



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

FISURACIÓN POR RETRACCIÓN EN HORMIGONES: INFLUENCIA DEL TIPO DE CEMENTO

MEMORIA PARA OPTAR A TITULO DE INGENIERO CIVIL

GLORIA ANDREA MUNIZAGA ROMÁN

**PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DAVID CAMPUSANO BROWN
ERNESTO GÓMEZ GAZZANO**

**SANTIAGO DE CHILE
ABRIL 2009**

**RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: GLORIA MUNIZAGA R.
FECHA: 26/08/2009
PROF. GUIA: Sr. FEDERICO DELFÍN A.**

“FISURACIÓN POR RETRACCIÓN EN HORMIGONES: INFLUENCIA DEL TIPO DE CEMENTO”

El presente Trabajo de Título tiene por objeto estudiar la influencia del contenido de puzolana adicionado al cemento en el comportamiento en retracción y fisuración de hormigones confeccionados con cementos que variaban en el porcentaje de adición entre 0 y 27% , y cuya finura Blaine variaba entre 2800 y 4500 cm²/g. El estudio consideró también la variable razón A/C en dos niveles 0.45 y 0.55.

Los ensayos de retracción y fisuración se realizaron según los métodos NCh 2221 Of 94 (Retracción libre) y ASTM C1581-04 (Retracción restringida). Las condiciones de curado del hormigón, para estos ensayos, corresponde a las de cámara seca (23°C/ 50% HR), las que se mantuvieron a partir de las 24 horas de su confección por todo el período de ensayo.

Los resultados muestran que prácticamente no se observan diferencias significativas en el comportamiento en retracción y fisuración al incorporar puzolana molida a 7000 cm²/g a un cemento Pórtland de 2800 cm²/g, en las dosis estudiadas de 17 y 23%. Se observó que la retracción libre a los 28 días varía en +/- 8% con respecto a la retracción medida en los hormigones de referencia (0% de adición), dependiendo de la relación A/C del hormigón. El comportamiento en retracción de los hormigones confeccionados con cemento Pórtland Puzolánico comercial con 27% de adición puzolánica, cuya finura es del orden de 4500 cm²/g, presentó un notorio incremento, con valores del orden de 20 y 40% superiores con respecto a los del hormigón de referencia, con cemento Pórtland y A/C de 0.45 y 0.55, respectivamente.

La vulnerabilidad a la fisuración, observada en ensayos de retracción impedida, demostró ser también significativamente mayor en el caso de los hormigones confeccionados con el cemento Pórtland Puzolánico comercial de 27% de adición puzolánica. La fisuración de los hormigones con cementos Pórtland puzolánicos más gruesos, con porcentajes de adición en el rango estudiado, resultó similar a la de los homigones de referencia con cemento Pórtland.

AGRADECIMIENTOS

Deseo agradecer a toda mi familia y amigos por el apoyo que siempre me dieron para llevar a buen término este trabajo.

Además quiero expresar mis más sinceros agradecimientos al profesor Federico Delfín A., quien además de proponer el tema siempre me brindó en todo momento su constante guía y ayuda.

Asimismo, expreso mis agradecimientos al personal de la sección Aglomerantes y de Hormigones del IDIEM, por su buena disposición y valiosa colaboración en el trabajo desarrollado.

Gracias al apoyo de Polpaico por donar los cementos y la puzolana ocupada en el estudio.

Finalmente a todas aquellas personas que de alguna forma hicieron posible la realización de este trabajo.

INDICE

CAPITULO	PÁGINA
1.- INTRODUCCIÓN.....	8
1.1.- Introducción general.....	8
1.2.- Objetivo general.....	9
1.3.- Objetivos específicos.....	9
1.4.- Alcances.....	9
2.- ANTECEDENTES GENERALES.....	10
2.1- Puzolana.....	10
2.1.1- Clasificación de material puzolánico.....	11
2.1.1.1- Puzolanas naturales.....	11
2.1.1.2- Puzolanas artificiales.....	12
2.1.2- Puzolanas en Chile.....	12
2.1.3- Actividad puzolánica.....	13
2.2- Cemento.....	14
2.2.1- Cemento portland.....	14
2.2.1.1- Composición química del cemento portland.....	15
2.2.1.2- Hidratación del cemento portland.....	16
2.2.1.2.1- Hidratación de los aluminatos.....	16
2.2.1.2.2- Hidratación de los silicatos.....	17
2.2.2- Cemento con adición puzolánica.....	18
2.2.2.1- Nomenclatura y normalización de cementos con adición puzolánica.....	18
2.2.2.1.1- Clasificación.....	19
2.2.2.2- Requisitos químicos.....	19
2.2.2.3- Propiedades físicas y mecánicas.....	19
2.2.2.4- Aspectos económicos.....	20
2.2.2.5- Aspectos técnicos.....	20
2.2.2.6- Hidratación del cemento con adición puzolánica.....	20
2.2.2.7- Propiedades del cemento con adición puzolánica.....	22
2.3- Retracción.....	24
2.3.1- Retracción plástica.....	24
2.3.2- Retracción autógena.....	26
2.3.3- Retracción por secado.....	26
2.3.3.1- Factores que afectan la retracción.....	28
2.3.4- Creep.....	33
2.4- Fisuración causada por la retracción.....	34
2.4.1- Factores que afectan el agrietamiento.....	36

3.-	PLANTEAMIENTO DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	38
3.1-	Planteamiento de la investigación.....	38
3.2-	VARIABLES DE ESTUDIO.....	38
3.3-	MATERIAS PRIMAS UTILIZADAS.....	38
3.3.1-	Cemento.....	38
3.3.2-	Puzolana.....	39
3.3.3-	Aridos.....	39
3.3.4-	Agua.....	40
3.4-	Elaboración de cementos portland puzolánicos experimentales.....	40
3.4.1-	Procesamiento de la puzolana.....	40
3.4.1.1-	Secado.....	40
3.4.1.2-	Molienda.....	41
3.4.1.3-	Homogeneización y envasado.....	41
3.4.1.4-	Caracterización.....	41
3.4.2-	Cementos de laboratorio.....	42
3.4.2.1-	Cemento portland puzolánico.....	42
3.4.2.1.1-	Dosificación.....	42
3.4.2.1.2-	Homogeneización y envasado.....	43
3.5-	Caracterización de los cementos.....	43
3.5.1-	Ensayos físicos a cementos.....	43
3.5.1.1-	Peso específico relativo.....	43
3.5.1.2-	Superficie específica (Método Blaine).....	43
3.5.1.3-	Agua de consistencia normal.....	44
3.5.1.4-	Tiempo de fraguado.....	44
3.5.2-	Ensayos químicos a cementos.....	45
3.5.2.1-	Pérdida por calcinación (PXC).....	45
3.5.2.2-	Trióxido de azufre.....	45
3.5.2.3-	Residuo insoluble.....	45
3.6-	Ensayos para determinar el comportamiento de los hormigones.....	46
3.6.1-	Resistencia a compresión.....	46
3.6.2-	Retracción libre.....	46
3.6.3-	Retracción restringida.....	46
3.6.3.1-	Implementación de la Norma ASTM C 1581-04.....	46
3.6.3.2-	Aparatos.....	47
3.6.3.2.1-	Anillo de acero.....	47
3.6.3.2.2-	Anillo exterior (moldaje).....	47
3.6.3.2.2-	Base no absorbente.....	47

4.-	DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	49
4.1-	Realización de ensayos.....	49
4.2	Fabricación de hormigones.....	49
4.2.1-	Materiales.....	49
4.2.2-	Dosificación.....	49
4.2.3-	Equipo.....	50
4.2.4-	Preparación del hormigón.....	50
4.3-	Confección de probetas.....	51
4.3.1-	Preparación de probetas.....	51
4.3.1.1-	Resistencia a compresión.....	51
4.3.1.2-	Retracción libre.....	51
4.3.1.3-	Retracción restringida.....	52
4.3.2-	Llenado de probetas.....	52
4.3.2.1-	Resistencia a compresión.....	52
4.3.2.2-	Retracción libre.....	53
4.3.2.3-	Retracción restringida.....	53
4.3.3-	Curado de probetas.....	54
4.3.4-	Desmolde de probetas.....	54
4.3.4.1-	Resistencia a compresión.....	54
4.3.4.2-	Retracción libre.....	54
4.3.4.3-	Retracción restringida.....	55
4.4-	Ambiente de prueba.....	56
4.5-	Mediciones.....	56
4.5.1-	Resistencia a compresión.....	56
4.5.2-	Retracción libre.....	57
4.5.3-	Retracción restringida.....	58
5.-	PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	59
5.1-	Propiedades físicas.....	59
5.1.1-	Peso específico relativo.....	59
5.1.1.1-	Cemento CPN.....	59
5.1.1.2-	Cemento CPPA.....	59
5.1.1.3-	Cemento CPPB.....	60
5.1.1.4-	Cemento CPPC.....	60
5.1.2-	Superficie específica (Método Blaine).....	61
5.1.3-	Agua de consistencia normal.....	61
5.1.4-	Tiempos de fraguado.....	62
5.2-	Propiedades químicas.....	62
5.2.1-	Pérdida por calcinación (PXC).....	62
5.2.2-	Trióxido de azufre.....	63
5.2.3-	Residuo insoluble.....	63
5.3-	Comportamiento de los hormigones.....	64

5.3.1-	Resistencia a compresión.....	64
5.3.1.1-	Hormigón CPN.....	64
5.3.1.2-	Hormigón CPPA.....	65
5.3.1.3-	Hormigón CPPB.....	66
5.3.1.4-	Hormigón CPPC.....	67
5.3.2-	Retracción libre.....	68
5.3.2.1-	Hormigón CPN.....	68
5.3.2.2-	Hormigón CPPA.....	69
5.3.2.3-	Hormigón CPPB.....	70
5.3.2.4-	Hormigón CPPC.....	71
5.3.3-	Retracción restringida.....	72
5.3.3.1-	Hormigón CPN.....	72
5.3.3.2-	Hormigón CPPA.....	75
5.3.3.3-	Hormigón CPPB.....	78
5.3.3.4-	Hormigón CPPC.....	81
6.-	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	84
6.1-	Propiedades físicas.....	84
6.1.1-	Peso específico relativo.....	84
6.1.1.1-	Análisis.....	85
6.1.2-	Superficie específica (Método Blaine).....	85
6.1.2.1-	Análisis.....	86
6.1.3-	Agua de consistencia normal.....	87
6.1.3.1-	Análisis.....	88
6.1.4-	Tiempos de fraguado.....	88
6.1.4.1-	Análisis.....	89
6.2-	Propiedades químicas.....	90
6.2.1-	Pérdida por calcinación (PXC).....	90
6.2.1.1-	Análisis.....	91
6.2.2-	Trióxido de azufre.....	91
6.2.2.1-	Análisis.....	92
6.2.3-	Residuo insoluble.....	93
6.2.3.1-	Análisis.....	94
6.3-	Comportamiento de los hormigones.....	94
6.3.1-	Resistencia a compresión.....	94
6.3.1.1-	Hormigón CPN.....	94
6.3.1.2-	Hormigón CPPA.....	95
6.3.1.3-	Hormigón CPPB.....	96
6.3.1.4-	Hormigón CPPC.....	97
6.3.1.5	Análisis.....	100
6.3.2-	Retracción libre.....	101
6.3.2.1-	Hormigón CPN.....	101

6.3.2.2-	Hormigón CPPA.....	102
6.3.2.3-	Hormigón CPPB.....	103
6.3.2.4-	Hormigón CPPC.....	104
6.3.2.5-	Análisis.....	107
6.3.3-	Retracción restringida.....	108
6.3.3.1-	Hormigón CPN.....	108
6.3.3.2-	Hormigón CPPA.....	111
6.3.3.3-	Hormigón CPPB.....	114
6.3.3.4-	Hormigón CPPC.....	117
6.3.3.5-	Análisis.....	123
7.-	DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	125
8.-	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	128
	 ANEXOS	
ANEXO A.-	DOSIFICACION DE LOS HORMIGONES.....	130

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1.1 Introducción General

El hormigón, también denominado concreto en algunos países, es el material manufacturado más utilizado en la construcción, resulta de la mezcla de uno o más conglomerantes (generalmente cemento) con áridos (grava, gravilla y arena), agua y, eventualmente, aditivos y adiciones. El cemento se hidrata en contacto con el agua, iniciándose complejas reacciones químicas que derivan en el fraguado y endurecimiento de la mezcla, obteniéndose al final del proceso un material con consistencia pétreo.

La principal característica estructural del hormigón es que resiste muy bien los esfuerzos de compresión. No tiene buen comportamiento a tracción, siendo ésta del orden de la décima parte de su resistencia a compresión, por este motivo es habitual usarlo asociado con el acero, recibiendo el nombre de hormigón armado, comportándose el conjunto muy favorablemente tanto a los esfuerzos de compresión como a los de tracción. Cuando se proyecta un elemento de hormigón armado se establecen las dimensiones, el tipo de hormigón, la cantidad y calidad del acero que hay que colocar en función de los esfuerzos que deberá resistir.

Es reconocida la existencia de problemas de fisuración y agrietamiento en la estructuras de hormigón y hormigón armado, esto es causado por las transformaciones químicas y esfuerzos mecánicos generados en el proceso de curado del hormigón. La fisuración se puede explicar en forma simple como resultado de un proceso físico-químico que sufre la pasta de cemento, después de ser amasado con los áridos, y que consiste principalmente en una disminución de volumen, esta disminución de volumen puede depender de muchos factores, entre ellos el tipo de cemento, los áridos, la relación agua/cemento, y fundamentalmente de las condiciones de humedad y temperatura durante el curado.

Los problemas de fisuración, sin embargo se presentan en Chile con mayor incidencia que lo normal dando origen a cuestionarnos si los componentes empleados en la composición del cemento chileno influyen en este problema que afecta y limita la vida útil del hormigón armado.

1.2 Objetivo general

El principal objetivo de este trabajo es aportar conocimientos sobre el comportamiento en retracción del hormigón que se utiliza en Chile para mejorar la serviciabilidad y durabilidad tanto de pavimentos como de estructuras de hormigón armado.

1.3 Objetivos específicos

Determinado el objetivo general de este trabajo, la investigación se abocará al estudio de los siguientes aspectos relativos al comportamiento del hormigón en su etapa de endurecimiento inicial:

- Inicio y evolución de la fisuración causada por retracción impedida en hormigones elaborados con distintos tipos de cementos (distintas dosis de puzolana) regidos por una misma norma (NCh148 Of.68), que varían en su contenido de adición puzolánica para poder determinar una curva de evolución de la retracción bajo condiciones de restricción impuesta.
- Estudiar la deformación causada por retracción libre en hormigones elaborados con distintos tipos de cementos (distintas dosis de puzolana).
- Determinar la edad de fisuración de hormigones con distintas dosis de puzolana y bajo condiciones de secado controladas, utilizando el método de ensayo ASTM C 1581 "Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage".

1.4 Alcances

Este trabajo está limitado al análisis del comportamiento en retracción de hormigones elaborados con cemento con adición puzolánica volcánica, la cual es utilizada por las cementeras nacionales para la producción de cemento portland puzolánico y cemento puzolánico, por lo tanto todos los análisis y conclusión resultante de esta investigación, sobre material puzolánico, se refiere sólo a este tipo de material (a menos que se especifique otra cosa).

CAPITULO 2

ANTECEDENTES GENERALES

2.1 Puzolana

El término puzolana, que originariamente se restringía a denominar unas tobas volcánicas existentes en la localidad italiana de Pozzuoli, cerca de Nápoles, se emplea en la actualidad de forma genérica para definir materiales que presentan las siguientes características:

- Aptitud para reaccionar con el hidróxido cálcico generado durante la hidratación del cemento, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en presencia de agua con formación de C-S-H secundario.
- Aptitud para formar productos hidratados con propiedades aglomerantes.
- Inhibe en un grado importante el deterioro que se produce por la reacción de los álcalis del cemento con los áridos reactivos.

La estructura de un grano de puzolana se caracteriza por ser micro células de forma tubular, con delgadas paredes y un elevado volumen interno de huecos. Es por éstas características que se puede explicar la elevada superficie específica, así como la facilidad para ser molido.¹

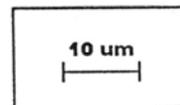
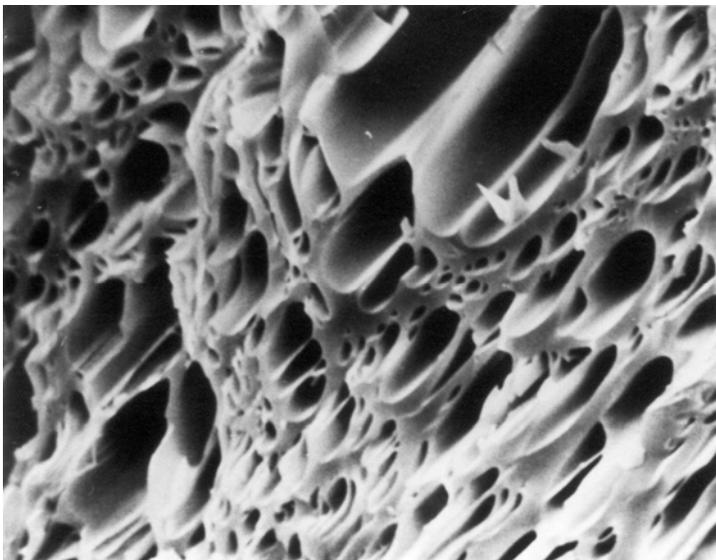


Figura N°1 Microfotografía de puzolana. Se observa la formación de pequeños poros en forma de canales. Aumento 1.200 veces.¹

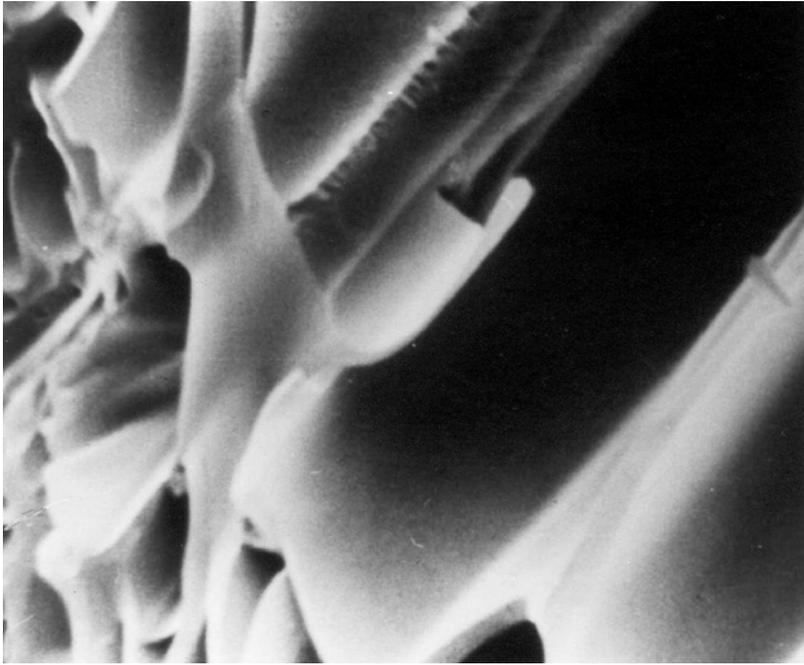


Figura N°2 Detalle de las micro células de la puzolana. Aumento 3.000 veces.¹

2.1.1 Clasificación de material puzolánico

La puzolana (ASTM C 618-89), se define como un material silíceo-aluminoso, el cual por sí solo posee poco o ningún valor cementante, pero cuando se encuentra finamente dividido y está en presencia de humedad reacciona químicamente con el hidróxido de calcio a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes, los principales tipos de puzolanas son: puzolanas naturales y puzolanas artificiales.

2.1.1.1 Puzolanas naturales

Las puzolanas naturales son aquellas que se encuentran en la naturaleza y sólo se han modificado por procesos mecánicos para el sólo propósito de ser adiciones al cemento. El procesamiento generalmente involucra el triturado, molido y separación de tamaños. En algunos casos también pueden incluir una actividad térmica. Algunas puzolanas naturales son:

- Cenizas volcánicas: Se forman por erupciones de carácter explosivo, en pequeñas partículas que son templadas a temperatura ambiente, originando la formación del estado vítreo.

- Tufos o tobas volcánicas (zeolitas): Producto de la acción hidrotermal sobre las cenizas volcánicas y de su posterior cementación diagenética.
- Tierras de diatomeas (diatomitas): Puzolanas de origen orgánico. Depósitos de caparazones silíceos de microscópicas algas acuáticas unicelulares (diatomeas).

2.1.1.2 Puzolanas artificiales

Las puzolanas artificiales son aquellos materiales que no son productos primarios de la industria que los produce. Los subproductos industriales pueden o no requerir un procesamiento (como secado o pulverizado), antes de ser empleado. Algunas puzolanas artificiales son:

- Cenizas volantes (fly ash): Subproducto de centrales termoeléctricas que utilizan carbón pulverizado como combustible, es un polvo fino constituido esencialmente de partículas esféricas.
- Arcillas activadas térmicamente: Las arcillas naturales no presentan actividad puzolánica a menos que su estructura cristalina sea destruida mediante un tratamiento térmico a temperaturas del orden de 600 a 900 °C.
- Microsílice (silica fume): Subproducto de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico para la producción de silicio o aleaciones de ferrosilicio.
- Cenizas de cáscara de arroz: Producida por la calcinación controlada de la cáscara de arroz.

2.1.2 Puzolanas en Chile

En Chile, específicamente en Santiago, existen grandes yacimientos de puzolana, de tipo riolítico, provenientes de flujos piroclásticos que fueron emplazados durante la erupción o una serie de erupciones cercanamente espaciadas, hace unos 500.000 años, desde un mismo centro. En base a la distribución y espesores de los afloramientos, se infiere que este centro es el Complejo Volcánico Maipo y que el volumen de estos flujos piroclásticos alcanzan probablemente unos 450 km³. Uno de esos yacimientos se encuentra en la comuna de Pudahuel y corresponde al lugar de origen de la puzolana utilizada para fabricación de los cementos utilizados en esta investigación.¹⁷

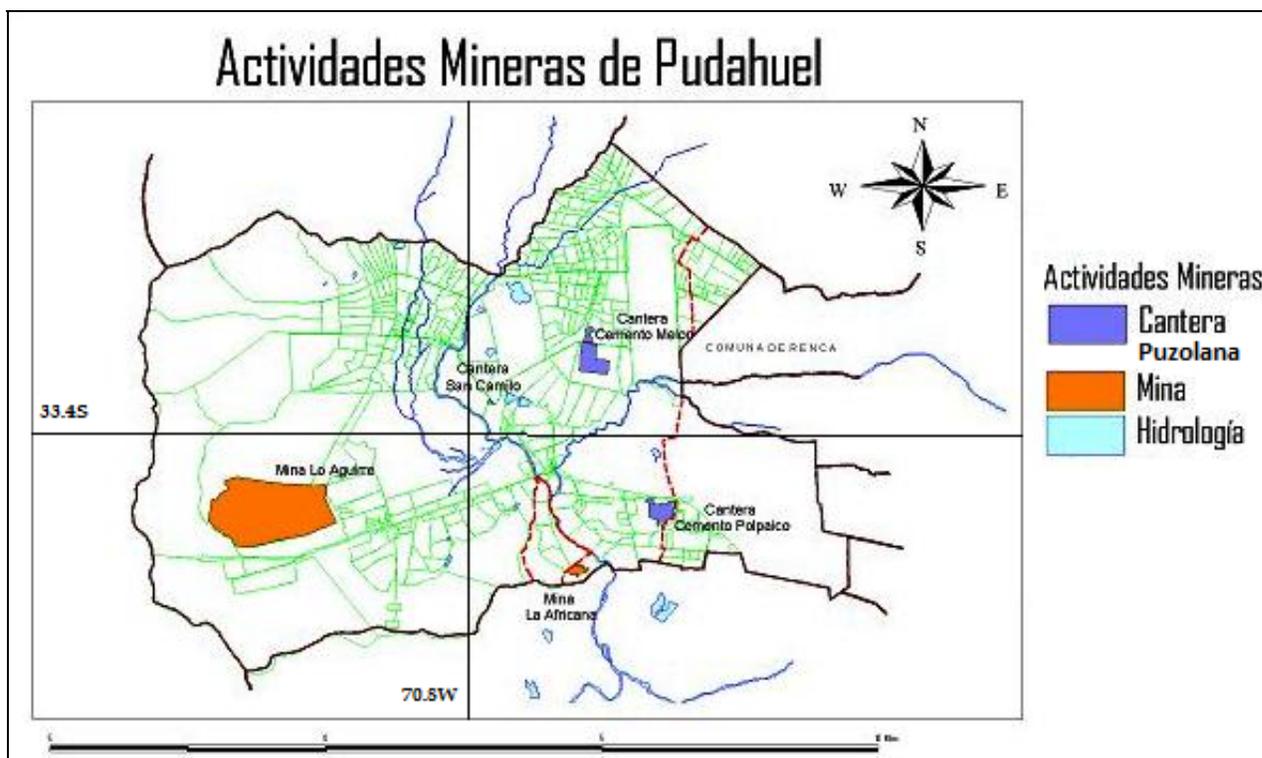


Figura N°2.3 Yacimientos de puzolana en la comuna de Pudahuel

2.1.3 Actividad puzolánica

Las puzolanas, al igual que las escorias y cenizas volantes, tienen los tres compuestos químicos fundamentales del clínquer: cal, sílice y alúmina.

La actividad puzolánica es complementaria de la hidrólisis de los silicatos del clínquer por una parte, y contraria al deslavado y la lixiviación de la cal hidratada de la pasta de cemento. De aquí que dicha acción, al formar compuestos hidráulicos con la cal, contribuya al desarrollo de la resistencia mecánica y química de los cementos que contienen puzolana, a plazos medios y largos; y que al fijar de forma estable dicha cal, evitando su disolución o ataque por medios agresivos externos, proporcione al hormigón una mayor durabilidad y resistencia química en múltiples aspectos.

La acción puzolánica químicamente considerada, consiste en el ataque y corrosión de los gránulos o partículas de material puzolánico por la cal de hidrólisis de los silicatos del clínquer, que en solución saturada o sobresaturada se encuentran en la fase líquida de la pasta de cemento, cuya alcalinidad, se incrementa por la cesión de álcalis de la puzolana a dicha fase líquida.

Se forman así, con incorporación de agua, hidratos del tipo de los que forman en su hidratación los silicatos anhídridos del clínquer, es decir, gel de tobermorita, pero de menor basicidad lo cual es una ventaja para los efectos de resistencia mecánica y química del cemento endurecido, pero es una desventaja para la corrosión.

2.2 Cemento

El cemento según la NCh148 Of.68 “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales”, es un material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire.

Los cementos se obtienen de la molienda de componentes básicos y adiciones entre los que se cuentan:

- Clínquer
- Yeso
- Adiciones (en algunos casos)

2.2.1 Cemento pórtland

El cemento hidráulico más comúnmente usado para hacer hormigón es el cemento pórtland, que está compuesto principalmente por silicatos de calcio hidráulicos. Los hidratos de silicato de calcio que se forman con la hidratación del cemento pórtland son responsables principales de sus características adherentes y son estables en un medio acuoso. El cemento pórtland básicamente es el resultado de la molienda conjunta de clínquer y yeso.

El clínquer está compuesto principalmente por materiales calcáreos, tales como caliza, alúmina y sílice, que se encuentran como arcilla o pizarra. En el proceso de fabricación, la materia prima es molida finamente y mezclada minuciosamente en una determinada proporción, luego es calcinada a altas temperaturas donde el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando bolas conocidas como clínquer. El clínquer, a su vez, se enfría y muele en combinación con un poco de yeso hasta obtener un polvo fino; y finalmente el producto resultante es el cemento pórtland.

2.2.1.1 Composición química del cemento pórtland

El clínquer es una mezcla heterogénea de varios minerales producidos por reacciones a alta temperatura entre óxido de calcio y sílice, alúmina y óxido de hierro. Los principales compuestos del cemento portland se muestran en la Tabla N°2.1.

Tabla N°2.1 Composición química ⁸

Nombre del Compuesto	Composición del óxido	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrito tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

En realidad los silicatos que se encuentran en el cemento no son compuestos puros, pues contienen pequeñas cantidades de óxidos en soluciones sólidas. Estos óxidos tienen efectos importantes en los ordenamientos atómicos, las formas cristalinas y las propiedades hidráulicas de estos silicatos.

En un cemento Pórtland ordinario las cantidades de óxido varían según la Tabla N°2.2

Tabla N°2.2 Porcentaje de óxido ⁸

Óxido	%
C_3S	45-60
C_2S	15-30
C_3A	6-12
C_4AF	6-8

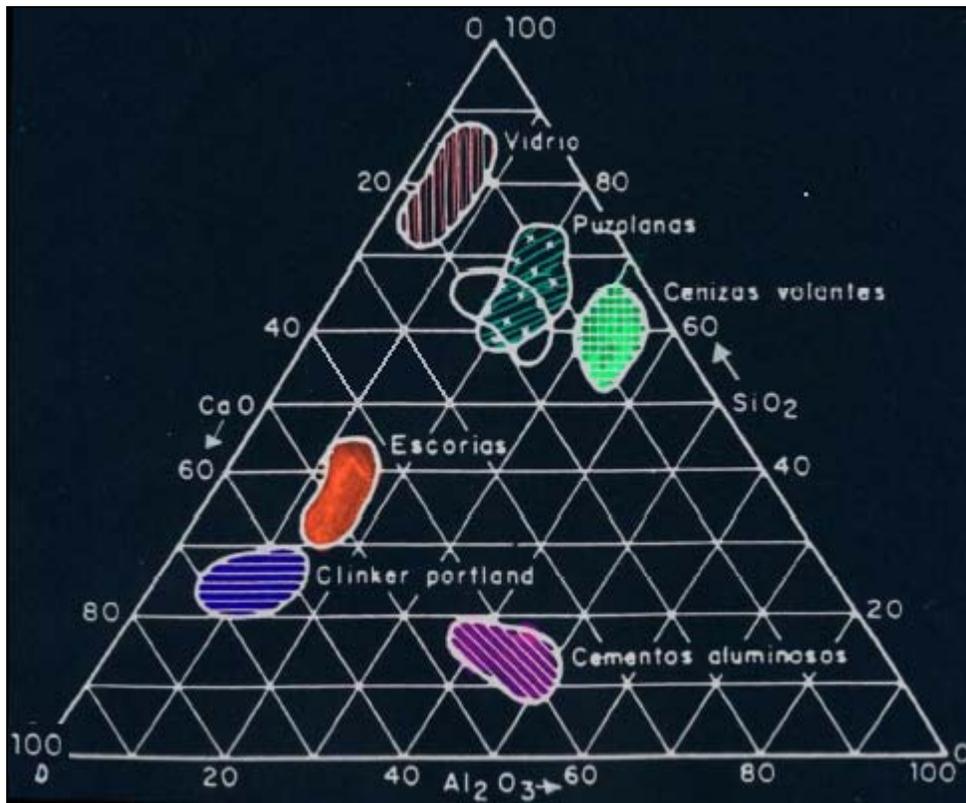


Figura N°2.4 Diagrama ternario de CaO, Al₂O₃ y SiO₂

2.2.1.2 Hidratación del cemento pórtland

El cemento al mezclarse con agua produce una pasta. En presencia de agua, los silicatos y aluminatos presentes en el cemento portland forman los productos de hidratación, los cuales con el paso del tiempo, hacen que esta pasta se transforme en un sólido.

2.2.1.2.1 Hidratación de los aluminatos

El aluminato tricálcico (C₃A) y el ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) son considerados los aluminatos del cemento Pórtland. Están presentes en el cemento en un 12% a 15% actuando como fundentes, de modo tal que logran reducir la temperatura de fusión y formación del clínquer.

En el proceso de hidratación el aluminato tricálcico reacciona casi inmediatamente con el agua, es por ese motivo que se agrega yeso, el cual actúa como retardante. El yeso reacciona con el aluminato tricálcico y forma etringita y monosulfato, los productos del ferroaluminato tetracálcico al reaccionar con el yeso forma estructuras similares a la etringita y al monosulfato. En el cemento, no es deseable la presencia de C_3A , pues contribuye poco o nada a reforzarlo, excepto a muy tempranas edades, y cuando la pasta de cemento endurecida es atacada por sulfatos, puede favorecer un rompimiento debido a la expansión motivada por la formación de sulfoaluminato de calcio a partir de ese compuesto.

2.2.1.2.2 Hidratación de los silicatos

El silicato tricálcico (C_3S) y el silicato dicálcico (C_2S), considerados los silicatos predominantes del cemento, están presentes en mayores proporciones y al hidratarse constituyen uno de sus productos de hidratación más importante responsable de las propiedades mecánicas y el desarrollo de la resistencia del cemento a lo largo del tiempo.

Las ecuaciones de reacción entre los silicatos y el agua pueden escribirse de la siguiente manera:



Los productos de ambas reacciones son similares, el $C_3S_2H_3$ es conocido como gel de tobermorita (llamada así por poseer una estructura aparentemente similar al mineral tobermorita), el otro producto es $Ca(OH)_2$ el cual es la cal liberada como hidróxido de calcio. De las ecuaciones se desprende que el C_3S requiere para su completa hidratación un 24% de agua para producir un 61% de gel de tobermorita y 39% de hidróxido de calcio, mientras que el C_2S requiere para su completa hidratación un 21% de agua para producir un 82% de gel de tobermorita y 18% de hidróxido de calcio. En la figura N°2.5 se muestra un modelo de la pasta de cemento hidratada.

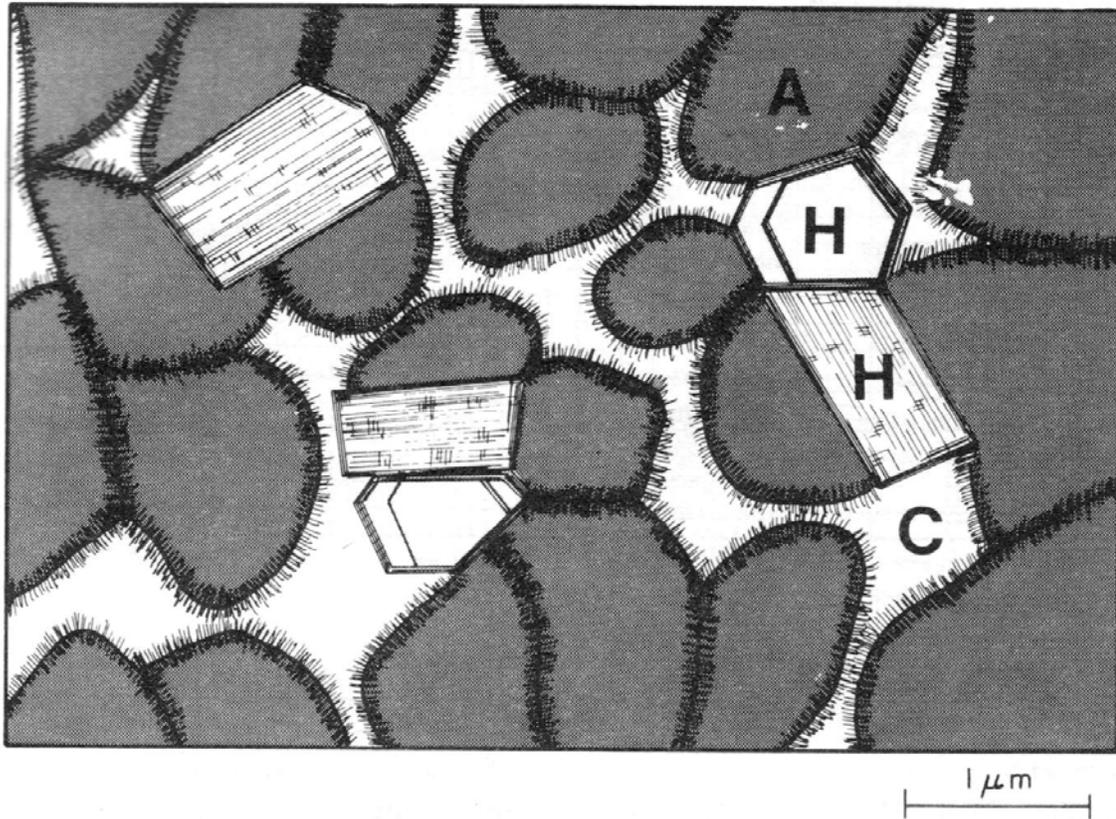


Figura N°2.5 Modelo de una pasta de cemento Pórtland bien hidratada ⁷

A: representa la agregación de partículas pobremente cristalinas de H-S-C.

