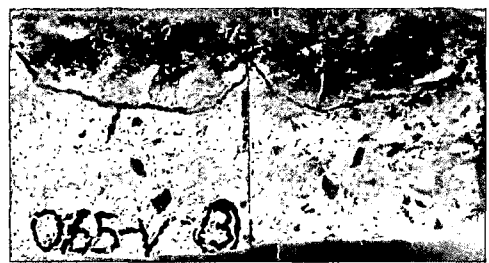


No se pudo realizar el ensayo de esta muestra.

0.65 V

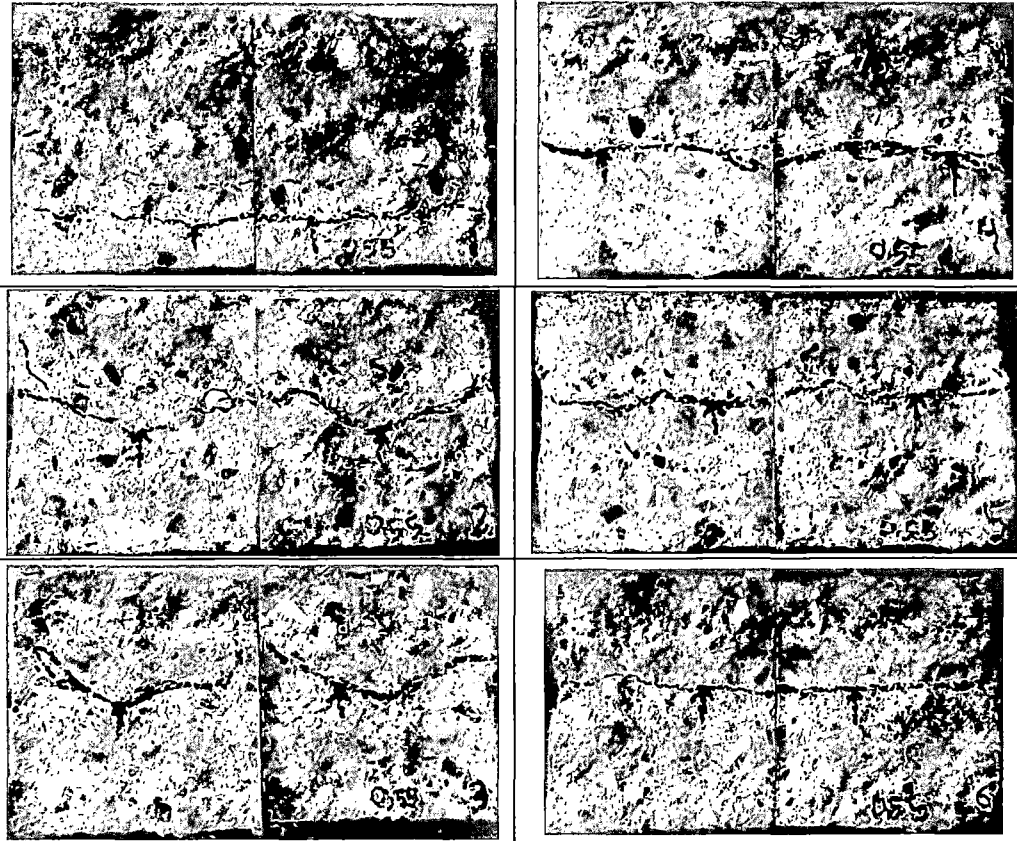
Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.65 y ensayada a los 112 días.

No se pudo realizar el ensayo de esta muestra.



