



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL**

**INFLUENCIA DE LA PUZOLANA EN LA FISURACIÓN POR
RETRACCIÓN EN LOS HORMIGONES CHILENOS**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL**

CRISTIÁN MAURICIO HERRERA ARRIAGADA

**PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFÍN ARIZTIA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ATILANO LAMANA POLA
GUILLERMO CAVIERES PIZARRO**

**SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2007**

**RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: CRISTIÁN HERRERA A.
FECHA: 28/08/2007
PROF. GUÍA: FEDERICO DELFÍN A.**

**“Influencia de la puzolana en la fisuración por retracción
en los hormigones chilenos.”**

El objetivo principal de este Trabajo de Título fue estudiar la influencia de la puzolana en la fisuración por retracción experimentada en los hormigones chilenos.

Para cumplir con el objetivo se confeccionaron dos tipos de cementos de laboratorio para lo cual se utilizó cemento portland comercial según norma NCh 148 Of68. A los cementos de laboratorio se les agregó puzolana molida a $7000 \text{ cm}^2/\text{g}$ confeccionando cementos con 20 y 30 por ciento de adición puzolánica. Además en forma complementaria se incorporaron al estudio cementos comerciales, el cemento portland utilizado para confeccionar los cementos de laboratorio y un cemento portland puzolánico. Así en esta investigación se utilizaron cuatro tipos de cementos, a saber: un cemento con cero por ciento de adición puzolánica (cemento portland); un cemento con 20 por ciento de adición puzolánica; un cemento con 30 por ciento de adición puzolánica; y un cemento portland puzolánico comercial con un 28 por ciento aproximadamente de adición puzolánica.

Para caracterizar a los cementos se determinaron las propiedades físicas y químicas que establece la norma NCh 148 Of68. Se debió además disponer de las instalaciones y equipamientos para realizar el método de ensayo ASTM C 1581 04 para medir retracción restringida.

En el estudio, que se hizo a nivel de morteros, se confeccionaron probetas para medir retracción libre, retracción restringida, resistencia cilíndrica a compresión y módulo elástico a distintas edades para analizar el comportamiento en el tiempo de los morteros. Todas las probetas se curaron de igual forma y se las mantuvo a lo largo del estudio en una cámara seca ($23^\circ\text{C} \pm 2$ y $50\% \pm 4$ HR) asegurando igualdad de condiciones ambientales durante todo el periodo de ensayo.

Los resultados de los ensayos indicaron que los morteros confeccionados con cementos portland puzolánicos desarrollaron a lo largo del periodo de la investigación un mayor grado de fisuración con respecto al cemento portland, además al comparar los resultados entre los cementos puzolánicos se aprecia una diferencia atribuible al proceso de fabricación.

Agradecimientos.

Siempre que se da inicio a un proyecto se tienen claro los objetivos que se quieren cumplir, la mayoría de las veces estos objetivos van creciendo y tomando forma a medida que el proyecto avanza, los problemas que van surgiendo a pesar que se vean complicados se logran resolver con la ayuda de personas que se van conociendo en el camino.

Estas palabras de agradecimiento las escribo a todas las personas que desinteresadamente me ayudaron a dar forma a este Trabajo de Título, ayudándome directa o indirectamente en él. A mis padres, mis hermanos, mis amigos y finalmente a la gente que conocí durante el Trabajo de Título y que me brindo su ayuda aconsejándome y guiándome.

Gracias a mi profesor guía Federico Delfín A., por su disponibilidad, cooperación y aporte para que este Trabajo de Título llegara a su fin.

Gracias al apoyo otorgado por IDIEM para realizar ensayos, ocupar instalaciones y por proveerme de materias primas.

Gracias al apoyo del Departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile por la facilitación de equipos.

