

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

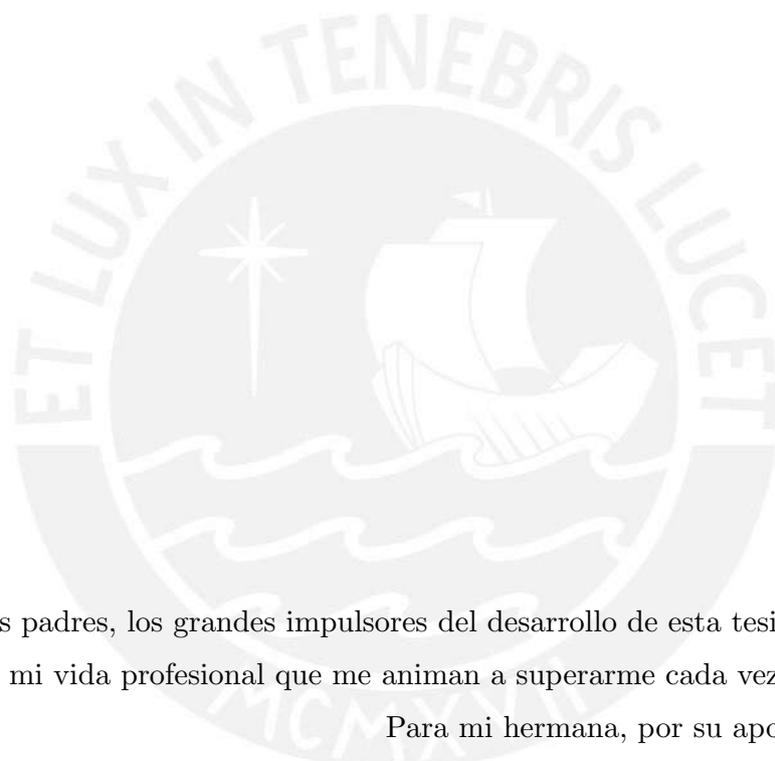
Estudio de la correlación entre la relación
agua/cemento y la permeabilidad al agua de
concretos usuales en Perú

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presenta la
bachiller:

Iskra Guisele Bustamante Romero

Asesor: Ing. Laura Marina Navarro Alvarado

Lima, Febrero del 2017



Para mis padres, los grandes impulsores del desarrollo de esta tesis. Son los pilares de mi vida profesional que me animan a superarme cada vez con más ahinco.

Para mi hermana, por su apoyo incondicional.

Para mi asesora de tesis a quien agradezco haberme brindado la oportunidad de realizar esta investigación y su guía durante todo el proceso.

Para mis amigos Jimmy Olivera, Cranmer Rojas, José Enrique, Katherine Montes y Guillermo Loaiza que me ayudaron en mi tesis de formas diferentes de manera desinteresada.

RESUMEN

El concreto es el principal material que se utiliza en la industria de la construcción. Se caracteriza por ser heterogéneo y poroso, por tanto propenso al ingreso de agentes agresivos que causan su deterioro físico y químico afectando su durabilidad. La propiedad del concreto que facilita su ingreso es la permeabilidad. Según Mehta la permeabilidad es la propiedad del concreto que mide la velocidad de flujo de un fluido cuando pasa a través del concreto, depende de su relación agua/cemento, del tamaño máximo del agregado, el tiempo de curado y del tipo de cemento. Esta propiedad del concreto ha sido investigada ampliamente de tal manera que entidades internacionales han establecido ensayos normados que determinan el procedimiento a seguir para su medición a través de dos mecanismos: capilaridad y permeabilidad. En este estudio se realizaron ensayos para medir la permeabilidad mediante la norma europea EN 12390-8.

La presente tesis contempló la implementación de esta norma europea en el laboratorio LEDI-PUCP y una posterior capacitación de su personal. Además, se elaboraron 60 especímenes de concreto que fueron elaborados de la siguiente manera: 5 especímenes por cada mezcla de relación agua/cemento (0.45, 0.5, 0.6 y 0.7) y se repitió cada mezcla tres veces con el objetivo de tener mayores resultados. Estos especímenes fueron ensayados siguiendo las instrucciones del manual adaptado de la EN 12390-8. Con los resultados de estos ensayos, se elaboraron curvas de coeficiente de permeabilidad vs relación a/c. Estos resultados sirvieron para concluir que la permeabilidad varía de forma exponencial respecto a la relación a/c, que a menor relación a/c menor permeabilidad y que el tiempo de curado húmedo es determinante para una baja permeabilidad, entre otros. La presente tesis ha sido determinante para demostrar que la permeabilidad depende de diversos factores y que es necesario evaluar cada uno de ellos para poder determinar si un concreto tiene o no alta permeabilidad.

Índice

Índice de figuras	vi
Índice de tablas	ix
1 Introducción	1
1.1 Aspectos generales	1
1.2 Objetivos, alcances y metodología	1
1.3 Organización del documento	2
2 Aspectos generales del concreto	3
2.1 Estructura interna	3
2.1.1 Estructura de la pasta de cemento hidratada	3
2.1.2 Poros en la pasta de cemento hidratada	4
2.1.3 Zona de transición	5
2.2 Durabilidad del concreto	6
2.2.1 Patologías en el concreto. Patología debido a fenómenos físicos	7
2.2.2 Patología debido a fenómenos químicos	7
3 Permeabilidad	11
3.1 Definición y ley de Darcy	11
3.2 Permeabilidad de la pasta de cemento hidratado, los agregados y el concreto	11
3.3 Relación entre porosidad y permeabilidad	12
3.4 Factores que influyen en la permeabilidad del concreto	13
3.5 Factores que influyen en la absorción capilar del concreto	16
4 Estado del arte de métodos de medición	17
4.1 Métodos que miden la absorción capilar	18

4.1.1	¿Qué miden?	18
4.1.2	ASTM C 1585 Método para medir la tasa de absorción de agua en concreto de cemento hidráulico	18
4.1.3	SIA 262-1 Anexo A Determinación de la permeabilidad al agua del concreto	20
4.1.4	BS 1881-122: 2011 Ensayos de hormigón. Método para la de- terminación de la absorción de agua	21
4.1.5	DIN 52 617 Medición de la absorción del agua	22
4.1.6	ASTM C 642 Determinación de la densidad, la absorción de agua y los vacíos en el concreto endurecido	23
4.2	Métodos para medir la permeabilidad	23
4.2.1	¿Qué miden?	23
4.2.2	EN 12390-8:2000 Profundidad de penetración de agua bajo presión	24
4.2.3	Método Torrent- SIA 262-1 Anexo E	26
4.2.4	CRC C 163 92 Método estándar para permeabilidad al agua del concreto usando celda triaxial	27
4.2.5	DIN 1048 Parte 5 Ensayo en concreto de permeabilidad al agua	28
4.3	Tabla resumen de métodos normalizados	29
5	Materiales	30
5.1	Cementos	30
5.2	Agregado grueso	30
5.3	Agregado fino	31
5.4	Aditivos	32
6	Metodología	34
6.1	Ensayos en el concreto en estado fresco	34
6.2	Diseño de mezcla para diferentes relaciones agua/cemento	35
6.2.1	Planificación	35
6.2.2	Diseño de mezcla según Fuller	35
6.3	Diseño de mezcla definitivo para probetas	40
6.4	Ensayos en concreto endurecido	42
6.4.1	ASTM C39	43
6.4.2	EN 1230-8	43

6.5	Implementación de la norma EN 12390-8 en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas (LEDI-PUCP)	43
6.5.1	Uso y manejo del equipo FORM TEST Water penetration test	43
6.5.2	Procedimiento y Manual adaptado al LEDI	45
6.6	Capacitación del personal y primer servicio del Equipo de Permeabilidad en el LEDI	51
6.7	Fórmula de valenta para hallar el valor de k	55
7	Resultados	57
7.1	Antecedentes	57
7.2	Resultados de Ensayo a compresión	58
7.3	Resultados de permeabilidad con diferentes relaciones agua/cemento	61
7.3.1	Identificación de valores atípicos. Test de Grubbs	69
7.3.2	Gráficas de coeficiente de permeabilidad versus relación a/c	73
8	Análisis de Resultados	76
8.1	Evaluación del tipo de cemento utilizado	76
8.2	Evaluación del agregado fino	76
8.3	Evaluación del agregado grueso	78
8.4	Evaluación del agregado global	79
8.5	Evaluación del concreto fresco	79
8.6	Evaluación del concreto endurecido	80
8.6.1	Resistencia a la compresión	80
8.6.2	Permeabilidad del concreto al agua bajo presión	83
8.7	Evaluación de la implementación del ensayo	88
9	Conclusiones y Recomendaciones	89
9.1	Conclusiones	89
9.2	Recomendaciones	90
10	Bibliografía	92

Índice de Figuras

2.1	Composición de la pasta de cemento fresca y endurecida en la máxima hidratación para varias relaciones a/c (Portugal, 2007)	4
2.2	Esquema de la distribución del tamaño de poro en el concreto (Sanchez de Guzmán, 2003)	5
2.3	Representación gráfica de la zona de transición y de la pch en el concreto (Mehta, 1998)	6
2.4	Mecanismo de generación de corrosión de acero de refuerzo ante cloruros, agua y oxígeno (Sencico, 2015)	7
2.5	Representación del deterioro de un espécimen de concreto expuesto en un ambiente marino (Adaptado de Portugal, 2007)	8
2.6	Daños por carbonatación del concreto (Ycaza, 2011)	9
2.7	Daños por ácidos en alcantarillados (Ycaza, 2011)	10
2.8	Daños por reacción álcali-agregado en muro (Pasquel, 1996).	10
3.1	Relación entre permeabilidad al agua, relación agua/cemento y curado inicial (Adaptado de Whiting, 1988)	14
3.2	Efecto de la relación agua/cemento y la duración de curado sobre la permeabilidad del concreto (McMillian y Lyse 1929 y PCA Major Series 227)	15
4.1	Propiedades de penetración de agua. Gráfica de humedad relativa % vs profundidad desde la superficie (Adaptado de Basheer, Nolan 2001)	17
4.2	Esquema de ensayo por la ASTM C 1585	20
4.3	Esquema del Ensayo SIA 262-1 Anexo A	20
4.4	Curva del factor de corrección por tamaño de muestra	21

4.5	Especímenes colocados sobre malla de alambre con la cara de succión bajo agua (Kartini et al, 2010)	22
4.6	Disposición esquemática del ensayo (Kartini et al, 2010)	23
4.7	Aparato de ensayo. Fuente propia (Foto del equipo Form Test del LEDI PUCP)	25
4.8	Determinación de la profundidad de penetración de agua	25
4.9	Esquema y detalles del equipo que usa el Método Torrent (Torrent, 2010)	26
4.10	Esquema de una celda triaxial (Adaptado de Einsiedl, 2015)	27
4.11	Esquema de realización de ensayo de DIN 1048	28
4.12	Tabla resumen de métodos de medición de absorción capilar y permeabilidad	29
5.1	Curva granulométrica de agregado grueso Huso 5	31
5.2	Curva granulométrica de agregado fino comparado con requerimientos de graduación (huso) del agregado fino ASTM C33	32
6.1	Ejemplo de determinación de las proporciones de agregado fino y grueso (López, 2015)	36
6.2	Curvas de agregado global 40-60 y Füller 1”	38
6.3	Curva granulométrica de la mezcla a-b con la curva de Füller 1”	39
6.4	Asentamiento por corte del concreto patrón. (Fuente propia)	39
6.5	Partes del equipo de penetración hidráulica FORM TEST	44
6.6	Puntos de agua, aire a presión y eliminación de agua conectados a sus mangueras respectivas	45
6.7	El compresor y sus partes	47
6.8	Ajuste del perno de sujeción	48
6.9	Válvulas de agua, “compressed air”, “emptying” y “glass”	49
6.10	Probeta dividida en dos en el equipo de compresión diametral	50
6.11	El técnico realizando la puesta de la probeta B2 siguiendo la recomendación del manual de presionar la rosca con llave francesa	52
6.12	Escarificado de base donde se aplicará la presión de agua	53
6.13	El equipo durante el ensayo de las 6 probetas	53
6.14	Superficie de rotura de la probeta 5 marcada su profundidad de penetración	54

6.15	Superficie de rotura de la probeta 4 marcada su profundidad de penetración	55
7.1	Curva de resistencia a la compresión promedio (kg/cm ²) vs edad (días)	60
7.2	Curva de resistencia a la compresión promedio (kg/cm ²) vs relación a/c	60
7.3	Recta de Coeficiente de permeabilidad vs Relación agua/cemento . . .	74
7.4	Recta de Coeficiente de permeabilidad sin valores atípicos vs Relación agua/cemento	74
7.5	Curva Coeficiente de permeabilidad promedio vs Relación agua/cemento	75
7.6	Curva Coeficiente de permeabilidad promedio sin valores atípicos vs Relación agua/cemento	75
8.1	Curva de resistencia a la compresión promedio vs relación a/c	81
8.2	Variación de resistencias típicas para relaciones agua-cemento de concreto de cemento portland basadas en más de 100 diferentes mezclas de concreto moldeadas entre 1985 y 1999 (Kosmatka et al., 2004)	81
8.3	Reducción en permeabilidad usando aditivos reductores de permeabilidad respecto a concretos de referencia. Ensayos usando EN 12390-8 modificada (Presión 1.0MPa y tiempo 96 horas) (ACI 212.3R, 2010) .	84
8.4	Efecto de la relación agua/cemento sobre los coeficientes de permeabilidad en pastas de cemento hidratado al 93% de hidratación (Powers et al, 1954)	85
8.5	Profundidad del agua bajo presión (mm) vs relación a/c (Sika, 2012) .	88

Índice de Tablas

3.1	Comparación entre la pch y rocas en función de la porosidad capilar y permeabilidad (Adaptado de Whiting)	12
3.2	Tiempo requerido para obtener una estructura de poros discontinuos .	13
5.1	Propiedades físicas del agregado grueso	30
5.2	Tabla resumen de características físicas de agregado grueso	31
5.3	Tabla resumen de características físicas de agregado fino	32
6.1	Parámetros de control en estado fresco	35
6.2	Valores iniciales según método de Füller de arena y piedra al 60 y 40% respectivamente.	37
6.3	Tabulación de los valores a y b mediante el Método de Füller.	38
6.4	Propiedades en estado fresco de concreto patrón segunda mezcla . . .	40
6.5	Mezclas definitivas y sus factores preliminares	41
6.6	Propiedades en estado fresco de las mezclas definitivas	41
6.7	Resultados del ensayo de profundidad de penetración del agua bajo presión	54
7.1	Resultados resistencia a la compresión de mezclas relación a/c 0.45 edades 7 y 28 días	58
7.2	Resultados resistencia a la compresión de mezclas relación a/c 0.50 edades 7 y 28 días	58
7.3	Resultados resistencia a la compresión de mezclas relación a/c 0.60 edades 7 y 28 días	59
7.4	Resultados resistencia a la compresión de mezclas relación a/c 0.60 edades 7 y 28 días	59

7.5	Profundidad máxima y cálculo de profundidad promedio para mezclas de relación a/c 0.45	61
7.6	Profundidad máxima y cálculo de profundidad promedio para mezclas de relación a/c 0.50	62
7.7	Profundidad máxima y cálculo de profundidad promedio para mezclas de relación a/c 0.60	63
7.8	Profundidad máxima y cálculo de profundidad promedio para mezclas de relación a/c 0.70	64
7.9	Datos usados en la fórmula de Valenta	64
7.10	Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación a/c 0.45	65
7.11	Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación a/c 0.50	66
7.12	Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación a/c 0.60	67
7.13	Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación a/c 0.70	68
7.14	Promedio de coeficiente de permeabilidad k (m/s) para cada relación a/c	68
7.15	Valor crítico de comparación para determinar si son valores atípicos (Vic. Bammet y Toby Lewis, 1984)	69
7.16	Evaluación de valores atípicos en Mezclas de relación 0.45, 0.50,0.60 y 0.70	70
7.17	Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación 0.45	71
7.18	Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación 0.50	72
7.19	Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación 0.60	72
7.20	Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación 0.70	73
7.21	Promedio de coeficiente de permeabilidad k (m/s) para cada relación a/c	73
8.1	Contenido de humedad natural de agregado fino en cada mezcla y el promedio	77
8.2	Contenido de humedad natural de agregado grueso en cada mezcla y el promedio	79
8.3	Ganancia de resistencia a la compresión a los 7 días para relación a/c 0.45	82

8.4	Ganancia de resistencia a la compresión a los 7 días para relación a/c 0.5	82
8.5	Ganancia de resistencia a la compresión a los 7 días para relación a/c 0.6	82
8.6	Ganancia de resistencia a la compresión a los 7 días para relación a/c 0.7	82
8.7	Clasificación de la permeabilidad del concreto de acuerdo a la NTC 4483	86
8.8	Cuadro de casos de exposición ambiental y sus especificaciones de profundidades máximas y medias (mm) (EHE 08)	87



Chapter 1

Introducción

1.1 Aspectos generales

El concreto es el principal material que se utiliza en la industria de la construcción. Se caracteriza por ser heterogéneo y poroso, por tanto propenso al ingreso de agentes agresivos que causan su deterioro físico y químico afectando su durabilidad. La propiedad del concreto que facilita el ingreso de estos agentes es la permeabilidad. Esta propiedad del concreto ha sido investigada ampliamente de tal manera que entidades internacionales han establecido ensayos normados que determinan el procedimiento a seguir para su medición, sin embargo no hay un ensayo de aceptación general ni existe ensayo establecido por la Norma peruana. En ese sentido esta tesis contempla una revisión bibliográfica de los ensayos normados existentes; así mismo, la implementación de un ensayo de permeabilidad en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas (LEDI PUCP) y la obtención de gráficas que relacionen la permeabilidad al agua de concretos usuales en Perú y la relación agua/cemento.

1.2 Objetivos, alcances y metodología

El objetivo de esta tesis consiste en estudiar la correlación entre la relación agua/cemento y la permeabilidad al agua de concretos usuales en Perú . Se diseñará mezclas para concretos con relaciones agua/cemento de 0.45, 0.5, 0.6 y 0.7, con cemento tipo I y aditivo plastificante, debido a que estas relaciones a/c son para concretos usuales de alta resistencia en estructuras donde se necesita menor permeabilidad. No se evalúan concreto comerciales, de resistencias 210 y 175 kg/cm² debido a que su permeabilidad es mayor a las relaciones a/c evaluadas y presentan mayor variabilidad en los resultados de permeabilidad. Se ensayarán especímenes mediante el método de permeabilidad normalizado EN 12390-8:2000 Norma europea y se implementará este ensayo en el LEDI PUCP. Los resultados de los ensayos serán estudiados mediante gráficas exper-

imentales de permeabilidad del concreto al agua versus relación agua/cemento.

1.3 Organización del documento

En el Capítulo 2 se describe los aspectos generales del concreto, entre los que se encuentra la estructura interna y la durabilidad del material. Dentro de la durabilidad se describe las patologías debido a fenómenos físicos y químicos.

En el Capítulo 3 se define la permeabilidad del concreto, la ley de Darcy y los factores que influyen en su presencia en el concreto, tanto para la permeabilidad como para la absorción capilar.

En el Capítulo 4 se realiza el estado del arte de los métodos que miden la absorción capilar y la permeabilidad al agua del concreto.

En el Capítulo 5 se detallan los materiales que se utilizarán en la elaboración del concreto.

En el Capítulo 6 se describe la metodología utilizada que consistió en los diseños de mezcla de prueba, diseño por método de fuller, diseños definitivos y ensayos normados en concreto fresco y endurecido. Asimismo, se realiza la implementación Norma EN 12390-8 en el laboratorio LEDI-PUCP. También se detalla la modificación de la norma EN 12390-8 mediante la formula de Valenta para hallar el coeficiente de permeabilidad.

En el Capítulo 7 se detallan los resultados obtenidos mediante la norma EN 12390-8 y las curvas obtenidas de estos resultados. También se detallan los resultados del ensayo a compresión.

En el Capítulo 8 se realiza el análisis de los resultados detallados en el Capítulo 7 tanto para el cemento, agregado grueso, fino y para el concreto fresco y endurecido. La evaluación del concreto endurecido comprende los ensayos de compresión y la permeabilidad del agua bajo presión. Asimismo, se evalúa el desarrollo del ensayo en la implementación de este en el LEDI-PUCP

En el Capítulo 9 se describen los comentarios y recomendaciones de la tesis realizada.

Chapter 2

Aspectos generales del concreto

2.1 Estructura interna

El concreto tiene una estructura altamente heterogénea y compleja. El estudio de su estructura interna y las relaciones estructura-propiedades es útil con el objetivo de hacer cambios para influenciar en las propiedades de interés ingenieril del concreto. Existen dos fases distinguibles en el concreto: las partículas de agregados y el medio aglutinante, la Pasta de Cemento Hidratado (pch). Sin embargo, a nivel microscópico existen otros aspectos de la estructura del concreto: La zona de transición, se encuentra entre las partículas de agregado grueso y la pch, se caracteriza por ser más débil que las otras fases por cuanto tiene una influencia mayor en el comportamiento del concreto (Mehta, 1998). Cada fase tiene multifases en su naturaleza. Ello explica la presencia de fases sólidas, poros y micro grietas.

2.1.1 Estructura de la pasta de cemento hidratada

Cuando el cemento es dispersado en el agua, el sulfato de calcio y los componentes de calcio a alta temperatura tienden a disolverse; y la fase líquida se satura rápidamente con varias especies de iones (Portugal, 2007). Como resultados de las combinaciones entre iones de calcio, de sulfatos, de aluminato y de iones de hidroxilo, se forman cuatro fases sólidas:

- Hidrato de silicato de calcio (H-S-C): es el 50-60% del volumen de sólidos en una pasta de cemento
- Hidróxido de calcio: es el 20-25% del volumen de los sólidos en la pasta hidratada.

- Sulfoaluminatos de calcio: es el 15-2% del volumen. Durante las edades tempranas, la relación iones sulfato/alúmina de la fase solución forman etringita; luego se transforma en hidrato de monosulfato. Su presencia hace al concreto vulnerable al ataque de sulfatos (Mehta, 1998).

La siguiente figura representa la pasta de cemento en condiciones de máxima hidratación en donde se muestra sus fases en estos estados: HSC, etringita (sulfoaluminato de calcio) e hidróxido de calcio. También se muestra la presencia de los poros, que serán descritos en el siguiente acápite.

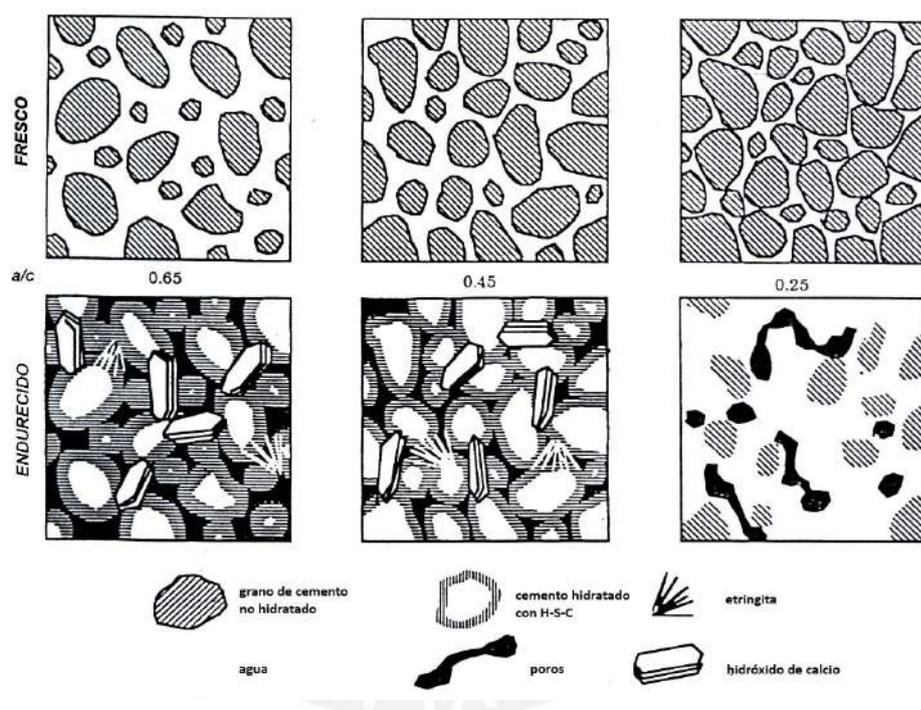


Figure 2.1: Composición de la pasta de cemento fresca y endurecida en la máxima hidratación para varias relaciones a/c (Portugal, 2007)

2.1.2 Poros en la pasta de cemento hidratada

La pasta de cemento es un material multifases, compuesto por partículas de cemento sin hidratar, embebidas en una matriz continua de pch, atravesada por poros de gel y poros capilares, ocupados por agua.