H: representa los productos cristalinos hexagonales tales como CH, C_3ASH_{18} , C_4AH_{19} .

C: representa las cavidades capilares o vacíos que existen cuando los espacios originalmente ocupados por agua no se llenan completamente con los productos de hidratación del cemento.

2.2.2 Cemento con adición puzolánica

2.2.2.1 Nomenclatura y normalización de cementos con adición puzolánica

Según la NCh148 Of.68, el cemento puzolánico es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer, puzolana y yeso. Y que puede aceptar hasta un 3% en peso del cemento de sustancias que no sean perjudiciales.

2.2.2.1.1 Clasificación

En Chile la NCh148.Of68 clasifica a los cementos de acuerdo a la dosis de puzolana que tengan, se tienen 2 tipos de cementos:

- Portland puzolánico con menos de un 30 % de puzolana.
- Puzolánico con más de un 30 % y menos de un 50 % de puzolana.

Además los cementos se clasifican según su resistencia en dos grados, estos son Corriente y Alta Resistencia.

2.2.2.2 Requisitos químicos

Los requisitos químicos que deben cumplir los cementos puzolánicos se indican a continuación en la Tabla N°2.3:

Tabla N°2.3 Requisitos químicos del cemento ¹¹

Análisis químico	Cemento	Cementos con adición de Puzolana	
	Portland	Portland Puzolánico	Puzolánico
Pérdida por calcinación máxima (%)	3,0	4,0	5,0
Residuo insoluble máximo (%)	1,5	30,0	50,0
Contenido de SO ₃ máximo (%)	4,0	4,0	4,0
Contenido de MgO máximo (%)	5,0	-	-

2.2.2.3 Propiedades físicas y mecánicas

Según las normas chilenas, los cementos deben cumplir con las siguientes propiedades físicas y mecánicas:

- Expansión en autoclave: la expansión o contracción en autoclave debe ser inferior a 1%.
- Tiempo de fraguado: el tiempo de fraguado para cada tipo de cemento está indicado en la Tabla N°2.4.
- Resistencia mecánica: la resistencia a la compresión y a la flexión está indicada en la Tabla N°2.4.

Tabla N°2.4 Propiedades físicas y mecánicas de los cementos ¹¹

Grado	Tiempo de fraguado		Resistencia mínima a la Compresión		Resistencia mínima a Flexión	
	Inicial mínimo [min]	Final máximo [h]	7 días [kgf/cm ²]	28 días [kgf/cm ²]	7 días [kgf/cm ²]	28 días [kgf/cm ²]
Corriente	60	12	180	250	35	45
Alta resistencia	45	10	250	350	45	55

2.2.2.4 Aspectos económicos

El proceso más caro en la fabricación del cemento portland es el relacionado al uso del horno, por el elevado consumo de combustible que éste necesita para producir el clínquer. Así, es que si se considera el hecho que en una tonelada de cemento con adición puzolánica se puede reducir hasta en un 50% del cemento portland, el cual es reemplazado por material puzolánico, se tiene una ganancia económica evidente, ya que el costo de obtención y procesamiento del material puzolánico es inferior al no requerir de tratamiento térmico.

2.2.2.5 Aspectos técnicos

Con este tipo de cementos se pueden obtener cementos con resistencias similares a los portland (excepto a muy corto plazo) destacando el hecho de tener propiedades y comportamientos de los cuales carecen los cementos portland y con esto tener ventajas comparativas sobre ellos en aspectos de reducción del calor de hidratación, la durabilidad frente a aguas ácidas y sulfatos, entre otros.

2.2.2.6 Hidratación del cemento con adición puzolánica

La ecuación de reacción del proceso de hidratación de un cemento con adiciones puzolánicas es la siguiente:



Un cemento con adición puzolánica produce lo mismo que un cemento portland (gel de tobermorita e hidróxido de calcio), pero el hidróxido de calcio producto de la reacción con los silicatos se combina con el material puzolánico produciendo más gel de tobermorita, este fenómeno otorga características adicionales al cemento con adición, que no tiene un cemento pórtland puro.

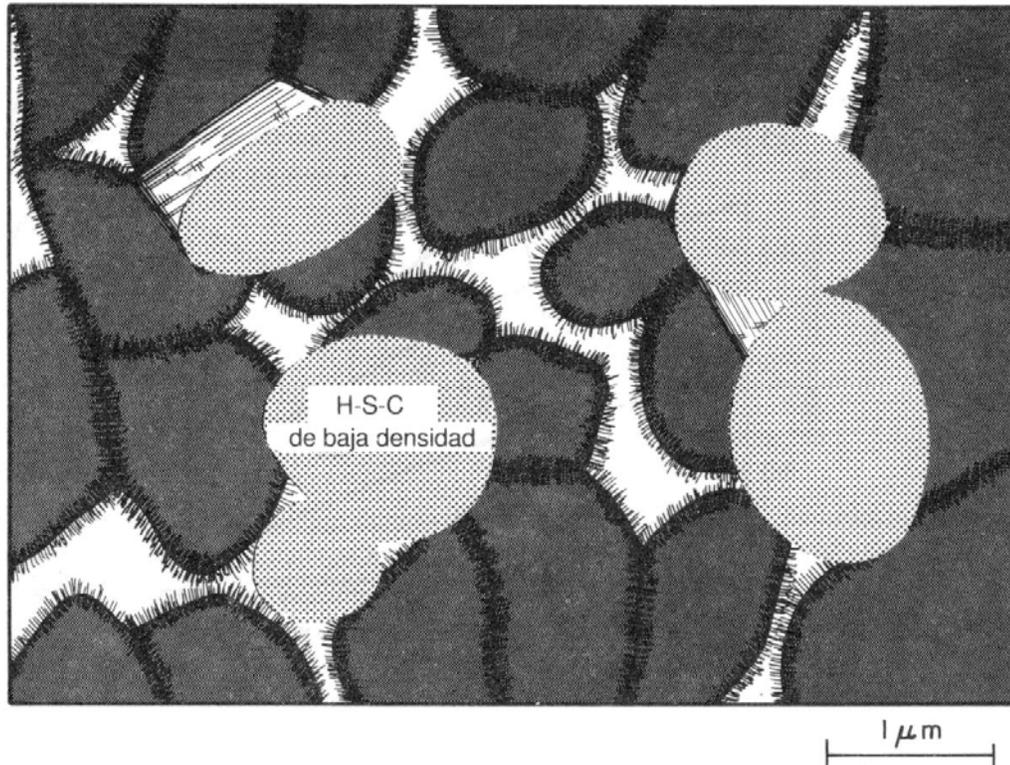


Figura N°2.6 Representación gráfica de las pastas de cemento bien hidratadas hechas con un cemento pórtland puzolánico ⁷

H-S-C: Hidrato de silicato de calcio

En la Figura N°2.6 se ve como resultado de la reacción puzolánica, los huecos capilares son eliminados o reducidos en tamaño, y los densos cristales de hidróxido de calcio son sustituidos por H-S-C adicional de una densidad menor.

2.2.2.7 Propiedades de cementos con adición puzolánica

Los cementos con puzolanas tienen como características:

- Poseen resistencia química en especial a los sulfatos.

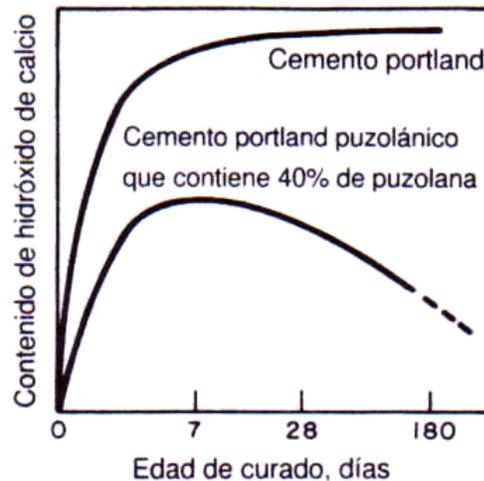


Figura N°2.7 Efecto de la edad de curado y del porcentaje de puzolana en el contenido de hidróxido de calcio en la pasta de cemento ⁷

En la Figura N°2.7 se aprecia el efecto de reducción del hidróxido de calcio disponible en la pasta de cemento hidratada, que es debido tanto al efecto de dilución como a la reacción puzolánica, esta última reacción es la que explica que el hormigón elaborado con tales cementos tienda a mostrar una resistencia superior a los sulfatos y a los ambientes ácidos. Inicialmente, con el curado, el contenido de hidróxido de calcio de la pasta de cemento se incrementa debido a la hidratación del cemento portland presente, más tarde comienza a abatirse con el avance de la reacción puzolánica.

- Reduce la permeabilidad del hormigón.
- Baja el calor de liberado en el proceso de hidratación del cemento.

La sustitución de una parte de cemento portland por una cantidad equivalente de puzolana reducirá el calor de hidratación a cortos plazos en forma proporcional a la cantidad de cemento portland sustituida, puesto que en este periodo la puzolana no actúa, comportándose como un material inerte.

A mediano y largo plazo, la reducción del calor es menor que la que corresponde a dicha proporcionalidad ya que intervienen, sumándose, el calor correspondiente a la formación de compuestos hidratados por acción puzolánica, y a la hidratación de los silicatos correspondientes del cemento Pórtland.

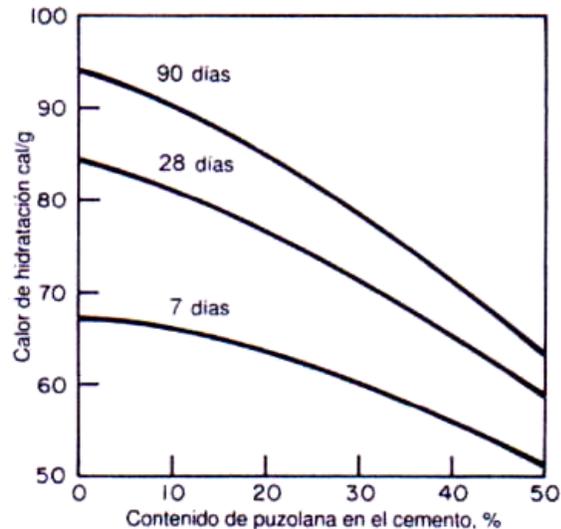


Figura N°2.8 Efecto de sustituir puzolana natural, sobre el calor de hidratación del cemento Pórtland ⁷

En la Figura N°2.8 se muestra el efecto de incrementar las cantidades de puzolana en la reducción del calor de hidratación del cemento pórtland puzolánico correspondiente.

- Son cementos en general más lentos que los portland.
- Inhiben la reacción álcali árido en algunos casos.

Esta reacción transcurre entre áridos silíceos reactivos y los álcalis o sales alcalinas (aportados por el cemento principalmente, y en menor proporción, por áridos y aditivos) puede combatirse paradójicamente con el empleo de puzolanas, evitando sus peligrosos efectos expansivos. Algo paradójico si se considera que la puzolana es un árido de gran reactividad frente a los álcalis, sin embargo, su finura y su reactividad son tales que, gran parte de la reacción se produce tan rápida y homogéneamente que no crea dilataciones una vez fraguado y endurecido el cemento.

En la Figura N°2.9 se muestra que las puzolanas pueden ser muy efectivas en reducir la expansión asociada con la reacción álcali-árido.

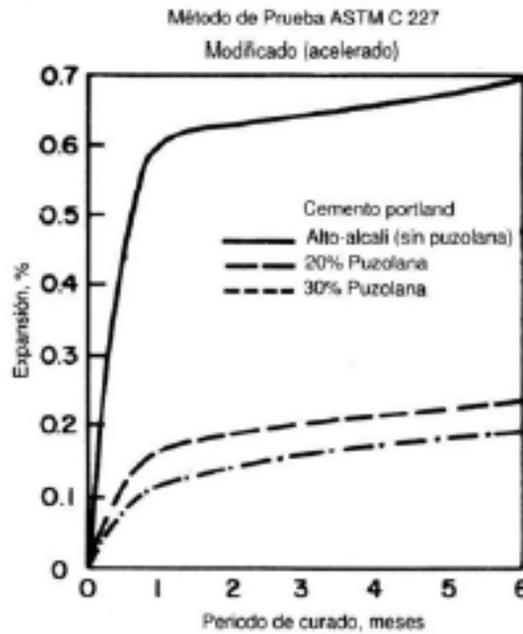


Figura N°2.9 Influencia de la adición de puzolana en la expansión álcali-agregado.⁷

2.3 Retracción

La retracción es un fenómeno intrínseco del hormigón, que está relacionado con la pérdida paulatina del agua en la mezcla. El fenómeno en cuestión, se refiere a que el hormigón experimenta variaciones de volumen, dilataciones o contracciones, durante su vida útil por causas físico químicas. La idea más importante que debe retenerse es que la retracción no es una fuerza impuesta sino que es una deformación impuesta al hormigón que provocará tensiones de tracción. Se pueden identificar básicamente cuatro tipos de retracción, estas son: retracción plástica, retracción autógena, retracción por secado y retracción térmica, esta última no se considerará debido a la irrelevancia que presenta para esta investigación.

2.3.1 Retracción plástica

Cuando la pasta de cemento es plástica experimenta una retracción volumétrica, cuya magnitud es del orden de 1% del volumen total del cemento seco.

Esta reducción se conoce como retracción plástica, porque se presenta mientras el hormigón está todavía en estado plástico, la pérdida de agua por evaporación de la superficie del hormigón agrava la retracción plástica y puede llevar a un agrietamiento superficial.

Sin embargo, si se evita por completo la evaporación inmediatamente después de la colocación del hormigón, se elimina el agrietamiento.

Por el lado de los materiales, se ha encontrado que la retracción plástica aumenta junto con el contenido de componentes finos en la mezcla de hormigón, de esta forma si agregamos más cemento en la mezcla, si se usa cemento fino o se incorpora polvo de sílice incrementa la tendencia del hormigón a tener fisuras por retracción plástica. El efecto del polvo de sílice fue establecido por Bloom y Bentur en 1995.²



Figura N°2.10 Las fisuras de retracción plástica se producen a causa de una rápida pérdida de agua de mezclado cuando el hormigón está en estado plástico.

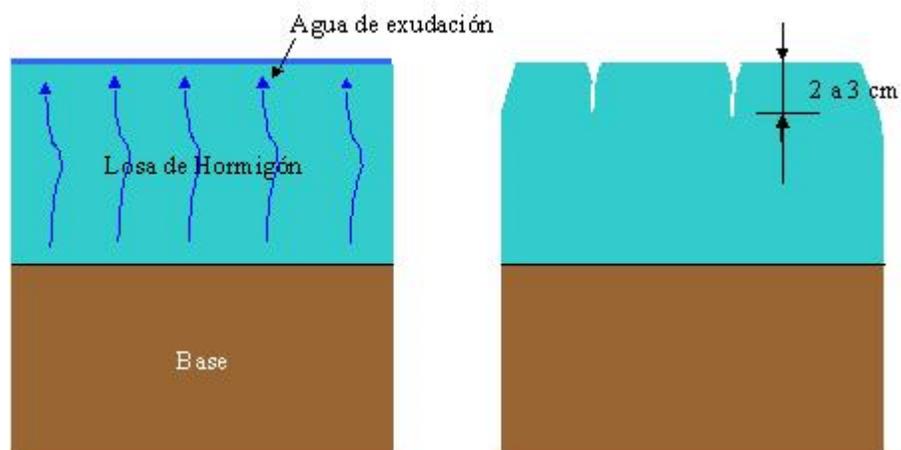


Figura N°2.11 Dentro de las primeras 2 horas de edad, la contracción superficial del hormigón está restringida por el resto del hormigón que aún se mantiene estable dimensionalmente. Esta restricción genera tensiones de tracción que el hormigón no puede soportar ya que está en estado fraguado y se fisura.

2.3.2 Retracción autógena

Aun después del fraguado ocurren cambios de volumen en forma de retracción o dilatación. Una continua hidratación puede llevar a una expansión, sin embargo, cuando no se permite el movimiento de humedad, ya sea hacia adentro o fuera del hormigón, se produce una retracción. La retracción de tal sistema se conoce como retracción autógena, en la práctica esto se produce en el interior de una gran masa de hormigón. La magnitud del movimiento está entre 40×10^{-6} a la edad de un mes, y de 100×10^{-6} , después de 5 años (medido como deformación unitaria lineal).

Por lo tanto, la retracción es relativamente pequeña y en la práctica (excepto en grandes estructuras de hormigón masivo) no es necesario tomarla en cuenta como factor separado de la retracción por secado que normalmente incluye aquella retracción causada por cambios autógenos. Es más importante cuando la razón agua-cemento es baja (menor a 0,40).⁸

2.3.3 Retracción por secado

La retracción por secado, se produce por la pérdida del agua en poros y capilares en el hormigón. Este fenómeno puede ocasionar en la pasta de cemento retracción de volumen de hasta un 1%. No obstante los áridos agregados reducen estas deformaciones a valores cercanos a un 0,06% (ACI 224. 1R-93), haciendo menos grave este efecto en elementos de hormigón.²

Una pasta de cemento saturada no permanecerá dimensionalmente estable cuando se expone a humedad ambiental por debajo de la saturación, principalmente porque la pérdida del agua físicamente absorbida del H-S-C (fase hidrato de silicato de calcio), resulta en deformación por retracción. En resumen, la deformación de retracción por secado está principalmente relacionada con la remoción de agua absorbida de la pasta de cemento hidratada. La humedad relativa diferencial entre el hormigón y la del medio ambiente es la fuerza conductora de este fenómeno.⁷

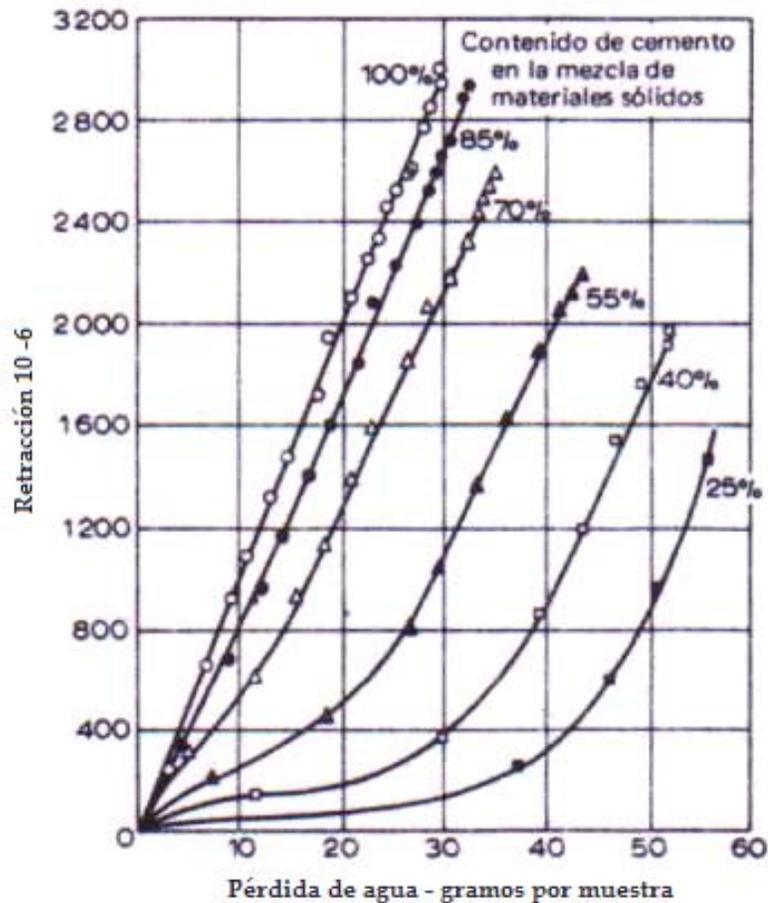


Figura N°2.12 Relación entre la retracción y la pérdida de agua de muestras de pastas de sílice-cemento pulverizada, curadas por 7 días a 21°C y secadas posteriormente. ⁸

La relación entre el peso del agua pérdida y la retracción se muestran en la Figura N°2.12. Para pastas puras, las dos cantidades son proporcionales ya que no hay agua capilar y solamente se elimina el agua absorbida. Sin embargo, las mezclas a las que se ha adicionado sílice pulverizada, que requieren por lo tanto una relación agua/cemento más alta, contienen cavidades capilares aún cuando se encuentran completamente hidratadas. Se vacían los espacios capilares, se produce una pérdida de agua sin que se presente retracción, pero una vez que los espacios capilares se han vaciado, el agua absorbida se mueve de la misma manera que en la pasta de cemento pura, y ocasiona retracción. Por lo tanto, la pendiente final de todas las curvas de la Figura N°2.12 es la misma. Los hormigones que contienen alguna cantidad de agua en los poros de los agregados o en grandes cavidades (accidentales) presentan una variación mayor en la forma de las curvas de pérdida de agua-retracción.

2.3.3.1 Factores que afectan la retracción

- **Cemento**

Las propiedades del cemento tienen poca influencia sobre la retracción del hormigón. Swayze ha probado que una retracción mayor en la pasta pura de cemento no significa necesariamente que el hormigón producido con dicho cemento se contraiga más efecto del creep. La influencia de la finura del cemento resulta sensible tan solo para la fracción gruesa con partículas más gruesas que $75 \mu\text{m}$. (No.200), que al tener comparativamente poca hidratación, actúa respectivamente como agregado. En los demás casos un cemento más fino no aumentará la retracción del hormigón (Figura N°2.13), aunque la retracción de la pasta pura de cemento sí se incrementa.⁸

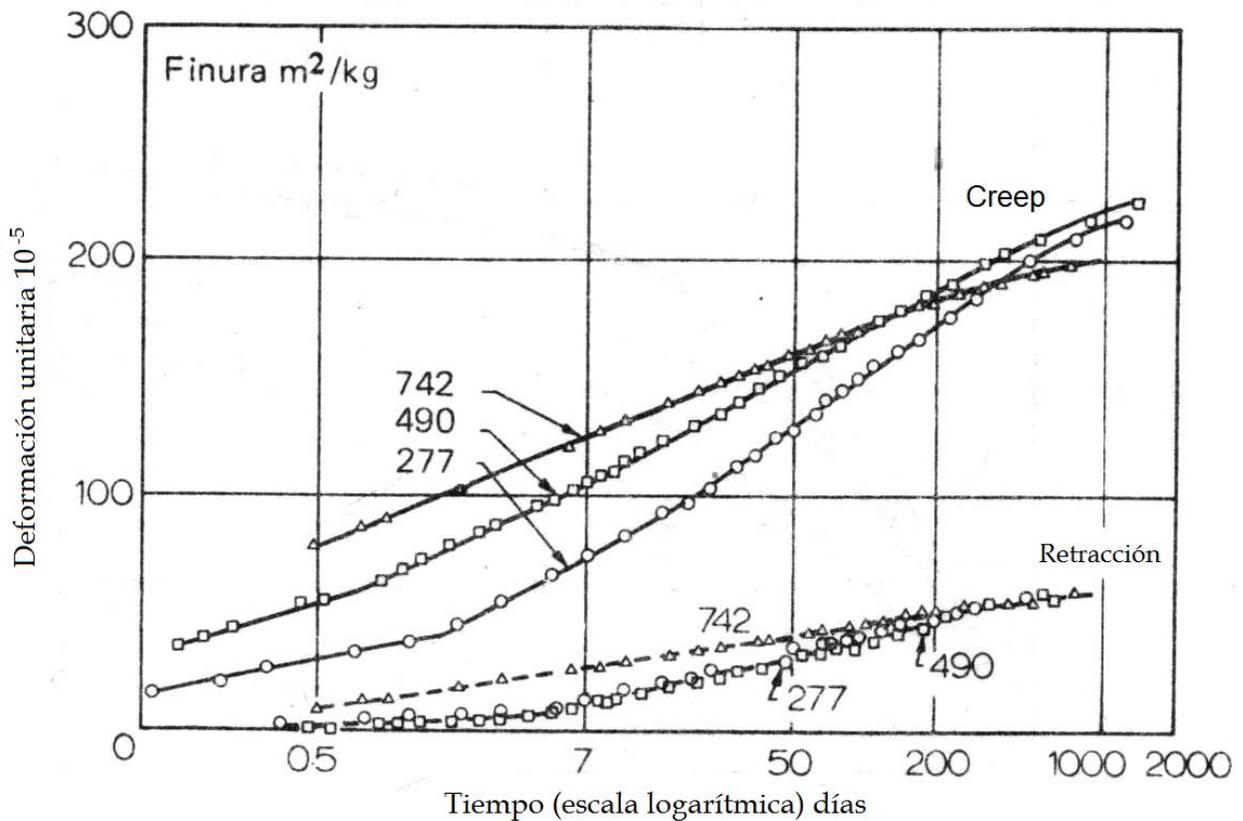


Figura N°2.13 Creep y retracción de hormigones elaborados con cementsos de diferente finura⁸

- **Agua**

El contenido de agua afecta también a la retracción del hormigón, porque se reduce la cantidad de agregado restrictivo. Por lo tanto, el contenido de agua de la mezcla indicará generalmente la cantidad previsible de retracción, pero el contenido de agua no es un factor primordial.⁸

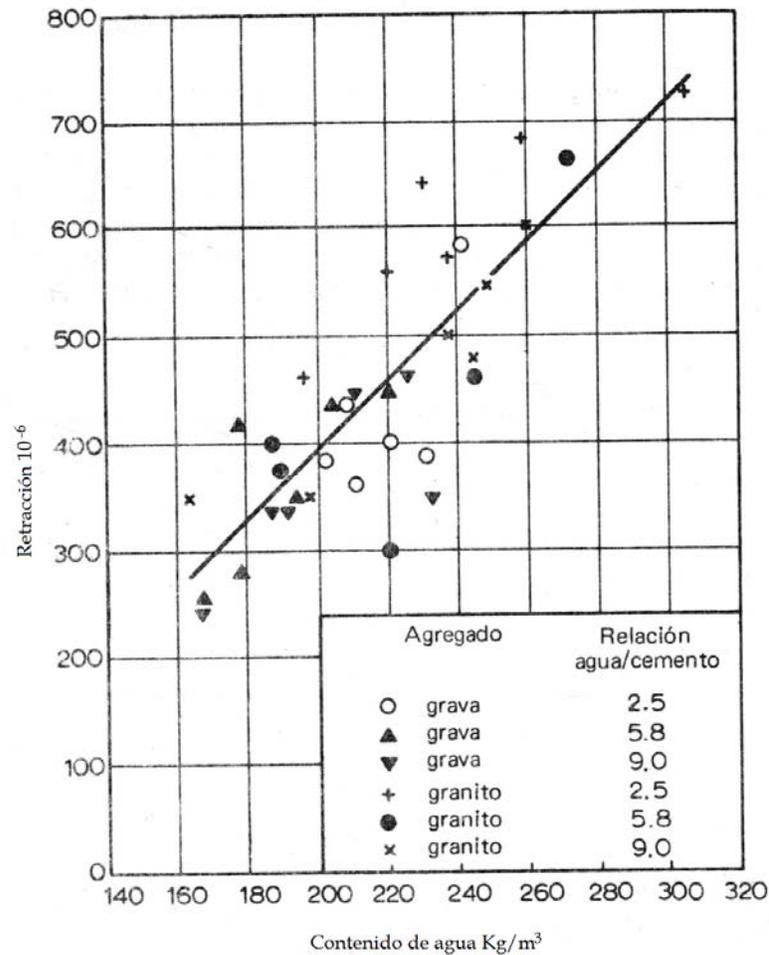


Figura N°2.14 Relación entre el contenido de agua del hormigón fresco y la retracción por secado.⁸

- **Agregado**

El tamaño y la granulometría del agregado por sí solos no afectan la magnitud de la retracción, pero un agregado mayor permite usar una mezcla más pobre, y por lo tanto, esto implica una menor retracción, en la Figura N°2.15 se puede apreciar que si aumenta el tamaño máximo del agregado, el contenido de agregado grueso se incrementa en el volumen del hormigón, entonces la retracción se reduce.

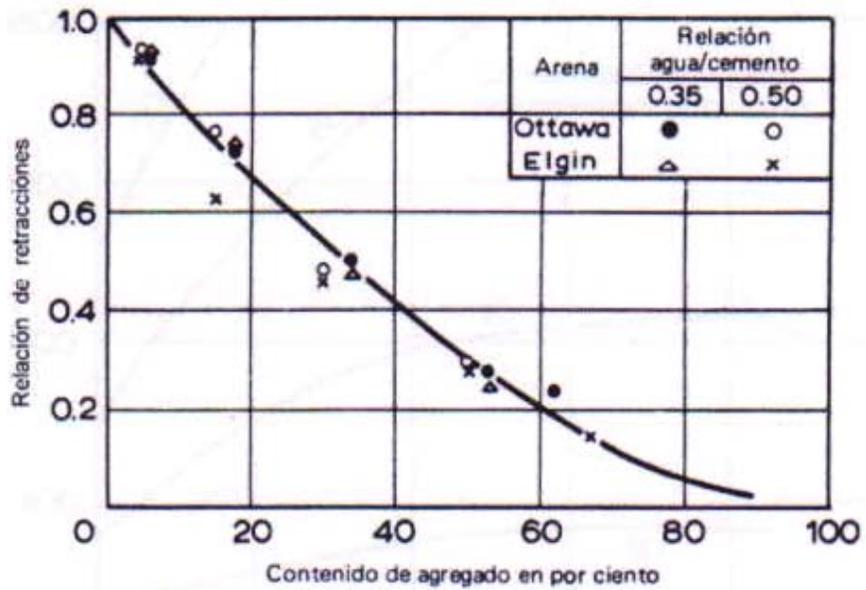


Figura N°2.15 Influencia del contenido de agregado del hormigón (por volumen) sobre la relación de la retracción del hormigón a la retracción de la pasta pura de cemento. ⁸

La influencia de la relación agua/cemento y del contenido de agregado, pueden combinarse en una sola gráfica, esto se puede ver en la Figura N°2.16, se debe tener en cuenta que los valores dados para la retracción corresponden al secado en clima templado.

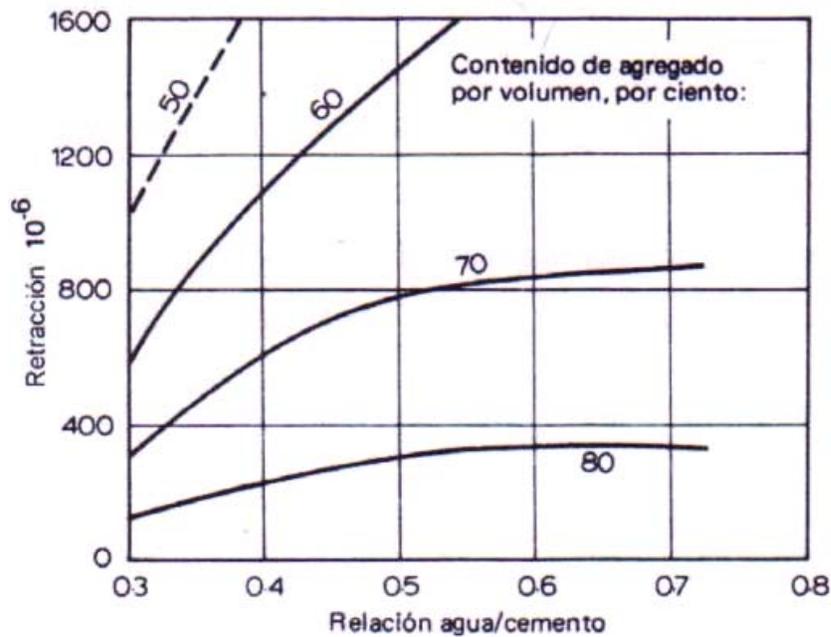


Figura N°2.16 Influencia de la relación agua/cemento y el contenido de agregado, sobre la retracción. ⁸

- **Aditivos y adiciones**

Los aditivos del hormigón tales como el cloruro de calcio y las adiciones como la escoria granulada y las puzolanas, tienden a incrementar el volumen de los poros finos en el producto de hidratación del cemento, al igual que los aditivos reductores de agua y los retardantes de fraguado que son capaces de afectar una mejor dispersión de las partículas del cemento anhidro en el agua, ya que la retracción por secado en el hormigón está asociada directamente con el agua retenida por los pequeños poros en el rango de 3 a 20 nm, los hormigones que contienen aditivos capaces de refinar los poros, generalmente muestran una retracción por secado más alta.

- **Curado y las condiciones de almacenamiento**

El curado prolongado con humedad retrasa la retracción, pero el efecto del curado sobre la magnitud de retracción a largo plazo es pequeño, aunque bastante complejo. En lo que se refiere a la pasta de cemento, el curado prolongado provoca una retracción final mayor, pero la pasta se vuelve más fuerte con el tiempo y resulta capaz de resistir la tendencia a contraerse sin fisurarse.

Un hormigón bien curado se contrae más rápidamente a partir del cese del curado, que uno con menor curado y, por lo tanto, los esfuerzos que se presentan después, debido al creep, son menores; además, un hormigón más resistente posee un grado menor de creep. Estos factores pueden contrarrestar la alta resistencia a la tracción del hormigón bien curado y producir fisuramiento. En resumen puede afirmarse que la duración del periodo de curado no es un factor importante en la retracción final y agrietamiento del hormigón.

La magnitud de la retracción es en gran parte independiente de la velocidad del secado, salvo en los casos en que se transfiere un hormigón sumergido en agua a un ambiente de muy poca humedad, donde puede producirse la fractura.

La humedad relativa ambiente afecta mucho la magnitud de retracción del hormigón, como se ve, por ejemplo, en la Figura N°2.17.

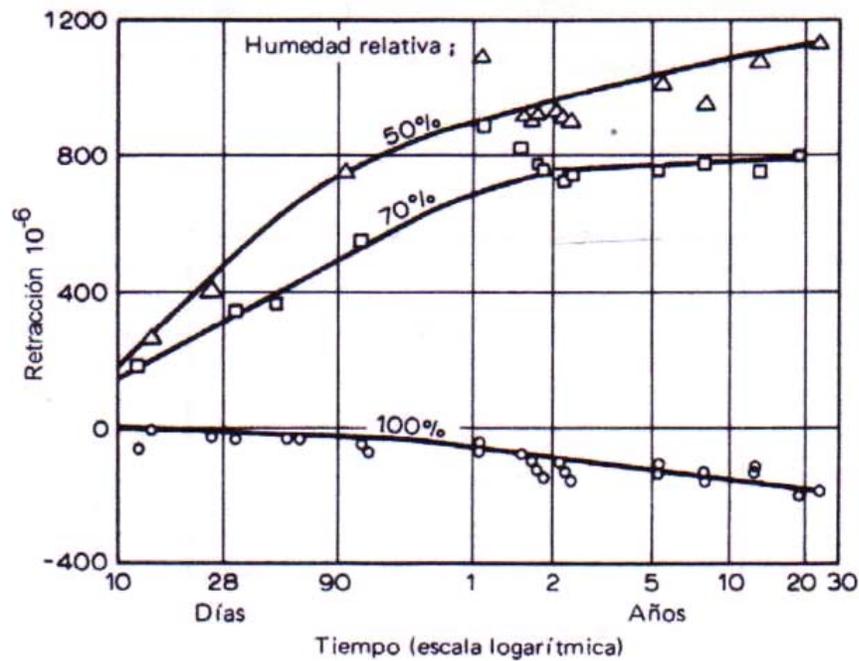


Figura N°2.17 Relación entre la retracción y el tiempo para hormigones almacenados a diferentes humedades relativas. ⁸

Por lo tanto el hormigón colocado en aire “seco” (no saturado) se retrae, pero se expande en agua o en aire con humedad relativa del 100%, siempre que no exista retracción autógena.