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

Capítulo 1	Introducción.....	9
1.1	Introducción general.....	9
1.2	Objetivos.....	10
1.3	Alcances.....	10
Capítulo 2	Cemento.....	11
2.1	Cemento portland.....	11
2.1.1	Composición química del cemento portland.....	11
2.1.2	Hidratación del cemento portland.....	12
2.1.2.1	Hidratación de los aluminatos.....	12
2.1.2.2	Hidratación de los silicatos.....	13
2.2	Cementos con adicción puzolánica.....	15
2.2.1	Puzolana.....	15
2.2.1.1	Clasificación de material puzolánico.....	15
2.2.1.1.1	Puzolanas naturales.....	15
2.2.1.1.2	Puzolanas artificiales.....	15
2.2.1.2	Puzolanas en Chile.....	16
2.2.1.3	Actividad puzolánica.....	16
2.2.2	Nomenclatura y normalización de cementos con adicción puzolánica.....	17
2.2.2.1	Cemento puzolánico.....	17
2.2.2.1.1	Clasificación.....	17
2.2.2.1.2	Requisitos químicos.....	18
2.2.2.1.3	Propiedades físicas y mecánicas.....	18
2.2.2.1.4	Aspectos económicos.....	18
2.2.2.1.5	Aspectos técnicos.....	19
2.2.3	Hidratación del cemento con adicción puzolánica.....	19
2.2.4	Propiedades de los cementos con adicción puzolánica.....	20
2.2.4.1	Calor de Hidratación.....	20
2.2.4.2	Resistencia.....	21
2.2.4.3	Durabilidad.....	22
2.2.4.3.1	Permeabilidad.....	22
2.2.4.3.2	Resistencia a los sulfatos y a los ambientes ácidos.....	23
2.2.4.3.3	Reacción álcali-árido.....	24
Capítulo 3	Estabilidad dimensional.....	25
3.1	Retracción plástica.....	25
3.2	Retracción autógena.....	26
3.3	Retracción por secado.....	26
3.3.1	Mecanismo de la retracción por secado.....	27
3.3.2	Factores que afectan la retracción.....	28
3.3.2.1	Cemento.....	28
3.3.2.2	Agua.....	29
3.3.2.3	Agregado.....	29
3.3.2.4	Aditivos y adiciones.....	32
3.3.2.5	Curado y las condiciones de almacenamiento.....	32
3.3.2.6	Geometría del elemento.....	34
3.4	Creep.....	35
3.4.1	Factores que influyen en el creep.....	39
3.4.1.1	Cemento.....	39
3.4.1.2	Agregado.....	40
3.4.1.3	Aditivos.....	42
3.4.1.4	Humedad relativa.....	43
3.4.1.5	Tiempo.....	44
3.4.1.6	Geometría del elemento.....	44

3.5	Fisuramiento inducido por la retracción.....	46
3.5.1	Factores que afectan el agrietamiento.....	48
3.5.1.1	Relación agua/cemento.....	48
3.5.1.2	Aditivos.....	48
3.5.1.3	Energía.....	48
3.6	Estudios Anteriores.....	49
Capítulo 4	Planteamiento del programa experimental.....	52
4.1	Planteamiento de la investigación.....	52
4.1.1	Variables del estudio.....	52
4.2	Materias primas.....	53
4.2.1	Cemento.....	53
4.2.2	Puzolana.....	53
4.2.3	Arena.....	53
4.2.4	Agua.....	54
4.3	Elaboración de cementos portland puzolánicos de laboratorio.....	54
4.3.1	Procesamiento de la puzolana.....	54
4.3.1.1	Secado.....	54
4.3.1.2	Molienda.....	55
4.3.1.3	Homogeneización y envasado.....	55
4.3.1.4	Caracterización de la puzolana.....	55
4.3.2	Cementos de laboratorio.....	56
4.3.2.1	Cemento portland puzolánico al 20%.....	56
4.3.2.1.1	Dosificación.....	56
4.3.2.1.2	Homogeneización y envasado.....	56
4.3.2.2	Cemento portland puzolánico al 30%.....	57
4.3.2.2.1	Dosificación.....	57
4.3.2.2.2	Homogeneización y envasado.....	57
4.4	Caracterización de los cementos.....	58
4.4.1	Ensayos físicos a cementos.....	58
4.4.1.1	Peso específico relativo.....	58
4.4.1.2	Superficie específica.....	58
4.4.1.3	Agua de consistencia normal.....	58
4.4.1.4	Tiempos de fraguado.....	59
4.4.2	Ensayos químicos a cementos.....	59
4.4.2.1	Pérdida por calcinación.....	59
4.4.2.2	Trióxido de azufre (SO ₃).....	59
4.4.2.3	Residuo insoluble.....	60
4.5	Ensayos para caracterización del comportamiento de los morteros.....	60
4.5.1	Resistencias mecánicas.....	60
4.5.2	Retracción libre.....	60
4.5.3	Retracción restringida.....	61
4.5.3.1	Implementación de Normativa.....	61
4.5.3.1.1	Aparatos.....	61
4.5.4	Módulo de elasticidad.....	62
Capítulo 5	Desarrollo experimental.....	63
5.1	Realización de ensayos.....	63
5.2	Fabricación de morteros.....	63
5.2.1	Materiales.....	63
5.2.2	Dosificación.....	63
5.2.3	Equipo.....	63
5.2.4	Preparación del mortero.....	64
5.3	Confección de probetas.....	64