Según el tamaño de los poros del concreto se clasifican en macroporos, poros capilares y microporos (Sánchez de Guzmán, 2003); los primeros son las burbujas de aire atrapado naturalmente (poros de compactación) y/o a las burbujas incluidas intencionalmente

(poros de aire incluido). Los poros capilares son los poros que se encuentran por fuera del gel de cemento, son de forma variable (Fernández y Navas, 1975); y los últimos, los microporos están constituidos por los poros de la pasta hidratada y endurecida. Los constituyentes de la pch y agregados se caracterizan por tener diferente porosidad pero potencialmente similar permeabilidad dependiendo del tipo de agregado y relación agua/cemento. Cuando la pch se mezcla con los agregados, el concreto resultante tiene menor porosidad de la pasta de cemento original. Por ejemplo, el concreto que se mezcla con pasta de cemento que tiene 25% a 50% en volumen de los poros (dependiendo de a/c), tendrá una porosidad final entre alrededor de 7% y 15% en volumen (Hearn et al, 2006).

La figura mostrada a continuación grafica la clasificación de los poros del concreto y sus tamaños.

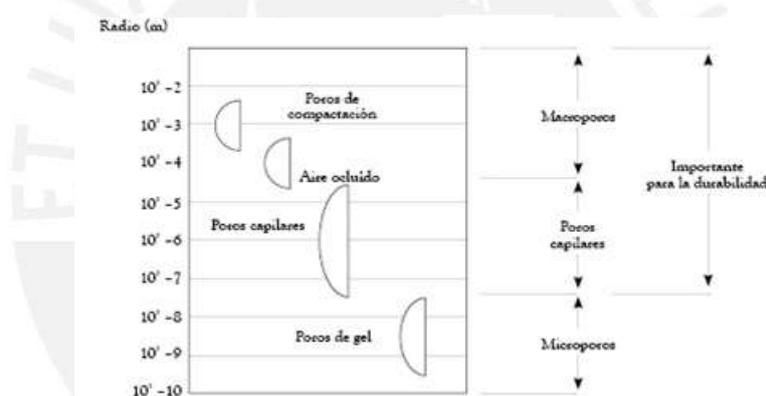


Figure 2.2: Esquema de la distribución del tamaño de poro en el concreto (Sanchez de Guzmán, 2003)

2.1.3 Zona de transición

La zona de transición es el eslabón más débil de la estructura del concreto. Aún para concretos de baja relación agua/cemento a edades tempranas, el volumen y tamaño de los poros en la zona de transición será más grande que en la masa del mortero. Cuando el concreto está recientemente compactado las partículas de agua se forman alrededor del agregado grueso produciendo una relación agua/cemento más alta en las cercanías del agregado grueso. Debido a ello es que los cristales de etringita e hidróxido de calcio cercanos al agregado grueso son más grandes por lo que forman una pasta más porosa en el pch (Mehta, 1998).

En la figura siguiente se muestra la zona de transición en el concreto en un diagrama representativo.

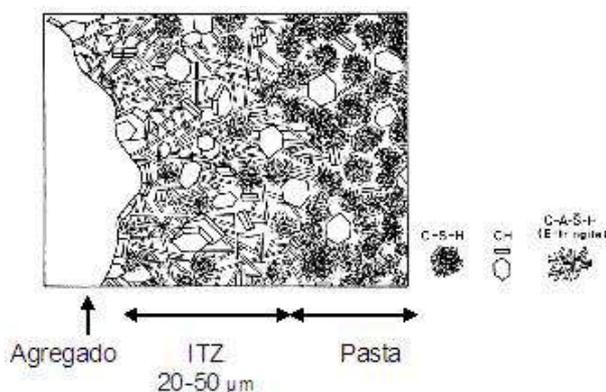


Figure 2.3: Representación gráfica de la zona de transición y de la pch en el concreto (Mehta, 1998)

2.2 Durabilidad del concreto

El agua es el agente principal tanto de la creación como de la destrucción del concreto, ya que causa muchos tipos de procesos de degradación física. Asimismo el agua es vehículo de transporte de iones agresivos, que pueden ser fuente de procesos de degradación química. Estos agentes causan su deterioro físico y químico afectando su durabilidad.

Según el comité 201 del ACI, la durabilidad del concreto se define como su resistencia a la acción del clima, a los ataques químicos, a la abrasión o cualquier otro proceso de deterioro. De tal manera que un concreto durable debe mantener su forma original, su calidad y sus propiedades de servicio al estar expuesto a su medio ambiente.

Cabe resaltar que la durabilidad depende de las propiedades del concreto y las prácticas de colocación, no obstante también es función de las condiciones ambientales que le rodean. Estas condiciones afectan su durabilidad del concreto pueden ser de origen físico o químico. En su mayoría estos factores se presentan en combinación manifestándose en la aparición de manchas, eflorescencias o fisuras (Niño, 2010)

2.2.1 Patologías en el concreto. Patología debido a fenómenos físicos

Los fenómenos físicos que intervienen contrariamente en la durabilidad del concreto incluyen el desgaste de la superficie o pérdida de masa debida a la abrasión, erosión, cavitación y agrietamiento debido a la cristalización de las sales en los poros, exposición a ciclos de humedecimiento y secado, y la exposición a temperaturas extremas como el congelamiento o el fuego.

2.2.2 Patología debido a fenómenos químicos

Los fenómenos químicos que intervienen son las reacciones de iones agresivos con el concreto que producen formación de productos expansivos en la pch, como es el caso de los ataques por sulfatos, ácidos y cloruros. También intervienen la expansión álcali-agregado y la corrosión del acero en el concreto.

1.-Ataque de cloruros y corrosión del acero en el concreto

La alta alcalinidad del hidróxido de calcio previene la corrosión del acero de refuerzo mediante la formación de una delgada película protectora de óxido de hierro en la superficie del metal. No obstante, si el concreto es permeable y permite que los cloruros solubles penetren en el concreto y si el agua y el oxígeno están presentes, entonces ocurrirá corrosión en el acero de refuerzo.

La capa de protección se destruye, se forma herrumbre y el incremento del volumen que causará agrietamiento y astillamiento del concreto (Neville, 1998) fenómeno que observamos en la figura a continuación.

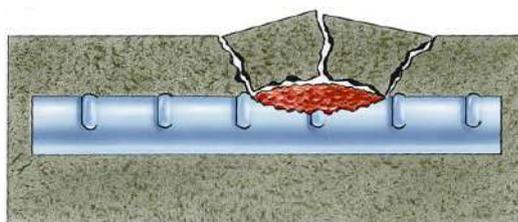


Figure 2.4: Mecanismo de generación de corrosión de acero de refuerzo ante cloruros, agua y oxígeno (Sencico, 2015)

2.-Ataque de sulfatos

Los sulfatos generan deterioro directamente al concreto, las principales fuentes de sulfatos que pueden atacar al concreto son: los suelos que contienen yeso mineral (sulfato cálcico), las aguas que contienen residuos industriales y, principalmente el agua de mar que contiene una concentración de aproximadamente 0,004 de sulfato de sodio (Vélez, 2010). El daño del concreto por sulfatos comienza en los bordes y las esquinas, seguido por grietas y astillamientos. El sulfato ocasiona la formación de yeso y etringita que provocan un aumento en volumen del 250%, lo cual produce grandes tensiones que desencadenan fisuras y desprendimientos superficiales del material.

La composición del concreto es determinante para el ataque de sulfatos, ya que los concretos con alto contenido de aluminato tricálcico (C3A) incrementan la posibilidad de este ataque.

Una estructura expuesta al agua del mar o la salpicadura del agua del mar es más vulnerable en la zona de marea o salpicadura, donde hay ciclos repetidos de mojado y secado y/o congelamiento y deshielo. La presencia de sulfatos y cloruros presentes en el agua de mar requiere el uso de concretos de baja permeabilidad para minimizar la corrosión del acero de refuerzo y el ataque de sulfatos (Hosmatka et al, 2004).

La figura a continuación representa el ataque químico de cloruros, sulfatos, CO₂ y ataques físicos debido al oleaje, en estructuras de concreto armado expuestas al ambiente marino.

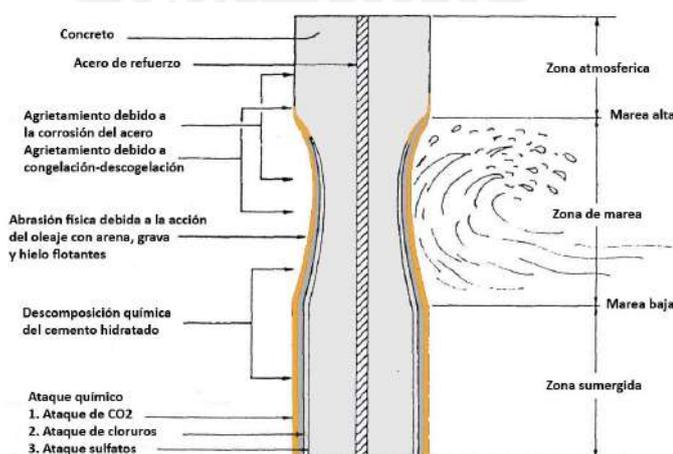


Figure 2.5: Representación del deterioro de un espécimen de concreto expuesto en un ambiente marino (Adaptado de Portugal, 2007)

3.-Carbonatación

La carbonatación del concreto es un proceso por el cual el dióxido de carbono del aire penetra en el concreto y reacciona con los hidróxidos de calcio para formar carbonatos (Verbeck, 1985). Esta reacción química destruye la habilidad del concreto de proteger el acero de reforzamiento contra la corrosión.

La carbonatación del concreto es el resultado de la reacción de los componentes hidratados del cemento con el CO₂ atmosférico. Como consecuencia de esta reacción, se reduce el pH de la solución del poro del concreto ($\text{pH} = 8$), desarrollándose una corrosión uniforme en el acero de refuerzo (Moreno et al, 2004).

La figura a continuación muestra acero de refuerzo expuesto y corroído debido a la carbonatación del concreto.



Figure 2.6: Daños por carbonatación del concreto (Ycaza, 2011)

4.-Ataque por ácidos

El ataque por ácidos se da especialmente en climas muy calientes, en los alcantarillados por acción de las bacterias que en agua negras generan gas de hidrogeno sulfuroso que se disuelve al agua. La resistencia al ataque de los ácidos se puede mejorar dejando secar el concreto antes de su exposición de manera que forme una capa de carbonato de calcio que bloquea los poros y reduce la permeabilidad en la superficie (Niño, 2010). La figura a continuación muestra concreto atacado por ácidos de las aguas negras de un alcantarillado.



Figure 2.7: Daños por ácidos en alcantarillados (Ycaza, 2011)

5.-Reacción álcali-agregado

La reacción álcali-agregado es un fenómeno que ataca al concreto endurecido elaborado con ciertos agregados que tienen presencia en el cuarzo, en su forma criptocristalina en rocas sedimentarias y álcalis provenientes principalmente del cemento, más humedad y temperatura. Esta reacción origina un gel alrededor de las partículas gruesas, que va hinchándose cada vez más, rompiendo la estructura interna del concreto y ocasionando fisuración y desintegración de la estructura (Pasquel, 1996).

La figura a continuación muestra la reacción álcali-agregado de un muro de concreto.



Figure 2.8: Daños por reacción álcali-agregado en muro (Pasquel, 1996).

Chapter 3

Permeabilidad

3.1 Definición y ley de Darcy

La permeabilidad se define como la propiedad que rige la velocidad de flujo de un fluido en un sólido poroso. El concepto de permeabilidad se introduce en la ley de Darcy, quien experimentalmente comprobó que el caudal de agua por unidad de superficie que atravesaba un sólido poroso era proporcional al gradiente de presión entre las dos caras del mismo (Amorós et al, 1992). La ley de Darcy generalizada (suponiendo que la dirección de circulación es horizontal) viene expresada por la ecuación (Mehta, 1998):

$$\frac{d_q}{dt} = \frac{K(\Delta H A)}{L\mu} \quad (3.1)$$

Donde:

- $\frac{d_q}{dt}$: velocidad de flujo del fluido
- μ : viscosidad del fluido
- Δ : gradiente de presión
- A : área de la superficie
- L : espesor del sólido

3.2 Permeabilidad de la pasta de cemento hidratado, los agregados y el concreto

La permeabilidad es una propiedad intrínseca de cada material. En el caso de la pasta de cemento hidratado, si la relación agua/cemento es alta y el grado de saturación es bajo, la pch tiene una alta porosidad capilar; ya que contiene un número relativamente

grande de poros grandes y bien conectados.

Otro de los componentes del concreto son los agregados, en donde la mayor parte de los poros en los agregados son en promedio mayores de 10 μ m mientras que la porosidad capilar en una pasta de cemento endurecida está en el rango de 10 a 100 nm (Mehta,1998). Se espera que la permeabilidad del agregado sea mucho más baja que la de la pasta de cemento típica, sin embargo en algunos casos no es así.

Por último, la permeabilidad del concreto depende principalmente de la relación agua/cemento (que determina el tamaño, el volumen y la continuidad de los vacíos capilares) y de las características del agregado (que influye en las micro grietas de la zona de transición entre el agregado y la pch). (Mehta, 1998). Estos factores significativos que afectan la permeabilidad, además de otros factores se encuentran descritos a continuación.

La siguiente tabla muestra una comparación de permeabilidad y porosidad capilar entre la pasta de cemento hidratado y agregados.

Tabla 3.1: Comparación entre la pch y rocas en función de la porosidad capilar y permeabilidad (Adaptado de Whiting)

Roca		Coeficiente de permeabilidad m/s (roca y pch)	Pasta de cemento (pch)	
Tipo	Porosidad %		Porosidad %	w/c
Arenisca	4.3	1.7×10^{-11}	30	0.71
Caliza	3.1	8.0×10^{-12}	28	0.66
Mármol fino	1.8	3.3×10^{-13}	15	0.48
Roca ígnea	0.6	3.5×10^{-14}	6	0.38

3.3 Relación entre porosidad y permeabilidad

La porosidad es la relación entre el volumen de poros saturables de agua con respecto al volumen total del concreto que incluye el volumen de sólidos y poros saturables como no saturables. Pero los poros saturables pueden ser continuos o discontinuos, solo los poros continuos (que unen dos superficies externas en el concreto) contribuyen con la permeabilidad.

La porosidad decrece con el tiempo debido a la continua hidratación del cemento. Además de los poros de aire grandes, la pasta de cemento hidratado contiene poros dentro de los sólidos hidratados y a menudo poros capilares dependiendo de la relación

agua/cemento y el grado de hidratación. Los canales continuos pueden formarse debido a la deficiencia de hidratación o debido a las microgrietas en la pch y en el mortero que rodea el agregado grueso.

Powers indica en sus trabajos que “observaron que el grado de permeabilidad es controlado principalmente por la porosidad capilar”. Durante la hidratación adicional, los poros capilares se convierten en discontinuos y la permeabilidad es controlada por los poros de gel. Dado que el sistema de poros capilares proporciona el camino para el ingreso de sustancias perjudiciales, la formación de un sistema de poros capilares discontinuos es altamente requerida. Powers también propuso que el curado húmedo del concreto endurecido pasado el punto de obtención de discontinuidad de poros capilares es de poco valor.

La tabla siguiente muestra la lista de los tiempos estimados requeridos para obtener pastas con poros discontinuos bajo condiciones estándar de laboratorio. El tiempo estuvo basado en hidratación de cemento tipo I.

Tabla 3.2: Tiempo requerido para obtener una estructura de poros discontinuos

Tiempo requerido para obtener una estructura de poros discontinuos		
a/c	Tiempo requerido	Grado aproximado de hidratación requerida
0.4	3 días	0.5
0.45	7 días	0.6
0.5	14 días	0.7
0.6	6 meses	0.95
0.7	1 año	1
>0.70	imposible	>1.00

3.4 Factores que influyen en la permeabilidad del concreto

1.-Relación agua/cemento: utilización de bajas relaciones a/c compatibles con la trabajabilidad del concreto. La relación a/c idónea también depende del TM del agregado utilizado, la granulometría, la relación agregado grueso/cemento y el uso de aditivos. Por esta razón, aunque se recomiendan relaciones agua cemento cercanas a 0.30, este valor puede variar ante la influencia de las variables anteriores. (Fernández y Navas, 2011)

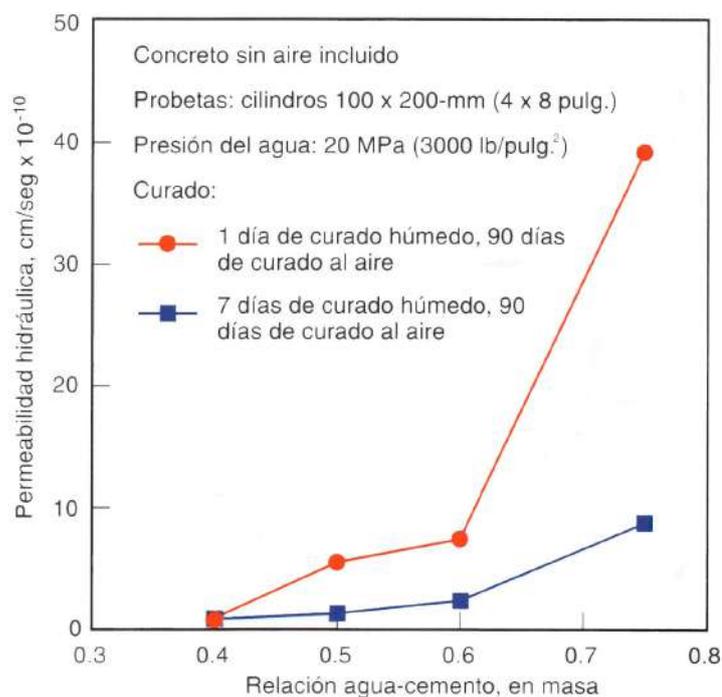


Figure 3.1: Relación entre permeabilidad al agua, relación agua/cemento y curado inicial (Adaptado de Whiting, 1988)

2.-Curado: la hidratación continua del cemento hace que el tamaño de los vacíos se reduzca. El concreto curado sin interrupción es menos permeable, no sólo por la no presencia de fisuras, sino también porque al evitar la evaporación temprana del agua de exudación, se previene la formación de redes capilares que permitan la libre circulación de agua (Niño, 2010) y que transporte iones agresivos. Para tener un curado adecuado se debe retener suficiente humedad por un tiempo determinado para que la hidratación (y reacciones puzolánicas, de ser el caso) ocurra.

3.-Tipo de cemento: este factor influye en la permeabilidad del concreto cuando se trata de cemento adicionados. Ceniza volante, escoria molida y puzolana natural generalmente reducen la permeabilidad y la absorción capilar del concreto bien curado (Kosmatka et al, 2004).

4.-Agregados finos y gruesos bien graduados: en el caso de la permeabilidad, no existen diferencias importantes entre el uso de agregados de forma redondeada o angulosa. Por otro lado respecto a la granulometría y el tamaño máximo, Crouch et al (2005) indican que granulometrías más uniformes y de tamaño máximo menor sí disminuyen la permeabilidad del concreto, pero que su efecto no es tan pronunciado

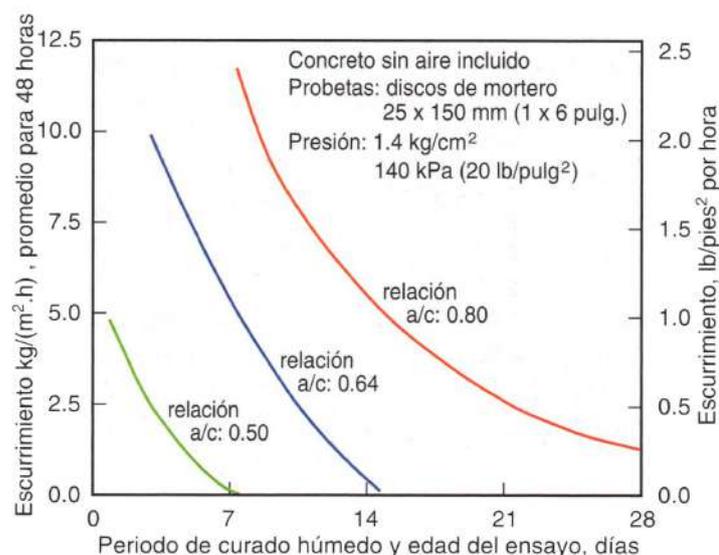


Figure 3.2: Efecto de la relación agua/cemento y la duración de curado sobre la permeabilidad del concreto (McMillian y Lyse 1929 y PCA Major Series 227)

como la ganancia en resistencia que se obtiene (Fernández y Navas, 2011). También el tamaño máximo del agregado influye en las microgrietas de la zona de transición entre el agregado y la pasta de cemento hidratado (Mehta, 1998).

5.-Relación agregado fino/agregado grueso: el porcentaje de agregado fino con respecto al agregado grueso (AF/AG) fue estudiado por Fernández et al (2001). En su estudio indican que valores entre 5% y 30% se recomiendan según el uso que se le quiera dar al concreto (Fernández y Navas, 2011). El límite inferior es recomendable para que la adherencia del pch con las partículas de agregado sea lo suficientemente fuerte como para evitar segregación y resistencias muy bajas. El límite superior es recomendable para generar resistencias mayores. Cabe agregar que el uso de agregado fino aumenta la trabajabilidad de las mezclas lo cual implica un beneficio en su manejo y colocación.

6.-Aditivos: Según el reporte ACI 212.3R-10 los principales métodos de impermeabilización se resumen en tres grandes grupos: hidrofóbicos (constituido por jabones, ácidos grasos, aceites vegetales, petróleo, entre otros que reducen la absorción capilar pero no la presión de agua), sólidos finamente divididos (constituido por químicos inertes, y llenantes químicos activos que reducen la permeabilidad del concreto al aumentar la densidad o llenar los poros) y materiales por cristalización (constituido por

químicos activos mezclados en cemento y arena que producen aumento de densidad de silicato de calcio hidratado que bloquean los poros y capilares del concreto). Estos aditivos se denominan reductores de permeabilidad los que influyen en menor permeabilidad, ya que reducen la tasa en la cual el agua bajo presión se transmite a través del concreto. No obstante, el uso de otros tipos de aditivos, como los plastificantes, es con el objetivo de mejorar resistencias y no de afectar en forma importante la permeabilidad.

7.-Tratamientos en la superficie: consiste en la impermeabilización con membranas adheridas, asfaltos y emulsiones en el caso de concreto expuesto a presión. No se hace mayor énfasis en este tratamiento pues no es de aplicación dentro del concreto sino exterior.

3.5 Factores que influyen en la absorción capilar del concreto

Según la ASTM C 1585 la absorción de agua de la superficie del concreto depende de muchos factores incluidos: proporciones de la composición del concreto (relación agua/cemento), presencia de adiciones y materiales suplementarios, la composición y características físicas del cemento y los agregados, el aire incorporado, el tipo y duración de curado, el grado de hidratación o edad, la presencia de micro grietas, la presencia de tratamientos superficiales y el método de colocación incluido la consolidación y el acabado final.

Chapter 4

Estado del arte de métodos de medición

Los factores que rigen el transporte de fluidos incluyen estructura de poros, contenido de humedad y condiciones de contorno. En el concreto el movimiento del agua está controlado por agrietamiento y las propiedades de la pch porque en mayoría de los casos, los agregados son impermeables. Por otra parte, el movimiento del agua en la pch es dificultoso por los cambios en su estructura de poros debido a la continua hidratación y el cambio de solubilidad de los materiales constituyentes. Los cambios en las condiciones de contorno, como la presión, temperatura, o gradiente químico afectará el estado del agua presente en la pch (Hearn et al, 2006). El ajuste a tales cambios, con el fin de restablecer el equilibrio termodinámico, se controla a través de mecanismos como los siguientes:

Capilaridad

Permeabilidad

Difusión

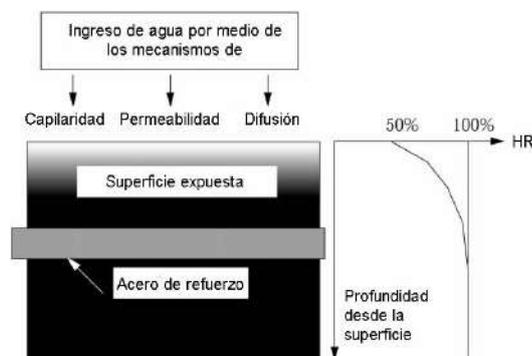


Figure 4.1: Propiedades de penetración de agua. Gráfica de humedad relativa % vs profundidad desde la superficie (Adaptado de Basheer, Nolan 2001)

No obstante los fenómenos más frecuentes de penetración de agua en el concreto son la capilaridad o absorción capilar y la permeabilidad (Hermida, 2013).

4.1 Métodos que miden la absorción capilar

4.1.1 ¿Qué miden?

La penetración de agua al interior del concreto basado en la propiedad de la absorción capilar se considera como el mecanismo más frecuente de transporte de agua en las estructuras de concreto armado (Hermida, 2013).

El coeficiente de absorción capilar se obtiene con la siguiente expresión:

$$\frac{Q}{A} = k\sqrt{t} \quad (4.1)$$

Donde:

- Q : cantidad de agua absorbida [cm³]
- A : área de la sección del espécimen [cm²]
- k : coeficiente de absorción del espécimen [cm/s^{1/2}]
- t : tiempo

Para determinar el coeficiente de absorción, Q/A es trazado en contraposición de \sqrt{t} (Tasdemir, 2003). Esta forma de expresar el tiempo permite visualizar más fácilmente el ritmo de penetración y permite calcular una pendiente o velocidad de avance del frente húmedo frente a la profundidad (Hermida, 2013).