- **Geometría del elemento**

A una humedad relativa de almacenamiento constante, tanto el tamaño como la forma de un elemento de hormigón determinan la magnitud de la retracción por secado. Es conveniente expresar los parámetros de tamaño y la forma por una simple expresión como el espesor efectivo o espesor teórico, que es igual al área de la sección dividida por el semiperímetro en contacto con la atmósfera. Las relaciones entre el espesor teórico y la retracción por secado se ilustran en la Figura N°2.18.

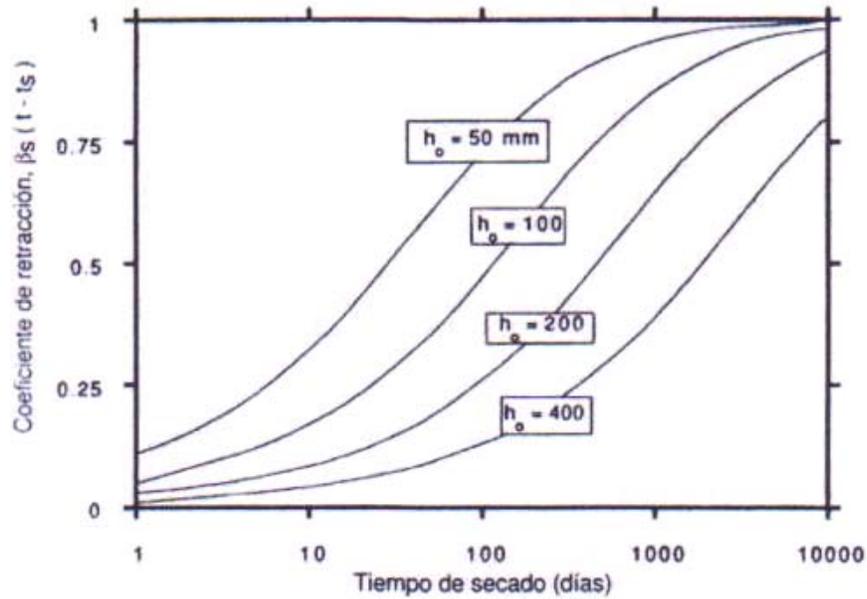


Figura N°2.18 Influencia del tiempo de exposición y tamaño del espécimen en el coeficiente de la retracción por secado.⁷

2.3.4 Creep

La relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria del hormigón está en función del tiempo; con el tiempo, el aumento gradual en la deformación unitaria se debe al creep. Por lo tanto, podemos definir el creep como un aumento en deformación unitaria bajo esfuerzo sostenido, y como dicho aumento puede ser varias veces mayor que la deformación unitaria elástica debida a la carga, el creep reviste considerable importancia en la mecánica estructural especialmente en estructuras de hormigón armado y pretensado.

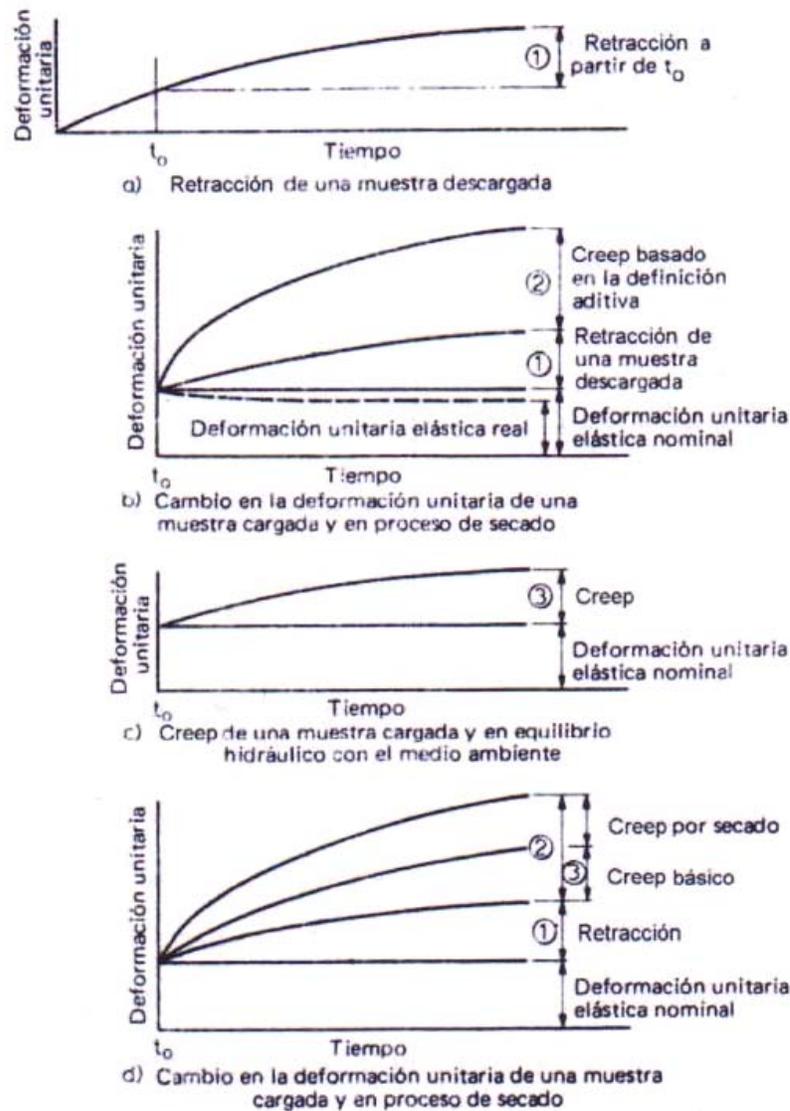


Figura N°2.19 Deformaciones que dependen del tiempo en un hormigón sometido a carga. ⁸

2.4 Fisuración causada por la retracción

La fisuración es una rotura en la masa del hormigón que se manifiesta exteriormente con un desarrollo lineal. La fisuración se produce siempre que la tensión, generalmente de tracción, a la que se encuentra sometido el material sobrepasa su resistencia última.

En todas las construcciones en las que interviene el hormigón pueden aparecer fisuras que pueden manifestarse al cabo de años, de semanas, de días, o solamente de horas y que pueden estar motivadas por causas múltiples, unas veces actuando en solitario y otras asociadas a otros fenómenos.

Las fisuras se distinguen por la edad de aparición en un elemento estructural, por su forma y trayectoria, abertura, movimiento, etc. La determinación de las causas que han provocado las fisuras es importante como medida previa a la reparación. Por lo tanto, en el caso de fisuración por retracción la magnitud de la deformación por retracción es solamente uno de los factores que rigen el agrietamiento del hormigón. En la Figura N°2.20, se pueden apreciar cuales son los otros factores:

- Módulo de elasticidad. Cuanto más bajo el módulo de elasticidad, más baja será la cantidad de esfuerzo elástico de tensión inducido para una magnitud dada de retracción.
- Creep plástico. Cuanto más alto el creep, más alta será la cantidad de relajamiento de esfuerzo y más bajo el esfuerzo neto de tensión.
- Resistencia a la tracción. Mientras más alta es la resistencia a la tracción, más bajo será el riesgo de que el esfuerzo por tracción exceda la resistencia y agriete el material.

En general, los hormigones de alta resistencia pueden ser más propensos a fisuras debido a la mayor retracción térmica y menor relajamiento de esfuerzo, cabe decir, que la afirmación anterior es aplicable a los elementos de hormigón masivo; en secciones delgadas, el efecto de la deformación por retracción por secado será más importante.

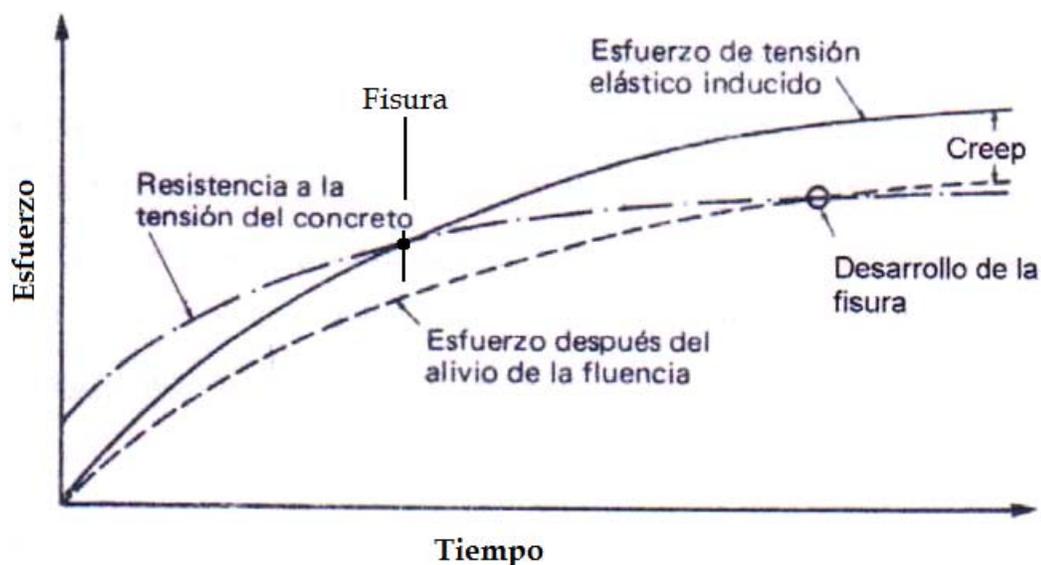


Figura N°2.20 Configuración esquemática de la evolución de la fisura cuando se libera por creep esfuerzo de tensión debido a la retracción restringida.⁸

2.4.1 Factores que afectan el agrietamiento

Se puede decir que muchos factores que reducen la retracción por secado del hormigón también tenderán a reducir su extensibilidad. Algunos factores que afectan al agrietamiento son:

- **Relación agua/cemento**

Uno de los factores más importantes del fisuramiento es la relación agua/cemento de la mezcla, ya que su incremento tiende a aumentar la retracción y al mismo tiempo, a reducir la resistencia del hormigón. Un incremento en el contenido del cemento aumenta también la retracción y, por lo tanto, la tendencia a formar fisuras; sin embargo, el efecto sobre la resistencia es positivo, esto se aplica a la retracción por secado. Por otro lado la presencia de arcilla en el agregado lleva a un aumento tanto en la retracción como del agrietamiento⁸.

- **Aditivos**

El uso de aditivos puede afectar la tendencia al fisuramiento mediante combinaciones de efectos sobre el endurecimiento, la retracción y el creep. Específicamente, los retardadores pueden producir que una mayor retracción sea absorbida en la forma de retracción plástica y, probablemente, incrementar también la extensibilidad del hormigón; por lo tanto, reducen el fisuramiento. Por otro lado, si el hormigón logra rápidamente un estado rígido, no puede absorber la posible retracción plástica y, como tiene poca resistencia, se fisura⁸.

- **Energía**

Debemos notar que, desde el punto de vista de la energía requerida para propagar una fisura, es más fácil agrandar una fisura existente que formar una nueva. Esto explica el hecho de que al aplicar una carga, cada fisura subsecuente se produce bajo una carga mayor que la anterior. El número total de fisuras formadas se determina por el tamaño del miembro de hormigón y la distancia entre las fisuras depende del tamaño máximo del agregado⁸.

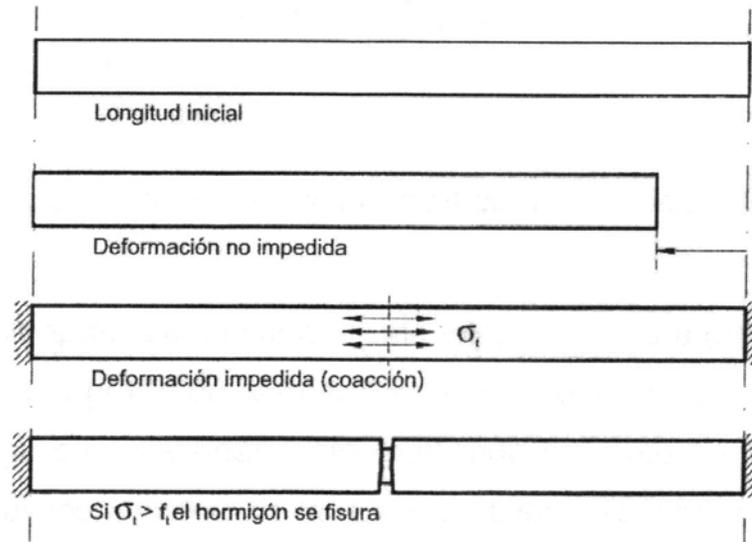


Figura N° 2.21 Fisuración por retracción²

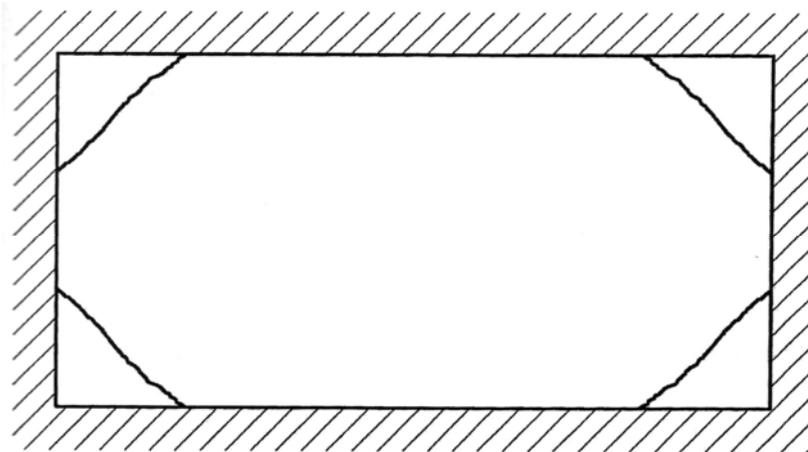


Figura N°2.22 Fisuras de retracción en una losa²

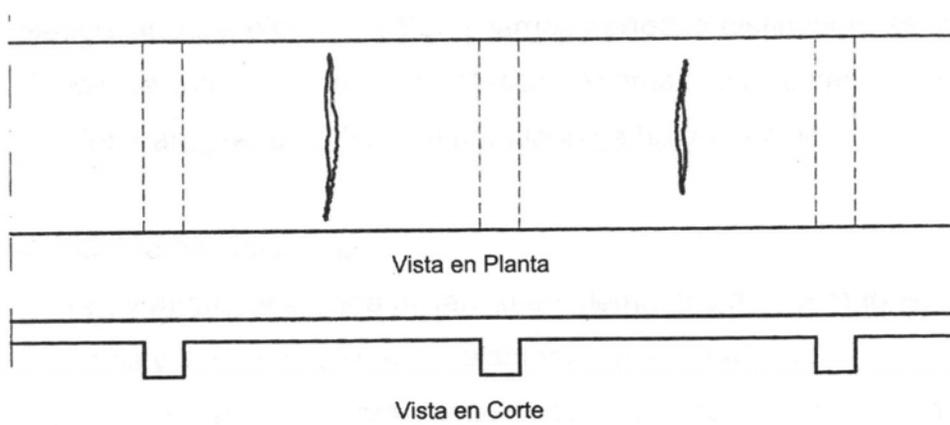


Figura N°2.23 Fisura por retracción por secado en losa con vigas en una dirección.

CAPITULO 3

PLANTEAMIENTO DEL PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Planteamiento de la investigación

En esta investigación se estudiará la influencia de la puzolana en la fisuración por retracción de los hormigones fabricados con cementos portland puzolánicos nacionales.

Para estudiar el efecto de las adiciones puzolánicas en los cementos chilenos en la fisuración del hormigón, se utilizarán cuatro tipos de cementos, de los cuales tres son en base a un cemento pórtland con distintas dosis de puzolana adicionada (0-17 y 23%) y el cuarto es un cemento pórtland puzolánico comercial con un 27% aproximado de puzolana incorporada en el proceso de molienda del clínquer.

3.2 Variables de estudio

Los ensayos se realizarán con hormigones, para los cuales se utilizará un árido normalizado, será de esta manera para reducir el grado de heterogeneidad en la distribución granulométrica de las partículas del árido. También se mantendrá constante la finura de la puzolana.

Lo que se irá variando, a parte del cemento será la relación agua/cemento (0,45 – 0,55), para poder tener una visión mayor del fenómeno de fisuración.

3.3 Materias primas utilizadas

3.3.1 Cemento

Los cementos utilizados en este trabajo experimental son cementos comerciales, los cuales fueron obtenidos de una planta cementera nacional, los cementos son los siguientes:

- Cemento pórtland puro, de Grado Alta Resistencia, según norma NCh 148 Of68.
- Cemento pórtland puzolánico, Grado Alta Resistencia, según norma NCh 148.Of68.

3.3.2 Puzolana

La puzolana empleada para este trabajo fue adquirida en una planta cementera nacional, es decir es obtenida en la región metropolitana en la comuna de Pudahuel. Es la misma que se encuentra en el cemento Portland Puzolánico comercial utilizado en este estudio.

3.3.3 Áridos

Los áridos utilizados en este trabajo fueron facilitados por IDIEM, los cuales cumplen con las especificaciones de la norma ASTM C33 Especificación Normalizada de Áridos para Hormigón, en la cual se especifican los requerimientos para los áridos finos y gruesos para utilizar en el hormigón. En las tablas que se presentan a continuación se detalla la granulometría de los áridos utilizados y su procedencia.

Tabla N°3.1 Granulometría gravilla Estratos - Catemito

ASTM	mm	% que pasa	% retenido
1 1/2"	40		
3/4"	20		
1/2"	12,5	100	0
3/8"	10	98	2
4	5	1	99
8	2,5		100
16	1,25		100
30	0,63		100
50	0,315		100
100	0,16		100
Tamaño max. Nominal (mm)		10	
Módulo Finura			6,01
Finos bajo malla 0,080 (%)		0,2	

Tabla N°3.2 Granulometría arena Santa Gloria - Nos

ASTM	mm	% que pasa
1 1/2"	40	
3/4"	20	
1/2"	12,5	
3/8"	10	100
4	5	93
8	2,5	71
16	1,25	54
30	0,63	37
50	0,315	18
100	0,16	7
Módulo Finura		2,99
Finos bajo malla 0,080 (%)		3,0

3.3.4 Agua

El agua utilizada para este trabajo experimental es potable, la cual se encuentra a una temperatura de 23 ± 2 °C.

3.4 Elaboración de cementos portland puzolánicos experimentales

3.4.1 Procesamiento de la puzolana

La puzolana utilizada fue extraída en su estado natural, por lo cual debe pasar por procesos previos antes de ser usada en la elaboración de los cementos de laboratorios.

3.4.1.1 Secado

La puzolana fue secada en horno a una temperatura de 110°C hasta peso constante, luego que se enfrió se envasó en bolsas selladas al vacío y se guardó en un lugar seco hasta ser trasladada para su molienda, todo este procedimiento se realizó en la sección de Aglomerantes del IDIEM.

3.4.1.2 Molienda

Luego de una serie de moliendas experimentales, se llegó a que el tiempo de molienda de la puzolana para alcanzar la finura requerida es de 210 minutos, la molienda se realizó en cargas de 5 kg. Este procedimiento se llevo a cabo en las dependencias del IDIEM ubicada en la comuna de Cerrillos.

3.4.1.3 Homogeneización y envasado

Una vez finalizado el proceso de molienda de la puzolana a utilizar, se procedió a la homogeneización del conjunto de cargas durante 30 minutos aproximadamente, posteriormente a esto se envasó en bolsas selladas al vacío y se almacenó en un lugar seco hasta su uso.

3.4.1.4 Caracterización

Las características químicas de la puzolana a emplear son muy importantes para así conocer su composición. En la siguiente Tabla N°3.3 se presenta el análisis químico de la puzolana que se utilizará en la fabricación de los cementos de laboratorio.

Tabla N°3.3 Análisis químico de la puzolana

	%
H ₂ O	8,50
CaO	2,53
SiO ₂	66,90
Al ₂ O ₃	13,45
Fe ₂ O ₃	1,88
MgO	0,74
SO ₃	0,07
K ₂ O	3,69
Na ₂ O	3,85
PxC	4,40
R.I.	90,79
Cl	0,04



Gráfico N°3.1 Análisis químico de la puzolana

Según el ensayo de superficie específica basado en la norma NCh159 Of.70, el resultado se presenta en la siguiente Tabla N°3.4.

Tabla N°3.4 Superficie específica de la puzolana. Método Blaine

	Peso específico relativo (g/ml)	T (°C)	P (g)	e	T (seg)	S (cm ² /g)
Puzolana	2,41	22,2	2,021	0,50	224,9	7000

3.4.2 Cementos de laboratorio

Para la obtención de los cementos de laboratorio se debe mezclar y homogeneizar el cemento portland con la puzolana procesada según la dosificación requerida. Se procesarán dos cementos de laboratorio con 17 y 23% de puzolana del peso total del cemento.

3.4.2.1 Cemento portland puzolánico

3.4.2.1.1 Dosificación

Este cemento es elaborado a partir de la mezcla del cemento CPN y puzolana, la dosificación de la puzolana es al 17 y 23% del peso total del cemento.

3.4.2.1.2 Homogeneización y envasado

Una vez terminado el proceso de homogeneización del cemento, el cual dura aproximadamente 30 minutos en la máquina de homogeneización, se procede a envasar el cemento en bolsas selladas al vacío y guardadas en un lugar seco. Todas las bolsas fueron marcadas como cemento portland al 17 y 23%.

En la siguiente Tabla N°3.5 se muestran los cuatro cementos experimentales a utilizar en la investigación.

Tabla N°3.5 Denominación de los Cementos utilizados

Abreviación	Nombre	Composición
CPN	Cemento portland puro	Cínquer + Yeso
CPPA	Cemento portland puzolánico al 17%	CPN + 17% puzolana
CPPB	Cemento portland puzolánico al 23%	CPN + 23% puzolana
CPPC	Cemento portland puzolánico comercial	Cínquer + Yeso +27% puzolana

3.5 Caracterización de los cementos

3.5.1 Ensayos físicos a cementos

3.5.1.1 Peso específico relativo

El peso específico relativo expresa la relación entre el peso de la muestra de cemento y su volumen absoluto.

El ensayo de determinación del peso relativo se hizo según la norma chilena NCh154 Of.69, en este método de ensayo el peso específico relativo de los cementos se determina al establecer la relación entre una masa de cemento (g) y el volumen (ml) de líquido que esta masa desplaza en el matraz de Le Chantelier.

3.5.1.2 Superficie específica (Método Blaine)

La finura se define según el método Blaine a través de la superficie específica de las partículas que componen la muestra, se expresa en cm^2/g ; esto se refleja en el proceso hidratación del cemento ya que a mayor superficie de partículas, mejor y más rápido es este proceso.

El ensayo de determinación de la superficie específica se hizo según la norma chilena NCh159 Of.70, en este método de ensayo la determinación de la finura del cemento se basa en el hecho de que la velocidad de paso del aire a través de una capa de material granular con determinada porosidad es función del porcentaje y del tamaño de los poros existentes en la capa, los cuales dependen del tamaño de las partículas del material, y por lo tanto, de la superficie específica de éste. En este método de ensayo se utiliza el permeabilímetro según Blaine.

3.5.1.3 Agua de consistencia normal

Al agregar agua al cemento se produce una pasta, la fluidez de la pasta aumenta a medida que se le va añadiendo agua.

La consistencia normal es un estado de fluidez alcanzado por la pasta del cemento que tiene una propiedad óptima de hidratación, según una consistencia estándar. Se expresa como un porcentaje en peso o volumen de agua con relación al peso seco del cemento.

El ensayo de consistencia normal se hizo según la norma chilena NCh151 Of.69, en este método de ensayo la determinación de la consistencia normal de los cementos se basa en la resistencia que opone la pasta de cemento a la penetración de la sonda de un aparato normalizado (aparato Vicat).

3.5.1.4 Tiempo de fraguado

Se denomina tiempo de fraguado, al tiempo en que la pasta de cemento deja de ser plástica y adquiere una cierta rigidez la cual no le permite moldearse. El tiempo de fraguado de una pasta de cemento varía de acuerdo a factores como temperatura, humedad de ambiente, proporción de agua a cemento, tipo de cemento y aditivos añadidos. Para establecer un procedimiento estándar se escoge la proporción de agua a cemento resultante de la prueba de consistencia normal del cemento, no se incluyen aditivos y las demás condiciones se mantienen constantes. El ensayo de determinación de tiempo de fraguado se hizo según la norma chilena NCh152 Of.71, en este método de ensayo la determinación de la consistencia normal de los cementos se basa en la resistencia que opone la pasta de cemento a la penetración de la aguja de un aparato normalizado (aparato de Vicat). Los tiempos de fraguado, inicial y final, se expresan en horas y minutos, con aproximación de 10 minutos.

3.5.2 Ensayos químicos a cementos

3.5.2.1 Pérdida por calcinación

Indica los constituyentes accidentales o impurezas del cemento portland que se eliminan por el calentamiento entre $950\pm 50^{\circ}\text{C}$. El ensayo de determinación de pérdida por calcinación se hizo según la norma chilena NCh147 Of.69, en este método de ensayo una muestra de cemento se calienta en una mufla a temperatura determinada y la pérdida de peso representa normalmente el agua higroscópica, la de pre hidratación y el dióxido de carbono.

3.5.2.2 Trióxido de azufre

El trióxido de azufre nos indica la cantidad de yeso incorporado en la fabricación del cemento. Este compuesto en dosis no adecuadas puede producir expansiones diferidas que al ocurrir en el hormigón endurecido ocasionan su agrietamiento. Por tal razón se limita en las normas su contenido máximo. El ensayo de determinación del trióxido de azufre se hizo según la norma chilena NCh147 Of.69, en este método de ensayo el sulfato se precipita de una solución ácida con cloruro de bario (BaCl_2). El precipitado se calcina y se pesa como sulfato de bario (BaSO_4) y se calcula como SO_3 equivalente.

3.5.2.3 Residuo insoluble

Indica las materias insolubles en ácido clorhídrico diluido que se encuentra en el cemento, constituidas principalmente por cuarzo y material silíceo insoluble. El ensayo de determinación del residuo insoluble se hizo según la norma chilena NCh147 Of.69, en este método de ensayo la determinación del residuo insoluble se basa en el tratamiento de una muestra con HCl y posteriormente con NaOH. Este ensayo permite conocer aproximadamente el contenido de adiciones al cemento.

3.6 Ensayos para determinar el comportamiento de los hormigones

3.6.1 Resistencia a compresión

Para cada hormigón estudiado se determina la resistencia a compresión en probetas cúbicas de 15x15 cm, de acuerdo a las especificaciones de la norma chilena NCh1037 Of.77. En esta norma se especifica el ensayo de probetas obtenidas según NCh1017 EOf.75, Confección y curado en obra de probetas para ensayos de compresión y tracción. Para cada ensayo se confeccionan dos probetas, las resistencias finales se expresan como el promedio de los resultados de ambos ensayos.

3.6.2 Retracción libre

Para cada hormigón se determina la curva de retracción libre por secado al aire en cámara seca ($T = 23 \pm 2$ °C, $HR = 50 \pm 4$ %) hasta la edad de 28 días, el procedimiento se realiza de acuerdo a las especificaciones de la norma chilena NCh2221 Of.94. Para cada serie se confeccionan dos probetas prismáticas de 100x100x285 mm. Se utiliza un equipo comparador marca Soiltest modelo CT384 para realizar las mediciones.

3.6.3 Retracción restringida

Para cada hormigón estudiado se determina la edad de fisuración mediante la confección de dos probetas por serie, para la realización de este ensayo se implementará la norma ASTM C 1581-04 en este trabajo de investigación.

3.6.3.1 Implementación de la Norma ASTM C 1581-04

El ensayo de retracción impedida consiste en moldear el hormigón en un molde circular alrededor de un anillo de acero, el anillo de acero puede encontrarse equipado con strain gages para medir pequeñas deformaciones las cuales son causadas por la tensión ejercida sobre el anillo de acero.

Dado que al estar restringida la retracción del hormigón por el anillo de acero éste ejerce una presión sobre el anillo. Esta presión deforma el anillo efecto que puede ser medido por los strain gages conectados a un sistema de adquisición de datos.

Si no se contase con los strain gages la inspección de los hormigones debe hacerse visualmente en forma minuciosa, dado que debe anotarse la edad de la aparición de la fisura y hacerle un seguimiento. Cabe mencionar que este método es para comparar las distintas variables del estudio y no intenta determinar la edad de fisuración del hormigón en algún tipo de estructura, configuración o exposición. El ensayo termina cuando existe una caída de más de 30 microstrain (μm) o cuando visualmente se encuentra una grieta, pero si después de 28 días de edad ninguno de estos dos eventos sucede el ensayo se da por finalizado.

3.6.3.2 Aparatos

3.6.3.2.1 Anillo de acero

Estructura de acero de espesor de $12,5 \pm 0,13$ mm., diámetro exterior de 330 ± 3 mm. y una altura de 150 ± 6 mm. El manto externo y el manto interno debe estar rectificadado para que se genere una superficie lisa con una textura de 63 micropulgadas (1.6 micrómetros) o más fino, según lo definido en ASME B 46.1.

3.6.3.2.2 Anillo exterior (moldaje)

Estructura de madera de diámetro exterior de 406 ± 3 mm. y una altura de 150 ± 6 mm. La estructura está formada por dos medios círculos los cuales se ensamblan para formar el moldaje y se desarma n para desmoldar la probeta.

3.6.3.2.3 Base no absorbente

Es una base metálica cuadrada de 500×500 mm., tratada con pintura.

En la Figura N°3.1 y Tabla N°3.6 se muestra un esquema del montaje del ensayo y las dimensiones respectivas.

CAPITULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 Realización de los ensayos

Los ensayos de retracción restringida y de compresión de los hormigones confeccionados fueron realizados en el laboratorio de investigación de la Sección de Hormigones de IDIEM, estos ensayos se detallan a continuación.

Tanto los ensayos físicos y químicos de los cementos utilizados en la confección de los hormigones fueron realizados en la sección de Aglomerantes del IDIEM.

4.2 Fabricación de hormigones

4.2.1 Materiales

- Cemento: CPN, CPPA, CPPB, CPPC
- Áridos: Gravilla y arena
- Agua: Potable a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 3$

4.2.2 Dosificación

Las razones a utilizar serán $A/C = 0.45 - 0.55$, para determinar las dosificaciones de los hormigones se utilizó la norma ACI 211.1, se realizó una prueba de rendimiento del hormigón para comprobar las dosificaciones, la prueba realizada arrojó un rendimiento de la amasada de 96% del hormigón lo cual es bueno para la realización de nuestros hormigones. Una vez terminado el amasado del hormigón es tomado el cono del hormigón, para comprobar que este dentro de los rangos estimados.

4.2.3 Equipo

Se utilizará una betonera de volteo lateral con capacidad de 160 litros y una balanza con capacidad máxima de 60 kilogramos y una precisión de 10 miligramos.

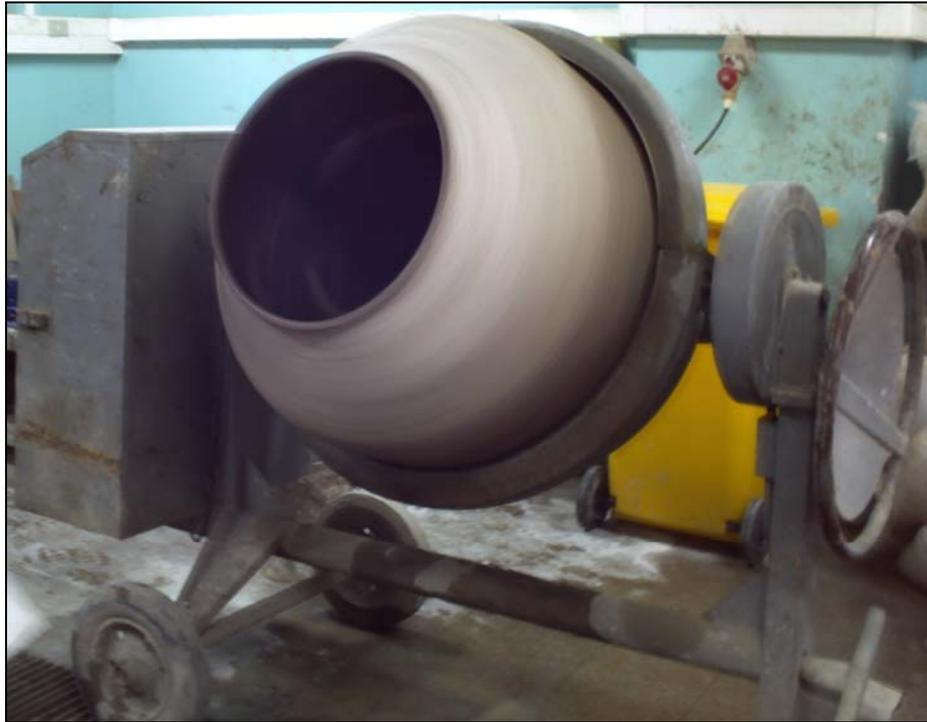


Figura N°4.1 Betonera

4.2.4 Preparación del hormigón

Se vierte en la betonera primero los áridos, luego el cemento y finalmente se agrega el agua se deja mezclar durante unos 5 minutos, se amasa de forma tal que se consiga su mezcla homogénea. Se utilizó el mismo procedimiento en la confección de todos los hormigones.

4.3 Confección de probetas

4.3.1 Preparación de probetas

4.3.1.1 Resistencia a compresión

Los moldes cúbicos deben estar limpios y se les aplica una capa de desmoldante en las paredes interiores del molde.

4.3.1.2 Retracción libre

Los moldes deben estar limpios y armados, se instalan los topes y se comprueba con el pie de metro que de tope a tope exista una distancia de 10 pulgadas. Después se debe aplicar una capa de desmoldante en las paredes interiores del molde.



Figura N°4.2 Molde de retracción libre

4.3.1.3 Retracción restringida

Se debe aplicar desmoldante al anillo interior por la parte exterior y al anillo exterior por la parte interior, después se centra y asegura ambos anillos, se debe medir con un pie de metro el espesor de modo que sea uniforme.



Figura N°4.3 Molde de retracción restringida

4.3.2 Llenado de probetas

4.3.2.1 Resistencia a compresión

Se vacía cuidadosamente el hormigón en el molde procurando evitar segregaciones agregamos el hormigón en una sola capa, manteniendo en todo momento un exceso de hormigón por sobre el borde del molde, para compactar las probetas se utilizó una mesa vibrador, finalmente se enrasa la superficie del molde con platacho.



Figura N°4.4 Probetas de compresión

4.3.2.2 Retracción libre

Se pone el hormigón en dos capas de igual espesor en el molde, luego se compacta cada capa en la mesa vibradora, luego que se haya compactado la capa superior, se retira el exceso de hormigón del molde y se alisa la superficie con unos pocos golpes de platacho.

4.3.2.3 Retracción restringida

Se vierte una capa de hormigón hasta completar la altura media del molde y con un pisón se dan 75 golpes alrededor del anillo, luego se vierte la segunda capa de hormigón y se lleva a la mesa de vibrado, finalmente se enrasa la superficie del molde.