5.3.1	Preparación de probetas.....	64
5.3.1.1	Retracción libre.....	64
5.3.1.2	Retracción restringida.....	65
5.3.1.3	Módulo de elasticidad.....	65
5.3.2	Llenado de probetas.....	65
5.3.2.1	Retracción libre.....	65
5.3.2.2	Retracción restringida.....	66
5.3.2.3	Módulo de elasticidad.....	66
5.3.3	Curado de las probetas.-.....	67
5.3.4	Desmolde.....	67
5.3.4.1	Retracción libre.....	67
5.3.4.2	Retracción restringida.....	67
5.3.4.3	Módulo de elasticidad.....	68
5.4	Ambiente de Prueba.....	68
5.5	Mediciones.....	70
5.5.1	Retracción libre.....	70
5.5.2	Retracción restringida.....	70
5.5.3	Módulo de Elasticidad.....	71
Capítulo 6	Resultados.....	73
6.1	Propiedades físicas.....	73
6.1.1	Peso específico relativo.....	73
6.1.1.1	Cemento CPN.....	73
6.1.1.2	Cemento CPPA.....	73
6.1.1.3	Cemento CPPB.....	74
6.1.1.4	Cemento CPPC.....	74
6.1.2	Superficie específica.....	74
6.1.2.1	Cemento CPN.....	74
6.1.2.2	Cemento CPPA.....	75
6.1.2.3	Cemento CPPB.....	75
6.1.2.4	Cemento CPPC.....	75
6.1.3	Agua de consistencia normal.....	76
6.1.4	Tiempos de fraguado.....	76
6.2	Propiedades químicas.....	77
6.2.1	Pérdida por calcinación.....	77
6.2.2	Trióxido de azufre.....	77
6.2.3	Residuo insoluble.....	77
6.3	Caracterización del comportamiento de los morteros.....	78
6.3.1	Resistencias mecánicas.....	78
6.3.1.1	Mortero CPN.....	78
6.3.1.2	Mortero CPPA.....	78
6.3.1.3	Mortero CPPB.....	79
6.3.1.4	Mortero CPPC.....	79
6.3.2	Retracción libre.....	80
6.3.2.1	Mortero CPN.....	80
6.3.2.2	Mortero CPPA.....	80
6.3.2.3	Mortero CPPB.....	81
6.3.2.4	Mortero CPPC.....	81
6.3.3	Retracción restringida.....	81
6.3.3.1	Mortero CPN.....	82
6.3.3.2	Mortero CPPA.....	83
6.3.3.3	Mortero CPPB.....	84
6.3.3.4	Mortero CPPC.....	85