4.1.2 ASTM C 1585 Método para medir la tasa de absorción de agua en concreto de cemento hidráulico

Este método es usado para determinar la tasa de absorción capilar del concreto por medio de la medición del incremento de masa del espécimen cuando la superficie del

concreto es expuesta al agua.

La absorción de agua se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$l = \frac{m_t}{Ad} \quad (4.2)$$

Donde:

- l : absorción [mm]
- m_t : cambio de masa del espécimen en gr, para un tiempo t
- A : área de la sección del espécimen [mm]
- d : densidad del agua [$\frac{g}{mm^3}$]

La tasa de absorción o sortividad es la pendiente que mejor se ajusta a la absorción l (mm) versus \sqrt{t} . La sortividad inicial es desde el primer minuto hasta las 6 horas descartando los que estén fuera de la pendiente. La sortividad secundaria mide la pendiente desde la primera hora hasta las 7 horas.

Esta diferenciación se debe a que el ritmo de absorción antes de las 6 horas es radicalmente diferente al ritmo de absorción a las 24 horas. Se sella la superficie lateral de cada espécimen con una material de sellado adecuado. Se hace lo mismo con el extremo del espécimen que no estará expuesto al agua, usando una película de plástico unida ligeramente.

Se coloca el dispositivo de soporte sobre el fondo de la bandeja y se llena la misma con agua hasta que el nivel de agua quede de 1mm a 3mm arriba del tope del dispositivo de soporte. Se coloca el espécimen sobre el dispositivo de soporte.

Se registra la masa a los intervalos: el primer punto debe ser a 60 ± 25 y el segundo punto a $5 \text{ min} \pm 10\text{s}$. Las mediciones subsecuentes deben ser a $10 \text{ min} \pm 2 \text{ min}$, 20 min , 30 min y 60 min . Luego se continúan las mediciones cada hora $\pm 5 \text{ min}$, hasta las 6 horas.

A continuación se muestra el diagrama esquemático del ensayo del espécimen.

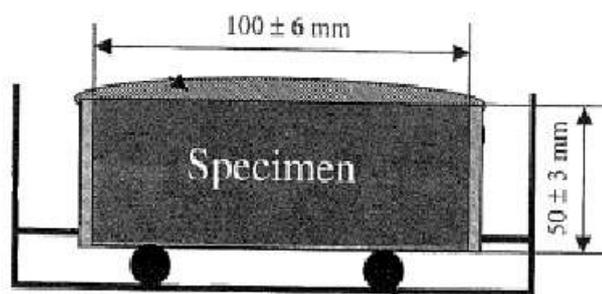


Figure 4.2: Esquema de ensayo por la ASTM C 1585

4.1.3 SIA 262-1 Anexo A Determinación de la permeabilidad al agua del concreto

Este método reglamentado por la Sociedad suiza de arquitectos e ingenieros (SIA) es ampliamente usado en Suiza y se encuentra alineado a las normativas europeas, siendo su última modificación en el año 2013.

Esta norma emplea un parámetro denominado absorción capilar q_w que se expresa en la forma $\frac{g}{m^2h}$. Puede expresarse en mm de penetración/hora. (Hermida 2013) Las muestras utilizadas son los cilindros (ϕ 50 mm, $h = 50$ mm). Se sumergen en 3 mm en agua durante 24 horas y luego se pesa. Se secan las muestras y se pesa hasta peso constante.

La imagen a continuación muestra el esquema de cómo se realiza el ensayo según esta normativa.

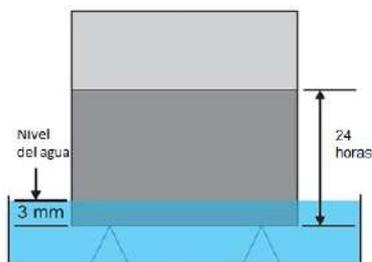


Figure 4.3: Esquema del Ensayo SIA 262-1 Anexo A

4.1.4 BS 1881-122: 2011 Ensayos de hormigón. Método para la determinación de la absorción de agua

Esta norma británica especifica un método para la determinación de absorción de agua de probetas de concreto de núcleos de una estructura, de concreto en prismas o cilindros donde se puede calcular la relación de superficie a volumen y donde hay punto en la muestra es de más de 50 mm de una superficie libre.

Los especímenes son curados en agua antes de someterse a la prueba, a los 30 y 90 días. Antes del ensayo, las probetas de hormigón se secan al horno masa constante a 105 ± 5 C durante 72 ± 2 horas y luego se almacenan en recipientes herméticos. Los especímenes se pesan antes de la inmersión y después de la inmersión durante 30 minutos (Kartini et al, 2010).

La absorción medida de cada muestra se calcula como el aumento de la masa resultante de la inmersión expresada como un porcentaje de la masa seca del espécimen.

Un factor de corrección de acuerdo con la relación de superficie a volumen de la muestra se obtendrá mediante la fórmula:

$$Factor\ de\ corrección = \frac{volumen(mm^3)}{rea\ superficial(mm^2) \times 12.5} \quad (4.3)$$

En el caso de prismas con un diámetro de $75\text{ mm} \pm 3\text{ mm}$ el factor de corrección deberá obtenerse a partir de la curva mostrada en la Figura 15 de acuerdo con la longitud del espécimen.

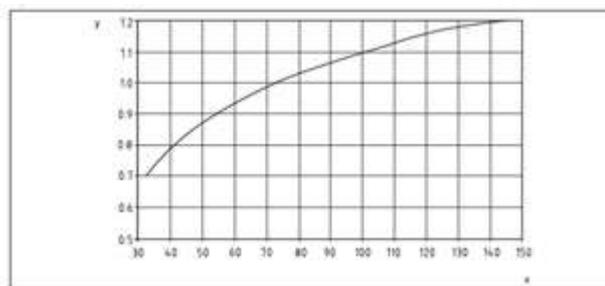


Figure 4.4: Curva del factor de corrección por tamaño de muestra

El producto de este factor de corrección y de la absorción medida será la "absorción corregida", siendo ésta la absorción equivalente de una núcleo de 75 mm de diámetro con una longitud de 75 mm.

4.1.5 DIN 52 617 Medición de la absorción del agua

La medición de la absorción de agua según la norma alemana DIN 52 617 se realiza en probetas preparadas por separado con un tamaño mínimo especificado.

Cilindros prismáticos de hormigón de 70 mm de diámetro y 110 mm de altura se preparan y prueban. Ocho días antes de la prueba los especímenes se retiraron del tanque de curado y se pintaron en las caras laterales del prisma con impermeabilizante con al menos dos capas para que sea impermeable al agua, mientras que la cara de succión y la cara opuesta se quedaron sin pintar.

Luego las muestras se acondicionaron en una atmósfera estándar hasta alcanzar masa constante. Las muestras se pesaron antes de la inmersión y, posteriormente, después en intervalos de 10 min, 30 min, 1 hora de sumergido y luego cada hora hasta que la sexta hora y después de 24 horas.

Las muestras se colocaron en un soporte con malla de alambre en una bandeja que contiene agua de modo que el nivel de agua se mantenga 10 ± 1 mm por encima de la cara de succión como se muestra en la figura a continuación (Kartini et al, 2010).



Figure 4.5: Especímenes colocados sobre malla de alambre con la cara de succión bajo agua (Kartini et al, 2010)

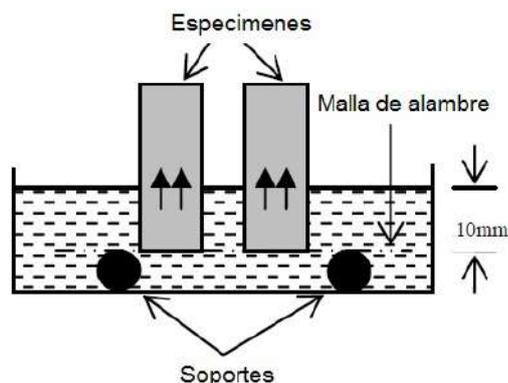


Figure 4.6: Disposición esquemática del ensayo (Kartini et al, 2010)

4.1.6 ASTM C 642 Determinación de la densidad, la absorción de agua y los vacíos en el concreto endurecido

Este método mide la absorción de agua y vacíos en el concreto endurecido. Se toma valores de masa seca al horno (A). Luego se registra valores de masa saturada después de inmersión al agua (B) después de 24 horas con superficie saturada superficialmente. Entonces se registra valores de masa saturada superficialmente seca después de ebullición en agua (C) por un período de 5 horas. Por último se toman valores después de su inmersión en agua y ebullición y se determina su masa sumergida aparente (D). Se halla el volumen de vacíos mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen de vacíos} = \frac{C - A}{C - D} \times 100 \quad (4.4)$$

4.2 Métodos para medir la permeabilidad

4.2.1 ¿Qué miden?

La permeabilidad del concreto se mide a partir de una condición de presión hidrostática sobre una de sus caras y corresponde a la velocidad o al caudal de agua que atraviesa el material debido justamente a la diferencia de presión entre la cara en contacto con el agua y la que no está (Hermida, 2013).

En los laboratorios de concreto el dispositivo para medir permeabilidad no es tan frecuente. Esto se debe principalmente a las pocas especificaciones que existen referentes

a la permeabilidad al agua del concreto. El comité ACI 350 “Código de Requerimientos para estructuras de concreto de ingeniería ambiental “que expone los métodos de diseño de estructuras de concreto reforzado para contener líquidos o gases, en lo que se refiere al concreto debería mencionarse la resistencia a la compresión, la relación A/C y algunas características de composición. La resistencia a la penetración al agua, permeabilidad o el coeficiente de Darcy del material, ni siquiera se mencionan en este comité donde aparecen todas las previsiones para hacer tanques de agua. (Hermida, 2013)

Por otro lado el comité ACI 318-08 define el ambiente categoría P, como un entorno donde el agua se considera un agresor. Así en el caso de mayor exposición P1, debe contarse con un concreto de “baja” permeabilidad. Un tanque que contiene agua se considera como el ejemplo para la situación P1, y donde como requisito para el concreto solo se menciona una resistencia mínima de 28 MPa y una relación A/C máxima de 0,5. Es así que está ausente cualquier especificación referente a permeabilidad al agua del concreto.

En ausencia de un método de prueba estándar, las técnicas ideadas para estudiar la permeabilidad del hormigón pueden clasificarse sobre la base de: permeámetro, carga axial y el instante en que la permeabilidad es medida (Hoseini et al, 2009).

Nos centraremos en el estudio de la medición de la permeabilidad al agua del concreto mediante ensayos normalizados.

4.2.2 EN 12390-8:2000 Profundidad de penetración de agua bajo presión

Esta norma británica mide la profundidad de penetración de agua en muestras de hormigón sometida a 0,5 MPa (72,5 psi, 5 bar) de presión hidrostática durante un período de tres días. Se realizan especímenes de concreto curados durante 28 días. Después del curado, las muestras se colocan en el dispositivo. Los soportes de muestra están abiertos en ambos extremos, con un extremo sometido a la presión hidrostática. Después de tres días, las muestras se retiran del aparato de ensayo. Por último se mide la profundidad máxima de penetración de agua en la muestra.

La figura a continuación muestra el dispositivo que se emplea para realizar este ensayo. Se muestra el mecanismo de generación de presión, el dispositivo con 6 soportes de muestra.



Figure 4.7: Aparato de ensayo. Fuente propia (Foto del equipo Form Test del LEDI PUCP)

La siguiente figura muestra la forma de medición de la penetración máxima del agua en mm luego de que la probeta ha sido partida en dos mediante el ensayo a compresión diametral.



Figure 4.8: Determinación de la profundidad de penetración de agua

Este ensayo evalúa la resistencia del concreto contra la penetración de agua bajo presión hidrostática.

4.2.3 Método Torrent- SIA 262-1 Anexo E

El método Torrent incluido en la norma suiza SIA 262-1 Anexo E es empleado para medir el recubrimiento de hormigón permeabilidad al aire de forma no destructiva. Es utilizado para especificar y controlar la calidad recubrimiento de hormigón en una estructura acabada.

El diseño del dispositivo se grafica en la figura a continuación. Sus dos características distintivas son:

- Una célula de doble cámara, basado en el principio de anillo de guarda. Se compone de una curvatura interna / y una cámara e externo.
- Un regulador de presión de membrana, cuya función es mantener siempre ambas cámaras a la misma presión ($P_i = P_e$).

En la figura a continuación se muestra la célula de doble cámara. El regulador de presión, cámaras exterior e interior y bomba de vacío además de fotos del equipo.

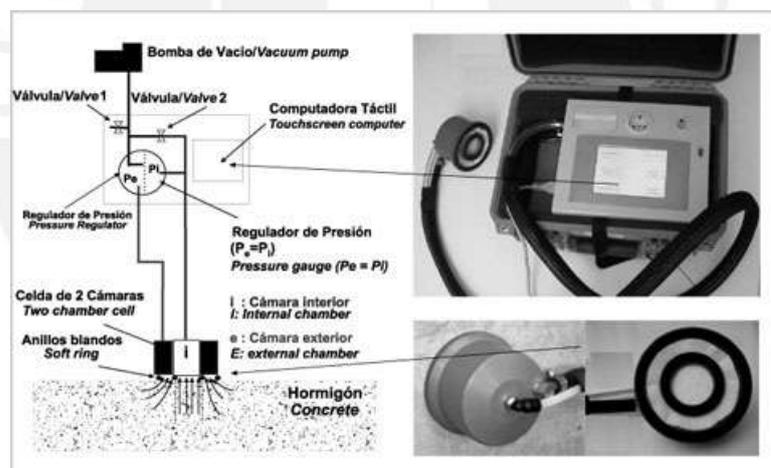


Figure 4.9: Esquema y detalles del equipo que usa el Método Torrent (Torrent, 2010)

El microprocesador almacena la información y calcula automáticamente el valor del coeficiente de permeabilidad al aire kT (m^2), es decir visualizador al final de la prueba. El final de la prueba se produce cuando la presión de la cámara interna p_i se eleva por 20 mbar o, en casos de hormigón altamente permeable, después de 360 s. desde el comienzo de la prueba. En consecuencia, dependiendo de la permeabilidad del hormigón, la prueba puede tomar de 2 a 6 minutos. El microprocesador es muy capaz de almacenar los datos de las pruebas (Ebensperger y Torrent, 2010).

4.2.4 CRC C 163 92 Método estándar para permeabilidad al agua del concreto usando celda triaxial

Este método de ensayo Normado por el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos cubre el procedimiento para determinar la permeabilidad al agua del hormigón utilizando una triaxial (o Hassler) celular. Los cálculos de la permeabilidad se basan en la ecuación de Darcy para flujos en un medio permeable.

Se realiza el establecimiento de una condición de flujo en estado estacionario en un espécimen cilíndrico de concreto alojado en una celda de permeabilidad triaxial. Una presión gradiente se mantiene a través de la muestra con un extremo expuesto a la presión ambiente y el extremo opuesto a la presión de prueba de conducción. Una presión de confinamiento radial se mantiene alrededor de la muestra. El efluente se recoge, y la tasa de flujo de volumen se determina. Una vez que se obtienen condiciones de flujo en estado estacionario, la permeabilidad se calcula.

Se debe tener en cuenta que la presión de confinamiento no será mayor de la mitad de la resistencia a la compresión no confinada estimado del espécimen de concreto.

La figura a continuación muestra el esquema de una celda triaxial con la muestra de concreto, así como su mecanismo de ingreso de agua y presión.

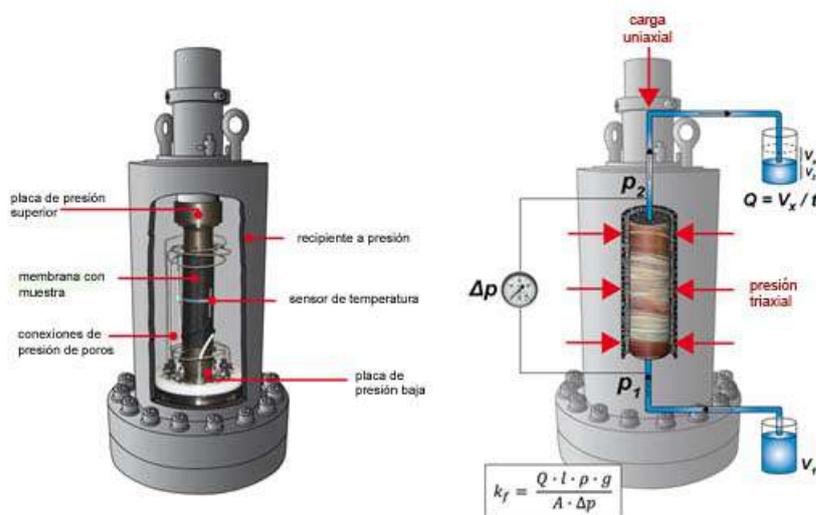


Figure 4.10: Esquema de una celda triaxial (Adaptado de Einsiedl, 2015)

4.2.5 DIN 1048 Parte 5 Ensayo en concreto de permeabilidad al agua

Esta norma alemana da una medida de la resistencia del concreto contra la penetración de agua a los 28 días después de la elaboración de especímenes. Los especímenes de concreto son expuestos a una presión de agua de $0,5 \text{ N} / \text{mm}^2$ (72,5 psi o 5 bar) durante un período de tres días. Las muestras se consideran que fallaron si el agua penetra a través de la superficie opuesta o por medio de los lados.

Inmediatamente después del término del ensayo, las muestras se cortan y se mide la profundidad de penetración de agua. La siguiente gráfica muestra el esquema de la realización del ensayo.

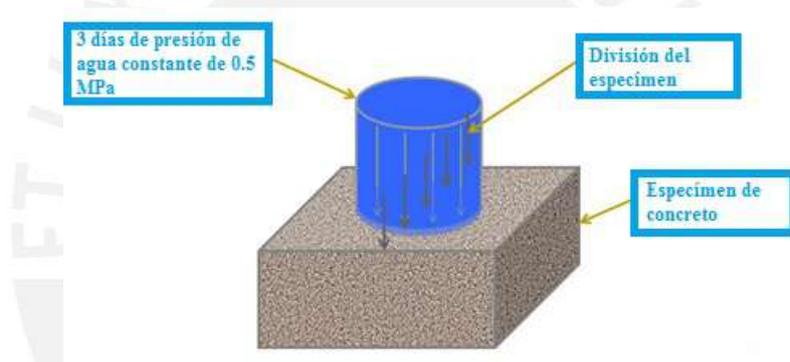


Figure 4.11: Esquema de realización de ensayo de DIN 1048

4.3 Tabla resumen de métodos normalizados

A continuación se muestra un resumen de los métodos normalizados presentados en el presente capítulo.

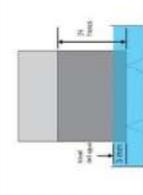
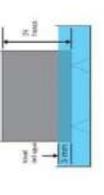
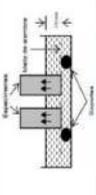
Medición	Norma	Observaciones	Grafico
Absorción capilar	ASTM C 1585 Método para medir la tasa de absorción de agua en concreto de cemento hidráulico	Determina la tasa de absorción capilar del concreto por medio de la medición del incremento de masa del espécimen cuando la superficie del concreto es expuesta al agua. La tasa de absorción o sorptividad es la pendiente que mejor se ajusta a la absorción I (mm) versus \sqrt{t} .	
	SIA 262-1 Anexo A Determinación de la permeabilidad al agua del concreto	Emplica un parámetro denominado absorción capilar q_{cap} que se expresa en la forma $\frac{q}{m^2 \times h}$.	
	BS 1881-122: 2011 Ensayos de hormigón. Método para la determinación de la absorción de agua	La absorción medida de cada muestra se calcula como el aumento de la masa resultante de la inmersión expresada como un porcentaje de la masa seca del espécimen. Un factor de corrección de acuerdo con la relación de superficie a volumen de la muestra se obtendrá con la siguiente fórmula: $\text{Factor de corrección} = \frac{\text{Área superficial (mm}^2\text{)} \times 12.5}{\text{volumen (mm}^3\text{)}}$	
	DIN 52 617 Medición de la absorción del agua	Las muestras se colocan en un soporte con malla de alambre en una bandeja que contiene agua de modo que el nivel de agua se mantenga 10 ± 1 mm por encima de la cara de succión como se muestra en la figura	
	ASTM C 642 Determinación de la densidad, la absorción de agua y los vacíos en el concreto endurecido	Este método mide la absorción de agua y vacíos en el concreto endurecido. Se calcula el volumen de espacios vacíos en base a la masa del espécimen sumergido a los 24 horas, en agua en ebullición por 5 horas y su masa sumergida aparente.	
Permeabilidad	EN 12390-8:2000 Profundidad de penetración de agua bajo presión/ DIN 1048 Parte 5 Ensayo en concreto de permeabilidad al agua	Mide la profundidad de penetración de agua en muestras de hormigón sometidas a 0.5 MPa (72.5 psi, 5 bar) de presión hidrostática durante un período de tres días.	
	Método Torrent-SIA 262-1 Anexo E	Seve para medir el recubrimiento de hormigón permeabilidad al aire de forma no destructiva. El microprocesador almacena la información y calcula automáticamente el valor del coeficiente de permeabilidad al aire K_1 (m ²)	
	CRC C 163 92 Método estándar para permeabilidad al agua del concreto usando celda triaxial	Determina la permeabilidad al agua del hormigón utilizando una triaxial (o Hassler) celular. Los cálculos de la permeabilidad se basan en la ecuación de Darcy para flujos en un medio permeable. Se debe tener en cuenta que la presión de confinamiento no será mayor de la mitad de la resistencia a la compresión no confinada estimado del espécimen de concreto.	

Figure 4.12: Tabla resumen de métodos de medición de absorción capilar y permeabilidad

Chapter 5

Materiales

5.1 Cementos

La tesis contempla la utilización de un tipo de cemento:

Cemento portland Tipo I: cemento de uso común en Perú. Tiene la propiedad de tener mayor resistencia inicial y rápido desencofrado.

5.2 Agregado grueso

El agregado grueso elegido es piedra chancada de TM 1". Se realizaron ensayos para determinar las propiedades físicas del agregado grueso, los cuales son los siguientes:

Tabla 5.1: Propiedades físicas del agregado grueso

Propiedades físicas del agregado grueso
NTP 400.012 - Granulometría
ASTM C29 - Peso unitario
ASTM C127-12 – Peso específico, humedad de absorción(W_a) y natural (W_o)

La siguiente tabla muestra el resumen de los ensayos para determinar las características físicas del agregado grueso.

Tabla 5.2: Tabla resumen de características físicas de agregado grueso

Piedra (1)	
T. M. N.	1 "
M. F.	6.63
P. U. comp. (gr/cm^3)	1.46
P. U. suelto (gr/cm^3)	1.37
P. E. seco (gr/cm^3)	2.71
P. E. sss (gr/cm^3)	2.72
Wa (%)	0.51

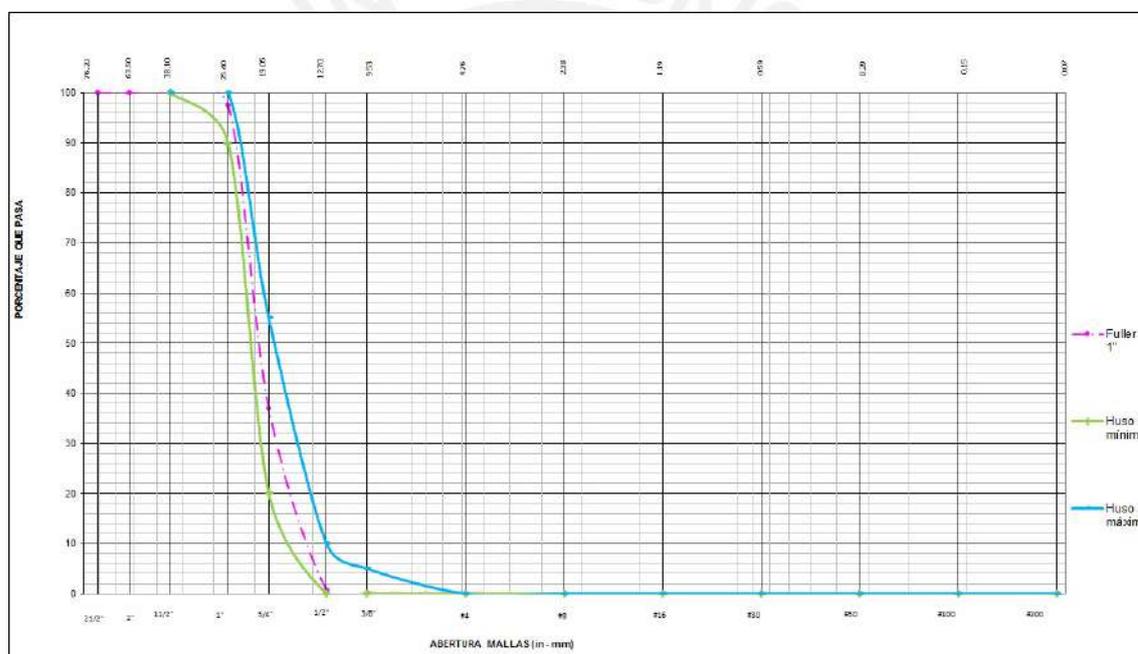


Figure 5.1: Curva granulométrica de agregado grueso Huso 5

5.3 Agregado fino

Los ensayos del agregado fino son los mismos del agregado grueso, no obstante los procedimientos varían así como la cantidad de muestra a ensayar. Los procedimientos están indicados en las normas siguientes:

NTP 400.012 - GRANULOMETRÍA

ASTM C29 - PESO UNITARIO

ASTM C128-12 – PESO ESPECÍFICO, HUMEDAD DE ABSORCIÓN (W_a) Y NATURAL (W_o)

La siguiente tabla muestra el resumen de los ensayos para determinar las características físicas del agregado fino.