Figura N°4.5 Confección de probetas de retracción restringida

4.3.3 Curado de probetas

Para evitar la evaporación todas las probetas se curarán bajo condiciones de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, se usa una arpillera húmeda para cubrir las probetas, la duración de este proceso es de 24 horas.

4.3.4 Desmolde

4.3.4.1 Resistencia a compresión

Una vez finalizado el curado de las probetas, éstas se desmoldan de forma cuidadosa para no dañar la probeta.

4.3.4.2 Retracción libre

Después de terminado el curado se debe utilizar los dispositivos de desmolde, para remover la probeta sin golpear ni sacudir y teniendo especial cuidado de no ejercer presión directamente contra los topes, una vez terminado el desmolde se identifica la probeta con el tipo de cemento que se utilizó.



Figura N°4.6 Probetas de retracción libre desmoldadas

4.3.4.3 Retracción restringida

Una vez terminado el curado, se sella la parte superior del anillo con parafina líquida luego se quitan las fijaciones del anillo exterior y éste se procede a retirar, finalmente es trasladado el anillo a la mesa giratoria.



Figura N°4.7 Probetas de retracción restringida en ambiente de prueba

4.4 Ambiente de prueba

Las probetas cúbicas de compresión deben ser mantenidas sumergidas en agua tranquila y saturada con cal a una temperatura de $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$. Tanto las probetas de retracción libre como de retracción restringida luego de su desmolde son llevada a la cámara seca la cual se mantiene en condiciones de $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y $50 \pm 4\%$ de humedad relativa en donde se lleva a cabo su secado.



Figura N°4.8 Cámara Seca

4.5 Mediciones

Todos los ensayos de medición terminan a los 28 días, tomando como día cero el día en que se preparó el hormigón, por lo tanto todas las probetas se desmoldaron a la edad de un día.

4.5.1 Resistencia a compresión

Las probetas deben retirarse del curado inmediatamente antes de ensayarlas, protegiéndolas con arpillera mojada hasta el momento en que deban ser colocadas en la máquina de ensaye, las mediciones se harán los días 3, 7 y 28 después de iniciado el secado.

4.5.2 Retracción libre

Luego de desmoldar las probetas y marcarlas se deben medir usando el comparador, para esto se debe medir la barra patrón y anotar el valor en mm, después de esto se miden las probetas respectivas. Este será el día uno de cada probeta, las mediciones usando el comparador serán a 4, 7, 14 y 28 días después de iniciado el secado.



Figura N°4.9 Instrumento utilizado para medir retracción libre

4.5.3 Retracción restringida

Las probetas serán inspeccionadas visualmente, como mínimo cada 3 días esta inspección se debe hacer con una buena iluminación y con una lupa, además se utilizará una regla de anchura de grietas; una vez aparecida una fisura se debe anotar la fecha, la longitud y el ancho; debe ser medida diariamente esta fisura hasta que termine el ensayo.



Figura N°4.10 Regla utilizada para medir fisuras



Figura N°4.11 Fisura en probeta de retracción restringida

CAPITULO 5

PRESENTACION DE RESULTADOS

5.1 Propiedades físicas de cementos

5.1.1 Peso específico relativo

Según el método de ensayo explicado en 3.5.1.1 se presentan los siguientes resultados que corresponden al peso específico relativo de los cementos utilizados en la investigación.

5.1.1.1 Cemento CPN

En la Tabla N°5.1 se presentan los resultados del ensayo de peso específico relativo para el cemento CPN.

Tabla N°5.1 Peso específico relativo de cemento CPN

PESO ESPECÍFICO RELATIVO							
Cemento	N°de matraz	t ₁ °C	m (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	t ₂ °C	Peso específico relativo (g/ml)
CPN	42	19,8	64,0	0,0	20,1	19,8	3,18
	8	19,8	64,0	0,0	20,1	19,8	3,18
Promedio							3,18

5.1.1.2 Cemento CPPA

En la Tabla N°5.2 se presentan los resultados del ensayo de peso específico relativo para el cemento CPPA.

Tabla N°5.2 Peso específico relativo de cemento CPPA

PESO ESPECÍFICO RELATIVO							
Cemento	N°de matraz	t ₁ °C	m (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	t ₂ °C	Peso específico relativo (g/ml)
CPPA	7	19,9	64,0	0,0	21,0	19,8	3,05
	42	19,9	64,0	0,0	21,0	19,8	3,05
Promedio							3,05

5.1.1.3 Cemento CPPB

En la Tabla N°5.3 se presentan los resultados del ensayo de peso específico relativo para el cemento CPPB.

Tabla N°5.3 Peso específico relativo de cemento CPPB

PESO ESPECÍFICO RELATIVO							
Cemento	N°de matraz	t ₁ °C	m (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	t ₂ °C	Peso específico relativo (g/ml)
CPPB	43	19,8	64,0	0,0	21,7	19,8	2,95
	8	19,8	64,0	0,0	21,7	19,8	2,95
Promedio							2,95

5.1.1.4 Cemento CPPC

En la Tabla N°5.4 se presentan los resultados del ensayo de peso específico relativo para el cemento CPPC.

Tabla N°5.4 Peso específico relativo de cemento CPPC

PESO ESPECÍFICO RELATIVO							
Cemento	N°de matraz	t ₁ °C	m (g)	V ₁ (ml)	V ₂ (ml)	t ₂ °C	Peso específico relativo (g/ml)
CPPC	45	20,0	64,0	0,0	22,0	20,1	2,91
	7	20,0	64,0	0,0	22,0	20,1	2,91
Promedio							2,91

5.1.2 Superficie específica (Método Blaine)

Según el método de ensayo explicado en 3.5.1.2 se presentan los siguientes resultados que corresponden a la superficie específica de los cementos utilizados en la investigación.

En la Tabla N°5.5 se presentan los resultados del ensayo de superficie específica para los cementos utilizados en esta investigación.

Tabla N°5.5 Superficie específica de los cementos utilizados

Superficie específica	
Cemento	(cm²/g)
CPN	2800
CPPA	3500
CPPB	3700
CPPC	4500

5.1.3 Agua de consistencia normal

Según el método de ensayo explicado en 3.5.1.3 se presentan los siguientes resultados que corresponden al agua de consistencia normal de los cementos utilizados en la investigación.

En la Tabla N°5.6 se presentan los resultados del ensayo de agua de consistencia normal para los cuatro cementos utilizados en la investigación.

Tabla N°5.6 Agua de consistencia normal de todos los cementos utilizados

Agua de consistencia normal			
Cemento	m (g)	agua consistencia normal	
		(ml)	(%)
CPN	500	123	24,50
CPPA	500	129	25,75
CPPB	500	132	26,50
CPPC	500	156	31,25

5.1.4 Tiempo de fraguado

Según el método de ensayo explicado en 3.5.1.4 se presentan los siguientes resultados que corresponden al tiempo de fraguado de los cementos utilizados en la investigación.

En la Tabla N°5.7 se presentan los resultados del ensayo de tiempo de fraguado para los cuatro cementos utilizados en la investigación.

Tabla N°5.7 Tiempos de fraguado de todos los cementos utilizados

Tiempos de fraguado						
Cemento	N° molde	t ₁ (h:min)	t ₂ (h:min)	t ₃ (h:min)	Tiempo de fraguado	
					inicial (h:min)	final (h:min)
CPN	L	11:20	13:40	14:30	2:20	3:10
CPPA	N	11:40	13:40	14:50	2:00	3:10
CPPB	Z	11:50	14:10	14:50	2:20	3:00
CPPC	M	11:30	14:10	15:10	2:40	3:40

5.2 Propiedades químicas de cementos

5.2.1 Pérdida por calcinación (PXC)

Según el método de ensayo explicado en 3.5.2.1 se presentan los siguientes resultados que corresponden al tiempo de fraguado de los cementos utilizados en la investigación.

En la Tabla N°5.8 se presentan los resultados del ensayo de pérdida por calcinación para los cuatro cementos.

Tabla N°5.8 Pérdida por calcinación de todos los cementos utilizados

Pérdida por calcinación	
Cemento	PXC %
CPN	0,8
CPPA	1,3
CPPB	1,6
CPPC	4,1

5.2.2 Trióxido de azufre

Según el método de ensayo explicado en 3.5.2.2 se presentan los siguientes resultados que corresponden al tiempo de fraguado de los cementos utilizados en la investigación.

En la Tabla N°5.9 se presentan los resultados del ensayo de pérdida por calcinación para los cuatro cementos.

Tabla N°5.9 Trióxido de azufre de todos los cementos utilizados

Contenido de Trióxido de azufre	
Cemento	SO₃ %
CPN	1,61
CPPA	1,30
CPPB	1,13
CPPC	1,72

5.2.3 Residuo insoluble

Según el método de ensayo explicado en 3.5.2.3 se presentan los siguientes resultados que corresponden al tiempo de fraguado de los cementos utilizados en la investigación.

En la Tabla N°5.10 se presentan los resultados del ensayo de residuo insoluble para los cuatro cementos.

Tabla N°5.10 Residuo insoluble de todos los cementos utilizados

Cemento	Residuo Insoluble %
CPN	0,24
CPPA	13,73
CPPB	18,69
CPPC	21,89

5.3 Comportamiento de los hormigones

5.3.1 Resistencia a compresión

Según el método de ensayo explicado en 3.6.1 se presentan los siguientes resultados que corresponden a la resistencia a compresión de los hormigones estudiados en la investigación.

5.3.1.1 Hormigón CPN

En la Tabla N°5.11 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a compresión para el hormigón confeccionado con el cemento CPN a la edad de 3,7 y 28 días, con una relación agua/cemento de 0,45.

Tabla N°5.11 Resistencia a compresión de hormigón CPN con relación agua/cemento de 0,45

Relación A/C 0,45	Resistencia a Compresión									
	día	3			7			28		
Tipo Cemento	Probeta N°	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)
CPN	1	46200	227	203	89200	228	391	156600	227	689
CPN	2	48200	227	213	91900	227	406	153900	227	677
	Prom.	47200	227	208	90550	227	398	155250	227	683

En la Tabla N°5.12 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a compresión para el hormigón confeccionado con el cemento CPN a la edad de 3,7 y 28 días, con una relación agua/cemento de 0,55.

Tabla N°5.12 Resistencia a compresión de hormigón CPN con relación agua/cemento de 0,55

Relación A/C 0,55	Resistencia a Compresión									
	día	3			7			28		
Tipo Cemento	Probeta N°	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)
CPN	1	31000	228	136	77500	227	342	111700	227	492
CPN	2	32400	227	143	79400	227	351	111400	227	490
	Prom.	31700	228	138	78450	227	345	111550	227	491

5.3.1.2 Hormigón CPPA

En la Tabla N°5.13 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a compresión para el hormigón confeccionado con el cemento CPPA a la edad de 3,7 y 28 días, con una relación agua/cemento de 0,45.

Tabla N°5.13 Resistencia a compresión de hormigón CPPA con relación agua/cemento de 0,45

Relación A/C 0,45	Resistencia a Compresión									
	día	3			7			28		
Tipo Cemento	Probeta N°	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)
CPPA	1	60600	228	266	90800	228	398	136400	227	600
CPPA	2	60000	227	264	89400	228	392	139700	227	615
	Prom.	60300	228	265	90100	228	395	138050	227	607

En la Tabla N°5.14 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a compresión para el hormigón confeccionado con el cemento CPPA a la edad de 3,7 y 28 días, con una relación agua/cemento de 0,55.

Tabla N°5.14 Resistencia a compresión de hormigón CPPA con relación agua/cemento de 0,55

Relación A/C 0,55	Resistencia a Compresión									
	día	3			7			28		
Tipo Cemento	Probeta N°	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)
CPPA	1	35200	226	156	57200	226	253	102800	227	452
CPPA	2	33200	227	147	58000	227	256	101400	228	445
	Prom.	33133	227	146	64233	226	284	105300	228	463

5.3.1.3 Hormigón CPPB

En la Tabla N°5.15 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a compresión para el hormigón confeccionado con el cemento CPPB a la edad de 3,7 y 28 días, con una relación agua/cemento de 0,45.

Tabla N°5.15 Resistencia a compresión de hormigón CPPB con relación agua/cemento de 0,45

Relación A/C 0,45	Resistencia a Compresión									
	día	3			7			28		
Tipo Cemento	Probeta N°	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)
CPPB	1	65400	226	290	91700	226	406	127400	225	566
CPPB	2	68100	226	302	93100	226	412	127900	225	568
	Prom.	66750	226	296	92400	226	409	127650	225	567

En la Tabla N°5.16 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a compresión para el hormigón confeccionado con el cemento CPPB a la edad de 3,7 y 28 días, con una relación agua/cemento de 0,55.

Tabla N°5.16 Resistencia a compresión de hormigón CPPB con relación agua/cemento de 0,55

Relación A/C 0,55	Resistencia a Compresión									
	día	3			7			28		
Tipo Cemento	Probeta N°	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)
CPPB	1	37800	225	168	58200	225	259	98600	225	438
CPPB	2	41300	227	182	60200	225	268	96800	224	432
	Prom.	36700	227	162	65300	226	289	102367	226	454

5.3.1.4 Hormigón CPPC

En la Tabla N°5.17 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a compresión para el hormigón confeccionado con el cemento CPPC a la edad de 3,7 y 28 días, con una relación agua/cemento de 0,45.

Tabla N°5.17 Resistencia a compresión de hormigón CPPC con relación agua/cemento de 0,45

Relación A/C 0,45	Resistencia a Compresión									
	día	3			7			28		
Tipo Cemento	Probeta N°	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)
CPPC	1	65000	227	286	92600	227	409	134500	227	592
CPPC	2	63500	227	280	93700	227	412	138600	227	610
	Prom.	64250	227	283	93150	227	411	136550	227	601

En la Tabla N°5.18 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a compresión para el hormigón confeccionado con el cemento CPPC a la edad de 3,7 y 28 días, con una relación agua/cemento de 0,55.

Tabla N°5.18 Resistencia a compresión de hormigón CPPC con relación agua/cemento de 0,55

Relación A/C 0,55	Resistencia a Compresión									
	día	3			7			28		
Tipo Cemento	Probeta N°	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)	Carga (Kgf)	Área (cm ²)	R (Kgf/cm ²)
CPPC	1	48200	227	212	68100	228	299	97800	228	429
CPPC	2	47400	228	208	69200	227	306	99600	228	437
	Prom.	42200	228	185	71600	227	315	103033	228	452

5.3.2 Retracción libre

Según el método de ensayo explicado en 3.6.2 se presentan los siguientes resultados que corresponden a la retracción libre de los hormigones estudiados en la investigación.

5.3.2.1 Hormigón CPN

En la Tabla N°5.19 se presentan los resultados del ensayo de retracción libre para el hormigón confeccionado con el cemento CPN hasta los 28 días de edad, con una relación agua/cemento de 0,45.

Tabla N°5.19 Retracción libre para hormigón CPN con relación agua/cemento de 0,45 (lecturas comparador)

	día	0*	3	7	14	28
Tipo Cemento	Fecha	24-oct	27-oct	31-oct	07-nov	21-nov
CPN	Probeta 1	7,045	7,033	7,004	6,970	6,919
CPN	Probeta 2	7,158	7,141	7,150	7,091	7,041
	Promedio	7,102	7,087	7,077	7,031	6,980
	Lectura Patrón	6,049	6,052	6,053	6,050	6,044

*Día 0: Edad probeta 24 horas.

En la Tabla N°5.20 se presentan los resultados del ensayo de retracción libre para el hormigón confeccionado con el cemento CPN hasta los 28 días de edad, con una relación agua/cemento de 0,55.

Tabla N°5.20 Retracción libre para hormigón CPN con relación agua/cemento de 0,55 (lecturas comparador)

	día	0*	3	7	14	28
Tipo Cemento	Fecha	28-oct	31-oct	04-nov	11-nov	25-nov
CPN	Probeta 1	7,084	7,067	7,041	7,002	6,953
CPN	Probeta 2	7,727	7,733	7,700	7,671	7,610
	Promedio	7,406	7,400	7,371	7,337	7,282
	Lectura Patrón	6,051	6,052	6,048	6,048	6,042

*Día 0: Edad probeta 24 horas.

5.3.2.2 Hormigón CPPA

En la Tabla N°5.21 se presentan los resultados del ensayo de retracción libre para el hormigón confeccionado con el cemento CPPA hasta los 28 días de edad, con una relación agua/cemento de 0,45.

Tabla N°5.21 Retracción libre para hormigón CPPA con relación agua/cemento de 0,45 (lecturas comparador)

	día	0*	3	7	14	28
Tipo Cemento	Fecha	10-dic	13-dic	17-dic	24-dic	07-ene
CPPA	Probeta 1	6,163	6,148	6,120	6,076	6,022
CPPA	Probeta 2	8,075	8,115	8,088	8,044	7,998
	Promedio	7,119	7,132	7,104	7,060	7,010
	Lectura Patrón	6,177	6,175	6,175	6,172	6,179

*Día 0: Edad probeta 24 horas.

En la Tabla N°5.22 se presentan los resultados del ensayo de retracción libre para el hormigón confeccionado con el cemento CPPA hasta los 28 días de edad, con una relación agua/cemento de 0,55.

Tabla N°5.22 Retracción libre para hormigón CPPA con relación agua/cemento de 0,55 (lecturas comparador)

	día	0*	3	7	14	28
Tipo Cemento	Fecha	17-dic	20-dic	24-dic	31-dic	14-ene
CPPA	Probeta 1	3,971	3,973	3,940	3,915	3,896
CPPA	Probeta 2	0,911	0,906	0,885	0,849	0,827
	Promedio	2,441	2,440	2,413	2,382	2,3615
	Lectura Patrón	6,172	6,180	6,173	6,174	6,171

*Día 0: Edad probeta 24 horas.

5.3.2.3 Hormigón CPPB

En la Tabla N°5.23 se presentan los resultados del ensayo de retracción libre para el hormigón confeccionado con el cemento CPPB hasta los 28 días de edad, con una relación agua/cemento de 0,45.

Tabla N°5.23 Retracción libre para hormigón CPPB con relación agua/cemento de 0,45 (lecturas comparador)

	día	0*	3	7	14	28
Tipo Cemento	Fecha	12-dic	15-dic	19-dic	26-dic	09-ene
CPPB	Probeta 1	5,804	5,793	5,770	5,730	5,701
CPPB	Probeta 2	5,877	5,868	5,826	5,790	5,755
	Promedio	5,841	5,831	5,798	5,760	5,728
	Lectura Patrón	6,175	6,175	6,172	6,172	6,207

*Día 0: Edad probeta 24 horas.

En la Tabla N°5.24 se presentan los resultados del ensayo de retracción libre para el hormigón confeccionado con el cemento CPPB hasta los 28 días de edad, con una relación agua/cemento de 0,55.

Tabla N°5.24 Retracción libre para hormigón CPPB con relación agua/cemento de 0,55 (lecturas comparador)

	día	0*	3	7	14	28
Tipo Cemento	Fecha	19-dic	22-dic	26-dic	02-ene	16-ene
CPPB	Probeta 1	3,300	3,291	3,274	3,216	1,072
CPPB	Probeta 2	2,643	2,599	2,618	2,560	0,413
	Promedio	2,972	2,945	2,946	2,888	0,743
	Lectura Patrón	6,172	6,175	6,172	6,171	4,054

*Día 0: Edad probeta 24 horas.

5.3.2.4 Hormigón CPPC

En la Tabla N°5.25 se presentan los resultados del ensayo de retracción libre para el hormigón confeccionado con el cemento CPPC hasta los 28 días de edad, con una relación agua/cemento de 0,45.

Tabla N°5.25 Retracción libre para hormigón CPPC con relación agua/cemento de 0,45 (lecturas comparador)

	día	0*	3	7	14	28
Tipo Cemento	Fecha	04-nov	07-nov	11-nov	18-nov	02-dic
CPPC	Probeta 1	5,822	5,823	5,774	5,726	5,797
CPPC	Probeta 2	4,301	4,280	4,234	4,179	4,272
	Promedio	5,062	5,052	5,004	4,953	5,035
	Lectura Patrón	6,047	6,050	6,047	6,047	6,186

*Día 0: Edad probeta 24 horas.

En la Tabla N°5.26 se presentan los resultados del ensayo de retracción libre para el hormigón confeccionado con el cemento CPPC hasta los 28 días de edad, con una relación agua/cemento de 0,55.

Tabla N°5.26 Retracción libre para hormigón CPPC con relación agua/cemento de 0,55 (lecturas comparador)

	día	0*	3	7	14	28
Tipo Cemento	Fecha	11-nov	14-nov	18-nov	25-nov	09-nov
CPPC	Probeta 1	6,869	6,848	6,823	6,751	6,844
CPPC	Probeta 2	6,096	6,082	6,049	5,987	6,065
	Promedio	6,483	6,465	6,436	6,369	6,455
	Lectura Patrón	6,047	6,047	6,047	6,041	6,179

*Día 0: Edad probeta 24 horas.

5.3.3 Retracción restringida

Según el método de ensayo explicado en 3.6.3 se presentan los siguientes resultados que corresponden a la inspección visual de las probetas de retracción restringida de los hormigones estudiados en la investigación. El registro empieza una vez detectada la fisura.

5.3.3.1 Hormigón CPN

En la Tabla N°5.27 y Tabla N°5.28 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 1 de la serie CPN / 0,45 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.27 Control de fisura N°1 en anillo 1 para hormigón CPN con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPN / 0,45	Fecha	07-nov	08-nov	10-nov	11-nov	13-nov	14-nov
Probeta	1	Edad (días)	15	16	18	19	21	22
Fecha Confección	23-oct	Ancho (mm)	0,05	0,10	0,1	0,1	0,15	0,175
Control Fisura (1)		Largo(cm)	9	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	07-nov	Fecha	17-nov	18-nov	19-nov	20-nov		
Edad (días)	15	Edad (días)	25	26	27	28		
Ubicación	0°	Ancho (mm)	0,2	0,2	0,25	0,25		
Ancho (mm)	0,05	Largo(cm)	15	15	15	15		
Largo(cm)	9							

Tabla N°5.28 Control de fisura N°2 en anillo 1 para hormigón CPN con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPN / 0,45	Fecha	07-nov	08-nov	10-nov	11-nov	13-nov	14-nov
Probeta	1	Edad (días)	15	16	18	19	21	22
Fecha Confección	23-oct	Ancho (mm)	0,05	0,05	0,1	0,1	0,1	0,15
Control Fisura (2)		Largo(cm)	9,5	10	10	10	15	15
Fecha Aparición	07-nov	Fecha	17-nov	18-nov	19-nov	20-nov		
Edad (días)	15	Edad (días)	25	26	27	28		
Ubicación	170°	Ancho (mm)	0,15	0,15	0,15	0,15		
Ancho (mm)	0,05	Largo(cm)	15	15	15	15		
Largo(cm)	9,5							

En la Tabla N°5.29 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 2 de la serie CPN / 0,45 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.29 Control de fisura en anillo 2 para hormigón CPN con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPN / 0,45	Fecha	06-nov	07-nov	08-nov	10-nov	11-nov	13-nov
Probeta	2	Edad (días)	14	15	16	18	19	21
Fecha Confección	23-oct	Ancho (mm)	0,075	0,1	0,2	0,25	0,275	0,3
Control Fisura		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	06-nov	Fecha	14-nov	17-nov	18-nov	19-nov	20-nov	
Edad (días)	14	Edad (días)	22	25	26	27	28	
Ubicación	90°	Ancho (mm)	0,3	0,35	0,3	0,4	0,4	
Ancho (mm)	0,075	Largo(cm)	15	15	15	15	15	
Largo(cm)	15							

En la Tabla N°5.30 y Tabla N°5.31 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 1 de la serie CPN / 0,55 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.30 Control de fisura N°1 en anillo 1 para hormigón CPN con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPN / 0,55	Fecha	10-nov	11-nov	13-nov	14-nov	17-nov	18-nov
Probeta	1	Edad (días)	14	15	17	18	21	22
Fecha Confección	27-oct	Ancho (mm)	0,05	0,1	0,175	0,175	0,175	0,2
Control Fisura (1)		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	10-nov	Fecha	19-nov	20-nov	21-nov	24-nov		
Edad (días)	14	Edad (días)	23	24	25	28		
Ubicación	10°	Ancho (mm)	0,2	0,2	0,2	0,2		
Ancho (mm)	0,05	Largo(cm)	15	15	15	15		
Largo(cm)	15							

Tabla N°5.31 Control de fisura N°2 en anillo 1 para hormigón CPN con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPN / 0,55	Fecha	10-nov	11-nov	13-nov	14-nov	17-nov	18-nov
Probeta	1	Edad (días)	14	15	17	18	21	22
Fecha Confección	27-oct	Ancho (mm)	0,05	0,05	0,1	0,1	0,125	0,15
Control Fisura (2)		Largo(cm)	8	8	15	15	15	15
Fecha Aparición	10-nov	Fecha	19-nov	20-nov	21-nov	24-nov		
Edad (días)	14	Edad (días)	23	24	25	28		
Ubicación	150°	Ancho (mm)	0,15	0,15	0,15	0,15		
Ancho (mm)	0,05	Largo(cm)	15	15	15	15		
Largo(cm)	8							

En la Tabla N°5.32 y Tabla N°5.33 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 2 de la serie CPN / 0,55 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.32 Control de fisura N°1 en anillo 2 para hormigón CPN con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPN / 0,55	Fecha	13-nov	14-nov	17-nov	18-nov	19-nov	20-nov
Probeta	2	Edad (días)	17	18	21	22	23	24
Fecha Confección	27-oct	Ancho (mm)	0,1	0,1	0,1	0,15	0,2	0,2
Control Fisura (1)		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	13-nov	Fecha	21-nov	24-nov				
Edad (días)	17	Edad (días)	25	28				
Ubicación	90°	Ancho (mm)	0,2	0,2				
Ancho (mm)	0,1	Largo(cm)	15	15				
Largo(cm)	15							

Tabla N°5.33 Control de fisura N°2 en anillo 2 para hormigón CPN con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPN / 0,55	Fecha	14-nov	17-nov	18-nov	19-nov	20-nov	21-nov
Probeta	2	Edad (días)	18	21	22	23	24	25
Fecha Confección	27-oct	Ancho (mm)	0,075	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
Control Fisura (2)		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	14-nov	Fecha	24-nov					
Edad (días)	18	Edad (días)	28					
Ubicación	210°	Ancho (mm)	0,1					
Ancho (mm)	0,075	Largo(cm)	15					
Largo(cm)	15							

5.3.3.2 Hormigón CPPA

En la Tabla N°5.34 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 1 de la serie CPPA / 0,45 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.34 Control de fisura en anillo 1 para hormigón CPPA con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPA / 0,45	Fecha	24-dic	27-dic	29-dic	31-dic	03-ene	05-ene
Probeta	1	Edad (días)	15	18	20	22	25	27
Fecha Confección	09-dic	Ancho (mm)	0,15	0,24	0,3	0,35	0,4	0,4
Control Fisura		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	24-dic	Fecha	06-ene					
Edad (días)	15	Edad (días)	28					
Ubicación	180°	Ancho (mm)	0,4					
Ancho (mm)	0,15	Largo(cm)	15					
Largo(cm)	15							

En la Tabla N°5.35 y Tabla N°5.36 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 2 de la serie CPPA / 0,45 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.35 Control de fisura N°1 en anillo 2 para hormigón CPPA con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPA / 0,45	Fecha	24-dic	27-dic	29-dic	31-dic	03-ene	05-ene
Probeta	2	Edad (días)	15	18	20	22	25	27
Fecha Confección	09-dic	Ancho (mm)	0,075	0,1	0,15	0,15	0,15	0,15
Control Fisura (1)		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	24-dic	Fecha	06-ene					
Edad (días)	15	Edad (días)	28					
Ubicación	45°	Ancho (mm)	0,15					
Ancho (mm)	0,075	Largo(cm)	15					
Largo(cm)	15							

Tabla N°5.36 Control de fisura N°2 en anillo 2 para hormigón CPPA con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual	
Tipo Cemento/ A/C	CPPA / 0,45
Probeta	2
Fecha Confección	09-dic
Control Fisura (2)	
Fecha Aparición	24-dic
Edad (días)	15
Ubicación	270°
Ancho (mm)	0,1
Largo(cm)	15

Inspección Visual						
Fecha	24-dic	27-dic	29-dic	31-dic	03-ene	05-ene
Edad (días)	15	18	20	22	25	27
Ancho (mm)	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2
Largo(cm)	15	15	15	15	15	15

Fecha	06-ene					
Edad (días)	28					
Ancho (mm)	0,2					
Largo(cm)	15					

En la Tabla N°5.37 y Tabla N°5.38 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 1 de la serie CPPA / 0,55 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.37 Control de fisura N°1 en anillo 1 para hormigón CPPA con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual	
Tipo Cemento/ A/C	CPPA / 0,55
Probeta	1
Fecha Confección	16-dic
Control Fisura (1)	
Fecha Aparición	05-ene
Edad (días)	20
Ubicación	0°
Ancho (mm)	0,05
Largo(cm)	4

Inspección Visual						
Fecha	05-ene	06-ene	08-ene	10-ene	12-ene	13-ene
Edad (días)	20	21	23	25	27	28
Ancho (mm)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Largo(cm)	4	15	15	15	15	15

Fecha						
Edad (días)						
Ancho (mm)						
Largo(cm)						

Tabla N°5.38 Control de fisura N°2 en anillo 1 para hormigón CPPA con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual	
Tipo Cemento/ A/C	CPPA / 0,55
Probeta	1
Fecha Confección	16-dic
Control Fisura (2)	
Fecha Aparición	05-ene
Edad (días)	20
Ubicación	180°
Ancho (mm)	0,05
Largo(cm)	5

Fecha	05-ene	06-ene	08-ene	10-ene	12-ene	13-ene
Edad (días)	20	21	23	25	27	28
Ancho (mm)	0,05	0,1	0,15	0,25	0,3	0,3
Largo(cm)	5	15	15	15	15	15

Fecha						
Edad (días)						
Ancho (mm)						
Largo(cm)						

En la Tabla N°5.39 y Tabla N°5.40 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 2 de la serie CPPA / 0,55 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.39 Control de fisura N°1 en anillo 2 para hormigón CPPA con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual	
Tipo Cemento/ A/C	CPPA / 0,55
Probeta	2
Fecha Confección	16-dic
Control Fisura (1)	
Fecha Aparición	31-dic
Edad (días)	15
Ubicación	90°
Ancho (mm)	0,05
Largo(cm)	2

Inspección Visual						
Fecha	31-dic	03-ene	05-ene	06-ene	08-ene	10-ene
Edad (días)	15	18	20	21	23	25
Ancho (mm)	0,05	0,05	0,05	0,075	0,1	0,15
Largo(cm)	2	4	5	15	15	15

Fecha	12-ene	13-ene				
Edad (días)	27	28				
Ancho (mm)	0,15	0,2				
Largo(cm)	15	15				

Tabla N°5.40 Control de fisura N°2 en anillo 2 para hormigón CPPA con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual	
Tipo Cemento/ A/C	CPPA / 0,55
Probeta	2
Fecha Confección	16-dic
Control Fisura (2)	
Fecha Aparición	05-ene
Edad (días)	20
Ubicación	270°
Ancho (mm)	0,05
Largo(cm)	3

Inspección Visual						
Fecha	05-ene	06-ene	08-ene	10-ene	12-ene	13-ene
Edad (días)	20	21	23	25	27	28
Ancho (mm)	0,05	0,05	0,075	0,1	0,1	0,1
Largo(cm)	3	8	10	15	15	15

Fecha						
Edad (días)						
Ancho (mm)						
Largo(cm)						

5.3.3.3 Hormigón CPPB

En la Tabla N°5.41 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 1 de la serie CPPB / 0,45 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.41 Control de fisura en anillo 1 para hormigón CPPB con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPB / 0,45	Fecha	24-dic	27-dic	29-dic	31-dic	03-ene	05-ene
Probeta	1	Edad (días)	13	16	18	20	23	25
Fecha Confección	11-dic	Ancho (mm)	0,2	0,3	0,35	0,4	0,4	0,4
Control Fisura		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	24-dic	Fecha	06-ene	08-ene				
Edad (días)	13	Edad (días)	26	28				
Ubicación	315°	Ancho (mm)	0,45	0,55				
Ancho (mm)	0,2	Largo(cm)	15	15				
Largo(cm)	15							

En la Tabla N°5.42 y Tabla N°5.43 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 2 de la serie CPPB / 0,45 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.42 Control de fisura N°1 en anillo 2 para hormigón CPPB con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPB / 0,45	Fecha	24-dic	27-dic	29-dic	31-dic	03-ene	05-ene
Probeta	2	Edad (días)	13	16	18	20	23	25
Fecha Confección	11-dic	Ancho (mm)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,075
Control Fisura (1)		Largo(cm)	10	10	10	10	10	15
Fecha Aparición	24-dic	Fecha	06-ene	08-ene				
Edad (días)	13	Edad (días)	26	28				
Ubicación	90°	Ancho (mm)	0,075	0,1				
Ancho (mm)	0,05	Largo(cm)	15	15				
Largo(cm)	10							

Tabla N°5.43 Control de fisura N°2 en anillo 2 para hormigón CPPB con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPB / 0,45	Fecha	24-dic	27-dic	29-dic	31-dic	03-ene	05-ene
Probeta	2	Edad (días)	13	16	18	20	23	25
Fecha Confección	11-dic	Ancho (mm)	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,25
Control Fisura (2)		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	24-dic	Fecha	06-ene	08-ene				
Edad (días)	13	Edad (días)	26	28				
Ubicación	285°	Ancho (mm)	0,3	0,3				
Ancho (mm)	0,05	Largo(cm)	15	15				
Largo(cm)	15							

En la Tabla N°5.44 y Tabla N°5.45 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 1 de la serie CPPB / 0,55 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.44 Control de fisura N°1 en anillo 1 para hormigón CPPB con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPB / 0,55	Fecha	31-dic	03-ene	05-ene	06-ene	08-ene	10-ene
Probeta	1	Edad (días)	13	16	18	19	21	23
Fecha Confección	18-dic	Ancho (mm)	0,05	0,05	0,05	0,075	0,15	0,15
Control Fisura (1)		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	31-dic	Fecha	12-ene	15-ene				
Edad (días)	13	Edad (días)	25	28				
Ubicación	90°	Ancho (mm)	0,2	0,2				
Ancho (mm)	0,05	Largo(cm)	15	15				
Largo(cm)	15							

Tabla N°5.45 Control de fisura N°2 en anillo 1 para hormigón CPPB con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPB / 0,55	Fecha	05-ene	06-ene	08-ene	10-ene	12-ene	15-ene
Probeta	1	Edad (días)	18	19	21	23	25	28
Fecha Confección	18-dic	Ancho (mm)	0,05	0,075	0,1	0,15	0,2	0,2
Control Fisura (2)		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	05-ene	Fecha						
Edad (días)	18	Edad (días)						
Ubicación	270°	Ancho (mm)						
Ancho (mm)	0,05	Largo(cm)						
Largo(cm)	15							

En la Tabla N°5.46 y Tabla N°5.47 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 2 de la serie CPPB / 0,55 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.46 Control de fisura N°1 en anillo 2 para hormigón CPPB con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPB / 0,55	Fecha	05-ene	06-ene	08-ene	10-ene	12-ene	15-ene
Probeta	2	Edad (días)	18	19	21	23	25	28
Fecha Confección	18-dic	Ancho (mm)	0,05	0,05	0,075	0,1	0,1	0,15
Control Fisura (1)		Largo(cm)	10	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	05-ene	Fecha						
Edad (días)	18	Edad (días)						
Ubicación	90°	Ancho (mm)						
Ancho (mm)	0,05	Largo(cm)						
Largo(cm)	10							