6.3.4	Módulo de elasticidad.....	87
6.3.4.1	Mortero CPN.....	87
6.3.4.2	Mortero CPPA.....	88
6.3.4.3	Mortero CPPB.....	88
6.3.4.4	Mortero CPPC.....	89
Capítulo 7	Análisis de resultados.....	91
7.1	Propiedades físicas.....	91
7.1.1	Peso específico relativo.....	91
7.1.1.1	Tablas y gráficos.....	91
7.1.1.2	Análisis.....	92
7.1.2	Superficie específica.....	92
7.1.2.1	Tablas y gráficos.....	92
7.1.2.2	Análisis.....	93
7.1.3	Agua de consistencia normal.....	93
7.1.3.1	Tablas y gráficos.....	93
7.1.3.2	Análisis.....	94
7.1.4	Tiempos de fraguado.....	94
7.1.4.1	Tablas y gráficos.....	94
7.1.4.1.1	Inicio de fraguado.....	94
7.1.4.1.2	Final de Fraguado.....	95
7.1.4.2	Análisis.....	96
7.2	Propiedades químicas.....	97
7.2.1	Pérdida por calcinación.....	97
7.2.1.1	Tablas y gráficos.....	97
7.2.1.2	Análisis.....	98
7.2.2	Trióxido de azufre.....	98
7.2.2.1	Tablas y gráficos.....	98
7.2.2.2	Análisis.....	99
7.2.3	Residuo Insoluble.....	99
7.2.3.1	Tablas y gráficos.....	99
7.2.3.2	Análisis.....	100
7.3	Caracterización del comportamiento de los morteros.....	101
7.3.1	Resistencias mecánicas.....	101
7.3.1.1	Tablas y gráficos.....	101
7.3.1.1.1	Resistencias a Flexión.....	101
7.3.1.1.2	Resistencias a Compresión.....	105
7.3.1.2	Análisis.....	110
7.3.2	Retracción libre.....	111
7.3.2.1	Tablas y gráficos.....	111
7.3.2.1.1	Mortero CPN.....	111
7.3.2.1.2	Mortero CPPA.....	112
7.3.2.1.3	Mortero CPPB.....	113
7.3.2.1.4	Mortero CPPC.....	114
7.3.2.2	Análisis.....	116
7.3.3	Retracción restringida.....	117
7.3.3.1	Tablas y gráficos.....	117
7.3.3.1.1	Mortero CPN.....	117
7.3.3.1.2	Mortero CPPA.....	119
7.3.3.1.3	Mortero CPPB.....	121
7.3.3.1.4	Mortero CPPC.....	123
7.3.3.2	Monitoreo Digital.....	127
7.3.3.2.1	Mortero CPN.....	127

7.3.3.2.2	Mortero CPPA.....	128
7.3.3.2.3	Mortero CPPB.....	128
7.3.3.2.4	Mortero CPPC.....	129
7.3.3.3	Análisis.....	129
7.3.4	Módulo de elasticidad.....	130
7.3.4.1	Tablas y gráficos.....	130
7.3.4.1.1	Mortero CPN.....	130
7.3.4.1.2	Mortero CPPA.....	132
7.3.4.1.3	Mortero CPPB.....	134
7.3.4.1.4	Mortero CPPC.....	136
7.3.4.2	Análisis.....	140
7.3.5	Estimación de Creep.....	140
7.3.5.1	Análisis.....	144
Capítulo 8	Conclusiones.....	145
Capítulo 9	Referencias bibliográficas.....	148

Capítulo 1 Introducción.