Tabla 5.3: Tabla resumen de características físicas de agregado fino

Arena (2)	
T. M. N.	—
M. F.	2.8
P. U. comp. (gr/cm^3)	1.68
P. U. suelto (gr/cm^3)	1.53
P. E. seco (gr/cm^3)	2.65
P. E. sss (gr/cm^3)	2.685
Wa (%)	1.33

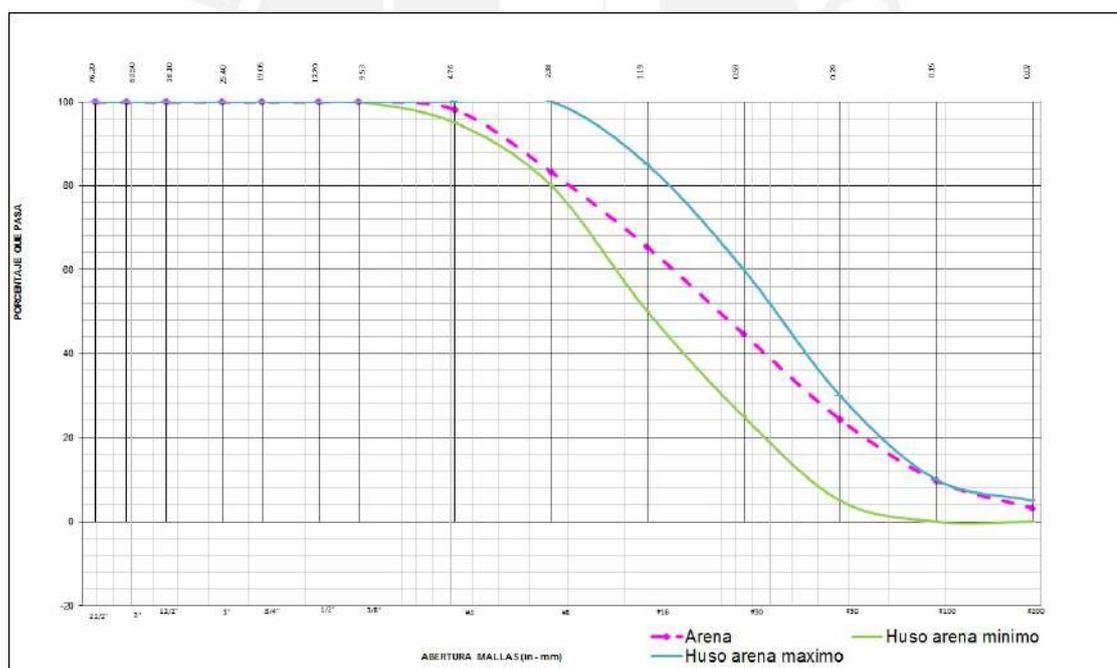


Figure 5.2: Curva granulométrica de agregado fino comparado con requerimientos de graduación (huso) del agregado fino ASTM C33

5.4 Aditivos

La presente tesis contempla la utilización de un aditivo:

Plastificante: Aditivo que brinda mayor trabajabilidad al concreto así como también

trabaja como reductor de agua. Se usa dosificación de 0.5% a 1.5% del peso del cemento según dosificación recomendada por el fabricante.



Chapter 6

Metodología

Se siguió la siguiente metodología dividida en tres etapas, las cuales son:

Primera Etapa – Ensayos de agregados

En esta etapa se evaluaron las propiedades del agregado grueso huso 5 y la arena gruesa. Se halló la granulometría, peso específico y unitario, humedad absoluta y relativa con la finalidad de tener un buen entendimiento de las características de los insumos a utilizar para las probetas de concreto.

Segunda Etapa – Ensayos preliminares

Se evaluaron las diferentes mezclas seleccionadas para el alcance del proyecto de investigación. Se trabajó con un rango de relaciones agua cemento a/c desde 0.45 hasta 0.7, haciendo los ajustes necesarios para que cumplan las especificaciones requeridas en el diseño y el Slump requerido.

Tercera Etapa – Ensayos definitivos

Después de realizadas la pruebas preliminares se llegó a nueve tipos de muestras, controlando en cada una de ellas un Slump de 5” - 6”. En estas probetas definitivas se realizaron los ensayos de permeabilidad y compresión.

6.1 Ensayos en el concreto en estado fresco

Estos ensayos se harán para controlar el estado y propiedades iniciales del concreto inmediatamente después del vaciado, es decir el concreto en estado fresco. Es muy importante realizarlos para estimar interrelaciones cuantitativas con la unidad cúbica de material a emplear, para obtener un concreto con propiedades requeridas. Así mismo, mediante este proceso de control se vaciaron probetas de control inicial para verificar el correcto diseño de mezclas y proporciones para luego vaciar las probetas definitivas. Estos ensayos no excedieron de 15 minutos a partir del momento de vaciado. Los parámetros de control se realizaron según las normas ASTM indicadas en la tabla.

Tabla 6.1: Parámetros de control en estado fresco

Parámetros de control en estado fresco según ASTM		
Medición de asentamiento	5" a 6"	ASTM C 143
Contenido de aire	1% a 2%	ASTM C 138
Temperatura del aire	De acuerdo a T del ambiente	ASTM C 1064

6.2 Diseño de mezcla para diferentes relaciones agua/cemento

6.2.1 Planificación

Primero, se usaron los datos de la caracterización de los agregados grueso y fino para hacer el diseño de mezcla preliminar.

Segundo, se realizó la corrección del día de mezcla con la humedad natural.

Por último, se realizaron 0.03 m³ de concreto correspondientes al diseño de mezcla y se realizaron los ensayos detallados en el título anterior.

6.2.2 Diseño de mezcla según Fuller

Creado en el año 1907 en los EUA, el método de dosificación de Fuller es uno de los más clásicos y fáciles de aplicar cuando conocemos la cantidad de cemento que deberá tener el concreto. Este método se utiliza en dosificaciones con más de 300 kg de cemento por metro cúbico de concreto, para tamaños máximos del agregado grueso comprendido entre 20mm (3/4") y 50mm (2") y agregados redondeados.

El diseño del concreto para las probetas de prueba se realizó mediante este método debido a que se eligió piedra TM 1", agregados redondeados y se sabía la cantidad de cemento, ya que se tenía una relación w/c determinada para cada mezcla. La relación arena/agregado grueso en volumen absoluto, se determina gráficamente:

- Se dibujan las curvas granulométricas de los 2 agregados.
- En el mismo papel, se dibuja la parábola de Fuller (Ley de Fuller).
- Por la malla N° 4 trazamos una vertical la cual determinará en las curvas trazadas 3 puntos.

A= % Agregado fino que pasa por la malla N° 4.

B= % Agregado grueso que pasa por la malla N° 4.

C= % Agregado ideal que pasa por la malla N° 4.

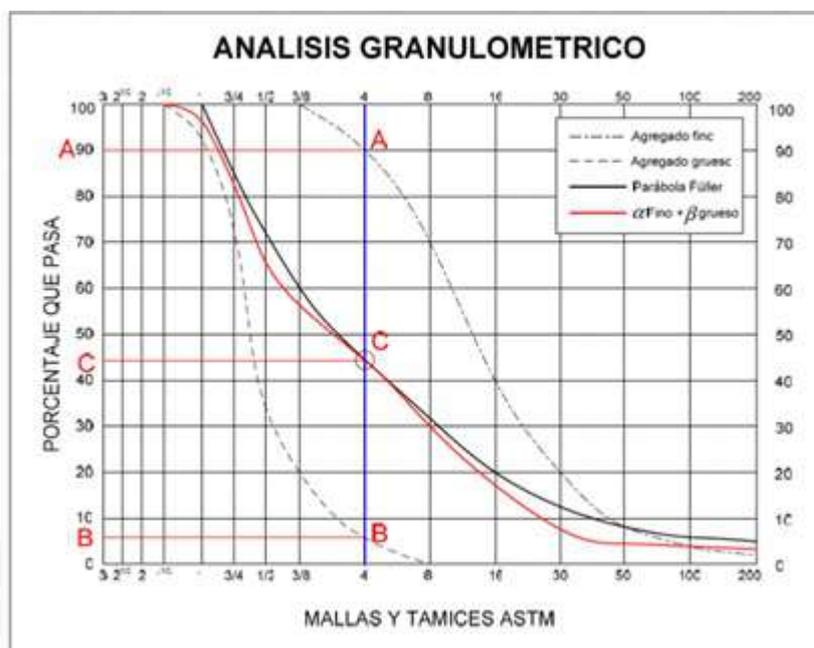


Figure 6.1: Ejemplo de determinación de las proporciones de agregado fino y grueso (López, 2015)

La figura nos muestra un ejemplo de determinación de las proporciones de agregado fino y agregado grueso en relación al volumen total de agregados por metro cúbico. Se hallan los porcentajes de agregado fino y grueso en la mezcla mediante las siguientes fórmulas:

$$a = \frac{C - B}{A - B} \times 100 \quad (6.1)$$

$$b = 100 - a \quad (6.2)$$

Donde “a” es el % en volumen absoluto del agregado fino dentro de la mezcla de agregados y b es el % en volumen absoluto del agregado grueso dentro de la mezcla de agregados.

Los valores hallados de a y b son los iniciales con los que se debe graficar la curva que produce la mezcla de ambos junto con al de Fuller 1”. Se debe mostrar que el área de intersección de ambas en la parte de abajo de la curva de Fuller de 1” es la misma que el área hacia arriba. De lo contrario de los valores de a y b se deben tabular de

manera que nos de estos valores aproximados.

En la tabla a continuación se muestran los valores del agregado global con los valores iniciales de arena y piedra.

Tabla 6.2: Valores iniciales según método de Füller de arena y piedra al 60 y 40% respectivamente.

M.F. MEZCLA:					Arena	x	98			
MEZCLA DE AGREGADOS					4.524	5.230	0			
					100		0.1			
							43.3			
							49.1			
						x=	0.5			
Malla (in)	Piedra % pasa	Arena % pasa	0.40 0.60	Malla (mm)	Fuller 2"	Fuller 1 1/2"	Fuller 1"	Fuller 3/4"	Fuller 1/2"	
2.5000	100	100	100.00	63.50	100	100	100.0	100	100	
2.0000	100	100	100.00	50.80	100	100	100.0	100	100	
1.5000	100	100	100.00	38.10	86.6	100	100.0	100	100	
1.0000	97	100	98.99	25.40	70.7	81.6	100.0	100	100	
0.7500	37	100	74.80	19.05	61.2	70.7	86.6	100	100	
0.5000	1	100	60.30	12.70	50	57.7	70.7	81.6	100	
0.3750	0	100	60.07	9.53	43.3	50	61.2	70.7	86.6	
0.1875	0	98	58.91	4.76	30.6	35.3	43.3	50	61.2	
0.0938	0	83	49.96	2.38	21.6	25	30.6	35.3	43.3	
0.0469		65	39.23	1.19	15.3	17.7	21.6	25	30.6	
0.0234		45	26.81	0.60	10.8	12.4	15.2	17.6	21.6	
0.0117		24	14.62	0.30	7.6	8.8	10.8	12.5	15.3	
0.0059		10	5.86	0.15	5.4	6.3	7.7	8.8	10.8	
0.0029		3	1.90	0.07	3.8	4.4	5.4	6.2	7.6	

En la gráfica a continuación se muestra el agregado global y la curva de Füller 1" mediante estas curvas se puede observar que el área de arriba es menor al área de abajo. Por lo tanto se debe proceder a tabular.

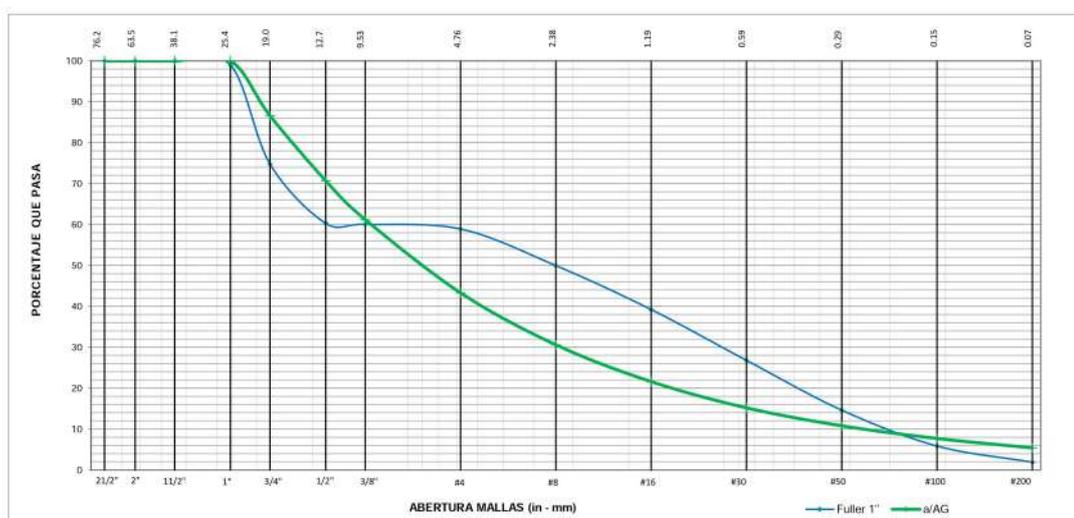


Figure 6.2: Curvas de agregado global 40-60 y Füller 1”

De acuerdo a las gráficas granulométricas y el cuadro adjunto que muestra las tabulaciones de valores de “a” y “b” óptimos, se halló un valor de arena de 0.50 y de agregado grueso de 0.50.

Tabla 6.3: Tabulación de los valores a y b mediante el Método de Füller.

M.F. MEZCLA: 4.524 M.F. Füller 1" 5.230						Arena		x		98	
MEZCLA DE AGREGADOS						Piedra		(1-x)		0.1	
						FULLER:		x=		43.3	
						x=		0.5		49.1	
Malla (in)	Piedra % pasa	Arena % pasa	0.50	0.40	0.45	Malla (mm)	Fuller 2"	Fuller 1 1/2"	Fuller 1"	Fuller 3/4"	Fuller 1/2"
2.5000	100	100	100.00	100.00	100.00	63.50	100	100	100.0	100	100
2.0000	100	100	100.00	100.00	100.00	50.80	100	100	100.0	100	100
1.5000	100	100	100.00	100.00	100.00	38.10	86.6	100	100.0	100	100
1.0000	97	100	98.74	98.99	98.87	25.40	70.7	81.6	100.0	100	100
0.7500	37	100	68.49	74.80	71.64	19.05	61.2	70.7	86.6	100	100
0.5000	1	100	50.38	60.30	55.34	12.70	50	57.7	70.7	81.6	100
0.3750	0	100	50.08	60.07	55.08	9.53	43.3	50	61.2	70.7	86.6
0.1875	0	98	49.11	58.91	54.01	4.76	30.6	35.3	43.3	50	61.2
0.0938	0	83	41.64	49.96	45.80	2.38	21.6	25	30.6	35.3	43.3
0.0469		65	32.69	39.23	35.96	1.19	15.3	17.7	21.6	25	30.6
0.0234		45	22.34	26.81	24.57	0.60	10.8	12.4	15.2	17.6	21.6
0.0117		24	12.18	14.62	13.40	0.30	7.6	8.8	10.8	12.5	15.3
0.0059		10	4.88	5.86	5.37	0.15	5.4	6.3	7.7	8.8	10.8
0.0029		3	1.58	1.90	1.74	0.07	3.8	4.4	5.4	6.2	7.6

La curva de la mezcla de “a” y “b” junto con la curva de Füller 1” se muestra en el siguiente gráfico:

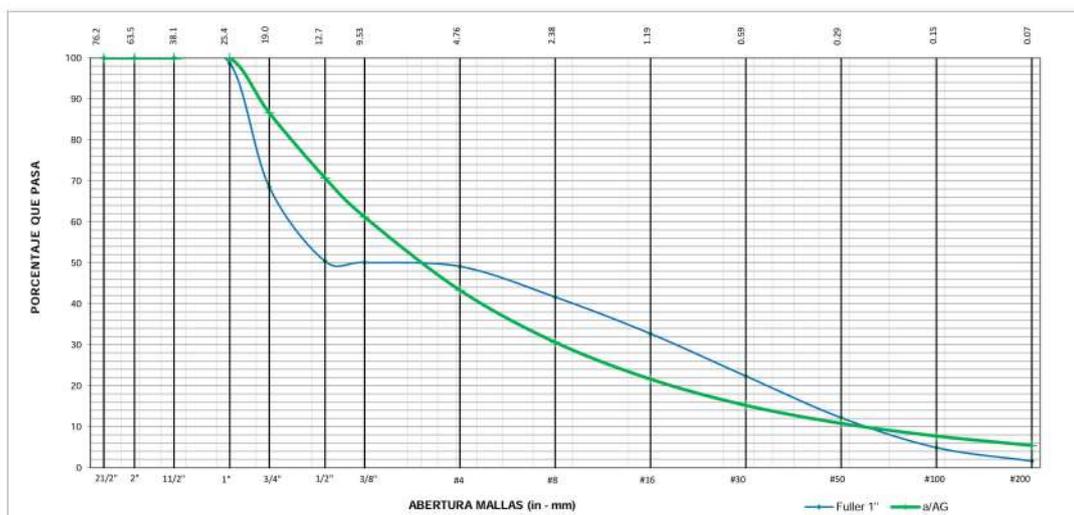


Figure 6.3: Curva granulométrica de la mezcla a-b con la curva de Füller 1"

Antes de realizar las mezclas de prueba con aditivo plastificante/reductor de agua se realizó mezcla de prueba con concreto patrón con cemento tipo I. Este concreto patrón se realizó con el objetivo de evaluar la trabajabilidad y el contenido de aire. Para un concreto de relación a/c 0.5 el slump fue de 10.15 cm y 2% de aire. Según estos resultados el ingreso de aire era el adecuado. No obstante, el asentamiento que nos resultó fue por corte lo cual invalidó el resultado obtenido. A continuación se muestra una foto del asentamiento por corte que se produjo.



Figure 6.4: Asentamiento por corte del concreto patrón. (Fuente propia)

Entonces, se hizo otro concreto patrón variando el porcentaje de arena de 0.5 a 0.55 para lograr un mayor poder ligante de la pasta de cemento hidratado que evite el

corte. Las propiedades del concreto fresco fueron las siguientes:

Tabla 6.4: Propiedades en estado fresco de concreto patrón segunda mezcla

Cemento	Relación a/c	Slump (cm)	Aire %
Tipo I	0.5	12.7	2

El asentamiento fue normal sin desprendimiento de sus elementos, por lo que esta dosificación quedó como el concreto patrón.

Luego de realizado el concreto patrón se hicieron mezclas de prueba con aditivo plastificante/reductor de agua. Entonces, se tuvo en cuenta que el aditivo le da mayor trabajabilidad, es por eso que para las mezclas de prueba de concreto con aditivo se disminuyó la cantidad de agua para llegar al asentamiento deseado.

Las primeras mezclas de prueba resultaron con asentamiento de 19 cm, mayor a 15.24 +/- 2.54 cm (asentamiento requerido) por ello se corrigió el diseño de mezcla por slump disminuyendo de 200kg a 190kg por m³. Al realizar estas últimas correcciones se obtuvieron resultados satisfactorios.

6.3 Diseño de mezcla definitivo para probetas

En base a los resultados de los diseños de mezcla de prueba, se realizaron las dosificaciones de cada relación agua/cemento con cemento tipo I .

Se fabricaron 10 probetas en tres mezclas para cada relación a/c. Se utilizó una mezcladora de 100 litros de capacidad, sin embargo para la cantidad de probetas necesarias por cada tanda se utilizó 75 litros de su capacidad. Las mezclas se realizaron según la norma NTP 339.183 2003 Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de hormigón (concreto) en el laboratorio. Se realizaron las mezclas los lunes de cada semana debido a la secuencia de ensayo que se explicará más adelante. Las fechas y hora de vaceado así como la cantidad de aditivo utilizado se detalla en la tabla siguiente.

Tabla 6.5: Mezclas definitivas y sus factores preliminares

Relación a/c	Mezcla N	Día	Hora (h:m)	Dosif. aditivo (% x kg cemento)
0.45	1	29-feb	11:40	1.00
	2	07-mar	12:20	1.03
	3	14-mar	13:30	1.03
0.5	1	21-mar	12:30	0.92
	2	28-mar	12:00	0.94
	3	04-abr	13:20	0.92
0.6	1	11-abr	11:40	0.86
	2	25-abr	12:45	0.84
	3	02-may	13:10	0.83
0.7	1	23-may	13:30	0.67
	2	16-may	12:15	0.63
	3	30-may	12:25	0.63

El diseño de mezcla de cada una de las indicadas en la tabla 6.5 se adjunta en el Anexo 1.

Las propiedades en estado fresco se detallan en la tabla a continuación.

Tabla 6.6: Propiedades en estado fresco de las mezclas definitivas

Relación a/c	Mezcla N	Dosif. aditivo (%)	Slump (cm)	Slump prom. (cm)	Aire %	Aire prom (%)	T C	Observaciones
0.45	1	1.00	9.00	10.67	2.10	2.27	31.70	Mezcla realizada en verano
	2	1.03	8.50		2.20		31.00	Mezcla realizada en verano
	3	1.03	14.50		2.50		26.40	Mezcla realizada en verano
0.5	1	0.92	10.00	12.00	2.80	3.27	32.70	Mezcla realizada en verano
	2	0.94	17.00		3.40		31.80	Mezcla realizada en verano
	3	0.92	9.00		3.60		31.50	
0.6	1	0.86	17.00	14.50	3.60	2.67	32.00	
	2	0.84	14.50		2.00		28.00	
	3	0.83	12.00		2.40		30.10	
0.7	1	0.67	18.00	14.50	2.40	2.17	24.30	
	2	0.63	10.50		2.30		24.10	Tapa de la olla para medir % de aire tenía fallas
	3	0.63	15.00		1.80		24.10	

El concreto de las relaciones a/c 0.45, 0.50 y 0.6 presentaron poco exudación debido a su baja relación a/c y la poca presencia de agua en la mezcla, no obstante en el concreto de relación a/c 0.70 se presentó exudación cuando se elaboraron las probetas. Luego de que transcurrió un día de encofradas las probetas, se desencofraron y marcaron identificando la relación agua/cemento y el día de vaciado.

Además, siguiendo las instrucciones de la EN 12390-8, se escarificó la base de la probeta, procedimiento que se detallará en la implementación de la norma en el LEDI.

Para el curado de las muestras, se sumergieron en agua por 28 días y luego fueron retiradas.

Primero, 2 probetas fueron ensayadas a compresión axial a los 7 días. Luego, 2 probetas fueron ensayadas a los 28 días. Por último, de las 6 probetas restantes, 5 de estas fueron ensayadas después de 28 días en el equipo de medición de profundidad de penetración del agua bajo presión.

6.4 Ensayos en concreto endurecido

Existen dos tipos de ensayos en concretos no endurecidos:

Ensayos destructivos:

Análisis de determinadas propiedades del concreto hasta llevar a la probeta a un estado de fatigo o rotura, deformando de esta manera sus dimensiones iniciales y eliminando la posibilidad de volverla a utilizar para otros tipos de pruebas. Dentro de estos ensayos se encuentran:

- Ensayo de resistencia a compresión a los 7 días
- Ensayo de resistencia a compresión a los 28 días
- Ensayo a flexo tracción
- Ensayo de permeabilidad
- Ensayo de humedad
- Ensayo de resistencia a la abrasión
- Ensayo de contenido de cloruros

Ensayos no destructivos:

Análisis de determinadas propiedades del concreto sin llegar a la deformación de sus condiciones iniciales, dejando la probeta apta para otros tipos de ensayos. Dentro de estos ensayos se encuentran:

- Ensayo de ultrasonido
- Ensayo con esclerómetro
- Ensayo de impacto acústico
- Ensayo por absorción
- Ensayo de líquidos penetrantes

El presente proyecto tiene como alcance cubrir un ensayo de resistencia a compresión destructivo de acuerdo a la norma americana ASTM C39 y ensayo de permeabilidad de acuerdo a la norma europea EN 12390.

6.4.1 ASTM C39

Método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto / NTP 339.034 – Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas.

Descripción

Este método de ensayo es usado para determinar el esfuerzo de compresión en el concreto utilizado en probetas cilíndricas y extracciones diamantinas de concreto. Se calculará este esfuerzo dividiendo la carga máxima obtenida durante el ensayo en laboratorio entre el área de la cara axial expuesta. Los valores obtenidos se expresarán en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm_2) o en mega pascales (MPa).

6.4.2 EN 1230-8

EN 12390-8 Norma para determinar la profundidad de penetración del agua bajo presión en concreto

En la sección 6.5 se tratará a detalle este ensayo.