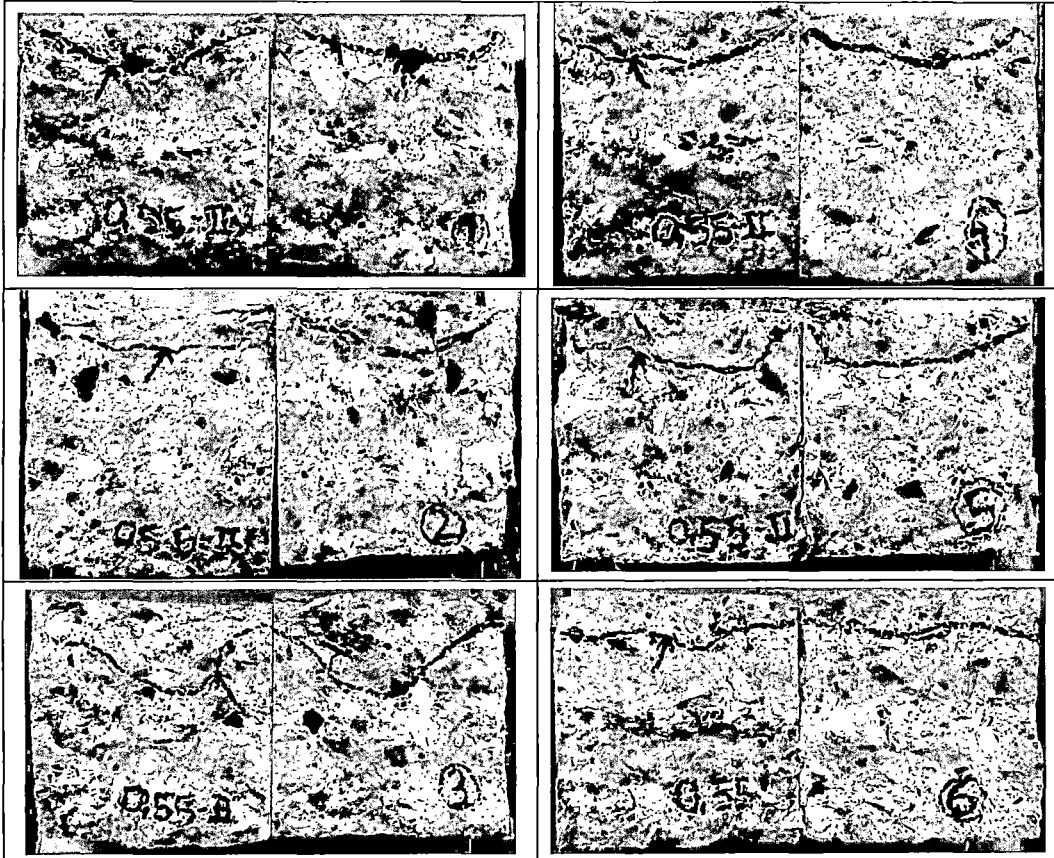
0.55-I

Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.55 y ensayada a los 28 días.



0.55-II

Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.55 y ensayada a los 49 días.



0.55-III

Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.55 y ensayada a los 70 días.



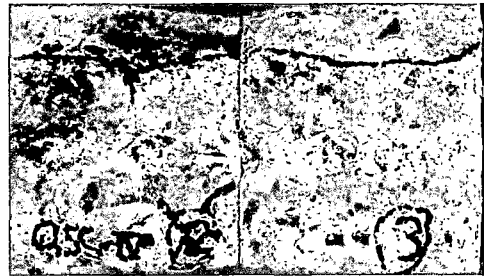
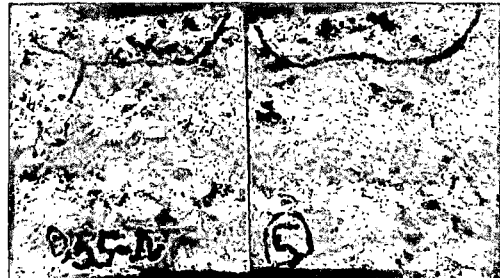
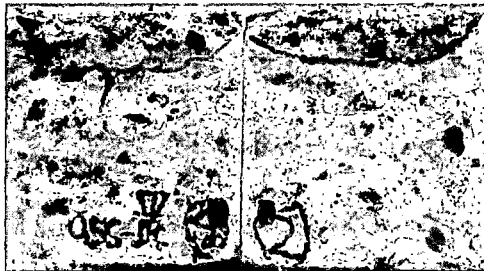
No se pudo realizar el ensayo de esta muestra.



0.55-IV

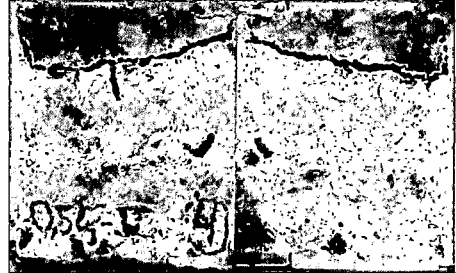
Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.55 y ensayada a los 91 días.

No se pudo realizar el ensayo de esta muestra.