1.1 Introducción general.

El cemento, resultado innegable del desarrollo histórico de la humanidad, es en la actualidad uno de los materiales más empleados en la vida moderna. Este material se fabrica en aproximadamente 150 países. Su uso universal en prácticamente todos los trabajos de la construcción, su costo relativamente bajo, la posibilidad de su producción industrial masiva y los buenos resultados obtenidos en sus aplicaciones han sido la causa de que hoy en día este aglomerante haya desplazado a todos los que le antecedieron, y que han quedado relegados a aplicaciones menores en trabajos de albañilería. No obstante lo anterior, existen fenómenos que se han presentado en el hormigón desde sus inicios, y que se investigan constantemente con el objeto de tener control sobre ellos, y así poder reducirlos o, en el mejor de los casos, evitarlos. Ahora bien, considerando que estos fenómenos dependen de múltiples factores, muy pocas veces se logra el objetivo de evitar su manifestación y sólo se puede aspirar a reducirlos.

La fisuración, producto de la retracción por secado del hormigón, es un fenómeno que afecta a toda estructura de hormigón. Estas fisuras tienen una serie de implicancias técnicas, económicas y de calidad sobre la construcción en hormigón. Desde el punto de vista técnico, se puede mencionar que principalmente afectan la durabilidad (corrosión de armaduras), la serviciabilidad (filtraciones), la apariencia (estética) y, eventualmente, la seguridad (resistencia) de las obras.

Entre los principales impactos económicos que estas situaciones pueden provocar, están los aumentos de costo por reparación de las fisuras, costos de asesorías y la eventual detención de labores durante el proceso de diagnóstico, evaluación y discusión de las posibles soluciones.

Nuestro país no se encuentra ajeno a este problema que presenta el hormigón, al contrario, se estima que el hormigón fabricado con cementos chilenos presenta un mayor índice de fisuración, por este motivo nuestro interés es investigar el comportamiento del cemento portland puzolánico con distintas adiciones de puzolana versus un cemento portland puro.

1.2 Objetivos.

- Estudiar la susceptibilidad a la fisuración por retracción que experimenta el hormigón confeccionado a base de cementos con adiciones de puzolana volcánica.
- Comparar las curvas de retracción libre de morteros con distintas dosis de puzolana.
- Determinar la edad de fisuración de morteros con distintas dosis de puzolana implementando el método de ensayo ASTM C 1581 para determinar la edad de fisuración de morteros y hormigones.

1.3 Alcances.

Este estudio esta limitado al análisis de cementos con adición puzolánica volcánica, la cual es usada por las cementeras nacionales para la producción de cemento portland puzolánico y cemento puzolánico, cualquier análisis o conclusión resultantes de esta investigación, sobre material puzolánico sin generalizar, se refiere sólo a este tipo de material.

Capítulo 2 Cemento.

2.1 Cemento portland.

El cemento es un material finamente pulverizado que no es en sí mismo conglomerante, sino que desarrolla la propiedad conglomerante como resultado de la hidratación (es decir, por las reacciones químicas entre los minerales del cemento y el agua). Un cemento es llamado hidráulico cuando los productos de la hidratación son estables en un medio acuoso. El cemento hidráulico más comúnmente usado para hacer hormigón es el cemento portland, que consiste principalmente de silicatos de calcio hidráulicos. Los hidratos de silicato de calcio que se forman con la hidratación del cemento portland son los responsables principales de sus características adherentes y son estables en un medio acuoso. El cemento portland 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 tritura hasta obtener un polvo fino; y finalmente, se adiciona un poco de yeso (sulfato de calcio) y el producto resultante es el cemento portland.

2.1.1 Composición química del cemento portland.

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 indican 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 portland ordinario las cantidades de óxido varían según la Tabla N° 2.2.

Tabla N°2.2 Porcentaje de óxido.⁸

Óxido	%
C ₃ S	45-60
C ₂ S	15-30
C ₃ A	6-12
C ₄ AF	6-8

2.1.2 Hidratación del cemento portland.

El cemento al mezclarse con agua produce una pasta. En presencia de agua, los silicatos y aluminatos presentes en el cemento portland forman productos de hidratación, los cuales son responsables para que, con el paso del tiempo, la pasta se transforme en una masa firme y resistente.

2.1.2.1 Hidratación de los aluminatos.

El aluminato tricálcico (C₃A) y el ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) son considerados los aluminatos del cemento. Están presentes en el cemento en pequeñas cantidades actuando como fundentes, de modo tal que logran reducir la temperatura de cocción del clínquer facilitando la combinación de cal y sílice.