6.5 Implementación de la norma EN 12390-8 en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas (LEDI-PUCP)

6.5.1 Uso y manejo del equipo FORM TEST Water penetration test

El equipo funciona con un compresor de aire de forma anexa. Este compresor de aire se activa y comienza a aplicar presión en el equipo en cuanto las válvulas de ingreso de presión estén abiertas. El compresor le da presión de aire en cada una de las cámaras de control de los bancos y el agua que se encuentra en su interior es desplazada hacia el espécimen de muestra. De esta manera el espécimen es sometido a presión que se gradúa en el manómetro, la presión a la que se someten las probetas es de 5 bar según

la EN 12390-8.

En las siguientes imágenes se muestran las partes del equipo FORM TEST en la cual se realiza el ensayo EN 12390-8. En la figura 6.5 se muestran los puntos de agua, aire a presión y eliminación de agua para mostrar por donde ingresa la presión hacia las probetas.

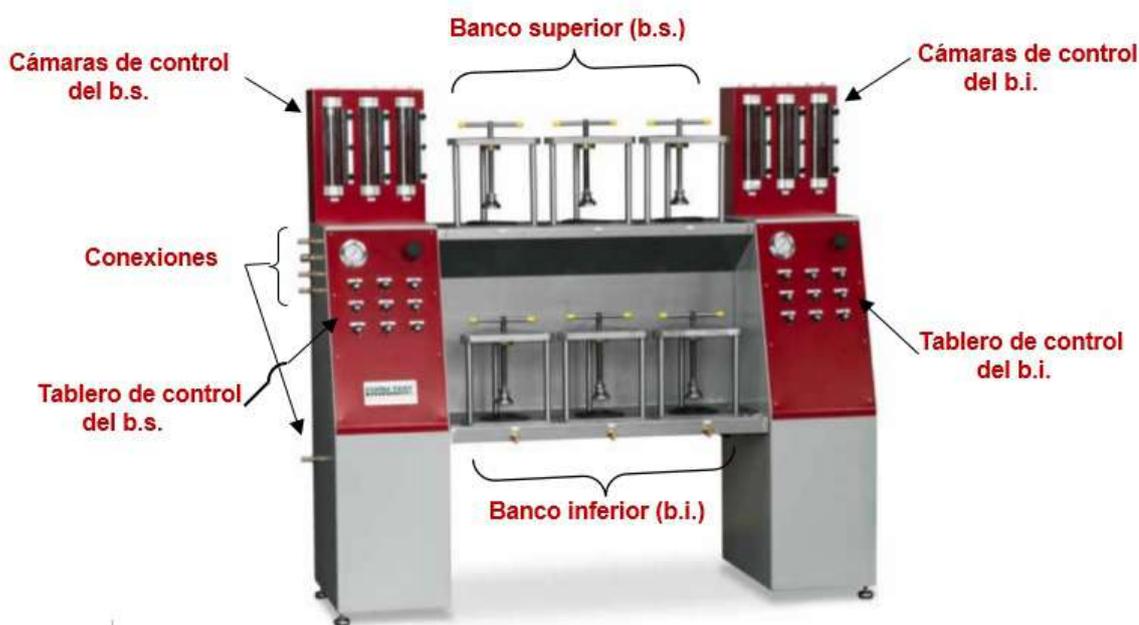


Figure 6.5: Partes del equipo de penetración hidráulica FORM TEST



Figure 6.6: Puntos de agua, aire a presión y eliminación de agua conectados a sus mangueras respectivas

Las imágenes mostradas son del equipo de penetración hidráulica FORM TEST que cumple con lo requerido por la EN 12390-8.

En la siguiente sección se detalla el procedimiento de ensayo usando el permeabilímetro en esta sección.

6.5.2 Procedimiento y Manual adaptado al LEDI

EQUIPO:

- Máquina de penetración hidráulica FORM TEST
- Compresor de aire
- Pie de rey
- Cepillo de cerdas de alambre de acero (*)
- Plantilla para el escarificado de la probeta
- (**)

- (***)

PROCEDIMIENTO/ACTIVIDADES y PERSONAL:

- A) Preparación de la probeta (Técnico)
- B) Ejecución del ensayo (Técnico)
- C) Procesamiento de los datos (Responsable del servicio)

PROCEDIMIENTO:

A) Preparación de la probeta:

La probeta de ensayo puede ser una muestra cúbica (150 a 200mm) o una probeta cilíndrica de 150mm de altura.

(*)

Después de desencofradas las probetas estas deberán ser escarificadas en su base mediante un cepillo de cerdas de alambre en la zona que será sometida a presión de agua. Se delimita esta zona trazando una circunferencia de 75 mm de diámetro ayudados por la base de neopreno centrada en la base de la probeta. Una vez trazada la circunferencia se posiciona la plancha hueca y se procede a escarificar con cepillo de cerdas de alambre hasta retirar el mortero.

(**)

Cortar las probetas con disco metálico diamantado. La altura mínima de la probeta es de 150 mm y máxima de 170 mm. Es importante que la cara finalizada del corte esté perpendicular a la base de la probeta. Verificar la perpendicularidad de las caras de asiento al eje de la probeta colocando la escuadra metálica en el extremo de dos diámetros perpendiculares entre sí.

Desechar la parte de la probeta correspondiente a la cara enrasada.

(***)

Las probetas deben tener como mínimo 28 días de edad y haber sido curadas en poza.

B) Ejecución del ensayo:

La descripción que sigue toma como referencia las Figuras 1, 2, 3 y 4

1. Encendido del compresor.

a) Cerrar la válvula principal colocando la palanca en posición cruzada respecto la dirección del flujo de salida del aire.

b) Encender el compresor girando la palanca del presostato en sentido antihorario, hacia la dirección de flujo y dejar que cargue hasta alcanzar la presión máxima preestablecida de 125 PSI, que se debe observar en el manómetro del compresor. El compresor debe apagarse automáticamente una vez alcanzado ese nivel de presión. En caso contrario apagar de inmediato y avisar al Técnico mecánico encargado.



Figure 6.7: El compresor y sus partes

2. Preparación del permeabilímetro.

- a) Verificar que todas conexiones, de agua, aire comprimido y vaciado/descarga, estén conformes. Caso contrario llamar al Técnico.
- b) Cerrar todas las válvulas. Cierre en sentido horario, tanto las principales: Water, Compressed air y Emptying, así como todas las de control individual Glass y Test position.
- c) Llenado de agua. Abrir la válvula Water, enseguida la válvula Glass de la posición a ensayar, llenar hasta el tope superior de la Cámara de control.
- d) Purgado. Colocar el dispositivo de sellado (disco de neopreno) en el asiento de las posiciones a emplear. Abrir la válvula Test position correspondiente, dejar que salga el agua moderadamente, observando que burbujee. Cerrar cuando ya no salgan más burbujas. Usar también, si fuera necesario, la válvula Glass para mantener el nivel en

el Vaso de control. Repetir la operación en las otras posiciones a emplear.

3. Ensayo.

a) Colocar la probeta centrado adecuadamente sobre el dispositivo de sellado, fijarlo manualmente mediante el tornillo de ajuste. De ser necesario fijar adicionalmente con una llave francesa N°12 girando el tornillo en sentido horario. La probeta debe ser puesta de tal manera que la presión debe ser aplicada sobre la cara no cortada o base (no aplicar sobre la cara cortada). No use extensiones extras para la palanca del tornillo.



Figure 6.8: Ajuste del perno de sujeción

b) Abrir la válvula principal del compresor. Enseguida, ya en el permeabilímetro, girar lentamente en sentido horario la válvula Reguladora de presión del banco de pruebas correspondiente, superior o inferior, controlando con el manómetro, hasta el nivel de presión de 5 bar.

IMPORTANTE: Antes de accionar la válvula es necesario aflojar la contratuerca y luego de alcanzado el nivel de presión, volver a ajustarlo, solo manualmente.

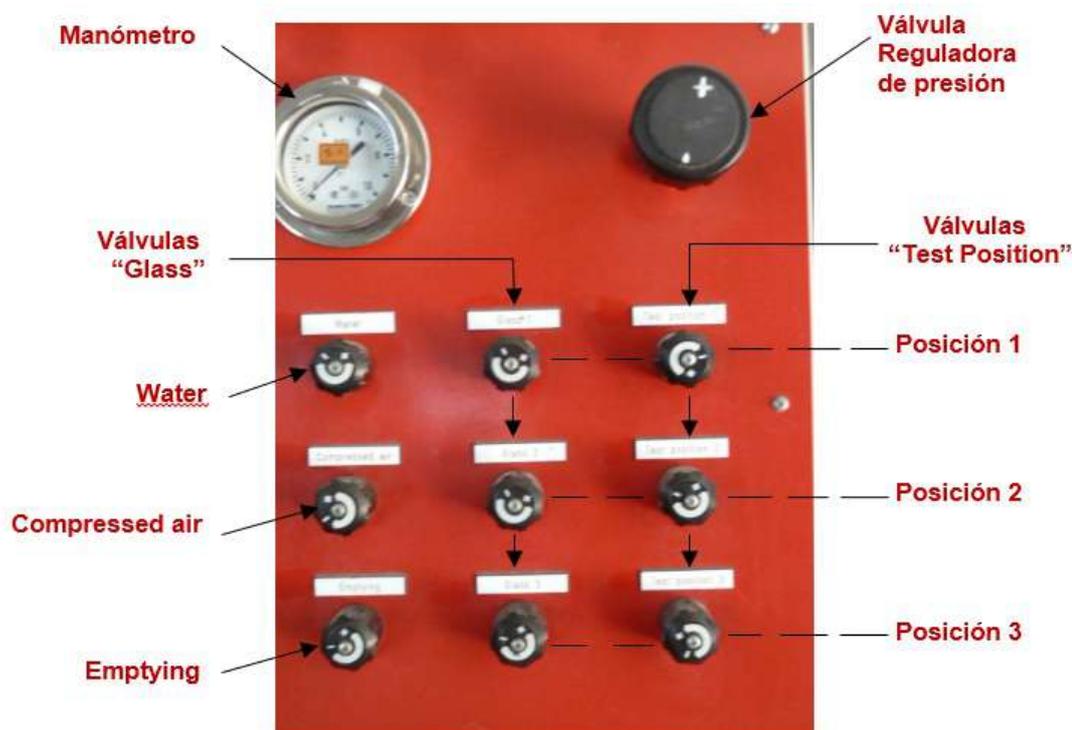


Figure 6.9: Válvulas de agua, "compressed air", "emptying" y "glass"

- c) Aplicar presión de ensayo a la probeta abriendo lentamente la válvula "Test position" correspondiente, observando que no ocurran fugas de agua, de ser el caso, previo cierre de la válvula, agregar ajuste mediante el tornillo; luego proseguir con la operación. En caso no se logre eliminar las fugas, suspender la operación, revisar la probeta y el dispositivo de sellado. Continuar con las otras probetas.
- d) Fijar el nivel cero en la Cámara de control. Usando la regla graduada, previo aflojado de las contratueras, hacer coincidir la referencia o el "cero" con el nivel del menisco de agua. En estas condiciones, el ensayo se da por iniciado. Repetir la operación con las otras probetas. Realizar las anotaciones en el formato correspondiente.
- e) En pleno ensayo, observar regularmente posibles fugas de agua. De ser el caso, revisar el sellado, previamente, cerrar la válvula "Test position", luego agregar ajuste mediante el tornillo. De persistir la fuga, proceder como en el paso anterior, retirar la probeta y revisar el disco de neopreno, cambiarlo si está dañado. Luego, reubicar la probeta y realizar los pasos c y d. Durante 3 días (72 h) \pm 2 horas se aplicará la presión de agua de manera constante.
- f) Luego de concluido el ensayo. Si se usaron todas las posiciones, cerrar la Válvula principal (en el compresor), enseguida cerrar las válvulas "Test position", abrir la

válvula emptying, abrir sucesivamente las válvulas glass para descargar el agua y finalmente abrir la válvula compressed air para despresurizar el equipo.

g) Retirar la probeta e inmediatamente llevarla al equipo de compresión diametral. Centrar la probeta mediante una regla luego colocarla encima del listón de triplay de manera longitudinal. Colocar un segundo listón en la parte superior de la probeta de manera longitudinal y aplicar la carga continuamente hasta que la probeta falle. La falla dividirá la probeta en dos, separar ambos especímenes, identificar la penetración del agua y con un marcador, delinearla. Medir la profundidad máxima con un pie de rey y anotar en el formato de ensayos el valor con precisión de 1 mm para cada mitad de espécimen de la probeta.



Figure 6.10: Probeta dividida en dos en el equipo de compresión diametral

C) Para el procesamiento de datos del ensayo:

Registrar los resultados obtenidos, en el formato de ensayos para ensayo de determinación de la profundidad de penetración de agua bajo presión LEDI-Lab-3.03 EN 12390-8. Reportar el promedio de la profundidad máxima de penetración de agua bajo presión de las mitades del espécimen. Ubicarla en las gráficas calibradas según las características de la probeta.

6.6 Capacitación del personal y primer servicio del Equipo de Permeabilidad en el LEDI

La capacitación del personal Jeancarlo Chavez se realizó el día 13/06/2016 y consistió en la enseñanza práctica de los siguientes procedimientos según el manual:

-Tratamiento inicial a las probetas

Al personal se le proporcionó una escobilla de alambre de acero y se le indicó que se delimita esta zona trazando una circunferencia de 75 mm de diámetro ayudados por la base de neopreno centrada en la base de la probeta. Una vez trazada la circunferencia se posiciona la plancha hueca y se procede a escarificar con el cepillo hasta retirar el mortero.

-Corte de probetas

Las celdas del equipo tienen una altura máxima menor al de una probeta estándar de 15x30 cm es por ello que se corta la probeta con una altura de 150 mm según lo indicado en la norma.

-Instalación de las probetas

Se indicó al personal que la cara a aplicar la presión es la que está escarificada e irá aprisionada junto el neopreno. Se hizo especial énfasis en aplicar mayor presión al perno de sujeción superior de modo que llegue a su máxima capacidad mediante una llave francesa N° 12 girando la tuerca en sentido horario.



Figure 6.11: El técnico realizando la puesta de la probeta B2 siguiendo la recomendación del manual de presionar la rosca con llave francesa

-Manejo del equipo

Al personal se le enseñó el manejo del equipo siguiendo el manual detallado en la anterior sección.

-Fin del ensayo

Siguiendo el manual se recomendó que la marcación de la línea de penetración de agua se realice con plumón indeleble negro y la medición de la penetración máxima sea con pie de rey.

Una vez que el personal se encontraba capacitado para realizar el ensayo, se procedió a realizar el primer servicio, el cual consistió en ensayar 6 probetas de 15x30cm de características diferentes:

- 2 probetas de concreto bombeado
- 2 probetas de concreto autocompactante
- 2 probetas de concreto convencional

Todas las probetas fueron vaciadas el día 16/05/2016 con edad y en cuanto las probetas llegaron al laboratorio (al día siguiente de ser vaciadas) se les realizó la escarificación en la base que será sometida a presión.



Figure 6.12: Escarificado de base donde se aplicará la presión de agua

Luego, el día del ensayo se retiraron de la poza de curado y se cortaron a una altura de 15 cm medida desde la base. Se realizó el ensayo siguiendo la Norma BS EN 12390-8 que ha sido detallada en anteriores capítulos.



Figure 6.13: El equipo durante el ensayo de las 6 probetas

Luego de 72 horas (3 días) las probetas se retiraron y se procedió a seguir lo indicado en

norma, partiendo en dos las probetas por medio del ensayo de compresión diametral. Los resultados de profundidad máxima de penetración son los siguientes:

Tabla 6.7: Resultados del ensayo de profundidad de penetración del agua bajo presión

Probeta N°	Profundidad máxima de penetración		Observaciones
	Mitad 1 (mm)	Mitad 2 (mm)	
B1-Bombeable	59	63	
B2-Bombeable	67	81	
B3-Autocompactante	17	15	
B4-Autocompactante	21	12	
B6-Convencional	21	29	*65/69 en borde
B5-Convencional	45	31	

En la figura a continuación se muestra la probeta B5 en la que se observó mayor penetración al borde de su base.



Figure 6.14: Superficie de rotura de la probeta 5 marcada su profundidad de penetración

Puede observarse que los valores de profundidad de penetración de la probeta B4 varían entre las dos mitades, como puede observarse en las fotos a continuación:



Figure 6.15: Superficie de rotura de la probeta 4 marcada su profundidad de penetración

En una mitad, tuvo mayor penetración de agua que en la otra, esto se debe a que la formación de poros capilares difiere en toda la longitud de la probeta. También depende de que el corte transversal se haga simétrico.

6.7 Fórmula de valenta para hallar el valor de k

De acuerdo a la Norma EN 12390-8 el resultado final del ensayo es la medida de la profundidad máxima de penetración del agua, no obstante este valor no permite determinar directamente la permeabilidad. Por ello, "...una modificación comunmente usada es exponer el concreto a 1MPa por 96 horas y luego usar la ecuación de Valenta para calcular el coeficiente de permeabilidad basado en la profundidad de penetración. El uso de la ecuación de Valenta requiere el incremento en masa de cada especimen a medir con precisión para determinar la fracción de volumen de poros en el concreto (Neville, 1995) lo cual no es parte de la EN 12390-8" (ACI 212.3R-10)

La fórmula de Valenta es la siguiente:

$$k = \frac{prof^2 xv}{2Th} \quad (6.3)$$

Donde:

- k : coeficiente de permeabilidad.
- $prof$: profundidad de penetración media (m).
- v : viscosidad determinada por ASTM C642.
- T : 96 horas (345600 s).
- H : 50 m de columna de agua.

En la fórmula de Valenta no se usa la profundidad máxima sino la profundidad media, por eso se hacen más cálculos para hallar este dato. El procedimiento a seguir es el siguiente:

- 1.-Se procede a dibujar una línea marcada por el disco de estanqueidad
- 2.-Se mide la profundidad máxima de penetración
- 3.-Se hace una captura fotográfica de la muestra, desde un punto tal que quede la probeta como una vista en planta.
- 4.-Digitalizamos la imagen con la ayuda del programa Autocad. Se procede a escalar la imagen fotográfica hacia la profundidad máxima medida.
- 5.-Hallamos el área de la zona de profundidad efectiva, que es la marca del disco de estanqueidad hasta la base.
- 6.-Calculamos la profundidad media, esto lo realizamos dividiendo el área de la zona de profundidad efectiva sobre la base de la misma. Calculamos una para cada lado de la probeta. Las imágenes de este procedimiento se encuentran en los anexos.

Chapter 7

Resultados

7.1 Antecedentes

Los ensayos de la presente tesis se realizaron en el Laboratorio de Estructuras Anti-sismicas (LEDI PUCP) siguiendo los procedimientos de la norma EN 12390-8.

Se usó Cemento Portland Tipo I-SOL, agregado grueso de la cantera Jicamarca y agregado fino de la misma cantera. El aditivo plastificante/reductor de agua usado es el MR-500 de la empresa Química Suiza.

En el Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad Nacional de Ingeniería (LEM-UNI) se han realizado 4 tesis del año 1998 que tienen el objetivo de estudiar la permeabilidad del concreto al agua y fabricaron equipos que cumplieran esta función, no obstante su resultado no era el coeficiente de permeabilidad. Después de estas tesis, la última en realizarse data del año 2015 y el equipo construido se encuentra actualmente en el LEM UNI. El resumen de la tesis expresa: “Se propone implementar un método para cuantificar la permeabilidad del concreto. Básicamente es una analogía a la experiencia de Darcy, que consiste en aplicar presión de agua directamente sobre el concreto, y así poder calcular el coeficiente de permeabilidad “k”, con el cual podremos comparar en campo, de distintas calidades utilizadas en cualquier proyecto” (Vasquez, 2015). El equipo construido sirve para medir el coeficiente de permeabilidad del concreto al agua bajo presión, no obstante sigue la normativa colombiana NTC 4483 Método de ensayo para determinar la Permeabilidad del concreto al agua, la cual es adaptación de la EN 12390-8. Sus resultados son concluyentes en cuanto a que a mayor edad del concreto menor permeabilidad del espécimen, además de que a mayor relación a/c mayor permeabilidad.

7.2 Resultados de Ensayo a compresión

Se realizó ensayo a compresión a los 7 días y a los 28 días. No se realizará un estudio más profundo de los resultados de resistencia a la compresión ya que este trabajo está enfocado en la permeabilidad. Se ensayaron dos probetas en cada día lo cual ha resultado lo siguiente:

Tabla 7.1: Resultados resistencia a la compresión de mezclas relación a/c 0.45 edades 7 y 28 días

Resultados resistencia a la compresión mezclas relación a/c 0.45									
Probeta N°	Fecha de vaciado	Edad (días)	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo prom	Diferencia Simp.	Diferencia (%)
1	29/02/2016	7	153.20	153.80	702.30	379.70	374.89	4.81	1.28
2			152.00	152.50	673.40	370.07			
3	29/02/2016	28	153.00	152.10	746.70	408.74	420.94	12.20	2.90
4			152.20	152.00	786.60	433.14			
1	07/03/2016	7	154.70	154.90	653.60	347.46	347.51	0.05	0.01
2			153.10	153.60	641.60	347.56			
3	07/03/2016	28	153.10	153.60	813.30	440.57	432.89	7.68	1.77
4			155.10	154.70	800.90	425.21			
1	14/03/2016	7	154.00	153.20	657.10	354.80	354.84	0.04	0.01
2			153.00	153.30	653.40	354.88			
3	14/03/2016	28	154.10	153.70	809.40	435.33	434.95	0.37	0.09
4			153.10	153.40	801.20	434.58			

Tabla 7.2: Resultados resistencia a la compresión de mezclas relación a/c 0.50 edades 7 y 28 días

Resultados resistencia a la compresión mezclas relación a/c 0.50									
Probeta N°	Fecha de vaciado	Edad (días)	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo prom	Diferencia Simp.	Diferencia (%)
1	21/03/2016	7	152.90	152.10	640.30	350.73	335.32	15.41	4.59
2			152.00	152.10	580.60	319.91			
3	21/03/2016	28	153.90	152.90	720.60	390.10	393.97	3.87	0.98
4			152.60	152.90	728.70	397.85			
1	28/03/2016	7	153.80	152.90	577.50	312.83	316.00	3.17	1.00
2			152.50	152.40	582.30	319.17			
3	28/03/2016	28	153.20	153.10	706.00	383.44	373.07	10.37	2.78
4			152.90	153.40	667.80	362.70			
1	04/04/2016	7	153.80	152.90	597.50	323.67	331.04	7.37	2.23
2			152.50	152.40	617.40	338.41			
3	04/04/2016	28	152.70	154.50	704.30	380.28	383.35	3.07	0.80
4			153.50	153.00	712.40	386.41			

Tabla 7.3: Resultados resistencia a la compresión de mezclas relación a/c 0.60 edades 7 y 28 días

Resultados resistencia a la compresión mezclas relación a/c 0.60									
Probeta N°	Fecha de vaciado	Edad (días)	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo prom	Diferencia Simp.	Diferencia (%)
1	11/04/2016	7	152.40	153.10	517.10	282.32	270.76	11.56	4.27
2			153.10	153.60	478.50	259.21			
3	11/04/2016	28	154.00	152.80	603.90	326.92	315.41	11.52	3.65
4			153.00	152.80	557.70	303.89			
1	25/04/2016	7	155.40	154.70	487.50	258.32	266.37	8.04	3.02
2			155.20	153.20	512.20	274.41			
3	25/04/2016	28	152.50	152.30	577.90	316.97	315.72	1.25	0.39
4			153.00	155.30	586.60	314.47			
1	02/05/2016	7	158.00	157.40	564.30	289.05	281.69	7.37	2.62
2			153.20	152.50	503.10	274.32			
3	02/05/2016	28	152.00	152.50	611.80	336.22	330.65	5.57	1.69
4			153.50	153.20	600.10	325.08			

Tabla 7.4: Resultados resistencia a la compresión de mezclas relación a/c 0.60 edades 7 y 28 días

Resultados resistencia a la compresión mezclas relación a/c 0.45									
Probeta N°	Fecha de vaciado	Edad (días)	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Carga máxima (KN)	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo prom	Diferencia Simp.	Diferencia (%)
1	09/05/2016	7	154.00	153.40	423.10	228.15	228.72	0.57	0.25
2			154.20	152.00	421.90	229.29			
3	09/05/2016	28	152.30	152.30	529.40	290.75	289.21	1.54	0.53
4			153.20	153.20	530.00	287.67			
1	16/05/2016	7	153.00	153.30	403.40	219.09	226.17	7.07	3.13
2			153.80	152.70	430.00	233.24			
3	16/05/2016	28	153.80	152.80	527.00	285.66	280.40	5.26	1.88
4			153.00	154.00	508.90	275.14			
1	30/05/2016	7	152.00	152.00	429.30	236.70	232.53	4.17	1.80
2			153.00	153.10	419.90	228.35			
3	30/05/2016	28	152.90	153.60	498.60	270.45	273.28	2.84	1.04
4			153.20	153.10	508.40	276.12			

Los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión para las distintas relaciones a/c se han promediado y con estos resultados se han elaborado gráfico de resistencia promedio(kg/cm²) vs edad (días) y otro gráfico de resistencia promedio(kg/cm²) vs relación agua/cemento.