Tabla N°5.47 Control de fisura N°2 en anillo 2 para hormigón CPPB con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPB / 0,55	Fecha	08-ene	10-ene	12-ene	15-ene		
Probeta	2	Edad (días)	21	23	25	28		
Fecha Confección	18-dic	Ancho (mm)	0,05	0,05	0,1	0,1		
Control Fisura (2)		Largo(cm)	15	15	15	15		
Fecha Aparición	08-ene	Fecha						
Edad (días)	21	Edad (días)						
Ubicación	280°	Ancho (mm)						
Ancho (mm)	0,05	Largo(cm)						
Largo(cm)	15							

5.3.3.4 Hormigón CPPC

En la Tabla N°5.48 y Tabla N°5.49 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 1 de la serie CPPC / 0,45 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.48 Control de fisura N°1 en anillo 1 para hormigón CPPC con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPC / 0,45	Fecha	11-nov	13-nov	14-nov	17-nov	18-nov	19-nov
Probeta	1	Edad (días)	8	10	11	14	15	16
Fecha Confección	03-nov	Ancho (mm)	0,1	0,2	0,2	0,25	0,3	0,3
Control Fisura (1)		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	11-nov	Fecha	20-nov	21-nov	24-nov	26-nov	28-nov	01-dic
Edad (días)	8	Edad (días)	17	18	21	23	25	28
Ubicación	270°	Ancho (mm)	0,3	0,35	0,35	0,35	0,35	0,45
Ancho (mm)	0,1	Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Largo(cm)	15							

Tabla N°5.49 Control de fisura N°2 en anillo 1 para hormigón CPPC con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPC / 0,45	Fecha	11-nov	13-nov	14-nov	17-nov	18-nov	19-nov
Probeta	1	Edad (días)	8	10	11	14	15	16
Fecha Confección	03-nov	Ancho (mm)	0,05	0,15	0,15	0,175	0,175	0,2
Control Fisura (2)		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	11-nov	Fecha	20-nov	21-nov	24-nov	26-nov	28-nov	01-dic
Edad (días)	8	Edad (días)	17	18	21	23	25	28
Ubicación	100°	Ancho (mm)	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,25
Ancho (mm)	0,05	Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Largo(cm)	15							

En la Tabla N°5.50 y Tabla N°5.51 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 2 de la serie CPPC / 0,45 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.50 Control de fisura N°1 en anillo 2 para hormigón CPPC con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPC / 0,45	Fecha	11-nov	13-nov	14-nov	17-nov	18-nov	19-nov
Probeta	2	Edad (días)	8	10	11	14	15	16
Fecha Confección	03-nov	Ancho (mm)	0,05	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
Control Fisura (1)		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	11-nov	Fecha	20-nov	21-nov	24-nov	26-nov	28-nov	01-dic
Edad (días)	8	Edad (días)	17	18	21	23	25	28
Ubicación	0°	Ancho (mm)	0,35	0,35	0,4	0,45	0,45	0,5
Ancho (mm)	0,05	Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Largo(cm)	15							

Tabla N°5.51 Control de fisura N°2 en anillo 2 para hormigón CPPC con relación agua/cemento 0,45

Inspección Visual		Inspección Visual						
Tipo Cemento/ A/C	CPPC / 0,45	Fecha	11-nov	13-nov	14-nov	17-nov	18-nov	19-nov
Probeta	2	Edad (días)	8	10	11	14	15	16
Fecha Confección	03-nov	Ancho (mm)	0,1	0,1	0,15	0,15	0,15	0,15
Control Fisura (2)		Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Fecha Aparición	11-nov	Fecha	20-nov	21-nov	24-nov	26-nov	28-nov	01-dic
Edad (días)	8	Edad (días)	17	18	21	23	25	28
Ubicación	180°	Ancho (mm)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Ancho (mm)	0,1	Largo(cm)	15	15	15	15	15	15
Largo(cm)	15							

En la Tabla N°5.52 y Tabla N°5.53 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 1 de la serie CPPC / 0,55 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.52 Control de fisura N°1 en anillo 1 para hormigón CPPC con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual	
Tipo Cemento/ A/C	CPPC / 0,55
Probeta	1
Fecha Confección	10-nov
Control Fisura (1)	
Fecha Aparición	18-nov
Edad (días)	8
Ubicación	290°
Ancho (mm)	0,05
Largo(cm)	13

Inspección Visual						
Fecha	18-nov	19-nov	20-nov	21-nov	24-nov	26-nov
Edad (días)	8	9	10	11	14	16
Ancho (mm)	0,05	0,05	0,1	0,1	0,15	0,15
Largo(cm)	13	15	15	15	15	15

Fecha	28-nov	01-dic	02-dic	03-dic	05-dic	08-dic
Edad (días)	18	21	22	23	25	28
Ancho (mm)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,2	0,25
Largo(cm)	15	15	15	15	15	15

Tabla N°5.53 Control de fisura N°2 en anillo 1 para hormigón CPPC con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual	
Tipo Cemento/ A/C	CPPC / 0,55
Probeta	1
Fecha Confección	10-nov
Control Fisura (2)	
Fecha Aparición	18-nov
Edad (días)	8
Ubicación	100°
Ancho (mm)	0,075
Largo(cm)	15

Inspección Visual						
Fecha	28-nov	01-dic	02-dic	03-dic	05-dic	08-dic
Edad (días)	18	21	22	23	25	28
Ancho (mm)	0,075	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
Largo(cm)	15	15	15	15	15	15

Fecha	28-nov	01-dic	02-dic	03-dic	05-dic	08-dic
Edad (días)	18	21	22	23	25	28
Ancho (mm)	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Largo(cm)	15	15	15	15	15	15

En la Tabla N°5.54 se presentan los resultados de la inspección visual del ensayo de retracción restringida para el anillo 2 de la serie CPPC / 0,55 desde la aparición de la fisura hasta los 28 días de edad.

Tabla N°5.54 Control de fisura en anillo 2 para hormigón CPPC con relación agua/cemento 0,55

Inspección Visual	
Tipo Cemento/ A/C	CPPC / 0,55
Probeta	2
Fecha Confección	10-nov
Control Fisura	
Fecha Aparición	18-nov
Edad (días)	8
Ubicación	250°
Ancho (mm)	0,075
Largo(cm)	15

Inspección Visual						
Fecha	18-nov	19-nov	20-nov	21-nov	24-nov	26-nov
Edad (días)	8	9	10	11	14	16
Ancho (mm)	0,075	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3
Largo(cm)	15	15	15	15	15	15

Fecha	28-nov	01-dic	02-dic	03-dic	05-dic	08-dic
Edad (días)	18	21	22	23	25	28
Ancho (mm)	0,35	0,4	0,4	0,4	0,45	0,6
Largo(cm)	15	15	15	15	15	15

CAPITULO 6

ANALISIS DE RESULTADOS

6.1 Propiedades físicas de cementos

6.1.1 Peso específico relativo

En la Tabla N°6.1 se presenta un resumen de las Tablas N°5.1, 5.2 5.3 y 5.4 las cuales corresponden al resultado del ensayo del peso específico relativo de cada cemento.

Tabla N°6.1 Resumen de Peso específico relativo

Cemento	Peso específico relativo (g/ml)
CPN	3,18
CPPA	3,05
CPPB	2,95
CPPC	2,91

Con los datos de la Tabla N°6.1 se obtiene el Gráfico N°6.1, en donde se comparan los valores del peso específico relativo de cada cemento.

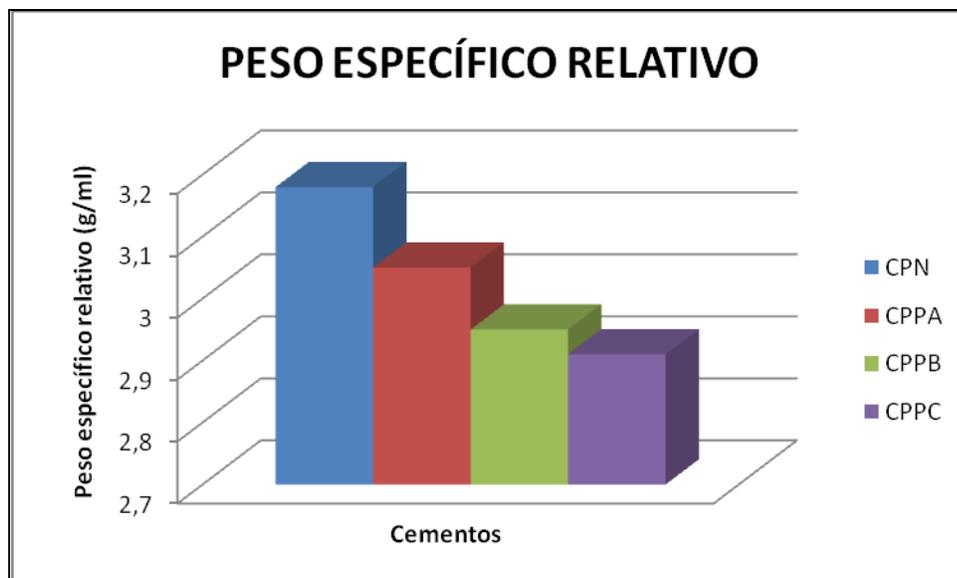


Gráfico N°6.1 Comparación de los pesos específicos relativos de los cementos

6.1.1.1 Análisis

En la Tabla N°6.1 se aprecia que el cemento CPN es el que tiene mayor peso específico relativo, esto se debe a que es un cemento portland puro, en cambio los cementos CPPA, CPPB y CPPC son cementos portland puzolánicos, los cuales al contener adición puzolánica (mineral más liviano que el cemento) tienen un peso específico relativo menor; de esta forma mientras mayor sea el porcentaje de adición puzolánica el peso específico relativo del cemento será menor, lo cual se cumple en este ensayo.

6.1.2 Superficie específica (Método Blaine)

En la Tabla N°6.2 se presenta un resumen de la Tabla N°5.5 la cual corresponde al resultado de finura de los cementos, según el ensayo de superficie específica de cada cemento.

Tabla N°6.2 Superficie específica de los cementos utilizados

Superficie específica	
Cemento	(cm²/g)
CPN	2800
CPPA	3500
CPPB	3700
CPPC	4500

Con los datos de la Tabla N°6.2 se obtiene el Gráfico N°6.2, en donde se comparan los valores de superficie específica de cada cemento.

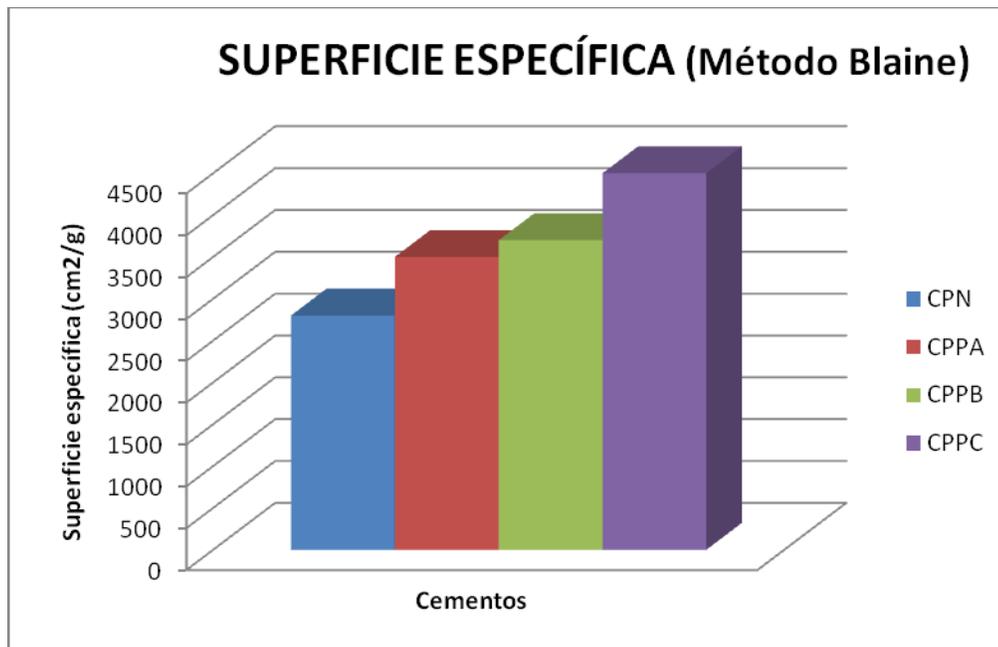


Gráfico N°6.2 Comparación de las superficies específicas de los cementos

6.1.2.1 Análisis

En la Tabla N°6.2 se aprecia que el cemento CPN es el que tiene menor superficie específica y que los cementos con adición puzolánica tienen una mayor superficie específica, esto demuestra que al mezclar con puzolana el cemento pòrtland puro la finura de la mezcla aumenta, esto se debe a que la puzolana añadida posee una finura mayor.

6.1.3 Agua de consistencia normal

En la Tabla N°6.3 se presenta un resumen de la Tabla N°5.6 la cual corresponde al resultado del ensayo de agua de consistencia normal de cada cemento.

Tabla N°6.3 Resumen de agua por consistencia normal

Agua de consistencia normal		
Cemento	agua consistencia normal	
	(ml)	(%)
CPN	123	24,50
CPPA	129	25,75
CPPB	132	26,50
CPPC	156	31,25

Con los datos de la Tabla N°6.3 se obtiene el Gráfico N°6.3, en donde se comparan los valores del ensayo de agua por consistencia normal de cada cemento.

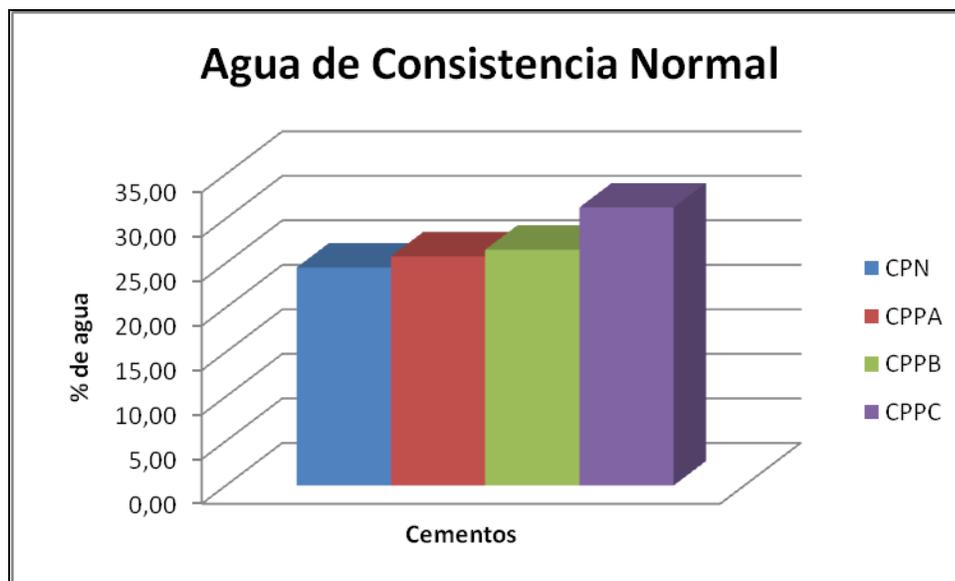


Gráfico N°6.3 Comparación del agua por consistencia normal de los cementos

6.1.3.1 Análisis

Del Gráfico N°6.3 se puede concluir que el cemento CPN es el que necesita menor cantidad de agua para conseguir una pasta de consistencia normal, de esta forma se puede decir que el cemento CPN es el que posee menor finura y que los cementos portland puzolánicos necesitan menos agua para hidratarse, esto se debe a que estos cementos CPPA, CPPB y CPPC como tienen adición puzolánica provocando una reducción en la permeabilidad del hormigón, lo que hace que necesiten más agua para hidratarse.

6.1.4 Tiempos de fraguado

En la Tabla N°6.4 se presenta un resumen de la Tabla N°5.7 con los resultados del ensayo de tiempos de fraguado de los cementos utilizados en esta investigación.

Tabla N°6.4 Tiempos de fraguado

Tiempos de fraguado		
Cemento	inicial (h:min)	final (h:min)
CPN	2:20	3:10
CPPA	2:00	3:10
CPPB	2:20	3:00
CPPC	2:40	3:40

Con los datos de la Tabla N°6.4 se obtiene el Gráfico 6.4, en donde se comparan los valores del ensayo de tiempos de fraguado de cada cemento.

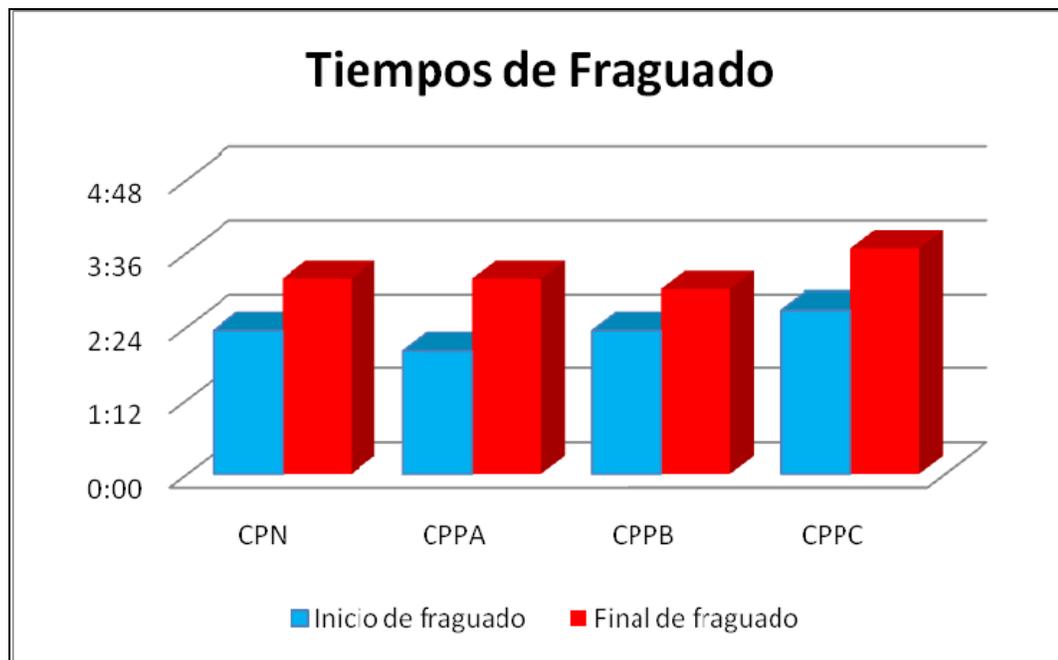


Gráfico N°6.4 Comparación del tiempo de fraguado de los cementos

6.1.4.1 Análisis

En la Tabla N°6.4 se aprecian los tiempos de inicio de fraguado de cada cemento, para los cuales todos los cementos tienen un inicio de fraguado similar, pero se puede observar que los cementos con adiciones puzolánicas tienen un inicio de fraguado más tardío mientras mayor sea el porcentaje de adición puzolánica.

En cuanto a los tiempos de final de fraguado de cada cemento, se observa que los cementos CPN, CPPA y CPPB tienen un final de fraguado similar y el CPPC tiene un mayor tiempo de final de fraguado, sin embargo el tiempo de fraguado de todos los cementos es en promedio de 55 minutos con una dispersión de ± 15 minutos.

Finalmente se puede decir que los valores de tiempos de inicio y final de fraguado de cada cemento están dentro de los valores de la norma NCh148 Of.68, en la cual se especifican los requisitos para los cementos de alta resistencia, estos valores están en la Tabla N°2.4.

6.2 Propiedades químicas de cementos

6.2.1 Pérdida por calcinación

En la Tabla N°6.5 se presenta un resumen de la Tabla N°5.8 la cual corresponde al resultado del ensayo de pérdida por calcinación de cada cemento.

Tabla N°6.5 Pérdida por calcinación

Pérdidas por Calcinación	
Cemento	PXC %
CPN	0,8
CPPA	1,3
CPPB	1,6
CPPC	4,0

Con los datos de la Tabla N°6.5 se obtiene el Gráfico N°6.5, en donde se comparan los valores del ensayo de tiempos de pérdida por calcinación de cada cemento.

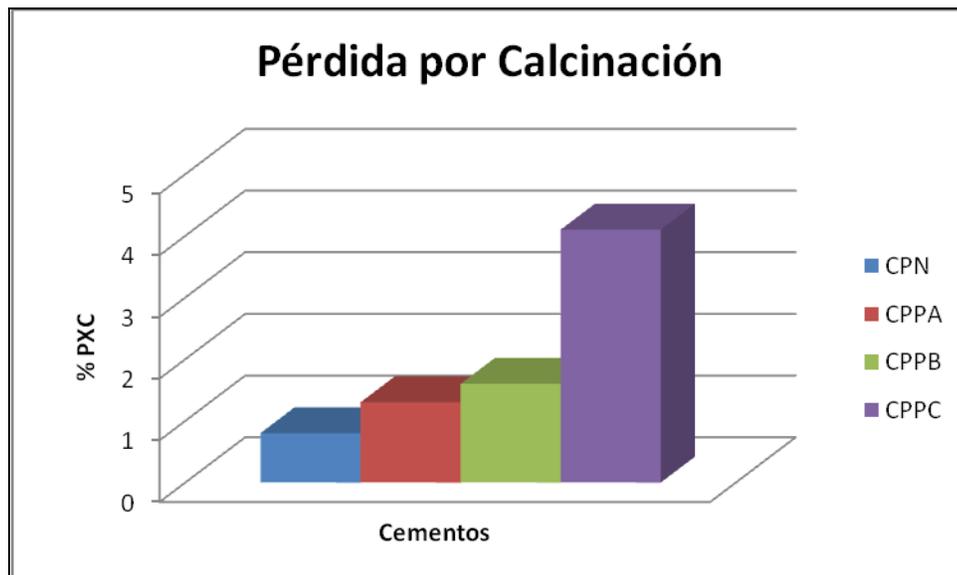


Gráfico N°6.5 Comparación de la pérdida por calcinación de los cementos

6.2.1.1 Análisis

En la Tabla N°6.5 se aprecia que el cemento CPPC es el que posee mayor pérdida por calcinación, por lo general estos valores representan el agua que poseen materiales que no pasan por el horno, como el yeso o la disociación de CO₂ de productos carbonizados del cemento. Dado que los cementos CPPA y CPPB sólo se diferencian del cemento CPN en su adición de puzolána, se puede concluir entonces que la diferencia entre los valores de estos cementos con adición puzolánica corresponde al aporte de humedad y del contenido de óxido de cal de la puzolana.

Además se aprecia que los valores de pérdida por calcinación de cada cemento están dentro de los valores de la norma NCh148 Of.68, en la cual se especifican los valores máximos para los cementos portland y cementos puzolánicos, estos valores están en la Tabla N°2.3.

6.2.2 Trióxido de azufre

En la Tabla N°6.6 se presenta un resumen de la Tabla N°5.9 la cual corresponde al resultado del ensayo de trióxido de azufre de cada cemento.

Tabla N°6.6 Trióxido de azufre

Trióxido de azufre	
Cemento	SO ₃ %
CPN	1,61
CPPA	1,30
CPPB	1,13
CPPC	1,72

Con los datos de la Tabla N°6.6 se obtiene el Gráfico N°6.6, en donde se comparan los valores del ensayo de trióxido de azufre de cada cemento.

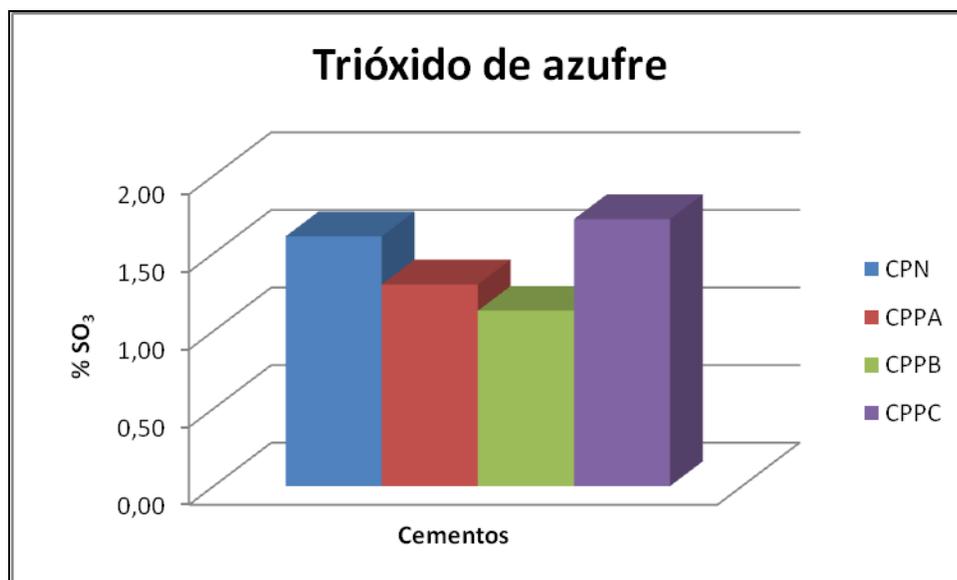


Gráfico N°6.6 Comparación de trióxido de azufre de los cementos

6.2.2.1 Análisis

De la Tabla N°6.6 se aprecia que el valor para el cemento CPN (cemento portland puro) de SO₃ está dentro de rango, ya que debería estar contenido entre 1 y 3 de SO₃ según la NCh148 Of.68. Además se aprecia que los cementos CPPA y CPPB son los que presentan los valores más bajos de trióxido de azufre, esto se explica por el contenido de yeso de cada cemento, dado que son mezclas de cemento portland y puzolana, por lo tanto el contenido de yeso disminuye en forma proporcional al aumento de la puzolana en cada cemento; en cuanto al cemento CPPC se observa que posee el mayor contenido de trióxido de azufre, debido a la mayor finura de molienda lo que obliga a incorporar más yeso para contrarrestar un menor tiempo de fraguado. Se aprecia que los valores de trióxido de azufre de cada cemento están dentro de los valores de la norma NCh148 Of.68, en la cual se especifican los valores máximos para los cementos portland y cementos puzolánicos, estos valores están en la Tabla N°2.3.

6.2.3 Residuo insoluble

En la Tabla N°6.7 se presenta un resumen de la Tabla N°5.10 la cual corresponde al resultado del ensayo de residuo insoluble de cada cemento.

Tabla N°6.7 Residuo insoluble de los cementos en estudio

Residuo Insoluble	
Cemento	Residuo Insoluble %
CPN	0,24
CPPA	13,73
CPPB	18,69
CPPC	21,89

Con los datos de la Tabla N°6.7 se obtiene el Gráfico N°6.7, en donde se comparan los valores del ensayo de residuo insoluble de cada cemento.

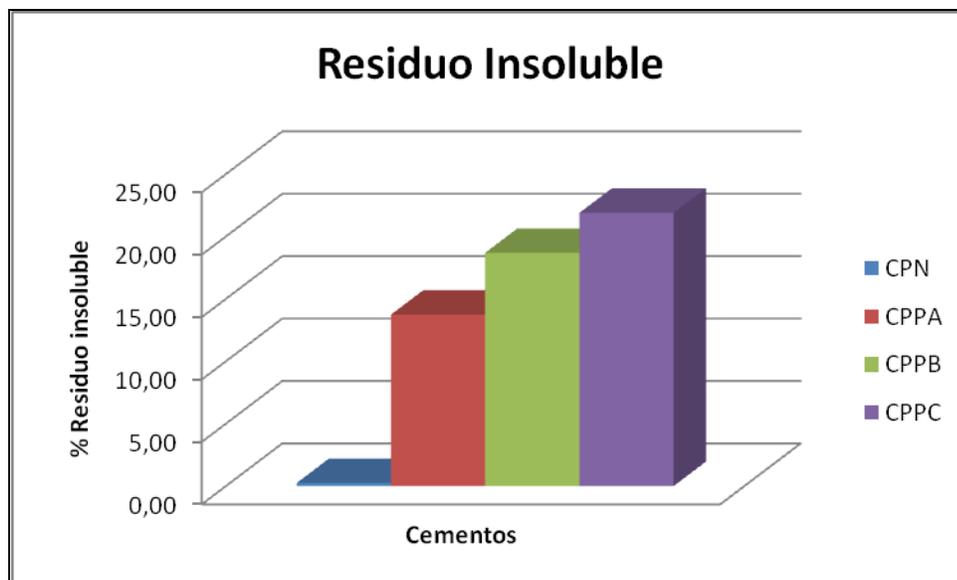


Gráfico N°6.7 Comparación de residuo insoluble de los cementos

6.2.3.1 Análisis

En la Tabla N°6.7 se aprecia que el cemento CPN presenta un 0,24% el cual es un buen índice del proceso llevado a cabo en el horno, ya que este ensayo nos indica si la clinquerización ha sido completa. En cuanto al cemento CPPC se observa que posee el valor más alto de porcentaje de residuo insoluble seguido de CPPB y CPPA, lo cual refleja el mayor contenido de sílice aportado por la puzolana, también se aprecia que los valores de residuo insoluble de cada cemento están dentro de los valores de la norma NCh148 Of.68, en la cual se especifican los valores máximos para los cementos portland y cementos puzolánicos, estos valores están en la Tabla N°2.3.

6.3 Comportamiento de los hormigones

6.3.1 Resistencia a compresión

6.3.1.1 Hormigón CPN

En la Tabla N°6.8 se presenta un resumen de los resultados del ensayo de resistencia a compresión a los 3,7 y 28 días de edad del hormigón confeccionado con cemento CPN, para la relación agua/cemento 0,45 y 0,55.

Tabla N°6.8 Resistencia a compresión de hormigones CPN

días	Resistencia a compresión de hormigones CPN (Kgf/cm ²)	
	A/C=0,45	A/C=0,55
3	208,1	138,3
7	398,5	345,0
28	683,2	491,1

Con los datos de la Tabla N°6.8 se obtiene el Gráfico N°6.8 donde se muestra la variación de la resistencia a compresión en el tiempo para el hormigón confeccionado con cemento CPN, para las relaciones agua/cemento 0,45 y 0,55.

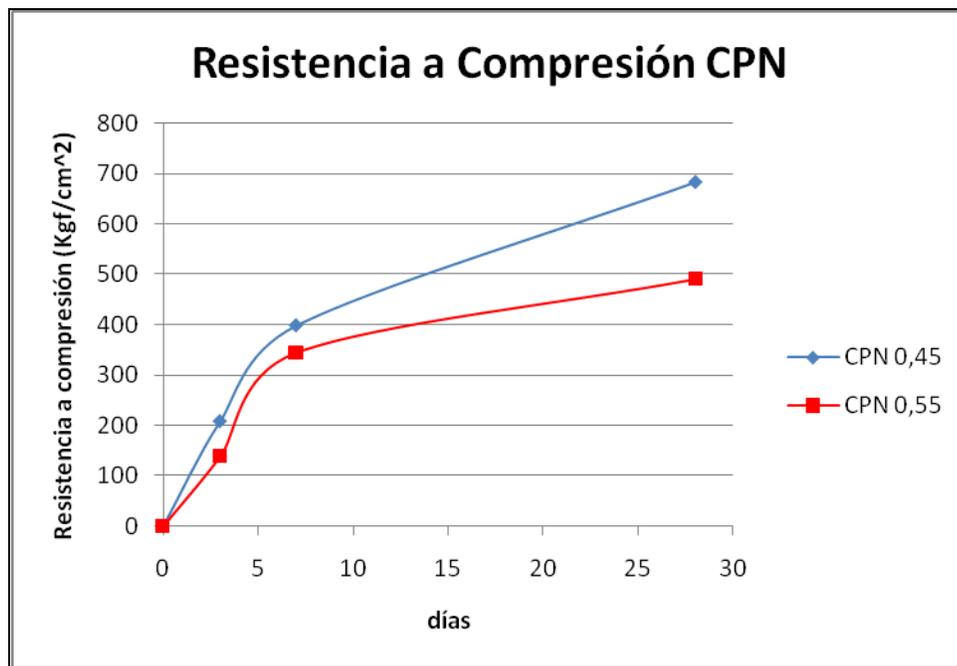


Gráfico 6.8 Resistencia a compresión en el tiempo para hormigones CPN

6.3.1.2 Hormigón CPPA

En la Tabla N°6.9 se presenta un resumen de los resultados del ensayo de resistencia a compresión a los 3,7 y 28 días de edad del hormigón confeccionado con cemento CPPA, para la relación agua/cemento 0,45 y 0,55.

Tabla N°6.9 Resistencia a compresión de hormigones CPN

días	Resistencia a compresión de hormigones CPPA (Kgf/cm ²)	
	A/C=0,45	A/C=0,55
3	264,9	146,2
7	395,2	283,9
28	607,5	462,9

Con los datos de la Tabla N°6.9 se obtiene el Gráfico N°6.9 donde se muestra la variación de la resistencia a compresión en el tiempo para el hormigón confeccionado con cemento CPPA, para las relaciones agua/cemento 0,45 y 0,55.

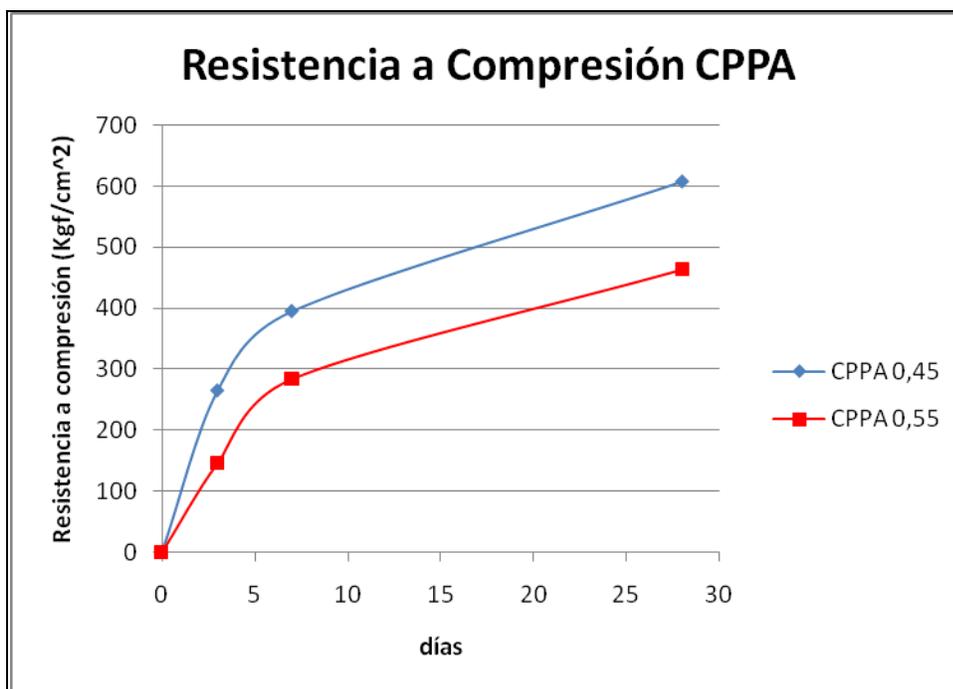


Gráfico 6.9 Resistencia a compresión en el tiempo para hormigones CPPA

6.3.1.3 Hormigón CPPB

En la Tabla N°6.10 se presenta un resumen de los resultados del ensayo de resistencia a compresión a los 3,7 y 28 días de edad del hormigón confeccionado con cemento CPPB, para la relación agua/cemento 0,45 y 0,55.

Tabla N°6.10 Resistencia a compresión de hormigones CPPB

días	Resistencia a compresión de hormigones CPPB (Kgf/cm ²)	
	A/C=0,45	A/C=0,55
3	295,7	162,1
7	409,3	289,5
28	567,3	453,8

Con los datos de la Tabla N°6.10 se obtiene el Gráfico N°6.10 donde se muestra la variación de la resistencia a compresión en el tiempo para el hormigón confeccionado con cemento CPPB, para las relaciones agua/cemento 0,45 y 0,55.