En el proceso de hidratación el aluminato tricálcico reacciona casi inmediatamente con el agua, es por este motivo que se agrega yeso, el cual actúa como un retardante. El yeso reacciona con el aluminato tricálcico y forma etringita y monosulfato, los productos del ferroaluminato tetracálcico al reaccionar con el yeso son estructuras similares a la etringita y al monosulfato. Al disminuir en la pasta la concentración de sulfato la concentración de aluminato sube lo que provoca que la etringita se vuelva inestable y se convierta gradualmente en monosulfato.

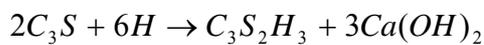
En el cemento, no es deseable la presencia de C₃A, pues contribuye poco o nada a reforzarlo, excepto a muy tempranas edades, y cuando la pasta de cemento endurecida es atacada por

sulfatos, puede favorecer un rompimiento debido a la expansión motivada por la formación de sulfoaluminato de calcio a partir del C₃A de la pasta endurecida.

2.1.2.2 Hidratación de los silicatos.

El silicato tricálcico (C₃S) y el silicato dicálcico (C₂S) son considerados los silicatos del cemento, están presentes en grandes cantidades y uno de sus productos de hidratación es el 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 como se muestra a continuación.



Ambos silicatos no se hidratan al mismo tiempo, y se sabe que el C₃S reacciona primero, con lo cual le otorga resistencia mecánica a corto y mediano plazo al cemento, por su parte el C₂S le otorga al cemento resistencia mecánica a mediano y largo plazo.

Los productos de ambas reacciones son similares, el C₃S₂H₃ 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 C₃S 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 C₂S requiere para su completa hidratación un 21% de agua para producir un 82% de gel de tobermorita y 18% de hidróxido de calcio.⁸

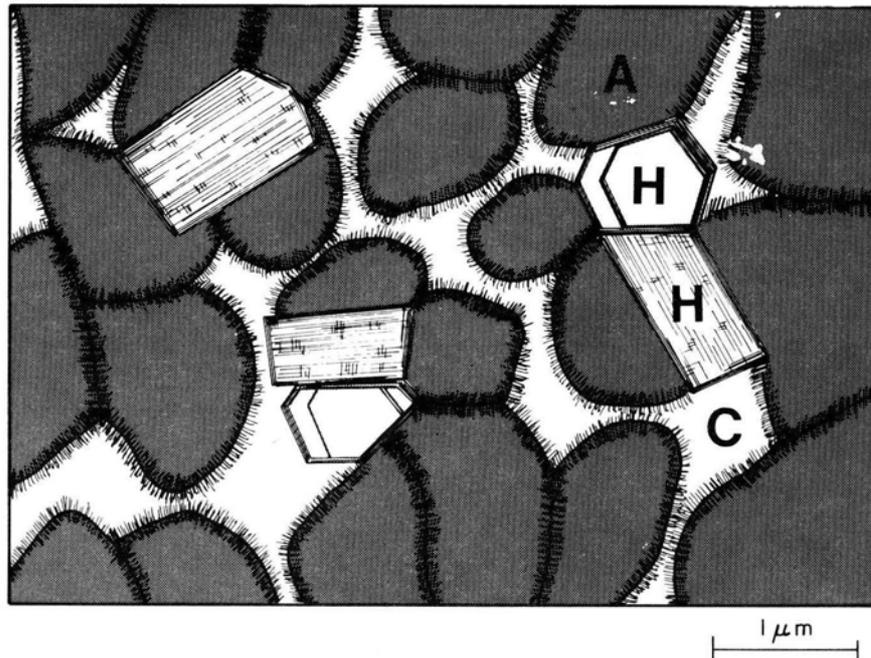


Figura 2.1 Modelo de una pasta de cemento portland bien hidratada.⁷

El gel de tobermorita representa entre 50 a 60 por ciento del volumen de sólidos en una pasta de cemento portland completamente hidratado y es el que determina en forma fundamental las propiedades mecánicas del cemento, por lo tanto es el producto más importante para determinar las propiedades de las pasta, esto contrasta con el hidróxido de calcio que representa entre 20 a 25 por ciento del volumen de la pasta hidratada, su contribución a la resistencia del cemento es muy inferior a la entregada por la tobermorita. Además, su presencia tiene un efecto adverso en la durabilidad química frente a la acción de las aguas acidas y sulfatos debido a su solubilidad.