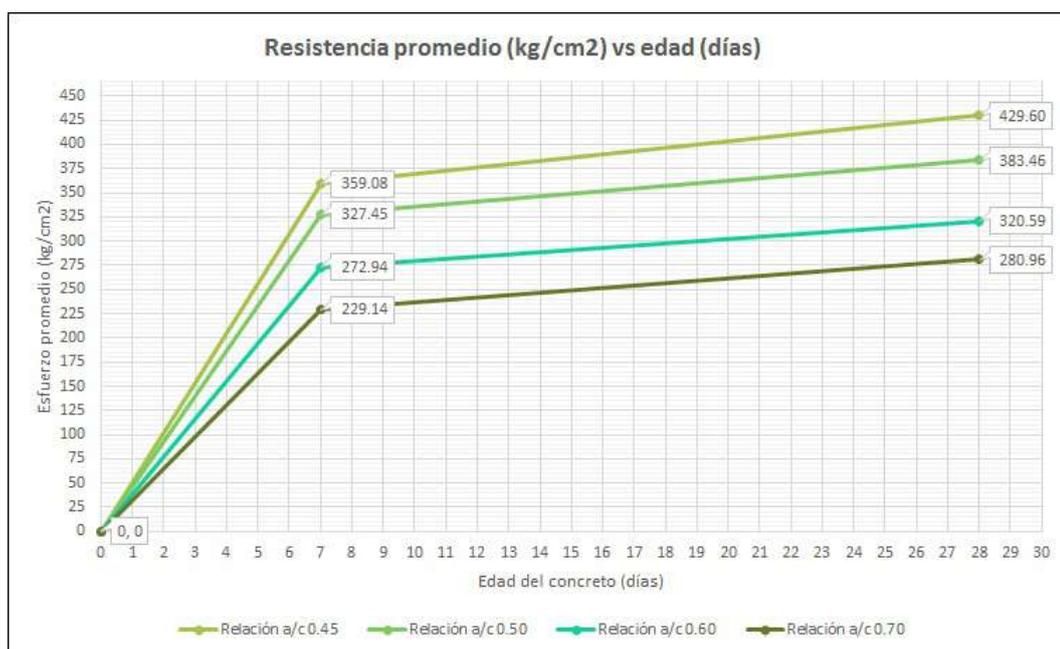


Figure 7.1: Curva de resistencia a la compresión promedio (kg/cm²) vs edad (días)

Se puede observar que a menor relación a/c, mayor resistencia a la compresión en la misma edad del concreto en días.

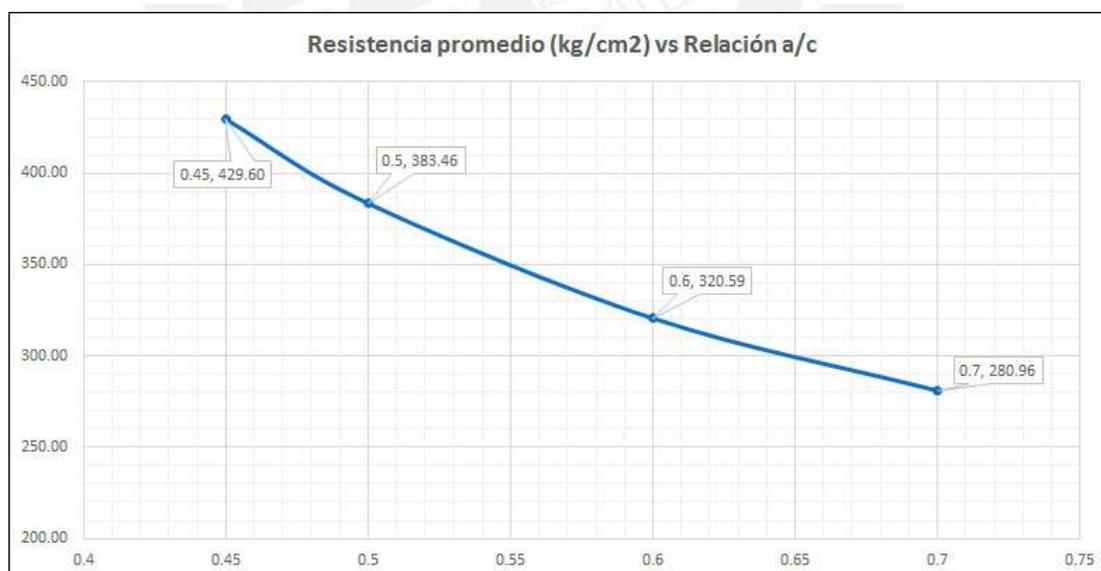


Figure 7.2: Curva de resistencia a la compresión promedio (kg/cm²) vs relación a/c

Se puede observar que la curva es ascente hacia menor relación a/c similar al comportamiento de las curvas teoricas y que su disminución es más pronunciada para relaciones a/c mayores.

7.3 Resultados de permeabilidad con diferentes relaciones agua/cemento

Se realizaron ensayos de 72 probetas cilíndricas de concreto, el tiempo de curado fue de 28 días sumergido en poza. El ensayo se realizó durante 4 días bajo una presión de 5 bares. En las tablas siguientes se encuentran los resultados obtenidos de profundidad máxima (cm) y el cálculo de la profundidad media (cm).

Tabla 7.5: Profundidad máxima y cálculo de profundidad promedio para mezclas de relación a/c 0.45

Probeta N°	# Mitad	Prof. Máx. (cm)	Área (cm ²)	Base (cm)	Prof. Media (cm)	Prof. Media Promedio
Fecha: 29/02						
1	M1	0.90	5.67	11.02	0.51	0.52
	M2	0.90	5.04	9.70	0.52	
2	M1	0.80	3.17	8.36	0.38	0.38
	M2	0.60	2.98	7.83	0.38	
3	M1	0.70	1.84	6.24	0.29	0.32
	M2	0.70	2.97	8.66	0.34	
4	M1	0.70	3.22	7.12	0.45	0.44
	M2	0.70	2.85	6.70	0.43	
5	M1	0.60	1.44	5.16	0.28	0.31
	M2	0.70	2.32	7.00	0.33	
Fecha: 07/03						
1	M1	1.00	5.60	10.75	0.52	0.51
	M2	0.90	4.60	9.19	0.50	
2	M1	1.00	4.08	9.53	0.43	0.47
	M2	1.00	5.24	10.37	0.51	
3	M1	1.10	6.63	12.00	0.55	0.56
	M2	1.10	6.24	10.88	0.57	
4	M1	1.40	4.65	9.05	0.51	0.48
	M2	0.90	3.54	7.97	0.44	
5	M1	0.70	4.91	11.68	0.42	0.40
	M2	0.60	4.25	11.32	0.38	
Fecha: 14/03						
1	M1	1.50	10.45	14.00	0.75	0.74
	M2	1.10	11.69	16.10	0.73	
2	M1	0.80	5.97	13.70	0.44	0.42
	M2	1.00	4.80	11.90	0.40	
3	M1	2.00	11.86	13.50	0.09	0.49
	M2	1.90	14.19	16.00	0.89	
4	M1	1.60	11.90	16.90	0.70	0.68
	M2	1.60	10.22	15.70	0.65	
5	M1	1.00	7.24	15.50	0.47	0.52
	M2	0.90	10.11	18.10	0.56	

Tabla 7.6: Profundidad máxima y cálculo de profundidad promedio para mezclas de relación a/c 0.50

Probeta N°	# Mitad	Prof. Máx. (cm)	Area (cm ²)	Base (cm)	Prof. Media (cm)	Prof. Media Promedio
Fecha: 22/04						
1	M1	0.70	4.10	10.60	0.39	0.62
	M2	1.50	12.19	14.50	0.84	
2	M1	0.70	5.64	11.00	0.51	0.56
	M2	1.10	6.58	10.80	0.61	
3	M1	0.80	3.41	6.90	0.49	0.53
	M2	1.40	4.95	8.70	0.57	
4	M1	1.00	7.14	13.00	0.55	0.52
	M2	1.10	6.22	13.00	0.48	
5	M1	1.20	7.54	12.10	0.62	0.66
	M2	1.10	6.99	10.10	0.69	
Fecha: 29/04						
1	M1	0.90	8.72	13.90	0.63	0.59
	M2	0.90	5.20	9.70	0.54	
2	M1	1.00	9.10	15.00	0.61	0.61
	M2	1.30	8.41	13.80	0.61	
3	M1	1.00	6.61	13.30	0.50	0.45
	M2	0.60	4.60	11.50	0.40	
4	M1	1.30	8.86	14.10	0.63	0.55
	M2	0.90	4.50	9.60	0.47	
5	M1	0.90	8.21	12.30	0.67	0.61
	M2	1.00	5.56	10.10	0.55	
Fecha 06/05						
1	M1	1.70	9.30	14.20	0.65	0.61
	M2	1.20	6.53	11.40	0.57	
2	M1	1.40	14.80	16.00	0.93	0.81
	M2	1.80	11.66	17.00	0.69	
3	M1	0.80	4.30	9.00	0.48	0.44
	M2	0.80	2.92	7.30	0.40	
4	M1	2.00	18.21	15.90	1.15	1.155
	M2	1.80	18.61	16.10	1.16	
5	M1	1.70	14.29	15.80	0.90	0.76
	M2	1.70	8.69	14.00	1.08	

Tabla 7.7: Profundidad máxima y cálculo de profundidad promedio para mezclas de relación a/c 0.60

Probeta N°	# Mitad	Prof Max (cm)	Area (cm ²)	Base (cm)	Prof Media (cm)	Prof Media Promedio
Fecha: 11/04						
1	M1	1.20	11.70	16.30	0.72	0.73
	M2	1.20	10.37	14.30	0.73	
2	M1	1.40	11.40	13.50	0.84	0.83
	M2	1.80	10.29	12.60	0.82	
3	M1	0.80	9.56	14.00	0.68	0.64
	M2	0.80	7.95	13.20	0.60	
4	M1	2.00	16.37	9.40	1.74	1.74
	M2	1.80	18.43	10.60	1.74	
5	M1	2.60	10.95	13.00	0.84	0.88
	M2	2.20	14.10	15.50	0.91	
Fecha: 25/04						
1	M1	1.60	11.87	15.20	0.78	0.87
	M2	1.50	17.05	17.70	0.96	
2	M1	1.30	7.65	13.30	0.58	0.84
	M2	2.40	15.52	14.30	1.09	
3	M1	2.60	10.54	14.30	0.74	0.70
	M2	1.00	9.62	14.80	0.65	
4	M1	1.60	10.76	14.20	0.76	0.76
	M2	2.10	11.50	15.20	0.76	
5	M1	1.20	10.59	14.10	0.75	0.78
	M2	1.40	10.82	13.60	0.80	
Fecha: 02/05						
1	M1	0.90	6.72	13.30	0.51	0.55
	M2	1.40	8.12	14.10	0.58	
2	M1	0.80	3.99	9.70	0.41	0.36
	M2	0.70	2.86	9.60	0.30	
3	M1	0.90	7.71	15.40	0.50	0.73
	M2	2.50	14.73	15.50	0.95	
4	M1	2.70	23.16	13.90	1.67	1.56
	M2	2.30	20.83	14.50	1.44	
5	M1	1.90	24.06	19.80	1.22	1.06
	M2	1.60	12.04	13.40	0.90	

Tabla 7.8: Profundidad máxima y cálculo de profundidad promedio para mezclas de relación a/c 0.70

Probeta N°	# Mitad	Prof Max (cm)	Area (cm ²)	Base (cm)	Prof Media	Prof Media Promedio
Fecha: 09/05						
1	M1	3.30	28.99	15.20	1.90	1.70
	M2	3.30	20.87	14.20	1.50	
2	M1	2.30	22.32	15.30	1.50	1.45
	M2	2.20	19.91	14.10	1.40	
3	M1	2.10	19.43	13.80	1.40	1.70
	M2	2.80	29.11	14.40	2.00	
4	M1	4.10	23.12	13.60	1.70	1.90
	M2	4.30	25.30	12.30	2.10	
5	M1	4.00	34.15	15.70	2.20	2.15
	M2	3.40	28.71	13.50	2.10	
Fecha: 23/05						
1	M1	1.80	3.72	16.30	0.23	0.58
	M2	1.70	12.16	13.10	0.93	
2	M1	1.50	11.04	14.30	0.77	0.79
	M2	1.30	13.07	16.20	0.81	
3	M1	2.90	17.49	14.70	1.19	1.12
	M2	2.40	17.19	16.50	1.04	
4	M1	2.20	17.47	15.90	1.10	1.39
	M2	2.70	23.61	14.10	1.67	
5	M1	1.50	17.54	13.60	1.29	1.33
	M2	1.70	20.95	15.40	1.36	
Fecha 30/05						
1	M1	2.30	22.63	14.10	1.60	1.75
	M2	2.60	27.81	14.70	1.89	
2	M1	2.30	22.48	15.00	1.50	1.59
	M2	2.30	25.04	15.00	1.67	
3	M1	2.50	19.98	15.70	1.27	1.13
	M2	2.00	15.21	15.40	0.99	
4	M1	3.80	41.10	15.60	2.63	2.46
	M2	3.50	36.70	16.10	2.28	
5	M1	3.00	46.52	16.40	2.84	2.58
	M2	2.40	34.64	15.00	2.31	

Una vez hallada la profundidad media, se procede a hallar el coeficiente de Darcy (k) mediante la fórmula de Valenta. Para todas las operaciones se usaron los siguientes datos, fijos en todos los ensayos:

Tabla 7.9: Datos usados en la fórmula de Valenta

Datos	
T (s)	345600
H (m)	50

La porosidad para cada mezcla es detallada en los anexos. En las siguientes tablas se muestra el resultado del k para cada mezcla de cada relación a/c.

Tabla 7.10: Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación a/c 0.45

Muestra N°	Profundidad media (m)	Porosidad	Coeficiente de permeabilidad (m/s)
Fecha: 29/02, Slump 9cm, aire 2.1%			
1	0.0052	13.80%	10.59E-14
2	0.0038	12.70%	5.31E-14
3	0.0032	12.10%	3.47E-14
4	0.0044	12.00%	6.72E-14
5	0.0031	12.30%	3.31E-14
K prom.			5.88E-14
Fecha: 07/03, Slump 8.5cm, aire 2.2%			
1	0.0051	12.30%	8.89E-14
2	0.0047	9.60%	5.63E-14
3	0.0056	11.50%	11.98E-14
4	0.0048	11.80%	6.91E-14
5	0.0040	10.30%	4.77E-14
K prom.			7.64E-14
Fecha: 14/03, Slump 14.5cm, aire 2.5%			
1	0.0074	14.00%	19.85E-14
2	0.0042	13.40%	6.20E-14
3	0.0068	14.00%	19.85E-14
4	0.0052	13.60%	11.90E-13
5	0.0061	14.10%	14.69E-14
K prom.			14.49E-14

Tabla 7.11: Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación a/c 0.50

Muestra N°	Profundidad media (m)	Porosidad	Coeficiente de permeabilidad (m/s)
Fecha: 21/03, Slump 10cm, aire 2.8%			
1	0.0062	13.70%	14.99E-14
2	0.0056	14.20%	12.89E-14
3	0.0056	13.50%	12.25E-14
4	0.0052	14.20%	10.89E-14
5	0.0066	14.30%	17.75E-14
K prom.			13.76E-14
Fecha: 28/03, Slump 17cm, Aire 3.4%			
1	0.0059	14.40%	14.26E-14
2	0.0061	14.50%	15.61E-14
3	0.0045	14.40%	8.44E-14
4	0.0055	14.60%	12.78E-14
5	0.0061	13.70%	14.75E-14
K prom.			13.17E-14
Fecha: 04/04, Slump 9cm, Aire 3.6%			
1	0.0061	12.80%	13.78E-14
2	0.0081	13.50%	25.63E-14
3	0.0044	12.60%	7.06E-14
4	0.0116	13.60%	52.49E-14
5	0.0076	13.50%	22.56E-14
K prom.			24.30E-14

Tabla 7.12: Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación a/c 0.60

Muestra N°	Profundidad media (m)	Porosidad	Coeficiente de permeabilidad (m/s)
Fecha: 11/04, Slump 17cm, Aire 3.6%			
1	0.0073	14.80%	22.51E-14
2	0.0083	15.30%	30.49E-14
3	0.0064	14.50%	17.19E-14
4	0.0088	15.30%	33.89E-14
5	0.0163	15.38%	118.27E-14
K prom.			44.47E-14
Fecha: 25/04, Slump 14.5cm, Aire 2%			
1	0.0087	15.60%	34.17E-14
2	0.0084	15.40%	31.07E-14
3	0.0070	15.50%	21.66E-14
4	0.0076	15.60%	26.07E-14
5	0.0078	15.50%	26.94E-14
K prom.			27.98E-14
Fecha: 02/05, Slump 12.5cm, Aire 2.4%			
1	0.0055	14.60%	12.78E-14
2	0.0036	14.20%	5.03E-14
3	0.0073	15.10%	24.56E-14
4	0.0106	15.20%	48.49E-14
5	0.0082	15.10%	27.96E-14
K prom.			23.77E-14

Tabla 7.13: Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación a/c 0.70

Muestra N°	Profundidad media (m)	Porosidad	Coeficiente de permeabilidad (m/s)
Fecha: 09/05, Slump 18cm, Aire 2.4%			
1	0.0170	15.50%	129.62E-14
2	0.0145	15.50%	94.29E-14
3	0.0170	15.30%	127.94E-14
4	0.0190	16.00%	167.13E-14
5	0.0215	16.10%	215.34E-14
K prom.			146.88E-14
Fecha: 23/05, Slump 10.5cm, Aire 2.3%			
1	0.0058	13.30%	12.95E-14
2	0.0079	13.10%	23.66E-14
3	0.0112	12.90%	46.40E-14
4	0.0133	13.40%	68.07E-14
5	0.0081	13.10%	24.87E-14
K prom.			35.19E-14
Fecha: 30/05, Slump 15cm, Aire 1.8%			
1	0.0175	15.00%	132.16E-14
2	0.0159	14.80%	109.04E-14
3	0.0113	14.80%	55.42E-14
4	0.0246	15.30%	261.59E-14
5	0.0181	15.10%	142.19E-14
K prom.			140.08E-14

A partir de estos resultados se puede hallar el valor promedio del coeficiente de permeabilidad (m/s), el cual será resumido en la siguiente tabla.

Tabla 7.14: Promedio de coeficiente de permeabilidad k (m/s) para cada relación a/c

Relación a/c	Coeficiente de permeabilidad k (m/s)
0.45	9.17E-14
0.5	18.39E-14
0.6	40.64E-14
0.7	123.18E-14

7.3.1 Identificación de valores atípicos. Test de Grubbs

En los resultados anteriores se ha observado datos anómalos o atípicos, por lo que se va a aplicar el Test de Grubbs para hallar si estos valores anómalos deben ser eliminados de la muestra. El test utiliza una estadística de prueba, G , que es la diferencia absoluta entre el valor atípico, N , y el promedio de la muestra (Media) dividida por la desviación estándar de la muestra y el valor resultante lo compara con los valores mostrados en la tabla a continuación.

Tabla 7.15: Valor crítico de comparación para determinar si son valores atípicos (Vic. Bammet y Toby Lewis, 1984)

Tamaño de muestra	Valor crítico
3	1.155
4	1.481
5	1.715
6	1.887
7	2.02
8	2.126
9	2.215
10	2.29

En las siguientes tablas se identifican los valores anómalos. Para determinar los valores atípicos a eliminar se aplicaron los siguientes criterios:

- 1.-Que sea un valor atípico determinado por Test de Grubbs
- 2.-Los valores dudosos determinados por Test de Grubbs también son considerados valores atípicos
- 3.-Los valores que se ocasionan un promedio de la mezcla mayor o menor a de las otras dos mezclas.
- 4.-Tres valores es la mínima cantidad por cada mezcla

Tabla 7.16: Evaluación de valores atípicos en Mezclas de relación 0.45, 0.50,0.60 y 0.70

Orden de menor a mayor	Identificar outliers	Media	Desv. Est.	Hallar G (N-Media)/Desvest	Valor critico al 95%	Comparación	¿Valor atípico?
Mezcla N°1 de relación 0.45							
3.312E-14	3.312E-14	5.886E-14	2.982E-14	0.86	1.67		
3.487E-14				0.80	1.67		
5.309E-14				0.19	1.67		
6.731E-14				0.28	1.67		
1.059E-13	1.059E-13			1.58	1.67	Dudoso	SI
Mezcla N°2 de relación 0.45							
4.765E-14	4.765E-14	7.634E-14	2.868E-14	1.00	1.67		
5.643E-14				0.69	1.67		
6.933E-14				0.24	1.67		
8.867E-14				0.43	1.67		
1.196E-13	1.196E-13			1.51	1.67	Dudoso	SI
Mezcla N°3 de relación 0.45							
6.208E-14	6.208E-14	1.449E-13	5.749E-14	1.44	1.67		
1.193E-13				0.44	1.67		
1.464E-13				0.03	1.67		
1.981E-13				0.93	1.67	Criterio 3	SI
1.985E-13	1.985E-13			0.93	1.67	Criterio 3	SI
Mezcla N°1 de relación 0.50							
1.090E-13	1.090E-13	1.375E-13	2.663E-14	1.07	1.67		
1.228E-13				0.55	1.67		
1.284E-13				0.34	1.67		
1.503E-13				0.48	1.67		
1.770E-13	1.770E-13			1.48	1.67	Dudoso	SI
Mezcla N°2 de relación 0.50							
8.410E-14	8.410E-14	1.315E-13	2.845E-14	1.66	1.67	Dudoso	SI
1.274E-13				0.14	1.67		
1.423E-13				0.38	1.67		
1.473E-13				0.56	1.67		
1.561E-13	1.561E-13			0.87	1.67		
Mezcla N°3 de relación 0.50							
7.079E-14	7.079E-14	2.432E-13	1.738E-13	0.99	1.67		
1.378E-13				0.61	1.67		
2.252E-13				0.10	1.67		
2.571E-13				0.08	1.67		
5.252E-13	5.252E-13			1.62	1.67	Dudoso	SI
Mezcla N°1 de relación 0.60							
2.252E-13	2.252E-13	4.450E-13	4.177E-13	0.53	1.67		
3.058E-13				0.33	1.67		
1.716E-13				0.65	1.67		
3.397E-13				0.25	1.67		
1.183E-12	1.183E-12			1.77	1.67	SI	SI
Mezcla N°2 de relación 0.60							
2.164E-13	2.164E-13	2.798E-13	4.806E-14	1.32	1.67		
2.604E-13				0.41	1.67		
2.702E-13				0.20	1.67		
3.110E-13				0.65	1.67		
3.413E-13	3.413E-13			1.28	1.67		
Mezcla N°3 de relación 0.60							
1.275E-13	1.275E-13	2.376E-13	1.661E-13	0.66	1.67		
5.035E-14				1.13	1.67	Criterio 3	SI
2.452E-13				0.05	1.67		
4.853E-13				1.49	1.67	Dudoso	SI
2.794E-13	2.794E-13			0.25	1.67		
Mezcla N°1 de relación 0.70							
9.414E-13	9.414E-13	1.469E-12	4.635E-13	1.14	1.67	no	
1.278E-12				0.41	1.67		
1.297E-12				0.37	1.67		
1.671E-12				0.44	1.67		
2.158E-12	2.158E-12			1.49	1.67	Dudoso	SI
Mezcla N°2 de relación 0.70							
1.290E-13	1.290E-13	3.519E-13	2.201E-13	1.01	1.67	Dudoso	SI
2.371E-13				0.52	1.67	Dudoso	SI
2.494E-13				0.47	1.67	Dudoso	SI
4.635E-13				0.51	1.67	Dudoso	SI
6.806E-13	6.806E-13			1.49	1.67	Dudoso	SI
Mezcla N°3 de relación 0.70							
5.543E-13	5.543E-13	1.401E-12	7.578E-13	1.12	1.67		
1.091E-12				0.41	1.67		
1.322E-12				0.10	1.67		
1.422E-12				0.03	1.67		
2.616E-12	2.616E-12			1.60	1.67	Dudoso	SI

La mezcla N°2 de la relación 0.70 tiene resultados muy por debajo de los promedios de las mezclas N°1 y 3, por lo que se eliminan los resultados de toda la mezcla. Estos valores menores se deben a que como se tuvo un slump menor a lo requerido se elaboraron las probetas con mayor golpes de martillo de goma a lo normado, con el objetivo de mejorar su cohesividad, lo que ayudó a una menor permeabilidad; no obstante este resultado no es representativo de la relación 0.70.