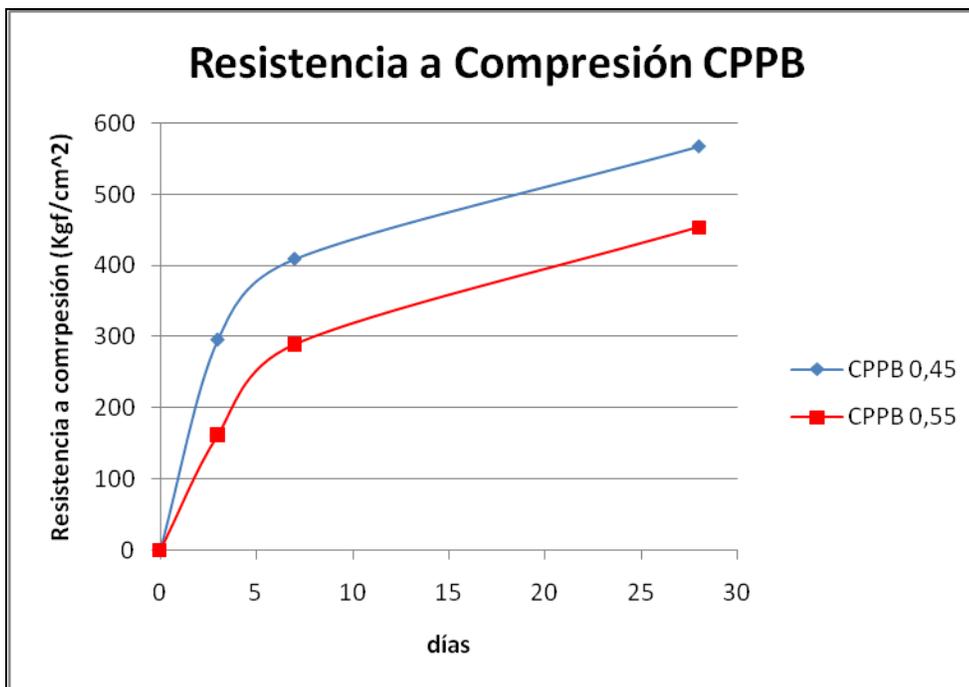


Gráfico 6.10 Resistencia a compresión en el tiempo para hormigones CPPB

6.3.1.4 Hormigón CPPC

En la Tabla N°6.11 se presenta un resumen de los resultados del ensayo de resistencia a compresión a los 3,7 y 28 días de edad del hormigón confeccionado con cemento CPPC, para la relación agua/cemento 0,45 y 0,55.

Tabla N°6.11 Resistencia a compresión de hormigones CPPC

días	Resistencia a compresión de hormigones CPPC (Kgf/cm ²)	
	A/C=0,45	A/C=0,55
3	283,2	185,3
7	410,6	315,5
28	600,9	452,4

Con los datos de la Tabla N°6.11 se obtiene el Gráfico N°6.11 donde se muestra la variación de la resistencia a compresión en el tiempo para el hormigón confeccionado con cemento CPPC, para las relaciones agua/cemento 0,45 y 0,55.

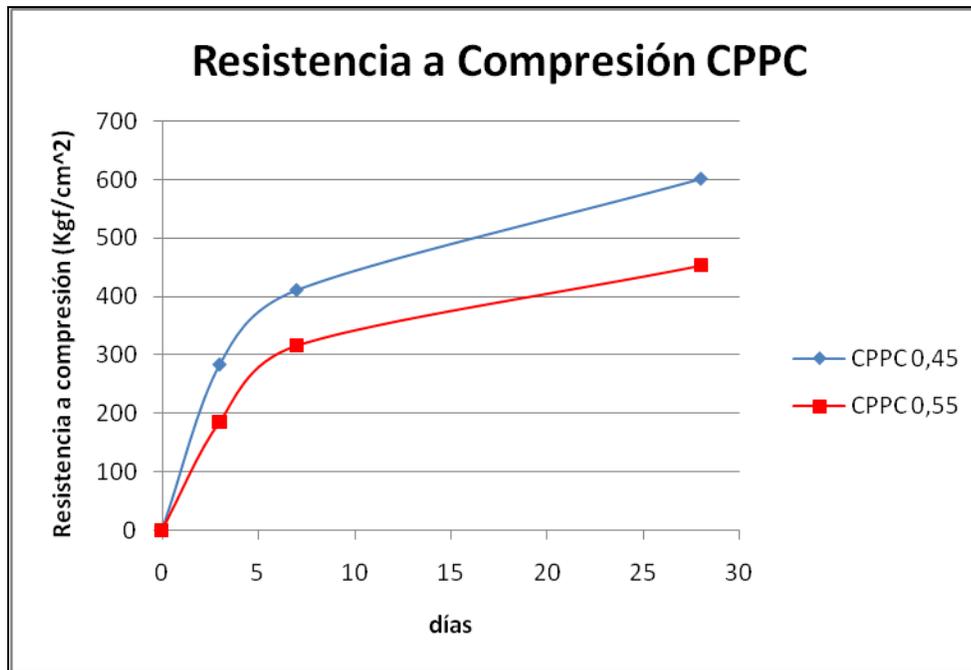


Gráfico 6.11 Resistencia a compresión en el tiempo para hormigones CPPC

En la Tabla N°6.12 y Tabla N°6.13 se presenta un resumen de las Tablas N°6.8, 6.9, 6.10 y 6.11 las cuales corresponden al resultado del ensayo de resistencia a compresión a los 3, 7 y 28 días de edad de los hormigones confeccionados con los distintos cementos y con las diferentes relaciones de agua/cemento ensayadas.

Tabla N°6.12 Resumen de las resistencias a compresión de los hormigones para la relación agua/cemento 0,45

A/C = 0,45	Resistencia a Compresión de hormigones (Kgf/cm²)			
	días	CPN	CPPA	CPPB
3	208,1	264,9	295,7	283,2
7	398,5	395,2	409,3	410,6
28	683,2	607,5	567,3	600,9

Tabla N°6.13 Resumen de las resistencias a compresión de los hormigones para la relación agua/cemento 0,55

A/C = 0,55	Resistencia a Compresión de hormigones (Kgf/cm²)			
	días	CPN	CPPA	CPPB
3	138,3	146,2	162,1	185,3
7	345,0	283,9	289,5	315,5
28	491,1	462,9	453,8	452,4

Con los datos de las Tablas N°6.12 y Tabla N°6.13 se obtienen los Gráficos N°6.12 y 6.13 donde se observan las resistencias a la compresión en el tiempo para un hormigón confeccionado con su respectivo cemento para cada relación agua/cemento.

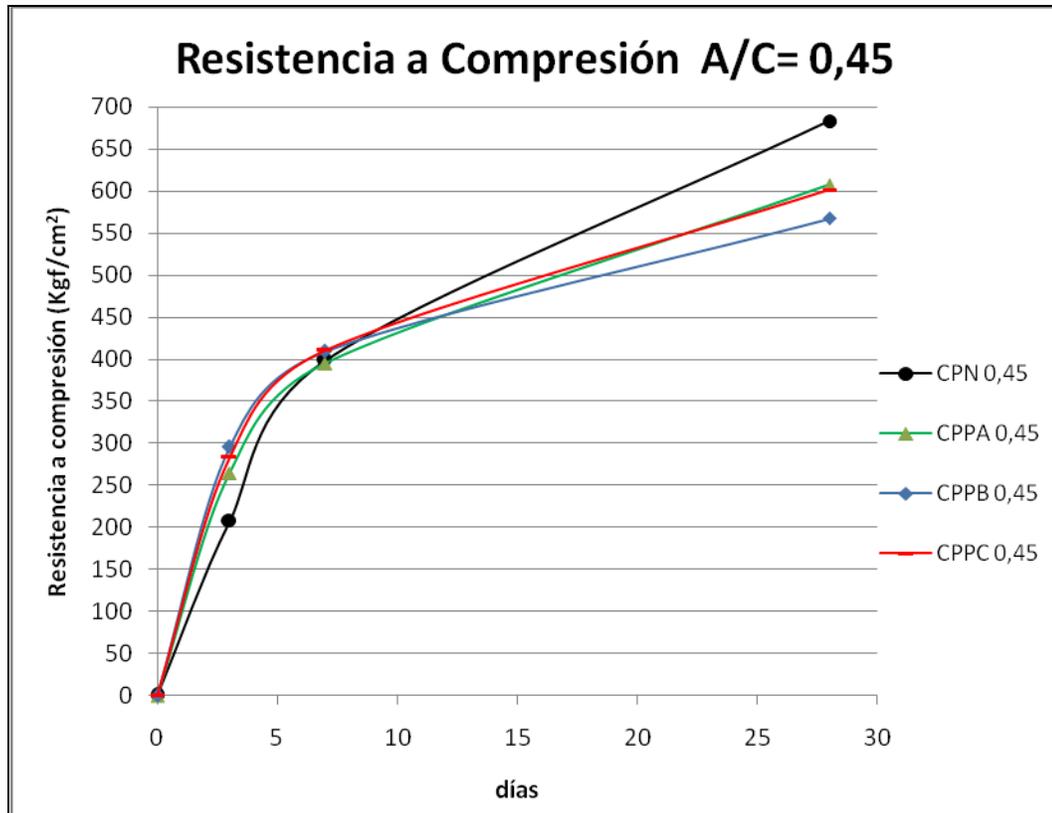


Gráfico N°6.12 Comparación de los valores de resistencia a compresión de hormigones para la relación agua cemento 0,45

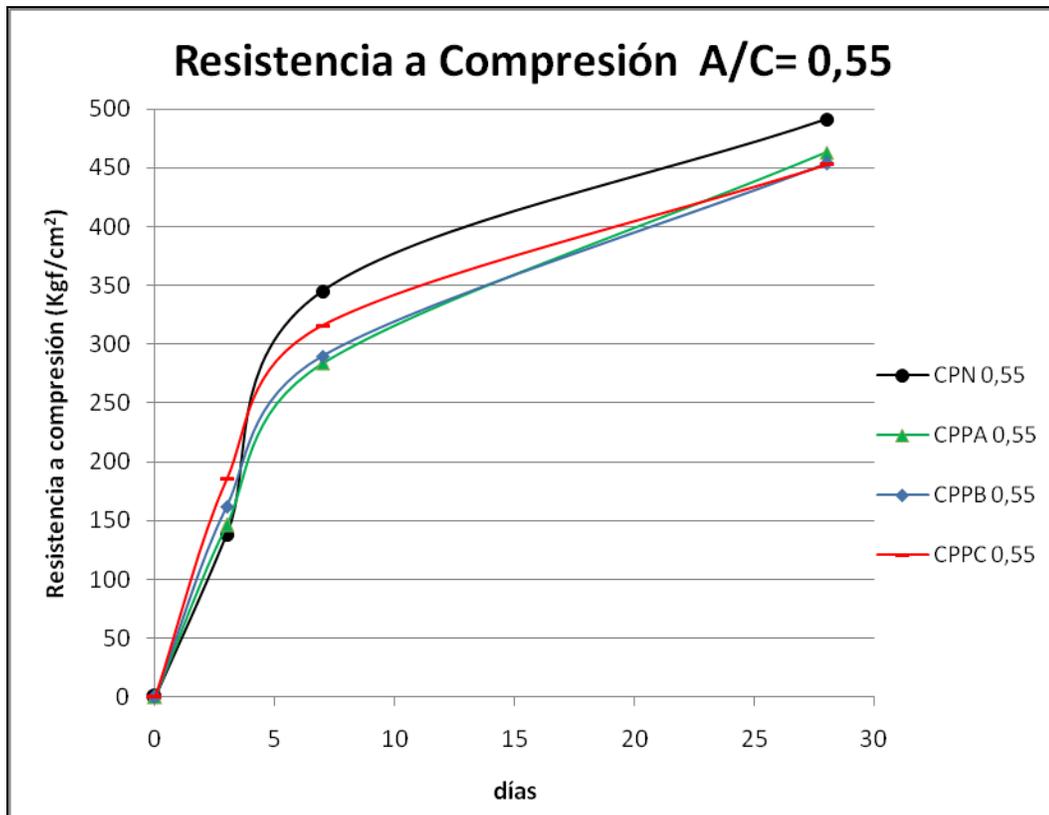


Gráfico N°6.13 Comparación de los valores de resistencia a compresión de hormigones para la relación agua cemento 0,55

6.3.1.5 Análisis

Se aprecia en las Tablas N°6.12 y N°6.13 que a mayor relación agua/cemento disminuye la resistencia a compresión de todos los hormigones. Por otro lado se puede apreciar que el hormigón confeccionado con el cemento CPN a la edad de 28 días muestra una resistencia a la compresión en promedio mayor frente a los hormigones con adición de puzolana, en cuanto a los dos hormigones experimentales (CPPA y CPPB) confeccionados con cementos puzolánicos podemos apreciar que su resistencia tiende a disminuir mientras mayor sea el porcentaje de adición, este comportamiento es lógico dado que los cementos puzolánicos desarrollan su alta resistencia más tarde que los portland puros, ya que la puzolana se comporta como agregado los primeros días hasta que la cal libre reacción con ella formando gel de tobermorita desarrollando a largo plazo altas resistencias.

En cuanto al hormigón confeccionado con el cemento comercial portland puzolánico CPPC se esperaba que al presentar el mayor porcentaje de puzolana debiera presentar una menor resistencia a la compresión, pero su comportamiento no fue así; esto se puede justificar debido a que el CPPC es un cemento portland puzolánico de alta resistencia que ha sido acelerado en su desarrollo de resistencia moliéndolo más fino.

Según la Tabla N°2.4 los valores de la resistencia a compresión de cada cemento están dentro de valores especificados por la norma NCh148 Of.68, cumpliendo el requisito de clasificación tanto de cemento portland y cemento portland puzolánico según sea el caso.

6.3.2 Retracción libre

6.3.2.1 Hormigón CPN

En la Tabla N°6.14 se presenta la deformación por retracción obtenida a partir de las mediciones de las Tablas N°5.19 y 5.20 las cuales corresponden al resultado obtenido en el ensayo de retracción libre hasta los 28 días de edad del hormigón confeccionado con el cemento CPN. En esta tabla se incluye la variación de longitud experimentada por la probeta de hormigón CPN con respecto a su longitud inicial.

Tabla N°6.14 Retracción libre de hormigón CPN

CPN	A/C = 0,45		A/C = 0,55	
día	Delta (mm)	Deformación unitaria 10^{-6}	Delta (mm)	Deformación unitaria 10^{-6}
0	0,000	0,00	0,000	0,00
3	0,015	52,63	0,006	22,81
7	0,045	157,89	0,032	112,28
14	0,076	266,67	0,066	231,58
28	0,121	424,56	0,115	403,51

Con los datos de la Tabla N°6.14 se obtiene el Gráfico N°6.14 donde se muestra la retracción libre en el tiempo para el hormigón confeccionado con cemento CPN, para las relaciones agua/cemento 0,45 y 0,55.

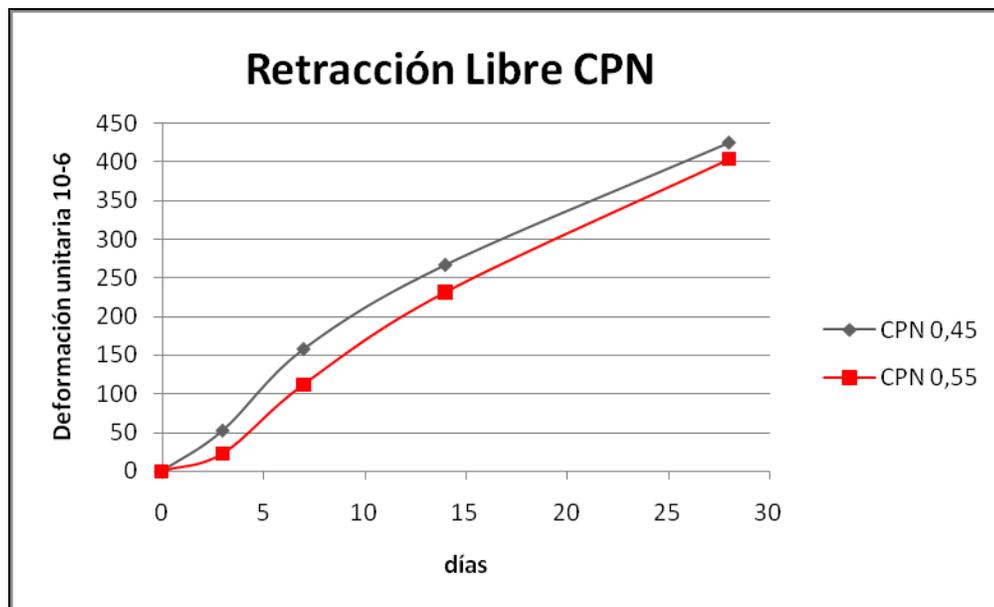


Gráfico N°6.14 Retracción libre de hormigón CPN

6.3.2.2 Hormigón CPPA

En la Tabla N°6.15 se presenta la deformación por retracción obtenida a partir de las mediciones de las Tabla N°5.21 y 5.22 las cuales corresponden al resultado obtenido en el ensayo de retracción libre hasta los 28 días de edad del hormigón confeccionado con el cemento CPPA. En esta tabla se incluye la variación de longitud experimentada por la probeta de hormigón CPPA con respecto a su longitud inicial.

Tabla N°6.15 Retracción libre de hormigón CPPA

CPPA	A/C = 0,45		A/C = 0,55	
	Delta (mm)	Deformación unitaria 10 ⁻⁶	Delta (mm)	Deformación unitaria 10 ⁻⁶
0	0,000	0,00	0,000	0,00
3	0,013	45,61	0,010	33,33
7	0,041	143,86	0,030	103,51
14	0,082	287,72	0,061	214,04
28	0,143	501,75	0,079	275,44

Con los datos de la Tabla N°6.15 se obtiene el Gráfico N°6.15 donde se muestra la retracción libre en el tiempo para el hormigón confeccionado con cemento CPPA, para las relaciones agua/cemento 0,45 y 0,55.

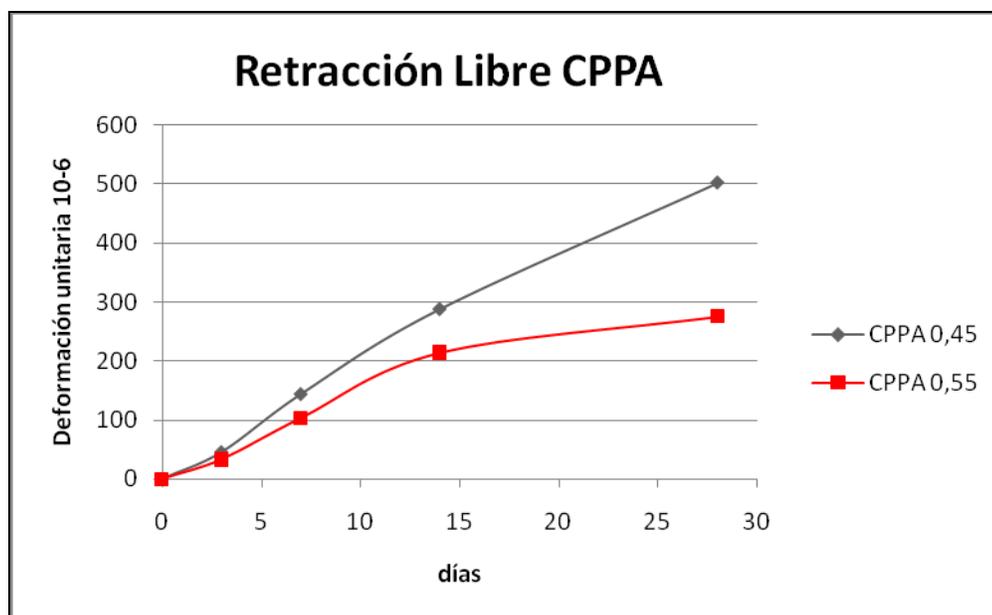


Gráfico N°6.15 Retracción libre de hormigón CPPA

6.3.2.3 Hormigón CPPB

En la tabla N°6.16 se presenta la deformación por retracción obtenida a partir de las mediciones de las Tabla N°5.23 y 5.24 las cuales corresponden al resultado obtenido en el ensayo de retracción libre hasta los 28 días de edad del hormigón confeccionado con el cemento CPPB. En esta tabla se incluye la variación de longitud experimentada por la probeta de hormigón CPPB con respecto a su longitud inicial.

Tabla N°6.16 Retracción libre de hormigón CPPB

CPPB	A/C = 0,45		A/C = 0,55	
	Delta (mm)	Deformación unitaria 10 ⁻⁶	Delta (mm)	Deformación unitaria 10 ⁻⁶
0	0,000	0,00	0,000	0,00
3	0,010	35,09	0,012	42,11
7	0,040	138,60	0,026	91,23
14	0,078	271,93	0,083	291,23
28	0,145	507,02	0,110	385,96

Con los datos de la Tabla N°6.16 se obtiene el Gráfico N°6.16 donde se muestra la retracción libre en el tiempo para el hormigón confeccionado con cemento CPPB, para las relaciones agua/cemento 0,45 y 0,55.

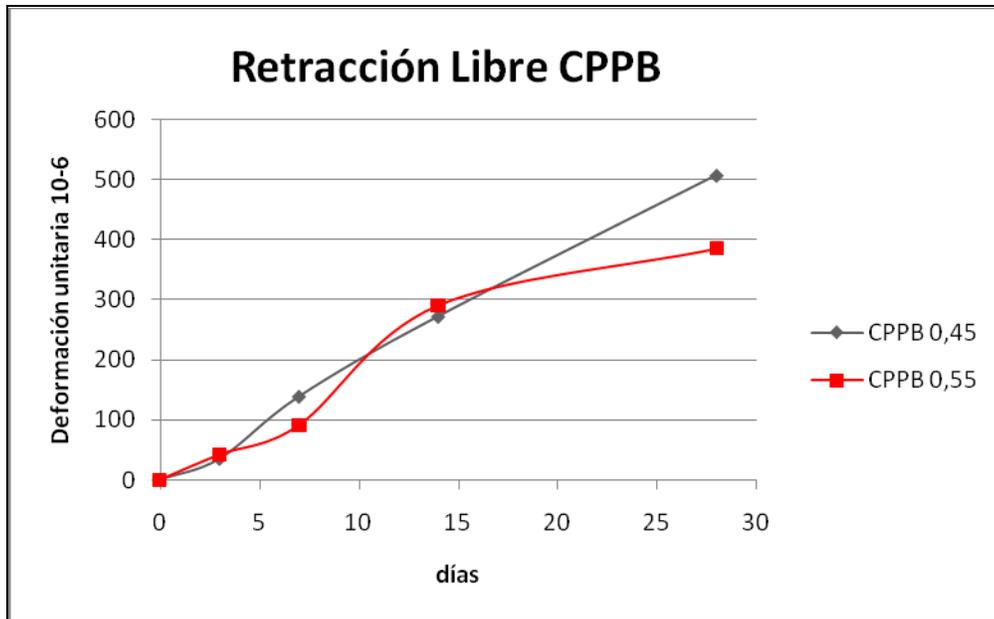


Gráfico N°6.16 Retracción libre de hormigón CPPB

6.3.2.4 Hormigón CPPC

En la tabla N°6.17 se presenta la deformación por retracción obtenida a partir de las mediciones de las Tabla N°5.25 y 5.26 las cuales corresponden al resultado obtenido en el ensayo de retracción libre hasta los 28 días de edad del hormigón confeccionado con el cemento CPPC. En esta tabla se incluye la variación de longitud experimentada por la probeta de hormigón CPPC con respecto a su longitud inicial.

Tabla N°6.17 Retracción libre de hormigón CPPC

CPPC	A/C = 0,45		A/C = 0,55		
	día	Delta (mm)	Deformación unitaria 10 ⁻⁶	Delta (mm)	Deformación unitaria 10 ⁻⁶
	0	0,000	0,00	0,000	0,00
	3	0,013	45,61	0,018	61,40
	7	0,058	201,75	0,047	163,16
	14	0,109	382,46	0,108	377,19
	28	0,166	582,46	0,160	561,40

Con los datos de la Tabla N°6.17 se obtiene el Gráfico N°6.18 donde se muestra la retracción libre en el tiempo para el hormigón confeccionado con cemento CPPC, para las relaciones agua/cemento 0,45 y 0,55.

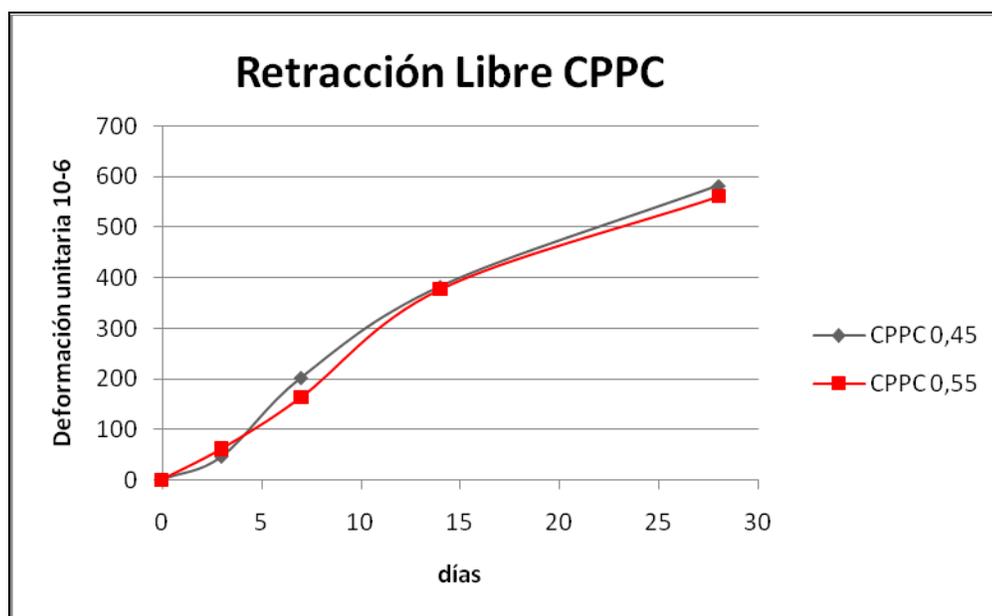


Gráfico N°6.17 Retracción libre de hormigón CPPB

En la Tabla N°6.18 y Tabla N°6.19 se presenta un resumen de las Tablas N°6.14, 6.15, 6.16 y 6.17 las cuales corresponden al resultado del ensayo de retracción libre hasta los 28 días de edad de los hormigones confeccionados con los distintos cementos y con las diferentes relaciones de agua/cemento ensayadas.

Tabla N°6.18 Resumen de retracción libre para hormigones con relación agua/cemento 0,45

A/C = 0,45				
día	Deformación unitaria 10⁻⁶			
	CPN	CPPA	CPPB	CPPC
0	0,00	0,00	0,00	0,00
3	52,63	45,61	35,09	45,61
7	157,89	143,86	138,60	201,75
14	266,67	287,72	271,93	382,46
28	424,56	501,75	507,02	582,46

Tabla N°6.19 Resumen de retracción libre para hormigones con relación agua/cemento 0,45

A/C = 0,55				
día	Deformación unitaria 10⁻⁶			
	CPN	CPPA	CPPB	CPPC
0	0,00	0,00	0,00	0,00
3	22,81	33,33	42,11	61,40
7	112,28	103,51	91,23	163,16
14	231,58	214,04	291,23	377,19
28	403,51	275,44	385,96	561,40

Con los datos de las Tablas N°6.18 y Tabla N°6.19 se obtienen los Gráficos N°6.18 y 6.19 donde se observan las deformaciones unitarias en el tiempo para un hormigón confeccionado con su respectivo cemento para cada relación agua/cemento.

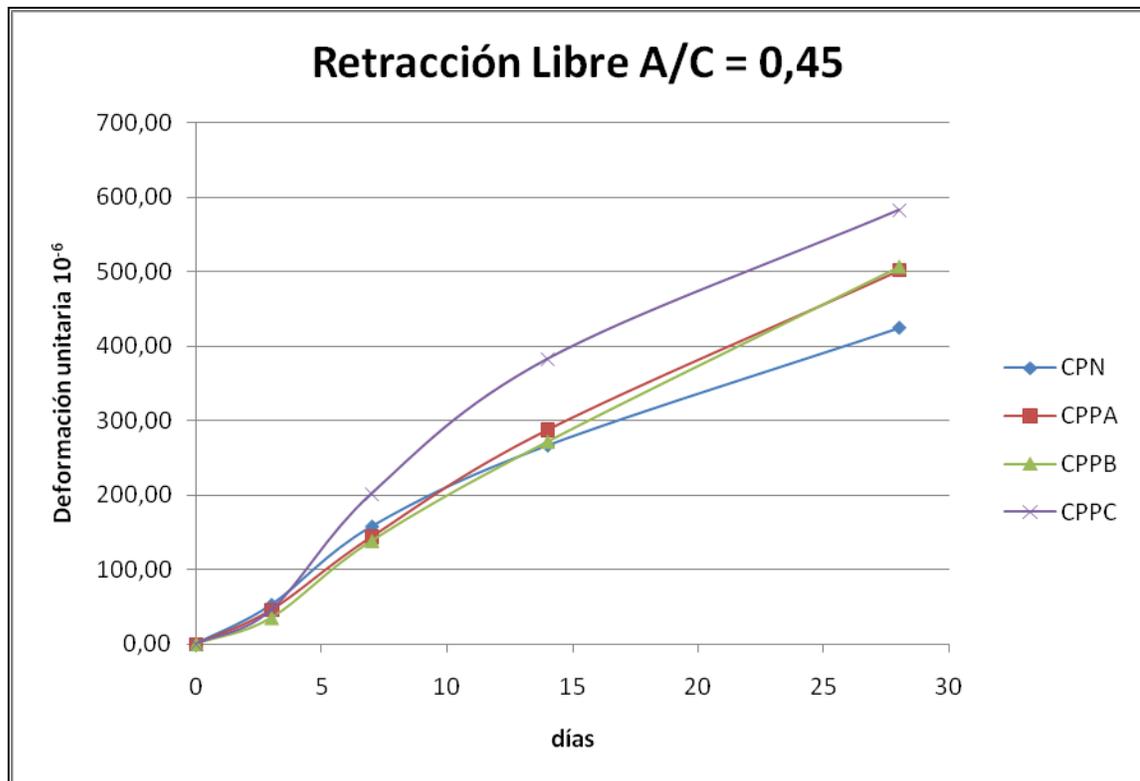


Gráfico N°6.18 Retracción libre de hormigones con relación agua/cemento 0,45

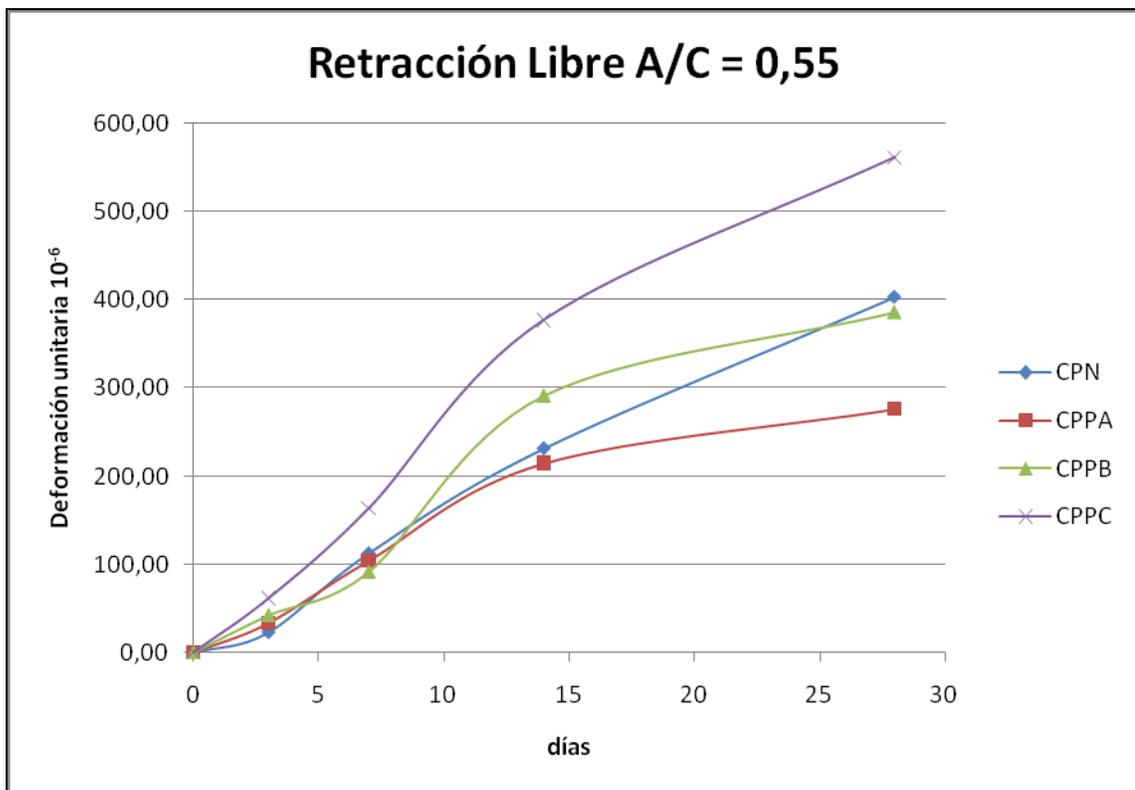


Gráfico N°6.19 Retracción libre de hormigones con relación agua/cemento 0,55

6.3.2.5 Análisis

Según las tablas anteriores se puede decir que la relación agua/cemento no es un factor primordial en la magnitud de la retracción libre a los edad final del ensayo de 28 días, pero si se aprecia que en los primero días de la probeta no existe una diferencia marcada entre la magnitud de la retracción de las distintas relaciones agua/cemento.

En cuanto a la comparación de la magnitudes de la retracción de los distintos hormigones para una relación agua/cemento dada, se observa que las puzolanas, tienden a incrementar el volumen de los poros finos en el producto de hidratación del cemento, ya que la retracción por secado en el hormigón está asociada directamente con el agua retenida por los pequeños poros en el rango de 3 a 20 nm, los hormigones que contienen aditivos capaces de reafirmar los poros, generalmente muestran una retracción por secado más alta, lo que se puede apreciar en los Gráfico N°6.18 y Gráfico N°6.19 mientras mayor es el contenido de puzolana del cemento mayor es la magnitud de la retracción durante los primeros 28 días de edad.

6.3.3 Retracción restringida

6.3.3.1 Hormigón CPN

En la Tabla N°6.20 se presenta un resumen de la Tabla N°5.27, 5.28 y 5.29 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para el hormigón confeccionado con el cemento CPN con una relación agua/cemento de 0,45. En la Tabla N°6.20 se presenta la variación del ancho de las fisuras desarrolladas en los anillos confeccionados con el hormigón CPN.

Tabla N°6.20 Control de fisuras para el hormigón CPN 0,45

Hormigón CPN A/C = 0,45 Anillo 1				Hormigón CPN A/C = 0,45 Anillo 2			
edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)	edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)
0	0	0	0	0	0		
15	0,05	15	0,05	14	0,075		
16	0,1	16	0,1	15	0,1		
18	0,1	18	0,1	16	0,2		
19	0,1	19	0,1	18	0,25		
21	0,15	21	0,1	19	0,275		
22	0,175	22	0,15	21	0,3		
25	0,2	25	0,15	22	0,3		
26	0,2	26	0,15	25	0,35		
27	0,25	27	0,15	26	0,4		
28	0,25	28	0,15	27	0,4		
				28	0,4		

Con los datos de la Tabla N°6.20 se obtienen los Gráficos N°6.20 y 6.21, en donde se muestra la variación en el tiempo de las fisuras desarrolladas por el hormigón CPN.