En la Figura 2.1 A representa la agregación de partículas pobremente cristalinas de H-S-C que tienen por lo menos una dimensión coloidal (1 a 100 nm). El espaciamiento interpartículas dentro de la aglomeración es de 0,5 a 3,0 nm (1,5 nm como promedio).

H representa los productos cristalinos hexagonales tales como CH, C₄ASH₁₈, C₄AH₁₉, ellos forman grandes cristales, generalmente de 1 μm.

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. El tamaño de los huecos capilares varía de 10 nm a 1 μm, pero en pastas bien hidratadas, de baja relación agua/cemento, son < 100 nm.⁷

2.2 Cementos con adición puzolánica.

2.2.1 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 a materiales que presentan las siguientes características:

- Aptitud para reaccionar con el hidróxido cálcico, $\text{Ca}(\text{OH})_2$, en presencia de agua.
- Aptitud para formar productos hidratados con propiedades aglomerantes.
- Tamaño de grano inferior a 5 mm.

2.2.1.1 Clasificación de material puzolánico.

Una puzolana se define como un material silíceo o silíceo y aluminoso que posee en sí mismo, poca o ninguna propiedad cementante, pero que en forma finamente pulverizada y en la presencia de humedad, reaccionará químicamente con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes. Según su origen, los materiales puzolánicos se clasifican en naturales o artificiales.

2.2.1.1.1 Puzolanas naturales.

Son aquellas que han sido procesados para el solo propósito de producir una puzolana. El procesamiento generalmente involucra el triturado, molido y separación de tamaños. En algunos casos también puede incluir una activación térmica. A continuación se mencionan algunas puzolanas naturales.

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 caparzones silíceos de microscópicas algas acuáticas unicelulares (diatomeas).

2.2.1.1.2 Puzolanas artificiales.

Son aquellos materiales que no son los 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. A continuación se mencionan algunas puzolanas artificiales.

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.

2.2.1.2 Puzolanas en Chile.

En Chile, específicamente en Santiago, existen grandes yacimientos de puzolana, de tipo riolítico, provenientes de flujos piroclásticos que fueron emplazados durante una erupción o una serie de erupciones cercanamente espaciadas, hace 450.000 ± 60.000 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 es, probablemente, de 450 km^3 .¹⁹ Uno de esos yacimientos se encuentra en la localidad de Pudahuel y corresponde al lugar de origen de la puzolana utilizada para la fabricación de los cementos experimentales de este trabajo.

2.2.1.3 Actividad puzolánica.

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

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 dicha cal, contribuya al desarrollo de la resistencia 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, pH, 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.

2.2.2 Nomenclatura y normalización de cementos con adición puzolánica.

2.2.2.1 Cemento puzolánico.

Según la norma chilena Nch 148.Of 68, cemento puzolánico es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clínquer, puzolana y yeso y que pueda aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluido el sulfato de calcio hidratado.

2.2.2.1.1 Clasificación.

La norma chilena Nch 148.Of 68 clasifica a los cementos puzolánicos según su contenido de puzolana en dos tipos.

Cemento Pórtland puzolánico. Es el cemento en cuya composición la proporción de puzolana no supera el 30% del peso del cemento.

Cemento puzolánico. Es el cemento en cuya composición la proporción de puzolana esta entre el 30% y 50% del peso del cemento.