Según estos resultados los nuevos resultados del coeficiente de permeabilidad de cada relación a/c son como sigue:

Tabla 7.17: Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación 0.45

Muestra N°	Profundidad media (m)	Porosidad	Coficiente de permeabilidad (m/s)
Fecha: 29/02, Slump 9cm, aire 2.1%			
2	0.0038	12.70%	5.31E-14
3	0.0032	12.10%	3.47E-14
4	0.0044	12.00%	6.72E-14
5	0.0031	12.30%	3.31E-14
		K prom.	4.7E-14
Fecha: 07/03, Slump 8.5cm, aire 2.2%			
1	0.0050	12.30%	8.89E-14
2	0.0045	9.60%	5.63E-14
4	0.0045	11.80%	6.91E-14
5	0.0040	10.30%	4.77E-14
		K prom.	6.55E-14
Fecha: 14/03, Slump 14.5cm, aire 2.5%			
2	0.0040	13.40%	6.20E-14
4	0.0055	13.60%	11.90E-14
5	0.0060	14.10%	14.67E-14
		K prom.	10.93E-14

Tabla 7.18: Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación 0.50

Muestra N°	Profundidad media (m)	Porosidad	Coeficiente de permeabilidad (m/s)
Fecha: 21/03, Slump 10cm, aire 2.8%			
1	0.0062	13.70%	14.99E-14
2	0.0056	14.20%	12.89E-14
3	0.0056	13.50%	12.25E-14
4	0.0052	14.20%	10.89E-14
		K prom.	12.76E-15
Fecha: 28/03, Slump 17cm, Aire 3.4%			
1	0.0059	14.40%	14.26E-14
2	0.0061	14.50%	15.61E-14
4	0.0055	14.60%	12.78E-14
5	0.0061	13.70%	14.75E-14
		K prom.	1.435E-13
Fecha: 04/04, Slump 9cm, Aire 3.6%			
1	0.0061	12.80%	13.78E-14
3	0.0044	12.60%	7.06E-14
5	0.0076	13.50%	22.56E-14
		K prom.	14.47E-14

Tabla 7.19: Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación 0.60

Muestra N°	Profundidad media (m)	Porosidad	Coeficiente de permeabilidad (m/s)
Fecha: 11/04, Slump 17cm, Aire 3.6%			
1	0.0073	14.80%	2.25094E-13
2	0.0083	15.30%	3.04982E-13
3	0.0064	14.50%	1.71852E-13
4	0.0088	15.30%	3.38949E-13
		K prom.	2.60219E-13
Fecha: 25/04, Slump 14.5cm, Aire 2%			
1	0.0087	15.60%	34.17E-14
2	0.0084	15.40%	31.07E-14
3	0.0070	15.50%	21.66E-14
4	0.0076	15.60%	26.07E-14
5	0.0078	15.50%	26.94E-14
		K prom.	27.98E-14
Fecha: 02/05, Slump 12.5cm, Aire 2.4%			
1	0.0055	14.60%	12.78E-14
3	0.0075	15.10%	24.56E-14
5	0.0080	15.10%	27.96E-14
		K prom.	21.77E-15

Tabla 7.20: Resultados de coeficiente de permeabilidad de mezclas de relación 0.70

Muestra N°	Profundidad media (m)	Porosidad	Coeficiente de permeabilidad (m/s)
Fecha: 09/05, Slump 18cm, Aire 2.4%			
1	0.0170	15.51%	129.62E-14
2	0.0145	15.47%	94.29E-14
3	0.0170	15.28%	127.94E-14
4	0.0190	15.99%	167.13E-14
		K prom.	129.67E-14
Fecha: 30/05, Slump 15cm, Aire 1.8%			
1	0.0175	15.00%	132.16E-14
2	0.0159	14.78%	109.04E-14
3	0.0113	14.82%	55.42E-14
5	0.0181	15.13%	142.19E-14
		K prom.	109.72E-14

Entonces, a partir de los valores hallados retirando los valores atípicos, los resultados promedio del coeficiente de permeabilidad k por cada relación a/c son los siguientes:

Tabla 7.21: Promedio de coeficiente de permeabilidad k (m/s) para cada relación a/c

Relación a/c	Coeficiente de permeabilidad k (m/s)
0.45	7.39E-14
0.5	13.85E-14
0.6	25.25E-14
0.7	119.69E-14

7.3.2 Gráficas de coeficiente de permeabilidad versus relación a/c

Con el objetivo de realizar comparaciones se elabora las gráficas de relación a/c vs coeficiente de permeabilidad. Se presentan dos: una con los resultados de todos los especímenes y otra con los resultados retirando los valores atípicos. Se ha graficado los valores promedio de coeficiente de permeabilidad de las tres mezclas por cada relación a/c , se han unido con líneas rectas los promedios de los resultados de cada relación a/c . El gráfico a continuación muestra la recta generada por los valores promedio de cada relación a/c vs coeficiente de permeabilidad.

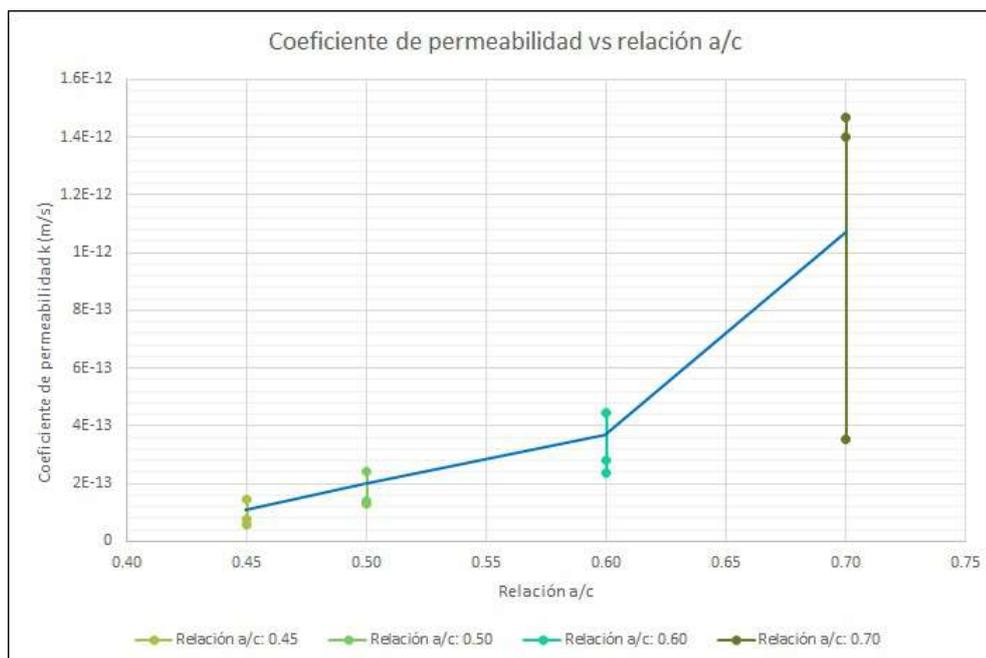


Figure 7.3: Recta de Coeficiente de permeabilidad vs Relación agua/cemento

El gráfico a continuación muestra la recta generada por los valores promedio sin considerar los valores atípicos de los coeficiente de permeabilidad.



Figure 7.4: Recta de Coeficiente de permeabilidad sin valores atípicos vs Relación agua/cemento

Luego, con la tabla de los valores promedio de coeficiente de permeabilidad se elabora

una figura de esta relación, en ambos casos: con y sin valores atípicos.

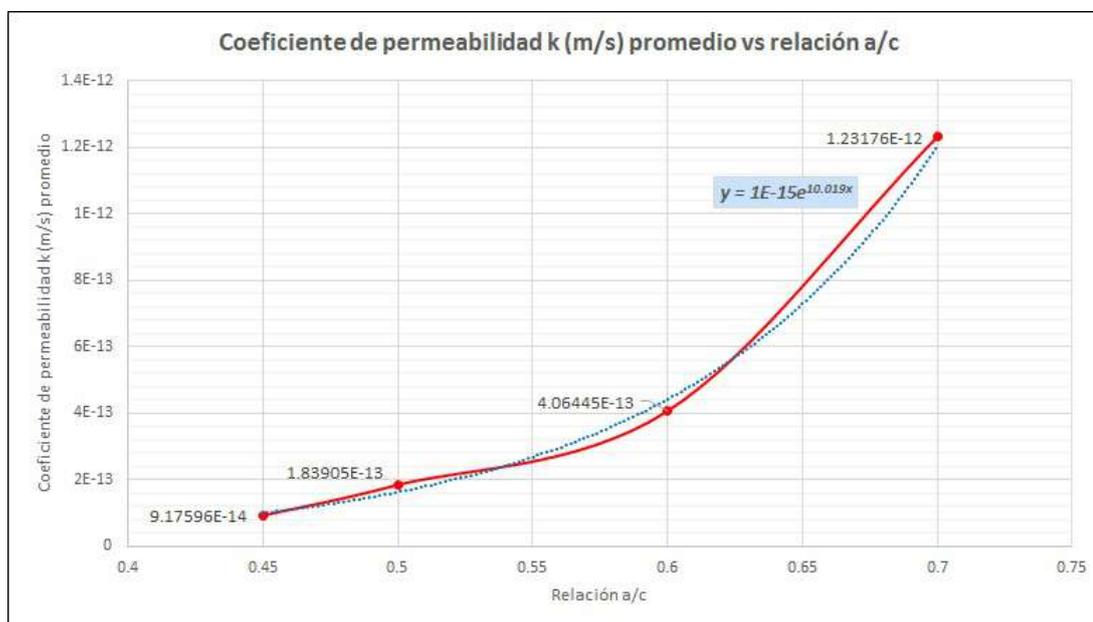


Figure 7.5: Curva Coeficiente de permeabilidad promedio vs Relación agua/cemento

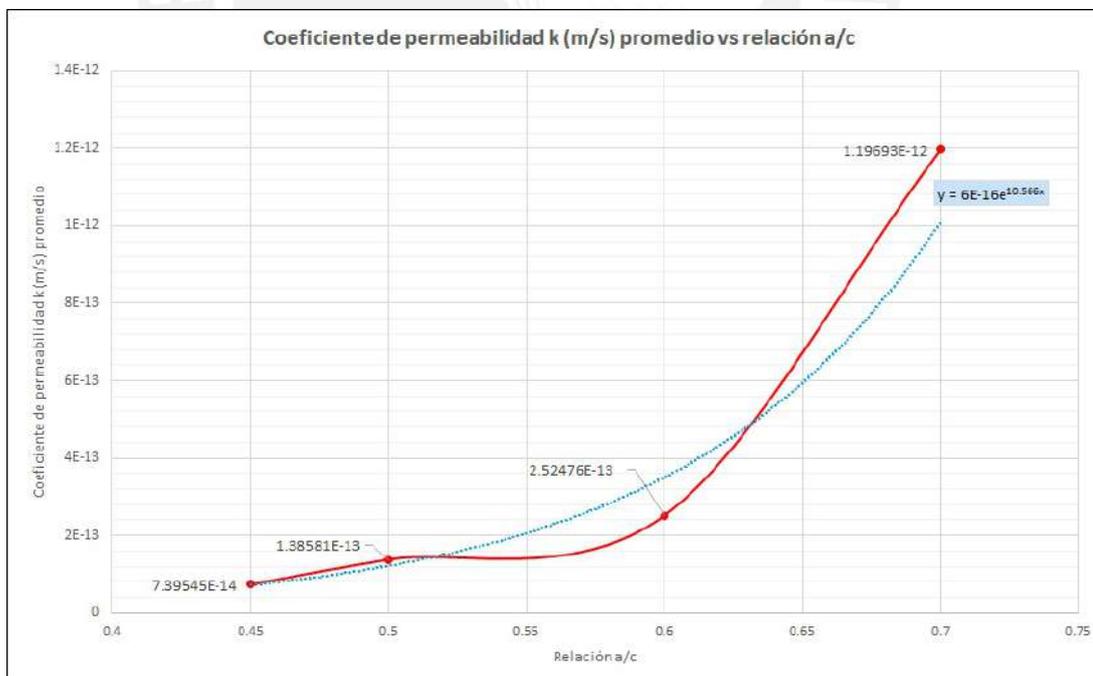


Figure 7.6: Curva Coeficiente de permeabilidad promedio sin valores atípicos vs Relación agua/cemento

Chapter 8

Análisis de Resultados

En el presente capítulo se procede al análisis de los resultados obtenidos tras el procesamiento de estos. Los ensayos se hicieron de acuerdo a la Norma EN 12390-8 y en las instalaciones del Laboratorio de Estructuras Antisísmicas de la Pontificia Universidad Católica del Perú.

8.1 Evaluación del tipo de cemento utilizado

El cemento utilizado en la presente investigación es el cemento portland Tipo I por ser de uso común en Perú. El cemento posee propiedades físicas y químicas aceptables al encontrarlas dentro de los parámetros establecidos por NTP 334.009 y ASTM C-150. Se compró un lote de cemento Sol de fecha 28 de febrero de 2016, las bolsas fueron debidamente protegidas para que su duración sea hasta la finalización de la investigación. Lamentablemente las dos últimas bolsas, para la mezcla del 01 de julio se encontraban hidratadas y se tuvo que usar bolsas de cemento Sol de otro lote.

8.2 Evaluación del agregado fino

Para la presente investigación se utilizó agregado fino de la Cantera Jicamarca.

1. El agregado fino es el material que ocupa los espacios que están libres entre los granos del agregado grueso, por ello es necesario que cumpla con la Norma NTP 400.037
2. El agregado fino utilizado tiene una granulometría que está dentro de los límites impuestos por la NTP. Ver Figura 5.2
3. El módulo de finura de esta arena es 2.8, indica que se trata de una arena gruesa siendo esta la característica principal necesaria para hacer concreto de mayor resistencia. El MF cumple el requisito de la ASTM C33 que debe ser mayor que 2.3 y menor que 3.1
4. Tiene un peso específico seco igual a 2.65 gr/cm^3 siendo este un valor promedio

de los ensayos realizados.

5. Presenta un porcentaje de absorción igual a 1.33%, valor obtenido del promedio de dos ensayos realizados, este valor se tuvo presente al momento de hacer las correcciones al agua de la mezcla, ya que un exceso causaría disminución en la resistencia a la compresión.

6. Presenta un peso unitario suelto de 1.53 kg/m^3 , promedio de dos ensayos realizados, este valor es útil cuando queremos convertir cantidades en peso a cantidades en volumen

7. Presenta un peso unitario compactado promedio de 1.68 kg/cm^3 , valor que muestra el incremento de su peso con relación a su peso suelto.

8. Muestra un contenido de humedad promedio de 2.26 %, el contenido de humedad natural del agregado fino se utilizó en la dosificación de cada muestra los valores obtenidos en cada mezcla se encuentran detalladas en la tabla adjunta. 9. Los valores de humedad del agregado fino tienen valores iniciales altos debido a que la arena era lavada (con el objetivo de eliminar impurezas) pero la humedad fue disminuyendo a medida que se secaba.

Tabla 8.1: Contenido de humedad natural de agregado fino en cada mezcla y el promedio

Relación a/c	Mezcla N°	Día	Humedad natural arena %
0.45	1	29-feb	2.74
	2	07-mar	4.08
	3	06-jun	2.41
0.5	1	21-mar	2.87
	2	28-mar	3.94
	3	04-abr	2.91
0.6	1	11-abr	1.89
	2	25-abr	1.34
	3	02-may	1.34
0.7	1	23-may	1.33
	2	16-may	1.13
	3	30-may	1.13
Promedio de humedad natural %			2.26

8.3 Evaluación del agregado grueso

Para la presente investigación se utilizó agregado grueso de la Cantera Jicamarca.

1. El agregado grueso utilizado tiene una granulometría que está dentro de los límites establecidos por la NTP y ha sido clasificado dentro de los Husos normados por la ASTM C-33 como huso 5. Ver Figura 5.1.
2. El módulo de finura del agregado grueso es 6.63 y TMN de 1", indica que se trata de una piedra chancada con poca presencia de tamaños pequeños de piedras.
3. Tiene un peso específico seco igual a 2.71 gr/cm^3 siendo este un valor promedio de los ensayos realizados.
4. Presenta un porcentaje de absorción igual a 0.51%, valor obtenido del promedio de dos ensayos realizados, este valor se utilizó al momento de hacer las correcciones al agua de la mezcla, ya que un exceso causaría disminución en la resistencia a la compresión.
5. Presenta un peso unitario suelto de 1.37 kg/m^3 , promedio de dos ensayos realizados, este valor es útil cuando queremos convertir cantidades en peso a cantidades en volumen
6. Presenta un peso unitario compactado promedio de 1.46 kg/cm^3 , lo que muestra el incremento de su peso con relación a su peso suelto.
7. Muestra un contenido de humedad promedio de 0.36 %, el contenido de humedad natural del agregado grueso se utilizó en la dosificación de cada muestra los valores obtenidos en cada mezcla se encuentran detalladas en la tabla adjunta.

Tabla 8.2: Contenido de humedad natural de agregado grueso en cada mezcla y el promedio

Relación a/c	Mezcla N°	Día	Humedad natural piedra %
0.45	1	29-feb	0.37
	2	07-mar	0.41
	3	06-jun	0.42
0.5	1	21-mar	0.41
	2	28-mar	0.20
	3	04-abr	0.35
0.6	1	11-abr	0.39
	2	25-abr	0.36
	3	02-may	0.36
0.7	1	09-may	0.36
	2	23-may	0.36
	3	30-may	0.36
Promedio de humedad natural %			0.36

8.4 Evaluación del agregado global

El agregado global se obtuvo con la relación más conveniente de la mezcla entre el agregado grueso y el agregado fino utilizando el método de fuller, y además la cantidad de agua se ajustó a efecto de obtener el slump requerido.

1. Se obtuvo una relación arena/piedra igual a 50% de arena y 50% de piedra. Con esta combinación se realizaron mezclas de prueba que resultaron con slump rechazados por ser de corte. Debido a ello se aumentó el contenido de arena para darle mayor cohesión a la pasta de cemento hidratado llegando a un 55% de arena y 45% de piedra.
2. La granulometría realizada para el agregado global cumple los límites propuestos por la norma DIN 1045.
3. Posee un módulo de finura de 6.63 y tamaño máximo nominal de 1" óptimo para el uso en un concreto de uso general.

8.5 Evaluación del concreto fresco

Se realizaron probetas de concreto para relaciones a/c: 0.45, 0.5, 0.6 y 0.7 con corrección por agua de modo que llegue al slump requerido.

Primero se realizó mezcla patrón sin aditivo reductor de agua/plastificante para eval-

uar el ingreso de aire, el cual resultó 2%, valor acorde a la dosificación. Por tanto se procedió con las mezclas de prueba con aditivo. El aditivo le brindó mayor trabajabilidad por lo que se disminuyó la cantidad de agua al concreto patrón, razón por la cual cambiaron las proporciones de cemento, piedra y arena.

Se realizó una mezcla patrón para concreto con aditivo plastificante de relación a/c: 0.5 y se fue disminuyendo el aditivo para las relaciones a/c: 0.6 y 0.7. Asimismo, se tuvo en cuenta el contenido de aire, ya que el concreto patrón resultó 2% de aire, se mantuvo ese diseño de mezcla en las probetas. El revenimiento de las mezclas de relación 0.45 es menor al de diseño debido a las condiciones de temperatura que se puede observar en la Tabla 6.6, así como la dificultad para establecer un concreto de revenimiento estable sin utilizar el máximo permitido de aditivo plastificante. La mezcla 1 de relación 0.6 tiene temperatura de concreto de 32 grados, característica que ocasiona mayor revenimiento al de diseño. En cuanto al porcentaje de aire dentro de la mezcla, este tiene valores mayores en las mezclas que tienen temperatura cercana a 32 grados (máxima permitida). La temperatura elevada del concreto ocasiona características en estado fresco variables y diferentes al concreto patrón de menor temperatura.

8.6 Evaluación del concreto endurecido

8.6.1 Resistencia a la compresión

En la figura a continuación se muestra los resultados de la resistencia a la compresión por cada relación a/c.

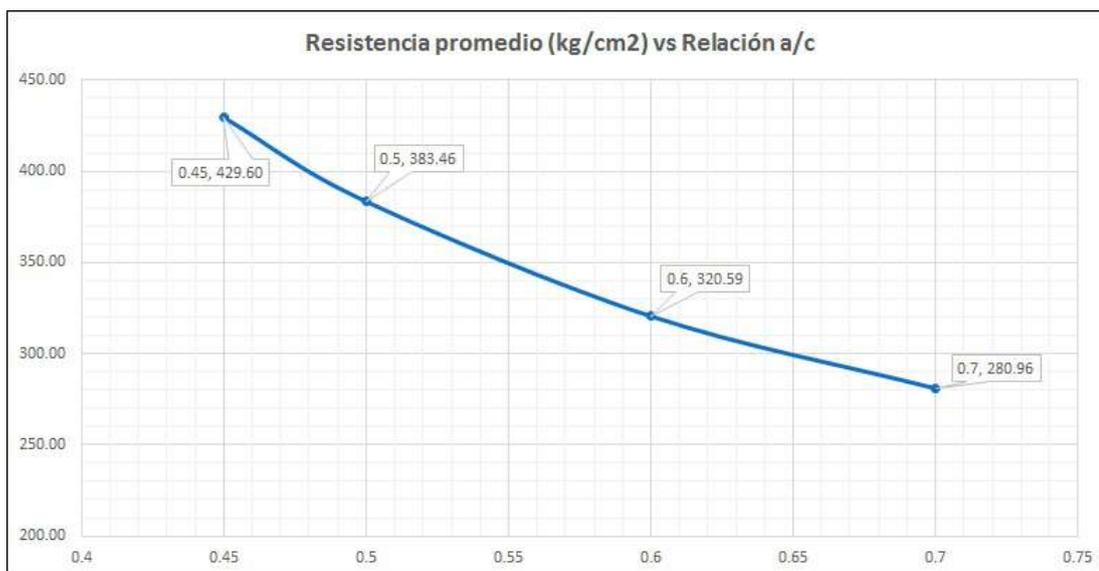


Figure 8.1: Curva de resistencia a la compresión promedio vs relación a/c

Se puede observar que a mayor a/c, menor resistencia a la compresión del concreto. La curva generada es similar a curvas obtenidas en otras investigaciones como la figura siguiente de Kosmatka que nos da el espectro de rango de valores de resistencia la compresión vs relación a/c.

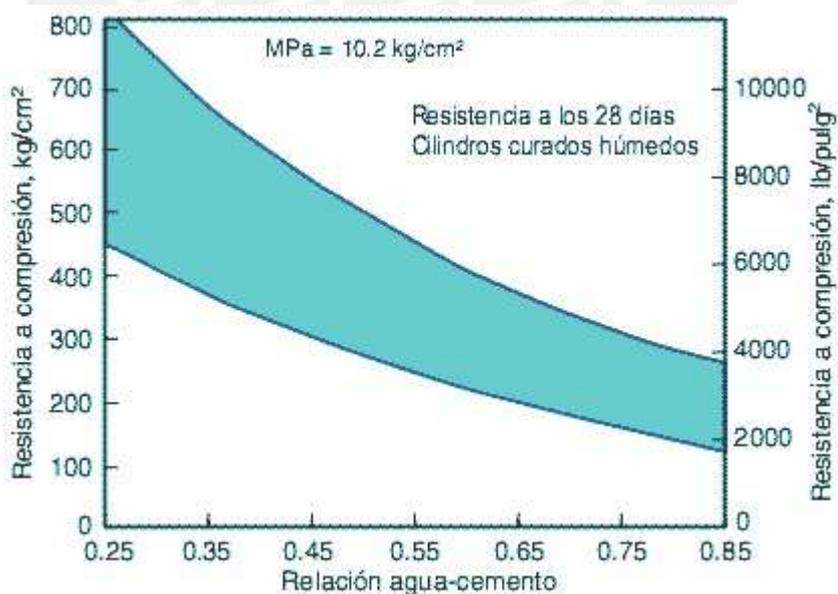


Figure 8.2: Variación de resistencias típicas para relaciones agua-cemento de concreto de cemento portland basadas en más de 100 diferentes mezclas de concreto moldeadas entre 1985 y 1999 (Kosmatka et al., 2004)

Las tablas a continuación muestran los valores de la resistencia a la compresión para 7 días y 28 días y el cálculo de la ganancia de resistencia de los 7 días respecto a 28 días en porcentaje.

Tabla 8.3: Ganancia de resistencia a la compresión a los 7 días para relación a/c 0.45

Edad (días)	Fecha de vaciado		
	29/02/2016	07/03/2016	14/03/2016
Resistencia a la compresión 7 días	374.89	347.51	354.84
Resistencia a la compresión 28 días	420.94	432.89	434.95
Ganancia de resistencia 7 días	89%	80%	82%

Tabla 8.4: Ganancia de resistencia a la compresión a los 7 días para relación a/c 0.5

Edad (días)	Fecha de vaciado		
	21/03/2016	28/03/2016	04/04/2016
Resistencia a la compresión 7 días	335.32	316.00	331.04
Resistencia a la compresión 28 días	393.97	373.07	383.35
Ganancia de resistencia 7 días	85%	85%	86%

Tabla 8.5: Ganancia de resistencia a la compresión a los 7 días para relación a/c 0.6

Edad (días)	Fecha de vaciado		
	11/04/2016	25/04/2016	02/05/2016
Resistencia a la compresión 7 días	270.76	266.37	281.69
Resistencia a la compresión 28 días	315.41	315.72	330.65
Ganancia de resistencia 7 días	86%	84%	85%

Tabla 8.6: Ganancia de resistencia a la compresión a los 7 días para relación a/c 0.7

Edad (días)	Fecha de vaciado		
	09/05/2016	23/05/2016	30/05/2016
Resistencia a la compresión 7 días	228.72	226.17	232.53
Resistencia a la compresión 28 días	289.21	280.40	273.28
Ganancia de resistencia 7 días	79%	81%	85%

Se puede encontrar que la ganancia de resistencia a los 7 días es mayor a 75% de la resistencia a los 28 días. Este cálculo se realiza como comprobación, ya que el diseño de las mezclas patrón fue a partir de relaciones a/c y no de resistencia de concreto requerida.