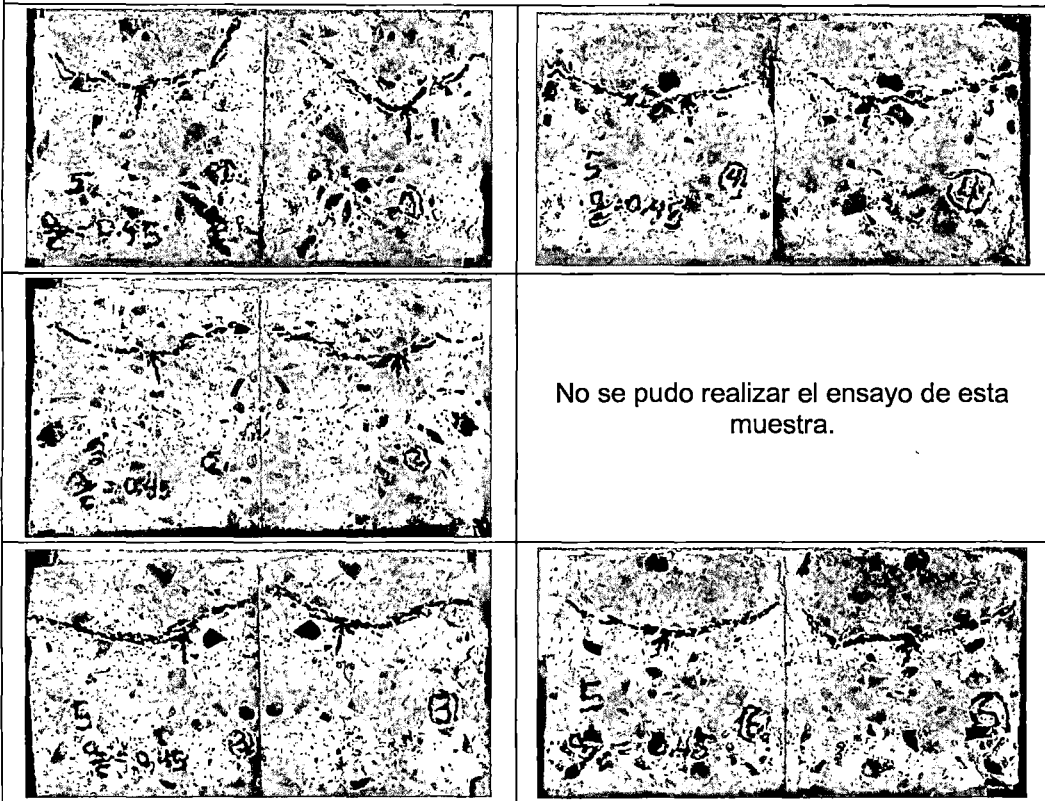
0.55-V

Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.55 y ensayada a los 112 días.