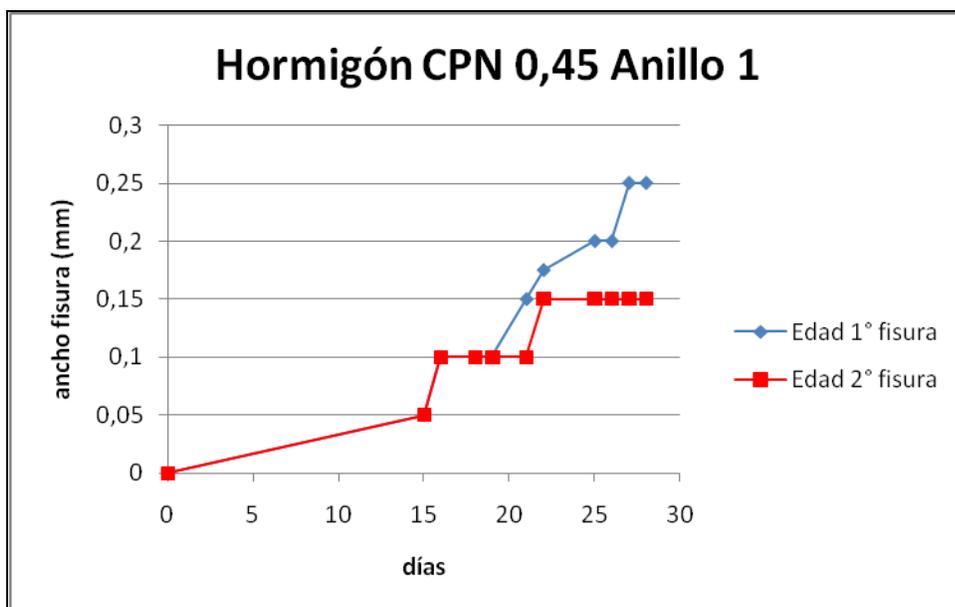


Gráfico N°6.20 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPN 0,45 anillo 1

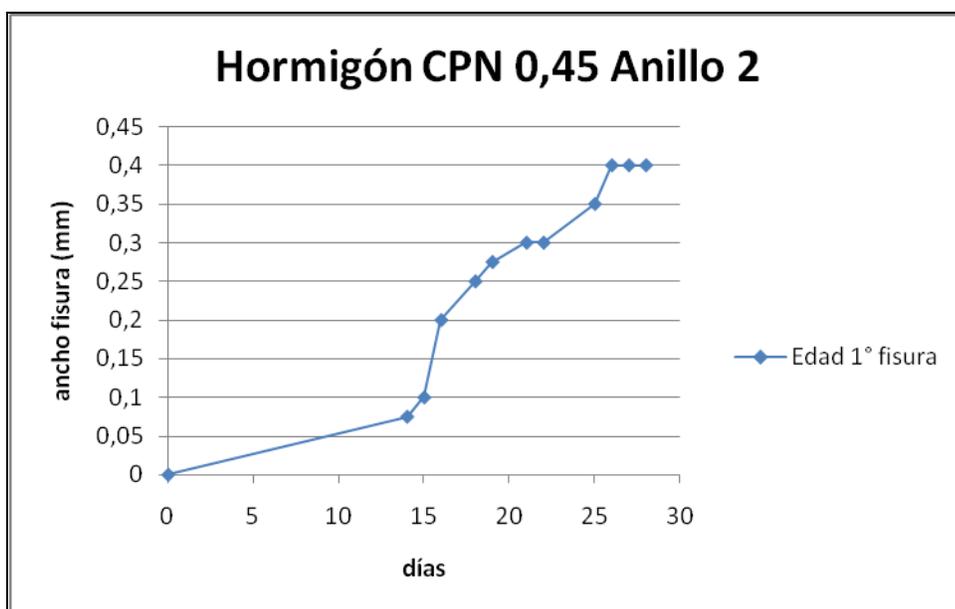


Gráfico N°6.21 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPN 0,45 anillo 2

En la Tabla N°6.21 se presenta un resumen de las Tablas N°5.30, 5.31, 5.32 y 5.33 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para el hormigón confeccionado con el cemento CPN con una relación agua/cemento de 0,55. En la Tabla N°6.21 se presenta la variación del ancho de las fisuras desarrolladas en los anillos confeccionados con el hormigón CPN.

Tabla N°6.21 Control de fisuras para el hormigón CPN 0,55

Hormigón CPN A/C = 0,55 Anillo 1				Hormigón CPN A/C = 0,55 Anillo 2			
edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)	edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
14	0,05	14	0,05	17	0,1	18	0,075
15	0,1	15	0,05	18	0,1	21	0,1
17	0,175	17	0,1	21	0,1	22	0,1
18	0,175	18	0,1	22	0,15	23	0,1
21	0,175	21	0,125	23	0,2	24	0,1
22	0,2	22	0,15	24	0,2	25	0,1
23	0,2	23	0,15	25	0,2	28	0,1
24	0,2	24	0,15	28	0,2		
25	0,2	25	0,15				
28	0,2	28	0,15				

Con los datos de la Tabla N°6.21 se obtienen los Gráficos N°6.22 y 6.23, en donde se muestra la variación en el tiempo de las fisuras desarrolladas por el hormigón CPN.

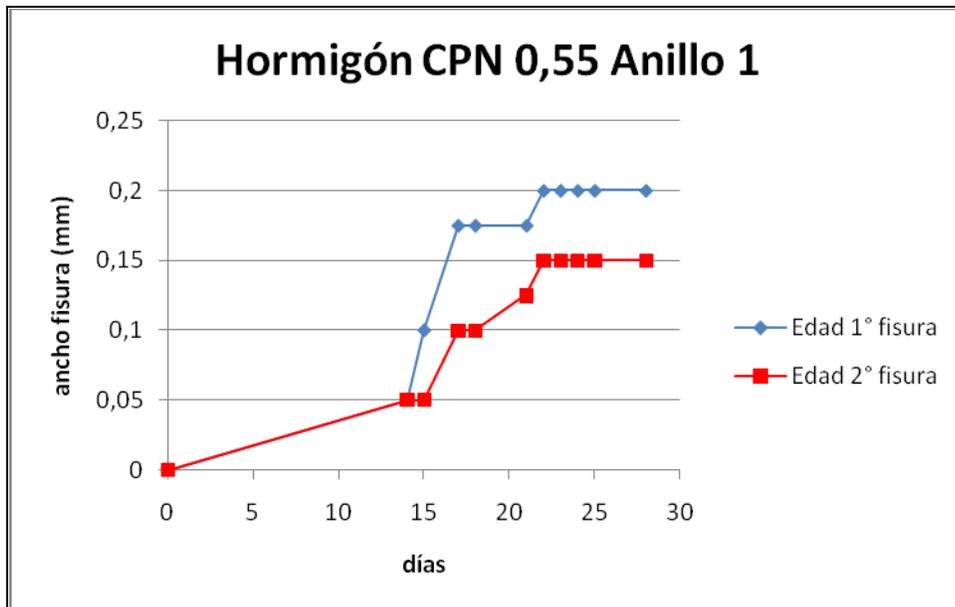


Gráfico N°6.22 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPN 0,55 anillo 1

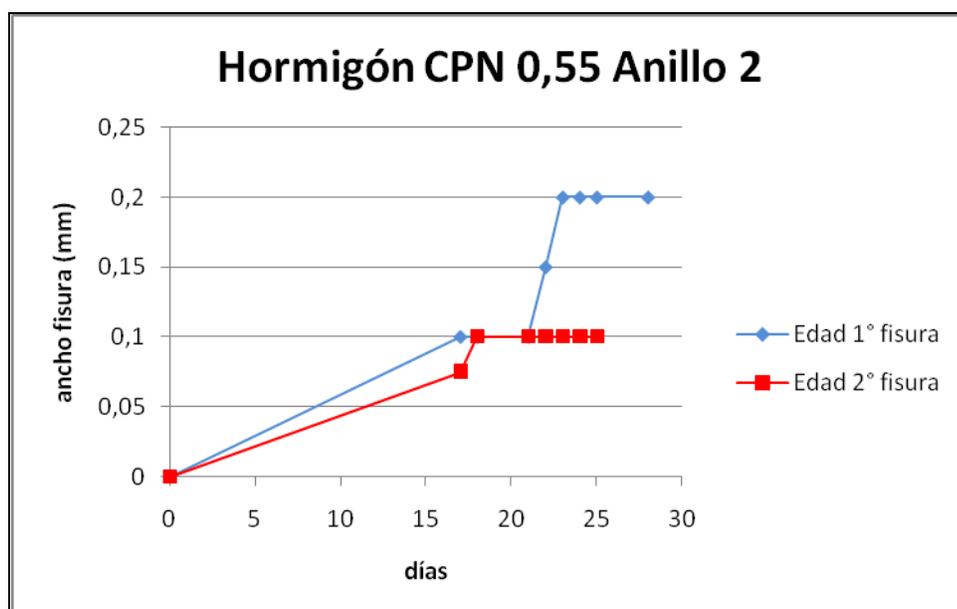


Gráfico N°6.23 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPN 0,55 anillo 2

6.3.3.2 Hormigón CPPA

En la Tabla N°6.22 se presenta un resumen de las Tablas N°5.34, 5.35 y 5.36 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para el hormigón confeccionado con el cemento CPPA con una relación agua/cemento de 0,45. En la Tabla N°6.22 se presenta la variación del ancho de las fisuras desarrolladas en los anillos confeccionados con el hormigón CPPA.

Tabla N°6.22 Control de fisuras para el hormigón CPPA 0,45

Hormigón CPPA A/C = 0,45 Anillo 1				Hormigón CPPA A/C = 0,45 Anillo 2			
edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)	edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)
0	0			0	0	0	0
15	0,15			15	0,075	15	0,1
18	0,25			18	0,1	18	0,1
20	0,3			20	0,15	20	0,1
22	0,35			22	0,15	22	0,2
25	0,35			25	0,15	25	0,2
27	0,4			27	0,15	27	0,2
28	0,4			28	0,15	28	0,2

Con los datos de la Tabla N°6.22 se obtienen los Gráficos N°6.24 y 6.25, en donde se muestra la variación en el tiempo de las fisuras desarrolladas por el hormigón CPPA.

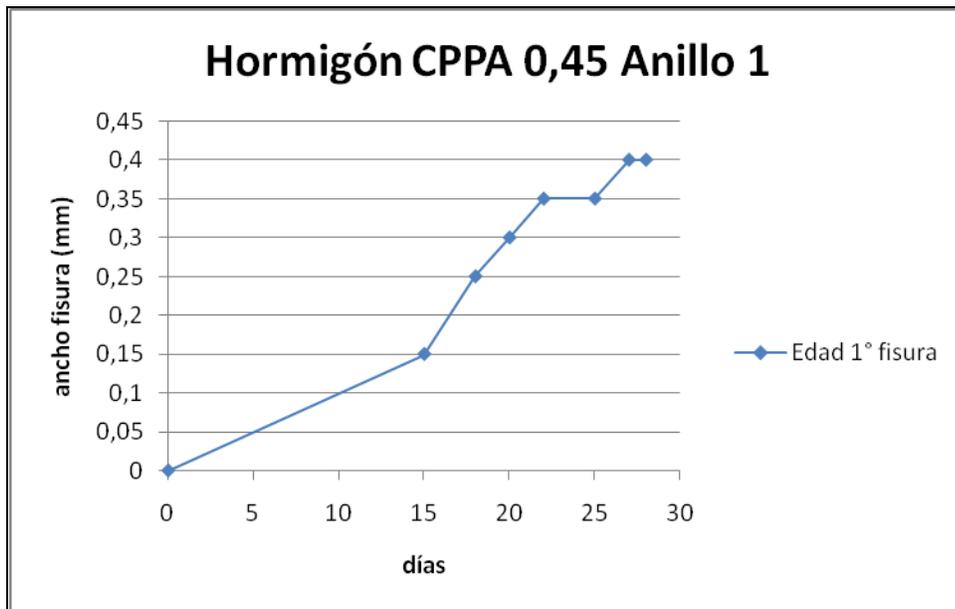


Gráfico N°6.24 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPPA 0,45 anillo 1

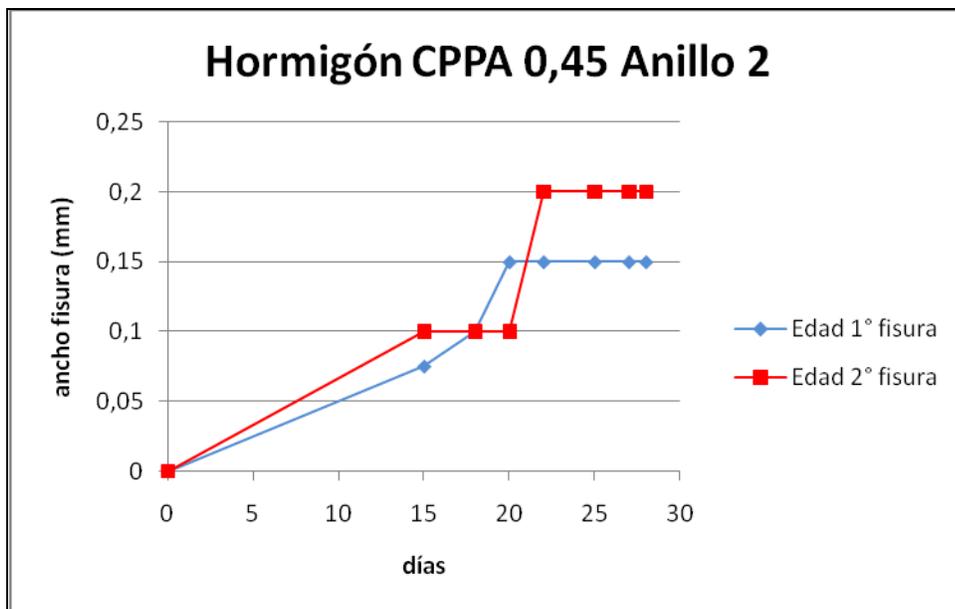


Gráfico N°6.25 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPPA 0,45 anillo 2

En la Tabla N°623 se presenta un resumen de las Tablas N°5.37, 5.38, 5.39 y 5.40 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para el hormigón confeccionado con el cemento CPPA con una relación agua/cemento de 0,55.

En la Tabla N°6.23 se presenta la variación del ancho de las fisuras desarrolladas en los anillos confeccionados con el hormigón CPPA.

Tabla N°6.23 Control de fisuras para el hormigón CPPA 0,55

Hormigón CPPA A/C = 0,55 Anillo 1				Hormigón CPPA A/C = 0,55 Anillo 2			
edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)	edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
20	0,05	20	0,05	15	0,05	20	0,05
21	0,05	21	0,1	18	0,05	21	0,05
23	0,05	23	0,15	20	0,05	23	0,075
25	0,05	25	0,25	21	0,075	25	0,1
27	0,05	27	0,3	23	0,1	27	0,1
28	0,05	28	0,3	25	0,15	28	0,1
				27	0,15		
				28	0,2		

Con los datos de la Tabla N°6.23 se obtienen los Gráficos N°6.26 y 6.27, en donde se muestra la variación en el tiempo de las fisuras desarrolladas por el hormigón CPPA.

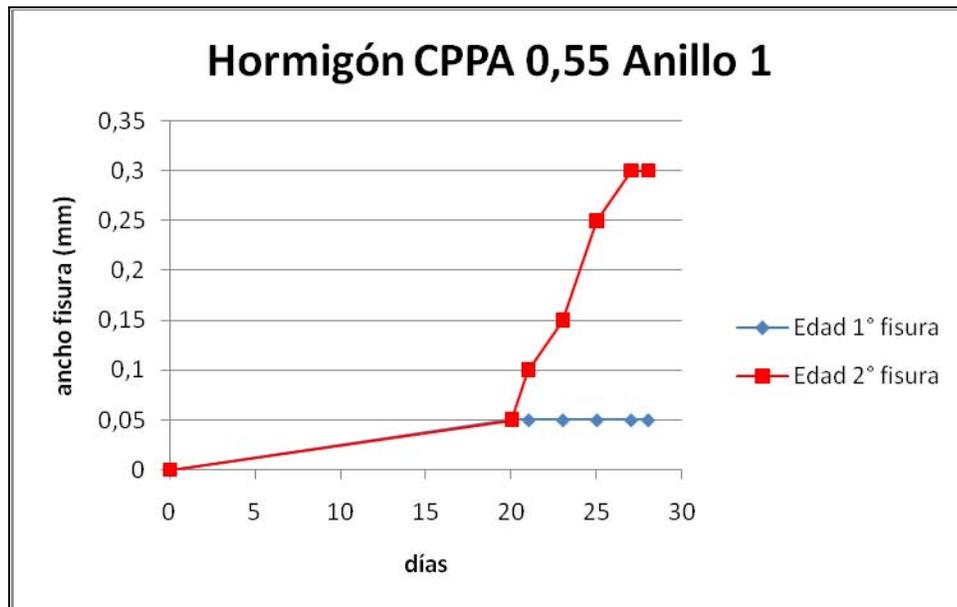


Gráfico N°6.26 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPPA 0,55 anillo 1

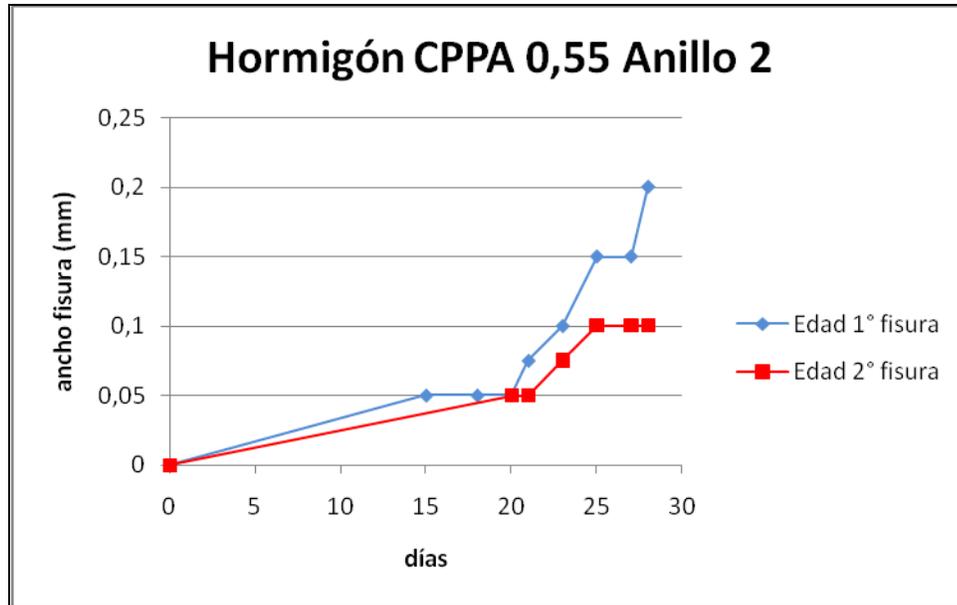


Gráfico N°6.27 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPPA 0,55 anillo 2

6.3.3.3 Hormigón CPPB

En la Tabla N°6.24 se presenta un resumen de las Tablas N°5.41, 5.42 y 5.43 las cuales corresponde a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para el hormigón confeccionado con el cemento CPPB con una relación agua/cemento de 0,45. En la Tabla N°6.24 se presenta la variación del ancho de las fisuras desarrolladas en los anillos confeccionados con el hormigón CPPB.

Tabla N°6.24 Control de fisuras para el hormigón CPPB 0,45

Hormigón CPPB A/C = 0,45 Anillo 1				Hormigón CPPB A/C = 0,45 Anillo 2			
edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)	edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)
0	0			0	0	0	0
13	0,2			13	0,05	13	0,05
16	0,3			16	0,05	16	0,1
18	0,35			18	0,05	18	0,15
20	0,4			20	0,05	20	0,2
23	0,4			23	0,05	23	0,25
25	0,4			25	0,075	25	0,25
26	0,45			26	0,075	26	0,3
28	0,55			28	0,1	28	0,3

Con los datos de la Tabla N°6.24 se obtienen los Gráficos N°6.28 y 6.29, en donde se muestra la variación en el tiempo de las fisuras desarrolladas por el hormigón CPPB.

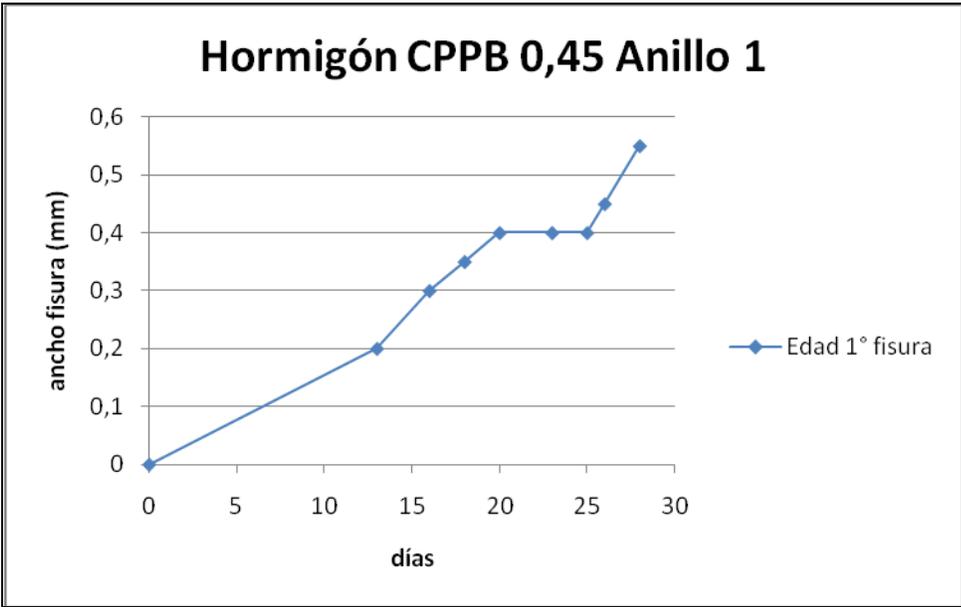


Gráfico N°6.28 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPPB 0,45 anillo 1

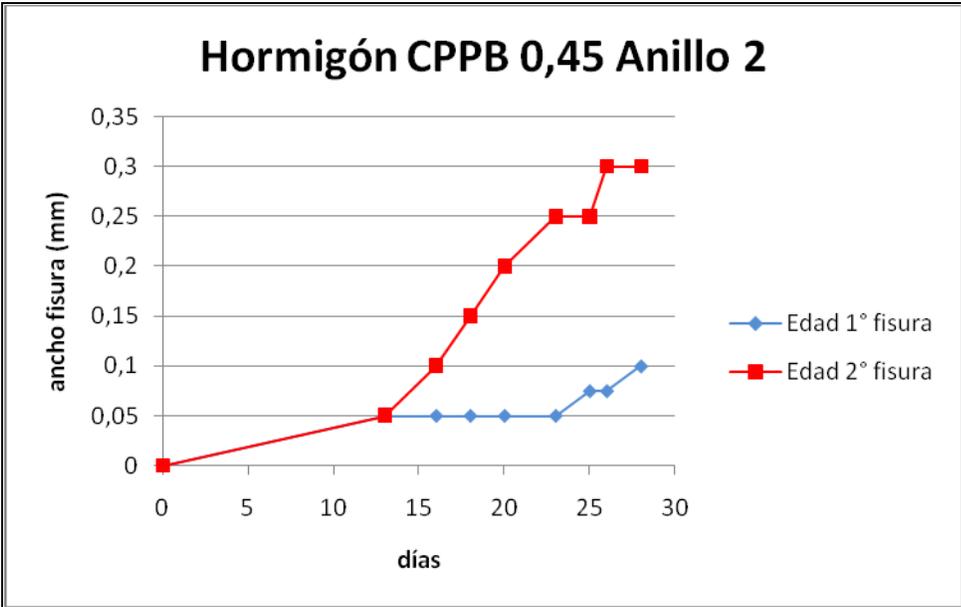


Gráfico N°6.29 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPPB 0,45 anillo 2

En la Tabla N°6.25 se presenta un resumen de las Tablas N°5.44, 5.45, 5.46 y N°5.47 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para el hormigón confeccionado con el cemento CPPB con una relación agua/cemento de 0,55. En la Tabla N°6.25 se presenta la variación del ancho de las fisuras desarrolladas en los anillos confeccionados con el hormigón CPPB.

Tabla N°6.25 Control de fisuras para el hormigón CPPB 0,55

Hormigón CPPB A/C = 0,55 Anillo 1				Hormigón CPPB A/C = 0,55 Anillo 2			
edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)	edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
13	0,05	18	0,05	18	0,05	21	0,05
16	0,05	19	0,075	19	0,05	23	0,05
18	0,05	21	0,1	21	0,075	25	0,1
19	0,075	23	0,15	23	0,1	28	0,1
21	0,15	25	0,2	25	0,1		
23	0,15	28	0,2	28	0,15		
25	0,2						
28	0,2						

Con los datos de la Tabla N°6.25 se obtienen los Gráficos N°6.30 y 6.31, en donde se muestra la variación en el tiempo de las fisuras desarrolladas por el hormigón CPPB.

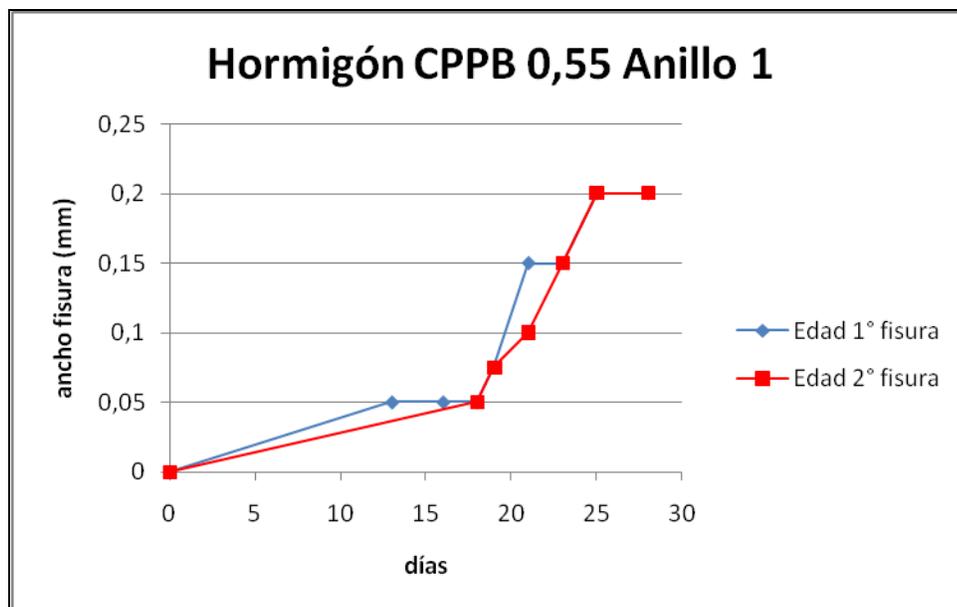


Gráfico N°6.30 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPPB 0,55 anillo 1

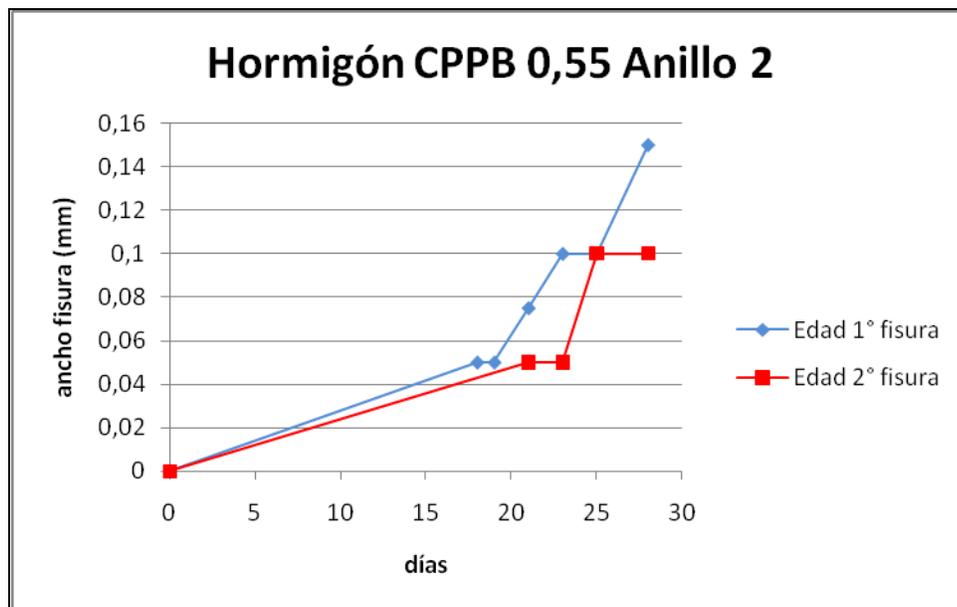


Gráfico N°6.31 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPPB 0,55 anillo 2

6.3.3.4 Hormigón CPPC

En la Tabla N°6.26 se presenta un resumen de las Tablas N°5.58, 5.49, 5.50 y 5.51 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para el hormigón confeccionado con el cemento CPPC con una relación agua/cemento de 0,45. En la Tabla N°6.26 se presenta la variación del ancho de las fisuras desarrolladas en los anillos confeccionados con el hormigón CPPC.

Tabla N°6.26 Control de fisuras para el hormigón CPPC 0,45

Hormigón CPPC A/C = 0,45 Anillo 1				Hormigón CPPC A/C = 0,45 Anillo 2			
edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)	edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)
0	0	0	0	0	0	0	0
8	0,1	8	0,05	8	0,05	8	0,1
10	0,2	10	0,15	10	0,2	10	0,1
11	0,2	11	0,15	11	0,2	11	0,15
14	0,25	14	0,175	14	0,3	14	0,15
15	0,3	15	0,175	15	0,3	15	0,15
16	0,3	16	0,2	16	0,3	16	0,15
17	0,3	17	0,2	17	0,35	17	0,15
18	0,35	18	0,2	18	0,35	18	0,15
21	0,35	21	0,2	21	0,4	21	0,15
23	0,35	23	0,2	23	0,45	23	0,15
25	0,35	25	0,2	25	0,45	25	0,15
28	0,45	28	0,25	28	0,5	28	0,15

Con los datos de la Tabla N°6.26 se obtienen los Gráficos N°6.32 y 6.33, en donde se muestra la variación en el tiempo de las fisuras desarrolladas por el hormigón CPPC.

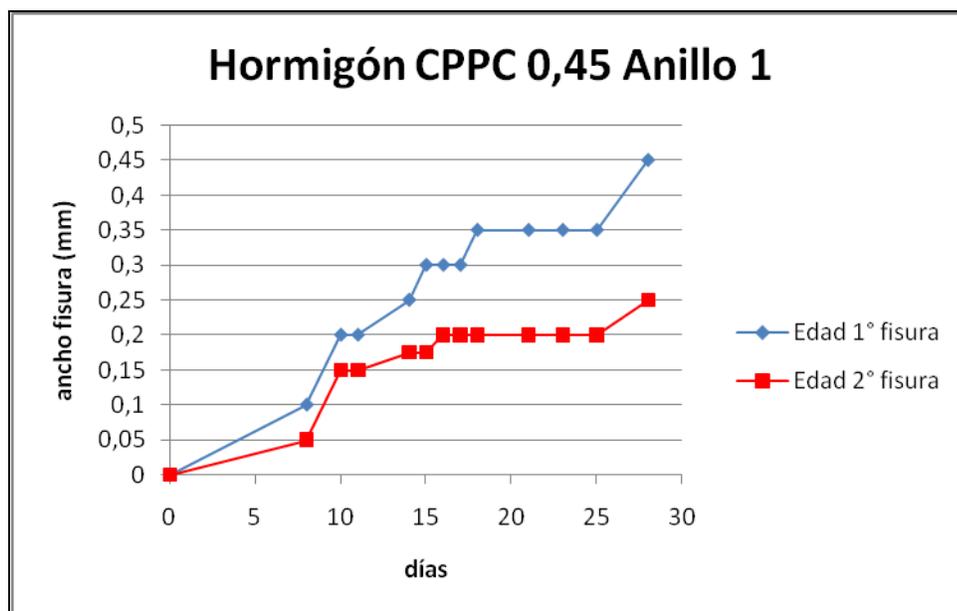


Gráfico N°6.32 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPPC 0,45 anillo 1

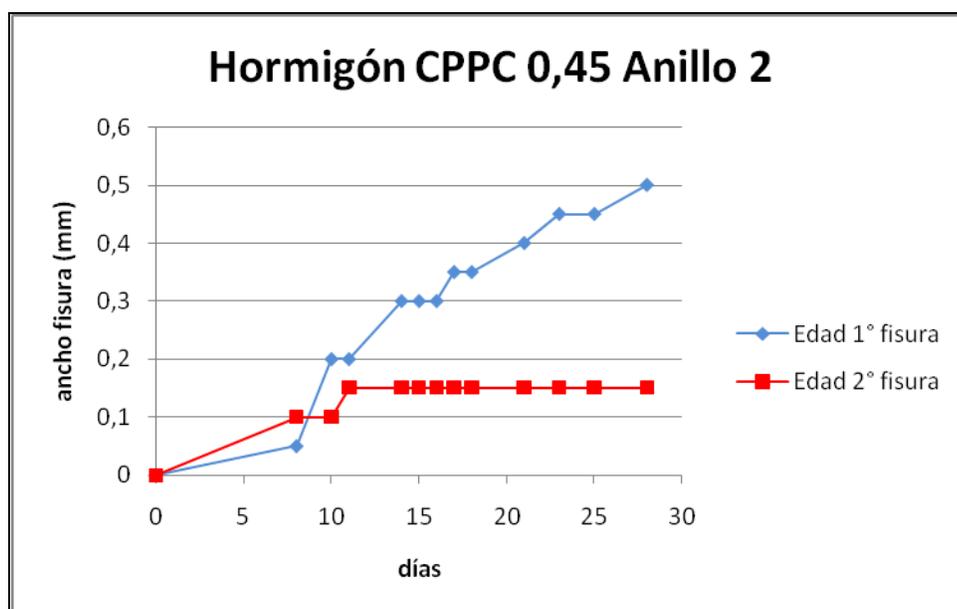


Gráfico N°6.33 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPPC 0,45 anillo 2

En la Tabla N°6.27 se presenta un resumen de las Tablas N°5.52, 5.53 y 5.54 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para el hormigón confeccionado con el cemento CPPC con una relación agua/cemento de 0,55. En la Tabla N°6.27 se presenta la variación del ancho de las fisuras desarrolladas en los anillos confeccionados con el hormigón CPPC.

Tabla N°6.27 Control de fisuras para el hormigón CPPC 0,55

Hormigón CPPC A/C = 0,55 Anillo 1				Hormigón CPPC A/C = 0,55 Anillo 2			
edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)	edad	Fisura N°1 (mm)	edad	Fisura N°2 (mm)
0	0	0	0	0	0		
8	0,05	8	0,075	8	0,075		
9	0,05	9	0,1	9	0,1		
10	0,1	10	0,1	10	0,2		
11	0,1	11	0,1	11	0,2		
14	0,15	14	0,2	14	0,3		
16	0,15	16	0,2	16	0,3		
18	0,15	18	0,25	18	0,35		
21	0,15	21	0,25	21	0,4		
22	0,15	22	0,25	22	0,4		
23	0,15	23	0,25	23	0,4		
25	0,2	25	0,25	25	0,45		
28	0,25	28	0,25	28	0,6		

Con los datos de la Tabla N°6.27 se obtienen los Gráficos N°6.34 y 6.35, en donde se muestra la variación en el tiempo de las fisuras desarrolladas por el hormigón CPPC.