En los resultados de $f'c$ promedio, la diferencia simple entre el esfuerzo de cada probeta y el promedio y la diferencia en % en el capítulo anterior (Tablas 7.1, 7.2, 7.3 y 7.4) muestra que los valores se encuentran por debajo del máximo rango aceptable (6.60%) de diferencia para resultados de esfuerzos de 2 especímenes. Es por ello, que los resultados parciales de esfuerzos promedio se encuentran dentro de la dispersión aceptable según la ASTM C39 para condiciones de laboratorio .

8.6.2 Permeabilidad del concreto al agua bajo presión

Se ha realizado tres mezclas por cada relación a/c con el objetivo de obtener una data amplia, ello a permitido obtener resultados que nos dan un buen indicio del comportamiento de la permeabilidad en el concreto. Se obtuvo dos gráficas, una con todos los valores obtenidos (Figura 7.5) y otro retirando los valores atípicos (Figura 7.6). Se puede comparar en ambas gráficas que los valores atípicos resultan valores mayores de coeficiente de permeabilidad para la relación a/c 0.60 y la 0.70. Esto hace notar que para próximas tesis es recomendable ensayar para relaciones intermedias (0.55, 0.65 y 0.75)

Respecto a los valores promedio de coeficiente de permeabilidad respecto a cada relación a/c estos pueden compararse con los valores de concreto de control o patrón de ensayos de la Norma ACI 212.3R-10. El concreto de referencia para cada tipo de aditivo reductor de permeabilidad tiene diferentes características para cada uno y no se pueden comparar entre sí, así que solo se compararán valores individuales. La gráfica a continuación muestra los valores del concreto de referencia junto con el concreto con aditivos reductores de permeabilidad, cabe recalcar que los valores del coeficiente de permeabilidad han sido hallados con la formula de Valenta aplicando el ensayo modificado de la EN 12390-8.

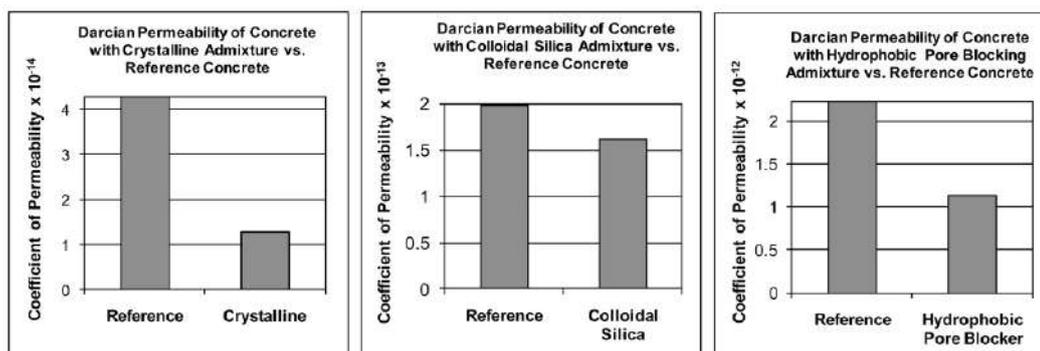


Figure 8.3: Reducción en permeabilidad usando aditivos reductores de permeabilidad respecto a concretos de referencia. Ensayos usando EN 12390-8 modificada (Presión 1.0MPa y tiempo 96 horas) (ACI 212.3R, 2010)

El concreto de referencia de aditivo hidrófobico bloqueador de poros tiene coeficiente de permeabilidad (k) de 2.23×10^{-12} m/s, valor cercano al resultado del k de la relación a/c 0.7 de 1.19×10^{-12} m/s. Lo mismo sucede con el concreto de referencia de aditivo coloidal de sílice, cuyo valor de k es de 1.98×10^{-13} , similar al k de la relación 0.6 de 2.52×10^{-13} .

El valor lejano es el de la relación 0.45 (7.39×10^{-14} m/s) con respecto al concreto de referencia del aditivo cristalino (4.29×10^{-14}), esto puede deberse a que su dosificación ha sido elaborada para un concreto de a/c 0.4.

En el capítulo 3, se detalla los factores que influyen en la permeabilidad y dentro de ellos está la relación agua/cemento y el curado; y se presenta la Figura 3.1 como ejemplo del comportamiento de la permeabilidad con respecto a la relación a/c y el curado inicial. Esta figura fue realizada para dos condiciones (con 1 y 7 días de curado húmedo y ambos ensayados a los 90 días curados al aire), los resultados de permeabilidad muestran valores de 1×10^{-12} , 5×10^{-12} , 9×10^{-12} y 40×10^{-12} m/s para relación a/c 0.4, 0.5 y 0.6 respectivamente.

Puede observarse que son valores mayores a los hallados en la presente tesis, esto se debe a que el curado ha sido seco y no húmedo lo que ha hecho que la hidratación se detenga. Además, a pesar que el ensayo ha sido con concreto de mayor edad, esto no ha colaborado en una menor permeabilidad. De esta comparación se puede concluir que el curado es determinante para obtener valores de permeabilidad menores, a pesar de la relación a/c que contenga el concreto.

La figura muestra los valores obtenidos por Powers sobre pastas de cemento hidratado, donde compara diferentes relaciones a/c con su respectivo coeficiente de permeabilidad.

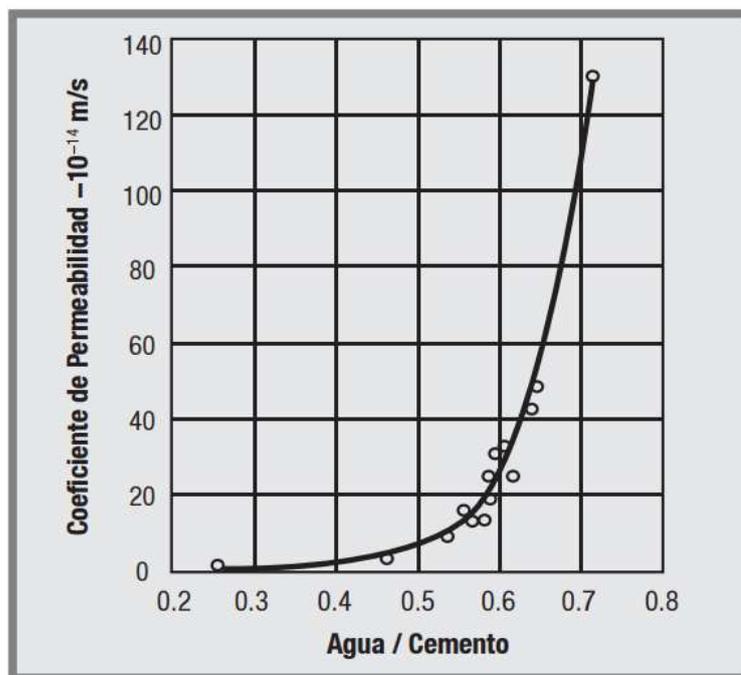


Figure 8.4: Efecto de la relación agua/cemento sobre los coeficientes de permeabilidad en pastas de cemento hidratado al 93% de hidratación (Powers et al, 1954)

Observamos que los valores del coeficiente de permeabilidad de la pasta de cemento hidratado tienen un comportamiento similar en cuanto a que la curva generada es exponencial como el de concreto endurecido. No obstante los valores obtenidos varían en magnitud debido a las diferentes condiciones de ensayo y que son diferentes muestras (la presente tesis es con concreto endurecido curado a 28 días, la curva de Powers es a partir de pasta de cemento hidratado-pch con 93% de hidratación)

A pesar de que los procedimientos de ensayo de permeabilidad del concreto están en su mayoría normalizados, la medición de la permeabilidad del concreto continua siendo una medida muy especializada. En los laboratorios de concreto el dispositivo para medir permeabilidad no es tan frecuente. Esto se debe principalmente a las pocas especificaciones que existen referentes a la permeabilidad al agua del concreto. Este es el caso del comité ACI 350 “Código de Requerimientos para estructuras de concreto de ingeniería ambiental“ que expone los métodos de diseño de estructuras de concreto reforzado para contener líquidos o gases, dentro de su lista de lo que debe aparecer en

las memorias de diseño, en lo que se refiere al concreto solo se menciona la resistencia a la compresión, la relación A/C y algunas otras características. La resistencia a la penetración al agua, permeabilidad o el coeficiente de Darcy del material, ni siquiera se mencionan en esta norma donde aparecen todas las previsiones para hacer tanques de agua.

Por otro lado, el comité ACI 318-08 define el ambiente categoría P, como un lugar donde el agua se considera un agresor. Es así que en el caso de mayor exposición P1, se debe considerar con un concreto de baja permeabilidad (Capítulo 4 Requerimientos de Durabilidad). Un tanque contenedor de agua se considera como el ejemplo para la situación P1, cuyo requisito para el concreto solo se menciona una resistencia mínima de 28 MPa y una relación A/C máxima de 0,5. Tampoco hay alguna especificación referente a la habilidad del agua para penetrar el concreto (Hermida, 2003)

Las especificaciones de permeabilidad aparecen en general para estructuras con niveles de ingeniería avanzados y por lo tanto para niveles de inversión elevados. Las presas, reactores nucleares y estructuras Offshore son algunos de los ejemplos en los que la permeabilidad al agua del concreto aparece con un requerimiento determinado como puede serlo el de la resistencia a la compresión. Un ejemplo de ello es la referencia siguiente: en una presa de concreto compactado con rodillo (CCR) la permeabilidad del material se especifica entre 15 a 1500 m/s x 10⁻¹¹ (Kliner, 2003).

Existen especificaciones internacionales como las siguientes, con las que se evaluará si los resultados obtenidos cumplen las mismas.

El coeficiente de Darcy o de permeabilidad ha sido usado para clasificar a los concretos como poco permeables o muy permeables, la tabla a continuación muestra la clasificación según la NTC 4483.

Tabla 8.7: Clasificación de la permeabilidad del concreto de acuerdo a la NTC 4483

Tipo de concreto	Coeficiente de Darcy k (m/s)
Concreto de baja permeabilidad	<10 ⁻¹²
Concreto de mediana permeabilidad	10 ⁻¹⁰ a 10 ⁻¹²
Concreto de alta permeabilidad	>10 ⁻¹⁰

Podemos observar que los resultados obtenidos en la presente tesis son de concretos de baja permeabilidad según esta clasificación.

Un concreto se considera suficientemente impermeable al agua según el Reglamento del Gobierno Español (EHE 08) si los resultados del ensayo de penetración del agua cumplen simultáneamente que:

Tabla 8.8: Cuadro de casos de exposición ambiental y sus especificaciones de profundidades máximas y medias (mm) (EHE 08)

Clase de exposición ambiental	Especificación para la profundidad máxima	Especificación para la profundidad media
IIIa, IIIb, IV, Qa, E, H, F, Qb (en el caso de elementos en masa o armados)	50 mm	30 mm
IIIc, Qc, Qb (solo en el caso de elementos pretensados)	30 mm	20 mm

Se puede observar que según la tabla, para el concreto diseñado en la presente tesis le corresponde una especificación de profundidad máxima de 50 mm y profundidad media de 30 mm. Los concretos de relación a/c 0.45, 0.5, 0.6 y 0.7 cumplen esta especificación.

También existe la recomendación de SIKKA presente en su manual Sika Concrete Handbook (2012) que la máxima profundidad de penetración del agua bajo presión según la EN 12390 es de 30mm para un concreto de buena calidad.

En la figura a continuación se muestra la profundidad de penetración para cada relación a/c.

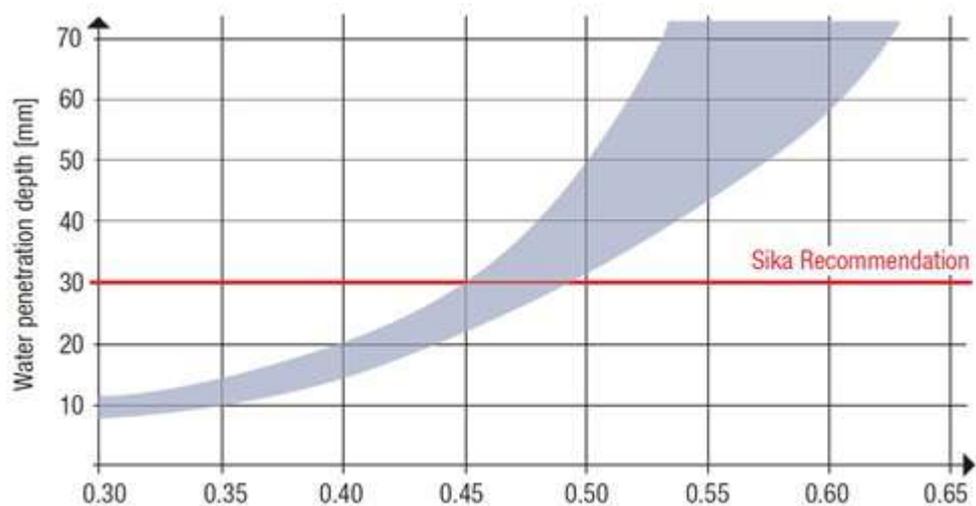


Figure 8.5: Profundidad del agua bajo presión (mm) vs relación a/c (Sika, 2012)

Se puede observar que según la figura anterior la profundidad máxima de penetración debe ser de 30mm, los valores promedio de los concretos de relación a/c 0.45, 0.5 y 0.6 cumplen esta recomendación, no obstante algunas muestras de concreto de relación a/c 0.7 no cumplen esta recomendación. Esta última observación es válida en cuanto a la permeabilidad es alta a partir de esta relación a/c 0.7 ya que se produce discontinuidad de poros capilares (Hearn et al, 2006)

8.7 Evaluación de la implementación del ensayo

La implementación del ensayo de la permeabilidad del concreto al agua bajo presión sigue la norma EN 12390-8 la cual fue adaptada para elaborar un manual de uso para el LEDI-PUCP. Se usó el equipo de penetración hidráulica FORM TEST conectado a un compresor de aire. Se tuvieron problemas iniciales para mantener los especímenes sin fuga, principalmente en aquellos especímenes que tenían la cara con quiebras y vacíos grandes ocasionados por una mala elaboración de la probeta. No obstante, se pudo controlar las fugas deteniendo el ensayo y volviendo a asegurar el espécimen con la llave francesa 12 que ajusta el perno de sujeción. Estas soluciones que se dieron a problemas presentados durante la ejecución del ensayo se incluyeron en el manual del mismo. También se observó que para un mejor ajuste del espécimen este debía ser cortado de manera perpendicular para evitar cualquier posibilidad de fuga.

Chapter 9

Conclusiones y Recomendaciones

Las conclusiones que se presentan son el resultado del análisis del ensayo de permeabilidad de concreto al agua bajo presión con un espacio muestral de 60 probetas de 15x30cm con resultados de coeficiente de permeabilidad obtenidos por medio de la norma EN 12390-8 y la fórmula de Valenta.

La elaboración, curado y ensayo de las muestras fue realizado en condiciones de laboratorio. Las relaciones agua/cemento usadas fueron las siguientes: 0.45, 0.5, 0.6 y 0.7.

9.1 Conclusiones

En base a los resultados obtenidos y análisis de los mismos podemos concluir lo siguiente:

-El coeficiente de permeabilidad (k) a los 28 días con curado húmedo es de 7.39×10^{-14} , 13.85×10^{-14} , 25.25×10^{-14} y 119.69×10^{-14} para concretos de relación agua/cemento de 0.45, 0.5, 0.6 y 0.7 respectivamente.

-La relación que existe entre el coeficiente de permeabilidad y la relación a/c es directa y varía de forma exponencial.

-Se concluye que a menor relación a/c, menor profundidad de penetración del agua bajo presión, por lo tanto menor permeabilidad de concreto al agua.

-Se ha demostrado que el factor del curado húmedo continuo durante los 28 días es determinante para una menor permeabilidad. Se ha comparado los resultados de la gráfica de Whiting con los resultados obtenidos en la presente tesis.

-El coeficiente de permeabilidad es el resultado de diversos factores, entre lo cuales están la profundidad de penetración del agua bajo presión y la porosidad (%). No

obstante, se ha comprobado que es susceptible a variaciones en: el porcentaje de aire, la temperatura del concreto y el asentamiento (slump); características del concreto en estado fresco, por lo que se recomienda controlar dichas propiedades en futuras investigaciones.

-Los valores de coeficiente de permeabilidad obtenidos por medio de la fórmula de Valenta demuestran que la porosidad (ASTM 642) influye notablemente en el coeficiente de Darcy, ya que este valor incrementa o disminuye de manera directamente proporcional a la profundidad máxima de penetración.

-Los especímenes de concreto cumplen con la especificación del gobierno español en cuanto a profundidad máxima y media de penetración.

-La porosidad obtenida por medio de ASTM 642 para cada espécimen tiene un valor proporcional a la profundidad máxima de penetración de la EN 12390-8. No obstante en algunos especímenes no se cumple esta relación esto se debe a que la porosidad es la relación entre el volumen de poros saturables de agua con respecto al volumen total del concreto que incluye el volumen de sólidos y poros saturables como no saturables. Pero los poros saturables pueden ser continuos o discontinuos (ciegos), solo los poros continuos (que unen dos superficies externas en el concreto) contribuyen con la permeabilidad. Por lo tanto, es posible contar con una porosidad alta pero con baja permeabilidad o viceversa.

-El ensayo de permeabilidad del concreto al agua bajo presión debe realizarse siguiendo la norma EN 12390-8, no obstante son dos rutas las que se pueden tomar: ensayo durante 3 días para hallar solamente la profundidad de penetración del agua bajo presión o la norma modificada que indica durante 4 días para hallar el coeficiente de permeabilidad.

-En cuanto a la implementación del ensayo de la norma EN 12390-8 en el LEDI-PUCP se concluye que se ha adaptado la norma al laboratorio satisfactoriamente, haciendo determinados cambios para perfeccionar el procedimiento y llevándolo a cabo exitosamente sin fugas en los especímenes.

9.2 Recomendaciones

Se recomienda seguir la línea de esta investigación para poder comparar la gran variedad de aditivos "impermeabilizantes" y poder tomar decisiones sobre el buen uso de ellos ante la presión y con diferentes tipos de concreto en distintos contenedores de

agua y obras de ingeniería avanzados como represas, etc.

Es recomendable el buen uso del vibrado mecánico en el proceso de colocación del concreto en la construcción de estructuras importantes que alberguen agua en su interior, ya que el concreto reducirá su permeabilidad y esto hace que la velocidad de infiltración sea más lenta y se alargue en cierto modo el tiempo de vida útil de la estructura.

Al hacer pruebas en concretos con relación agua/cemento 0.6 o más es recomendable realizar el ensayo a edades mayores a los 28 días, a fin de conocer en que instante se estabiliza el coeficiente de permeabilidad. Los especímenes pueden presentar fugas en la cara sometida a presión por lo que se debe asegurar que esta no tenga quiniaduras ni vacíos. También se debe asegurar que no haya fugas presionando el espécimen mediante la rotula ajustada con llave francesa N^(o)12. Tener en cuenta ambas recomendaciones para la implementación del ensayo. Se recomienda realizar el ensayo de permeabilidad del concreto al agua bajo presión en núcleos extraídos de estructuras que están o estarán sometidas a presión de agua para comprobar los valores del coeficiente de permeabilidad. Se recomienda 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. Se tiene un buen indicio del comportamiento de las muestras, no obstante es recomendable concentrarse en una sola relación agua/cemento y ensayar el mayor número de probetas para distintas edades de concreto partir de los 28 días de edad. De este modo, la dispersión de los resultados se reducirá.

Chapter 10

Bibliografía

ACI 350-06 (2006) Código de Requerimientos para estructuras de concreto de Ingeniería Ambiental. American Concrete Institute

ACI 318-08 (2008) Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute

ACI 212.3R-10 (2010) "Report on chemical admixtures for concrete" American Concrete Institute

Adam, N. (1998). Tecnología del Concreto. Tomo I, Editorial Limusa, México.

Amorós, J. L., Beltrán, V., Escardino, A., y Orts, M. J. (1992). Permeabilidad al aire de soportes cocidos de pavimento cerámico.(I) Influencia de las variables de prensado y de la temperatura de cocción. Bol. Soc. Esp. Ceram. Vidr, 31(1), 33-38.

ASTM C 1585-04 "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes" American Standards Testing Materials Vo. 4.02 Concrete and Aggregates, 201 ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, U.S.A.

ASTM C 642-97 (2004). Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, U.S.A.

Basheer, P. A. M., y Nolan, E. (2001). Near-surface moisture gradients and in situ permeation tests. Construction and Building Materials, 15(2), 105-114.

BS 1881-122: 2011. Curva del factor de corrección por tamaño de muestra en BS 1881-122: 2011

DIN 1048. Esquema de realización de ensayo de DIN 1048

Ebensperger, L., y Torrent, R. (2010). Medición "in situ" de la permeabilidad al aire del hormigón: status quo. Revista ingeniería de construcción, 25(3), 371-382.

Einsiedl (2015) Esquema de una celda triaxial. Recuperado de: http://www.hydro.geo.tum.de/fileadmin/user_upload/processed-/csm-Triax-2406-e5d0552102.png

EN 12390 “Testing hardened concrete –Part 8: Depth of penetration of water under pressure” English version of DIN EN 12390-8:2009-07.

Fernández, R., y Navas, A. (2012). Diseño de mezclas para evaluar su resistencia a la compresión uniaxial y su permeabilidad. *Infraestructura Vial* Vol. 13 Núm. 24 2012.

Hearn, N., Hooton, R. D., and Nokken, M. R. (2006). Pore structure, permeability, and penetration resistance characteristics of concrete. In *Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM International.

Hermida, G. (2013). Concreto de baja permeabilidad, algo más que disminuir la relación agua/cementante. Sika Colombia. Disponible en: <http://goo.gl/2UH4F2>

Hoseini, Bindiganavile y Banthia. (2009) The effect of mechanical stress on permeability of concrete: A review. Canada. University of Alberta. Disponible en: *Cement and Concrete Composites*. Elsevier.

IMP - Institut für Materialprüfung (2015) Determinación de la profundidad de penetración de agua.

Kartini, K., Mahmud, H. y Hamidah, M.S. (2010). Absorption and permeability performance of Selangor rice husk ash blended grade 30 concrete. *Journal of engineering science and technology*, 5(1), 1-16.

Kliner R.A., (2003) “Design guidelines for Roller Compacted Concrete lift joints” *Roller Compacted Concrete Dams*. Ed BergaL R.J. Buil pp 486 Madrid

Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., y Tanesi, J. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto. Portland Cement Association.

McMillan, F. R., y Lyse, I. (1929). Some permeability studies of concrete. In *ACI Journal Proceedings* (Vol. 26). ACI.

McMillian y Lyse (1929) Efecto de la relación agua/cemento y la duración de curado

Mehta, P. K. (1998). *Concreto: estructura, propiedades y materiales*. IMCYC.

Moreno, E. I., Domínguez, G. G., Cob, E. J., y Duarte, F. (2004). Efecto de la relación agua/cemento en la velocidad de carbonatación del concreto utilizando una cámara de aceleración. *Ingeniería Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán*, 8(2), 117-130.

Niño, R. (2010). *Tecnología de concreto: materiales, propiedades y diseño de mezclas*. Asociación Colombiana de Productores de Concreto–ASOCRETO. Bogotá, 227.

NTC 4483.Método de ensayo para determinar la permeabilidad del Concreto al agua. Norma Técnica Colombiana

Pasquel C., E. (1998). Tópicos de Tecnología del Concreto. Ediciones Colegio de Ingenieros del Perú.

Portugal, P. (2007) Tecnología del concreto de alto desempeño. UNSA. Perú. Libro electrónico disponible en: <http://es.scribd.com/doc/42540958/Tecnologia-Del-Concreto-de-Alto-Desempeno>

Powers, T. C., and Brownyard, T. L. (1946, September). "Permeability of Portland cement paste". In Journal of the American Concrete Institute, 51 (pp. 285-298).

Sánchez de Guzmán, D. (2003), Durabilidad y patología del Concreto, Bogotá: Asocreto.

Sencico (2011) Mecanismo de generación de corrosión de acero de refuerzo ante cloruros, agua y oxígeno. Recuperado de: <http://civilgeeks.com/wp-content/uploads/2011/12/clip-image00644.jpg>

SIA 262-1 Anexo A. Esquema del Ensayo SIA 262-1 Anexo A

Sika Services AG (2012) Sika Concrete Handbook.

Tasdemir, C. (2003). Combined effects of mineral admixtures and curing conditions on the sorptivity coefficient of concrete. Cement and Concrete Research, 33(10), 1637-1642.

Torrent (2010) Esquema y detalles de Método Torrent .

Vélez, L. M. (2010). Permeabilidad y Porosidad en Concreto. Tecno Lógicas, (25), 169-187.

Verbeck, G. J. (1958). Carbonation of hydrated portland cement. Cement and Concrete, 17-36.

Whiting, D. (1988). Permeability of selected concretes. ACI Special Publication, 108.

Ycaza (2011) Daños por ácidos en alcantarillados. Daños por carbonatación del concreto. Recuperado de: <http://civilgeeks.com/wp-content/uploads/2011/10/LA-CARBO>

NATACI%3 %93N-EL-PRIMER-C%3%81NCER- DEL-HORMIG%3%93N.jpg