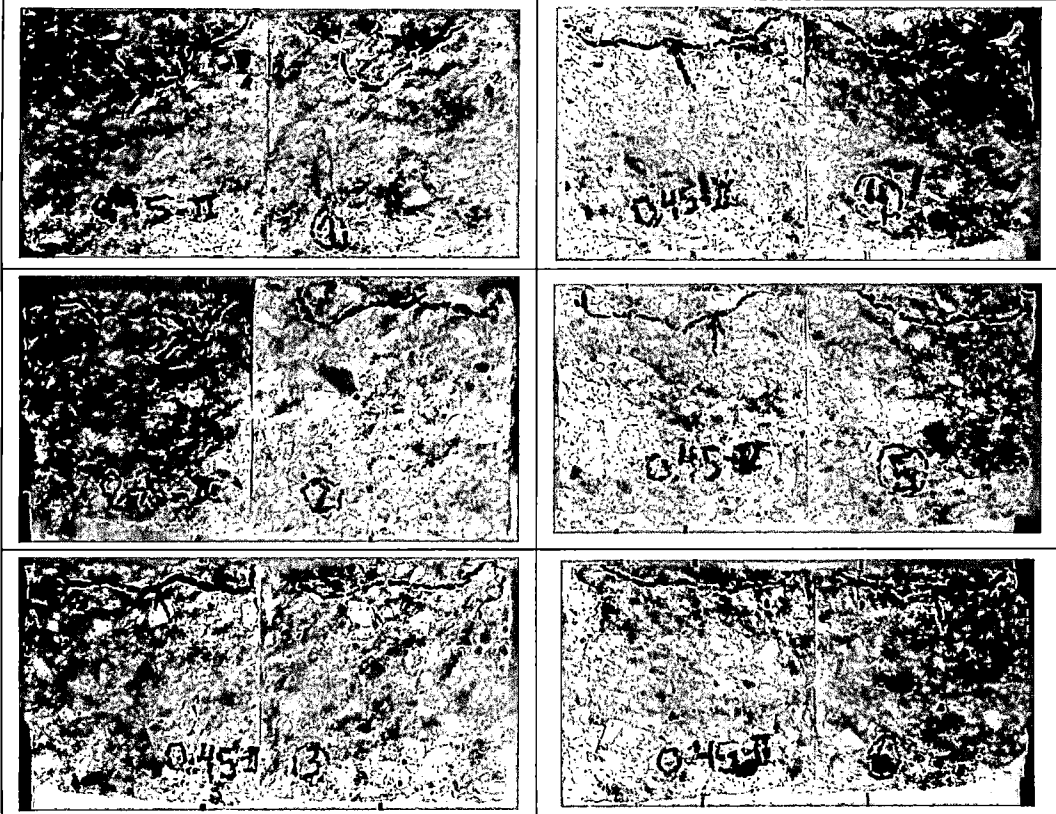
0.45-I

Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.45 y ensayada a los 28 días.



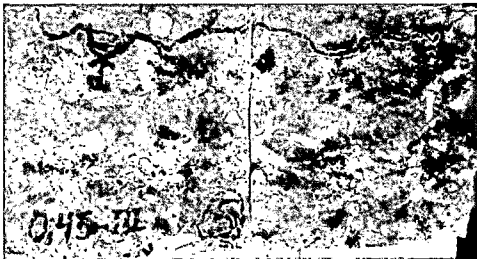
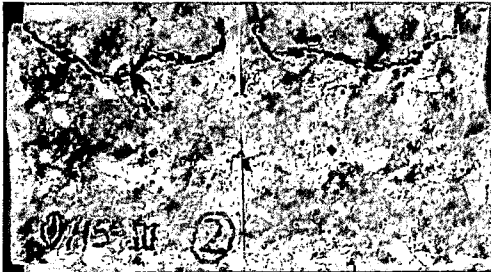
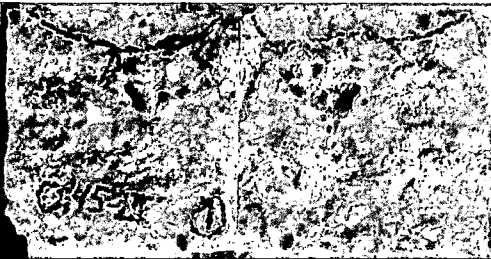
0.45-II

Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.45 y ensayada a los 49 días.



0.45-III

Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.45 y ensayada a los 70 días.



0.45-IV

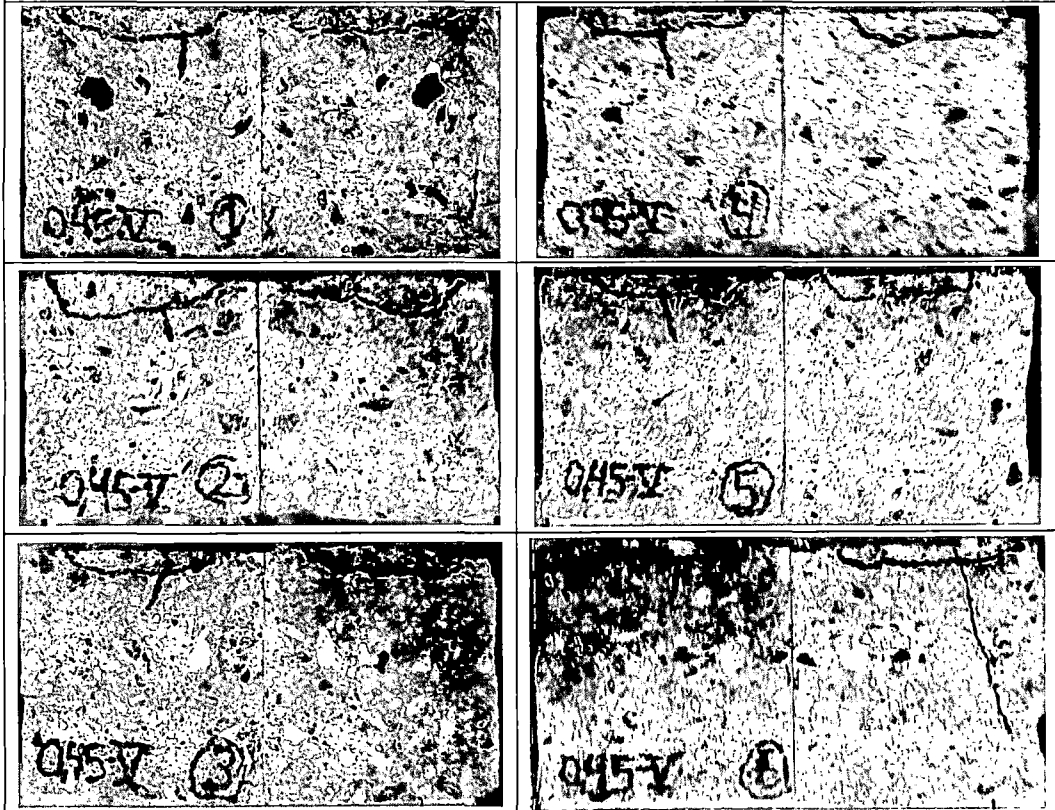
Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.45 y ensayada a los 91 días.