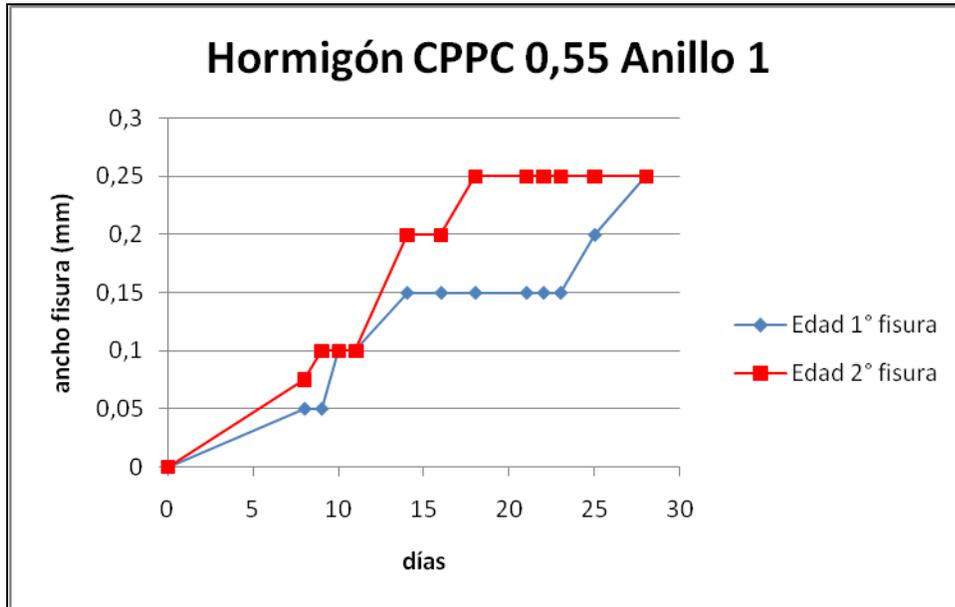


Gráfico N°6.34 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPPC 0,55 anillo 1

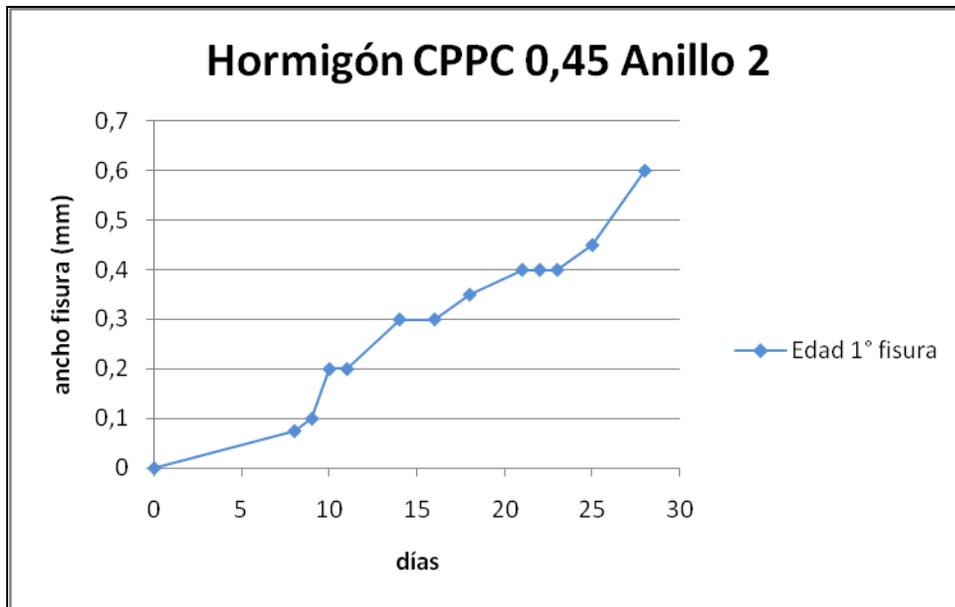


Gráfico N°6.35 Variación en el tiempo del ancho de fisura para el hormigón CPPC 0,55 anillo 2

En la Tabla N°6.28 se presenta un cuadro resumen con el tiempo promedio en días desde que se confecciona el hormigón hasta que visualmente se detecta la fisura en la probeta, para la confección de esta tabla se utilizaron los datos obtenidos en 5.3.3.

Tabla N°6.28 Tiempo promedio en aparecer la fisura en los hormigones estudiados

Tiempo en aparecer la fisura (días)		
Tipo de hormigón	Relación A/C	
	0,45	0,55
CPN	14,67	15,75
CPPA	15,00	18,75
CPPB	13,00	17,50
CPPC	8,00	8,00

Con los datos de la Tabla N°6.28 se obtiene el Gráfico N°6.36 donde se muestra el tiempo promedio en aparecer la fisura para cada hormigón estudiado.

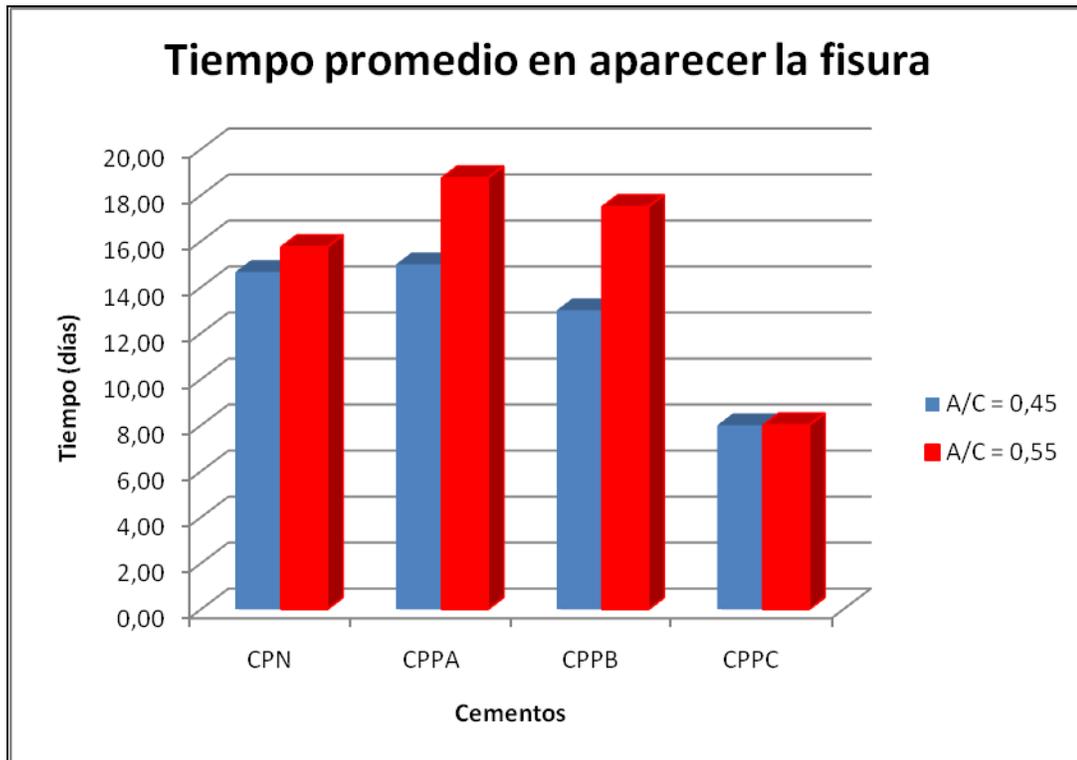


Gráfico N°6.36 Tiempo promedio en aparecer la fisura en los hormigones estudiados

En la Tabla N°6.29 se presenta un cuadro resumen con el promedio del ancho de las fisuras de cada anillo a los 28 días de edad desde que se confecciona el hormigón.

Tabla N°6.29 Promedio del ancho de las fisuras de cada anillo a los 28 días

Tipo de hormigón	Ancho de fisura (mm)	
	Relación A/C	
	0,45	0,55
CPN	0,4	0,33
CPPA	0,375	0,33
CPPB	0,48	0,38
CPPC	0,68	0,55

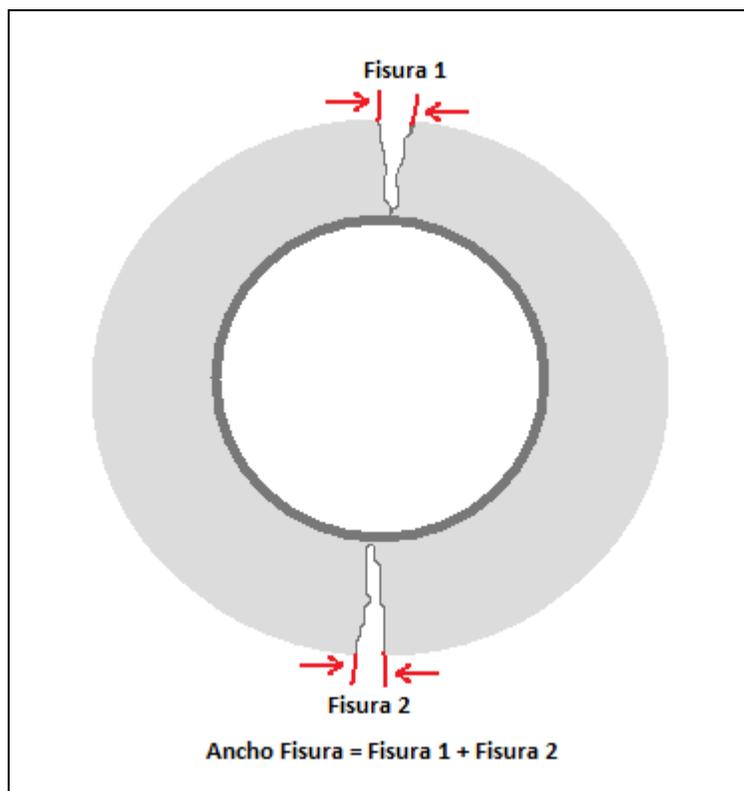


Figura N°6.1 Esquema del Ancho de fisura para un anillo a los 28 días

Con los datos de la Tabla N°6.29 se obtiene el Gráfico N°6.37 donde se muestra el promedio del ancho de las fisuras de cada anillo a los 28 días de edad.

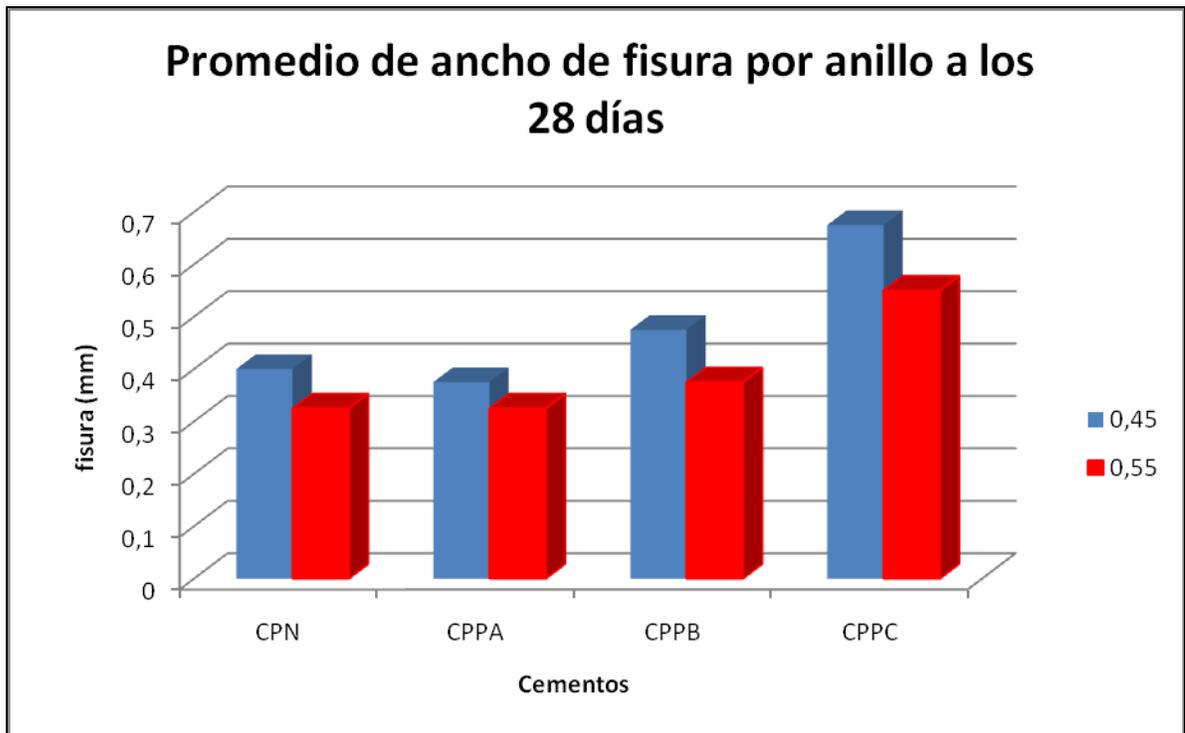


Gráfico N°6.37 Promedio del ancho de las fisuras a los 28 días

6.3.3.5 Análisis

Lo primero es mencionar que todas las probetas ensayadas se fisuraron dentro del tiempo que duraba el ensayo. A lo largo del ensayo se observó que en 12 de los 16 anillos del ensayo de retracción restringida se desarrollaron 2 fisuras, las cuales estaban ubicadas diametralmente opuestas una de la otra, para aquellos anillos en los cuales se observó sólo una fisura, el ancho de ésta era casi equivalente al de las dos fisuras que aparecieron en el otro anillo, las cuales si se sumaban mostraban un ancho equivalente al anillo con una fisura.

Estas fisuras crecieron a lo largo del tiempo y se estabilizaron al final del ensayo, pero esto no quiere decir que las fisuras causadas por la retracción no sigan creciendo en el tiempo, ya que el proceso de retracción continúa desarrollándose a lo largo del tiempo.

En cuanto a los datos de las Tablas N°6.28 y Tabla N°6.29 se aprecia que la relación agua/cemento influye en que la edad de fisuración del hormigón, siendo más tardía para la relación $A/C = 0,55$ y que al ancho de la fisura sea menor, dado que la deformación de retracción por secado está principalmente relacionada con la remoción de agua absorbida de la pasta de cemento hidratada, los anillos con mayor relación agua/cemento presentan una edad mayor en aparecer la fisura. La clase de cemento afecta también la evolución de la retracción por secado del hormigón, de modo que los hormigones confeccionados con cemento portland o con un menor contenido de adición de puzolana tienen una evolución más lenta que los hormigones confeccionados con un cemento portland puzolánico, de este modo el hormigón confeccionado con el cemento comercial CPPC, presenta la edad de aparición de fisura más temprana la cual fue creciendo gradualmente en el tiempo. En cuanto al ancho de las fisuras a los 28 días de edad de las probetas se observa que el comportamiento de los cementos con adición puzolánica tiende a presentar un ancho promedio de fisura mayor mientras más alta sea la adición de puzolana al cemento portland utilizado en la confección del hormigón.

CAPITULO 7

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

- El trabajo de realizar cementos de laboratorio para la investigación nos entrega información directa de la influencia de la puzolana en el cemento portland puro, ya que la única diferencia entre los cementos CPN, CPPA y CPPB es el contenido de adición puzolánica.
- En general, el método empleados para medir la retracción restringida de los hormigones es eficiente.
- En cuanto a los ensayos físicos y químicos realizados a los cementos utilizados nos entregaron la información para verificar que los cementos experimentales confeccionados, al igual que los cementos comerciales usados en la investigación, cumplían con los requisitos de la norma chilena.
- Cuanto mayor es el contenido de puzolana en el cemento mayor cantidad de agua se requiere para alcanzar la consistencia normal.
- La adición puzolánica no favorece la propiedad de resistencia a la compresión del cemento endurecido, hecho que es especialmente notorio en los cementos puzolánicos experimentales (CPPA y CPPB). Sin embargo, esta pérdida de resistencia debido a la presencia de puzolana puede ser reducida en el largo plazo.
- La incorporación de puzolana en el cemento no favorece la retención del agua de amasado de las probetas de hormigón cuando éstas son expuestas a condiciones de secado. La mayor porosidad total que presentan los hormigones confeccionados con cementos del alta adición puzolánica y la elevada pérdida de agua de dichos hormigones durante los primeros días de exposición a condiciones de secado, podrían explicar las variaciones significativas de longitud que muestran las probetas ensayadas a retracción libre. Sin embargo, en algunos casos los cementos puzolánicos pueden desarrollar en el largo plazo retracciones de longitud comparativamente igual o menor a la alcanzada por el cemento portland.

Esto se puede deber a que la adición puzolánica forma compuestos de estructura similar a la tobermorita sólo en el mediano y largo plazo. Lo anterior no es válido para el hormigón confeccionado con el cemento portland puzolánico comercial (CPPC), en cuyo caso la retracción libre de las probetas resultan superiores.

- Independiente de las diferentes características de los cementos, todas las probetas de retracción libre tienen un comportamiento parecido en cuanto a que presentan una primera retracción, después un leve hinchamiento y finalmente una segunda retracción.
- Para hormigones confeccionados con cemento portland puzolánico la retracción por secado se desarrolla inicialmente a mayor velocidad y luego se desacelera antes que en hormigones con cemento portland, probablemente debido al incremento de la impermeabilidad en el tiempo de hormigones con cemento portland puzolánico. Este comportamiento observado podría implicar un mayor riesgo de fisuración del hormigón con cemento portland puzolánico.
- En cuanto a la influencia de la relación agua/cemento se aprecia en la mayoría de los ensayos de retracción no hubo una gran diferencia entre los resultados con distintas relaciones de agua/cemento, este comportamiento puede ser por dos motivos, uno es que realmente no influye mucho este factor o también puede ser que las relaciones de agua/cemento estudiadas son muy cercanas en cuanto a su valor.
- Los resultados obtenidos en esta investigación, permiten dar algunas recomendaciones para lograr un mejor conocimiento del fenómeno de la retracción de los cementos y su relación e influencia en el comportamiento de los hormigones fabricados con ellos.

Estas recomendaciones son:

- Sería de interés extender al estudio cementos con adiciones superior al 30% del peso del cemento.
- Estudiar un rango más amplio de la relación agua/cemento, para poder estudiar más a fondo su influencia en la retracción de los hormigones.

- En base a todos los resultados obtenidos en los diferentes ensayos se puede concluir que el comportamiento de los hormigones confeccionados con cementos de laboratorio fue distinto al comportamiento del hormigón confeccionado con el cemento portland puro, como la única diferencia entre estos cementos es la adición de puzolana. Podemos decir que la puzolana influye directamente en los cambios físicos y químicos del hormigón confeccionado con determinado cemento. Por lo tanto, en los hormigones la adición puzolánica influye en la fisuración por retracción, dado que los hormigones confeccionados con el cemento puzolánico presentan una retracción de hasta un 70% más de ancho de fisura que los hormigones confeccionados con cemento portland. Con esto se cumple el objetivo principal de esta investigación que era determinar la influencia de la puzolana en la fisuración por retracción que experimentan hormigones fabricados con distintos cementos.

CAPITULO 8

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Bobadilla, Mauricio A., 1990. “Caracterización de una puzolana y optimización de su uso en cementos”. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
2. Brito Ávila, Sergio Alfredo. 2003. “Recomendaciones para el control del agrietamiento por retracción en muros y losas de hormigón armado” Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
3. Cavieres, Guillermo A. 2002. “Fenómenos de contracción en morteros”. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
4. David Diban, Jorge Alberto. 1988.” Efecto de las adiciones puzolánicas en la retracción de pastas y morteros de cemento en sus primeras edades” Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
5. González Correa, Jorge. 1982. “Estudio comparativo de retracción en hormigón y mortero” Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
6. Joisel, Albert., 1975 “Fisuras y grietas en morteros y hormigones: sus causas y remedios”.
7. Mehta, P. Kumar y Monteiro, Paulo J. M. 1998. “Concreto: estructura, propiedades y materiales”
8. Neville, Adam M., 1977. “Tecnología del Concreto”
9. Norma ASTM C1581-04 Standard Test Method for Determining at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage.

10. Norma NCh 147 Of69 “Cementos – Análisis Químico” Instituto Nacional de Normalización.
11. Norma NCh 148 Of68 “Cemento. Terminología, clasificación y especificaciones generales” Instituto Nacional de Normalización.
12. Norma NCh 151 Of69 “Cemento. Método de determinación de la consistencia normal” Instituto Nacional de Normalización.
13. Norma NCh 152 Of71 “Cemento. Método de determinación del tiempo de fraguado” Instituto Nacional de Normalización.
14. Norma NCh 154 Of69 “Cemento. Determinación del peso específico relativo” Instituto Nacional de Normalización.
15. Norma NCh 158 Of67 “Cementos: ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento” Instituto Nacional de Normalización.
16. Norma NCh 159 Of70 “Cemento. Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blaine” Instituto Nacional de Normalización.
17. Revista Geológica de Chile N°23 páginas 39-52 1984.
18. Sepúlveda Montiglio, Esteban Andrés. 2004. “Cemento con adiciones puzolánicas: influencia de la molienda conjunta en la eficiencia de estas adiciones” Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

ANEXO A
DOSIFICACION DE LOS HORMIGONES

Para determinar las dosificaciones de los hormigones se utilizó la norma ACI 211.1.

A.1 Relación A/C = 0,45

A.1.1 Hormigón CPN

	MF	Densidad a.s. [kg/m3]	p.e.	Absorción	Humedad
Agregado Fino	2,97		2,65	0,7	4,2
Agregado Grueso		1512	2,7	0,5	0,9
CPN			3,14		

	A/C	0,45
	Asentamiento [mm]	75-100
	Tamaño máximo [mm]	12,5
Tabla		
A1,5,3,3	Contenido de Agua [kg/m3]	216
A1,5,3,4 (a)	Esfuerzo a compresión [Mpa]	37
	Contenido de Cemento [kg/m3]	480
A1,5,3,6	Cantidad de Agregado grueso [kg]	847
	Agregado Fino	
	Mass basis	
A1,5,3,7,1	masa total [kg]	2310
	masa de agregado fino [kg]	767
	Absolute Volume Basis	
	Volumen de agua [m3]	0,216
	Volumen de cemento [m3]	0,153
	Volumen de agregado grueso [m3]	0,314
	Volumen de aire atrapado [m3]	0,01
	Volumen total parcial [m3]	0,692
	Volumen de agregado fino [m3]	0,308
	masa de agregado fino [kg]	815
	Agregado grueso (húmedo) [kg]	854
	Agregado fino (húmedo) [kg]	800

Corrección por Abs. y Hum. [kg]	m3	52 L.
Agua [kg]	186	9,7
Cemento CPN [kg]	480	25,0
Agregado grueso (húmedo) [kg]	854	44,4
Agregado fino (húmedo) [kg]	800	41,6
TOTAL [kg]	2320	120,6

A.1.2 Hormigón CPPA

	MF	Densidad a.s. [kg/m3]	p.e.	Absorción	Humedad
Agregado Fino	2,97		2,66	0,7	2,9
Agregado Grueso		1512	2,7	0,5	1,2
CPPA			2,95		

	A/C	0,45
	Asentamiento [mm]	75-100
	Tamaño máximo [mm]	12,5
Tabla		
A1,5,3,3	Contenido de Agua [kg/m3]	216
A1,5,3,4 (a)	Esfuerzo a compresión [Mpa]	37
	Contenido de Cemento [kg/m3]	480
A1,5,3,6	Cantidad de Agregado grueso [kg]	847
A1,5,3,7,1	Agregado Fino	
	Mass basis	
	masa total [kg]	2310
	masa de agregado fino [kg]	767
	Absolute Volume Basis	
	Volumen de agua [m3]	0,216
	Volumen de cemento [m3]	0,163
	Volumen de agregado grueso [m3]	0,314
	Volumen de aire atrapado [m3]	0,01
	Volumen total parcial [m3]	0,702
	Volumen de agregado fino [m3]	0,298
	masa de agregado fino [kg]	792
	Agregado grueso (húmedo) [kg]	857
	Agregado fino (húmedo) [kg]	790

Corrección por Abs. y Hum. [kg]	m3	52 L.
Agua [kg]	193	10,0
Cemento CPN [kg]	480	25,0
Agregado grueso (húmedo) [kg]	857	44,6
Agregado fino (húmedo) [kg]	790	41,1
TOTAL [kg]	2320	92,8

A.1.3 Hormigón CPPB

	MF	Densidad a.s. [kg/m3]	p.e.	Absorción	Humedad
Agregado Fino	2,97		2,66	0,7	2,8
Agregado Grueso		1512	2,7	0,5	0,9
CPPB			2,87		

	A/C	0,45
	Asentamiento [mm]	75-100
	Tamaño máximo [mm]	12,5
Tabla		
A1,5,3,3	Contenido de Agua [kg/m3]	216
A1,5,3,4 (a)	Esfuerzo a compresión [Mpa]	37
	Contenido de Cemento [kg/m3]	480
A1,5,3,6	Cantidad de Agregado grueso [kg]	847
A1,5,3,7,1	Agregado Fino	
	Mass basis	
	masa total [kg]	2310
	masa de agregado fino [kg]	767
	Absolute Volume Basis	
	Volumen de agua [m3]	0,216
	Volumen de cemento [m3]	0,167
	Volumen de agregado grueso [m3]	0,314
	Volumen de aire atrapado [m3]	0,01
	Volumen total parcial [m3]	0,707
	Volumen de agregado fino [m3]	0,293
	masa de agregado fino [kg]	780
	Agregado grueso (húmedo) [kg]	854
	Agregado fino (húmedo) [kg]	789

Corrección por Abs. y Hum. [kg]	m3	52 L.
Agua [kg]	197	10,2
Cemento CPN [kg]	480	25,0
Agregado grueso (húmedo) [kg]	854	44,4
Agregado fino (húmedo) [kg]	789	41,0
TOTAL [kg]	2320	92,8

A.1.4 Hormigón CPPC

	MF	Densidad a.s. [kg/m3]	p.e.	Absorción	Humedad
Agregado Fino	2,97		2,65	0,7	4,2
Agregado Grueso		1512	2,7	0,5	1,8
CPPC			2,84		

	A/C	0,45
	Asentamiento [mm]	75-100
	Tamaño máximo [mm]	12,5
Tabla		
A1,5,3,3	Contenido de Agua [kg/m3]	216
A1,5,3,4 (a)	Esfuerzo a compresión [Mpa]	37
	Contenido de Cemento [kg/m3]	480
A1,5,3,6	Cantidad de Agregado grueso [kg]	847
A1,5,3,7,1	Agregado Fino	
	Mass basis	
	masa total [kg]	2310
	masa de agregado fino [kg]	767
	Absolute Volume Basis	
	Volumen de agua [m3]	0,216
	Volumen de cemento [m3]	0,169
	Volumen de agregado grueso [m3]	0,314
	Volumen de aire atrapado [m3]	0,01
	Volumen total parcial [m3]	0,709
	Volumen de agregado fino [m3]	0,291
	masa de agregado fino [kg]	772
	Agregado grueso (húmedo) [kg]	862
	Agregado fino (húmedo) [kg]	800

Corrección por Abs. y Hum. [kg]	m3	52 L.
Agua [kg]	178	9,3
Cemento CPN [kg]	480	25,0
Agregado grueso (húmedo) [kg]	862	44,8
Agregado fino (húmedo) [kg]	800	41,6
TOTAL [kg]	2320	120,6

A.2 Relación A/C = 0,55

A.2.1 Hormigón CPN

	MF	Densidad a.s. [kg/m3]	p.e.	Absorción	Humedad
Agregado Fino	2,97		2,65	0,7	3,3
Agregado Grueso		1512	2,7	0,5	0,8
CPN			3,14		

	A/C	0,55
	Asentamiento [mm]	75-100
	Tamaño máximo [mm]	12,5
Tabla		
A1,5,3,3	Contenido de Agua [kg/m3]	216
A1,5,3,4 (a)	Esfuerzo a compresión [Mpa]	27
	Contenido de Cemento [kg/m3]	393
A1,5,3,6	Cantidad de Agregado grueso [kg]	847
	Agregado Fino	
	Mass basis	
A1,5,3,7,1	masa total [kg]	2310
	masa de agregado fino [kg]	854
	Absolute Volume Basis	
	Volumen de agua [m3]	0,216
	Volumen de cemento [m3]	0,125
	Volumen de agregado grueso [m3]	0,314
	Volumen de aire atrapado [m3]	0,01
	Volumen total parcial [m3]	0,665
	Volumen de agregado fino [m3]	0,335
	masa de agregado fino [kg]	888
	Agregado grueso (húmedo) [kg]	853
	Agregado fino (húmedo) [kg]	882

Corrección por Abs. y Hum. [kg]	m3	52 L.
Agua [kg]	191	9,9
Cemento CPN [kg]	393	20,4
Agregado grueso (húmedo) [kg]	853	44,4
Agregado fino (húmedo) [kg]	882	45,9
TOTAL [kg]	2320	120,7

A.2.2 Hormigón CPPA

	MF	Densidad a.s. [kg/m3]	p.e.	Absorción	Humedad
Agregado Fino	2,97		2,66	0,7	2,1
Agregado Grueso		1512	2,7	0,5	0,8
CPPA			2,95		

	A/C	0,55
	Asentamiento [mm]	75-100
	Tamaño máximo [mm]	12,5
Tabla		
A1,5,3,3	Contenido de Agua [kg/m3]	216
A1,5,3,4 (a)	Esfuerzo a compresión [Mpa]	27
	Contenido de Cemento [kg/m3]	393
A1,5,3,6	Cantidad de Agregado grueso [kg]	847
A1,5,3,7,1	Agregado Fino	
	Mass basis	
	masa total [kg]	2310
	masa de agregado fino [kg]	854
	Absolute Volume Basis	
	Volumen de agua [m3]	0,216
	Volumen de cemento [m3]	0,133
	Volumen de agregado grueso [m3]	0,314
	Volumen de aire atrapado [m3]	0,01
	Volumen total parcial [m3]	0,673
	Volumen de agregado fino [m3]	0,327
	masa de agregado fino [kg]	870
	Agregado grueso (húmedo) [kg]	853
	Agregado fino (húmedo) [kg]	872

Corrección por Abs. y Hum. [kg]	m3	52 L.
Agua [kg]	201	10,5
Cemento CPN [kg]	393	20,4
Agregado grueso (húmedo) [kg]	853	44,4
Agregado fino (húmedo) [kg]	872	45,4
TOTAL [kg]	2320	92,8

A.2.3 Hormigón CPPB

	MF	Densidad a.s. [kg/m3]	p.e.	Absorción	Humedad
Agregado Fino	2,97		2,66	0,7	2,5
Agregado Grueso		1512	2,7	0,5	1,2
CPPB			2,87		

	A/C	0,55
	Asentamiento [mm]	75-100
	Tamaño máximo [mm]	12,5
Tabla		
A1,5,3,3	Contenido de Agua [kg/m3]	216
A1,5,3,4 (a)	Esfuerzo a compresión [Mpa]	27
	Contenido de Cemento [kg/m3]	393
A1,5,3,6	Cantidad de Agregado grueso [kg]	847
A1,5,3,7,1	Agregado Fino	
	Mass basis	
	masa total [kg]	2310
	masa de agregado fino [kg]	854
	Absolute Volume Basis	
	Volumen de agua [m3]	0,216
	Volumen de cemento [m3]	0,137
	Volumen de agregado grueso [m3]	0,314
	Volumen de aire atrapado [m3]	0,01
	Volumen total parcial [m3]	0,677
	Volumen de agregado fino [m3]	0,323
	masa de agregado fino [kg]	860
	Agregado grueso (húmedo) [kg]	857
	Agregado fino (húmedo) [kg]	876

Corrección por Abs. y Hum. [kg]	m3	52 L.
Agua [kg]	195	10,1
Cemento CPN [kg]	393	20,4
Agregado grueso (húmedo) [kg]	857	44,6
Agregado fino (húmedo) [kg]	876	45,5
TOTAL [kg]	2320	92,8

A.2.4 Hormigón CPPC

	MF	Densidad a.s. [kg/m3]	p.e.	Absorción	Humedad
Agregado Fino	2,97		2,65	0,7	5,2
Agregado Grueso		1512	2,7	0,5	0,8
CPPC			2,84		

	A/C	0,55
	Asentamiento [mm]	75-100
	Tamaño máximo [mm]	12,5
Tabla		
A1,5,3,3	Contenido de Agua [kg/m3]	216
A1,5,3,4 (a)	Esfuerzo a compresión [Mpa]	27
	Contenido de Cemento [kg/m3]	393
A1,5,3,6	Cantidad de Agregado grueso [kg]	847
	Agregado Fino	
	Mass basis	
A1,5,3,7,1	masa total [kg]	2310
	masa de agregado fino [kg]	854
	Absolute Volume Basis	
	Volumen de agua [m3]	0,216
	Volumen de cemento [m3]	0,138
	Volumen de agregado grueso [m3]	0,314
	Volumen de aire atrapado [m3]	0,01
	Volumen total parcial [m3]	0,678
	Volumen de agregado fino [m3]	0,322
	masa de agregado fino [kg]	853
	Agregado grueso (húmedo) [kg]	853
	Agregado fino (húmedo) [kg]	899

Corrección por Abs. y Hum. [kg]	m3	52 L.
Agua [kg]	175	9,1
Cemento CPN [kg]	393	20,4
Agregado grueso (húmedo) [kg]	853	44,4
Agregado fino (húmedo) [kg]	899	46,7
TOTAL [kg]	2320	120,7

TABLE A1.5.33 – APPROXIMATE MIXING WATER AND AIR CONTENT REQUIREMENTS FOR DIFFERENT SLUMPS AND NOMINAL MAXIMUM SIZES OF AGGREGATES (SI)

Water, Kg/m ³ of concrete for indicated nominal maximum sizes of aggregate								
Slump, mm	9.5*	12.5*	19*	25*	37.5*	50†*	75††	150††
Non-air-entrained concrete								
25 to 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 to 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 to 175	243	228	216	202	190	178	160	—
Approximate amount of entrapped air in non-air-entrained concrete, percent	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Air-entrained concrete								
25 to 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 to 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 to 175	216	205	197	184	174	166	154	—
Recommended average total air content, percent for level of exposure:								
Mild exposure	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5****	1.0***††
Moderate exposure	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5****	3.0****
Extreme exposure††	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5****	4.0****

TABLE A1.5.3.4(a) – RELATIONSHIPS BETWEEN WATER-CEMENT RATIO AND COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE (SI)

Compressive strength at 28 days, MPa*	Water-cement ratio, by mass	
	Non-air-entrained concrete	Air-entrained concrete
40	0.42	—
35	0.47	0.39
30	0.54	0.45
25	0.61	0.52
20	0.69	0.60
15	0.79	0.70

TABLE A1.5.3.6 – VOLUME OF COARSE AGGREGATE PER UNIT OF VOLUME OF CONCRETE (SI)

Nominal maximum size of aggregate, mm	Volume of dry-rodded coarse aggregate* per unit volume of concrete for different fineness moduli† of fine aggregate			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.60
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.80	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

**TABLE A1.5.3.7.1 – FIRST ESTIMATE OF
MASS OF FRESH CONCRETE (SI)**

Nominal maximum size of aggregate, mm	First estimate of concrete unit mass, kg/m ³ *	
	Non-air-entrained concrete	Air-entrained concrete
9.5	2280	2200
12.5	2310	2230
19	2345	2275
25	2380	2290
37.5	2410	2350
50	2445	2345
75	2490	2405
150	2530	2435