No se pudo realizar el ensayo de esta muestra.



0.45-V

Fotografías tomadas de las muestras correspondientes a la relación agua-cemento de 0.45 y ensayada a los 112 días.

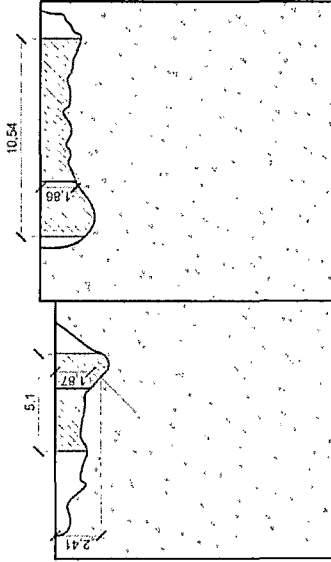
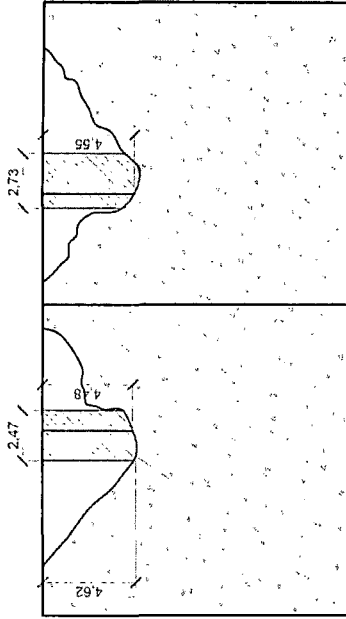


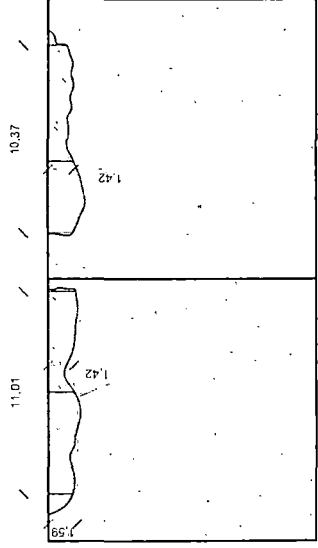
ANEXO 2: EJEMPLO DE MEDICIÓN DE PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN PROMEDIO






Explicaremos brevemente el procedimiento de medición de la profundidad de penetración media:

1. Se procede a marcar un punto de referencia sobre la línea marcada por la profundidad de infiltración de agua (línea azul), se realiza la medida desde la superficie de la probeta hasta ese punto, registrándose como medida de referencia.
2. Se hace una captura fotográfica de la muestra, desde un punto tal que nos quede la probeta como una vista en planta.
3. Digitalizamos la imagen, con la ayuda del programa Autocad (líneas en verde), se procede a escalar la imagen tomando como referencia la medida tomada en 1.
4. Calculamos la zona de profundidad efectiva, que es la marca debajo del área dejada por el disco de estanqueidad (Ver capítulo II), o cuando empieza a descender el nivel dejado por la profundidad de penetración.
5. Calculamos la profundidad de penetración media, esto lo realizaremos calculando el área de la zona de profundidad efectiva y dividiendo sobre la base de la misma. Calculamos una para cada lado de la probeta.

A continuación, presentaremos algunos ejemplos de las medidas adicionales, tomadas de la profundidad de penetración media.





-  Muestra de concreto
-  Zona de infiltración efectiva
-  Penetración de agua
-  Profundidad de penetración media
-  Punto de referencia