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

2.2.2.1.2 Requisitos químicos.

Los requisitos químicos que deben cumplir los cementos se indican en la Tabla N°2.3.

Tabla N°2.3 Requisitos químicos de los cementos.¹⁷

Análisis químico	Cemento Portland	Cementos Puzolánicos	
		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	---	---

2.2.2.1.3 Propiedades físicas y mecánicas.

En las normas chilenas se especifican las siguientes propiedades físicas y mecánicas que deben cumplir los cementos.

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 esta indicado en la Tabla N° 2.4.

Resistencia mecánica. La resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión esta indicado en la Tabla N° 2.4.

Tabla N°2.4 Propiedades físicas y mecánicas de los cementos.¹⁷

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

2.2.2.1.4 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 este necesita para producir el clínker. Así es que, si se considera el hecho que en una tonelada de cemento con adición puzolánica se puede reducir en hasta un 50% el 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. Todo esto considerando obviamente que la planta dispone de material puzolánico y que el transporte de esta no es un factor importante económicamente.

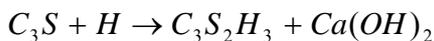
2.2.2.1.5 Aspectos técnicos.

Según lo mencionado en el punto “actividad puzolánica” queda claro que con estos tipos 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.

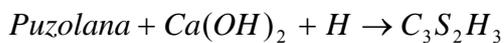
2.2.3 Hidratación del cemento con adición puzolánica.

Desde el punto de vista técnico un cemento con adición puzolánica presenta varias cualidades que están relacionadas con el proceso de hidratación. Si comparamos las ecuaciones de reacción del proceso de hidratación de un cemento portland y un cemento con adición observamos lo siguiente.

Cemento portland y cemento con adición puzolánica.



Cemento con adición puzolánica.



Básicamente un cemento portland en el proceso de hidratación produce gel de tobermorita y hidróxido de calcio y un cemento con adición puzolánica hace lo mismo, pero el hidróxido de calcio producto de la reacción con los silicatos consume al material puzolánico produciendo más gel de tobermorita este fenómeno otorga características adicionales al cemento con adición que no tiene el cemento portland puro.

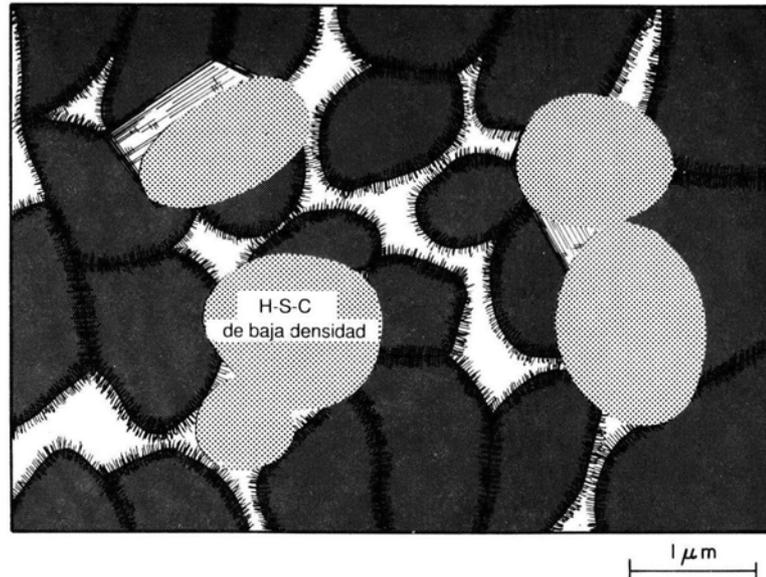


Figura 2.2 Representación gráfica de pastas de cemento bien hidratadas hechas con un cemento portland puzolánico.⁷

En comparación con una pasta de cemento portland (ver Figura 2.1 para identificación de las fases presentes), en la Figura 2.2 se muestra que, 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.

2.2.4 Propiedades de los cementos con adición puzolánica.

2.2.4.1 Calor de Hidratación.

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 portland.

En la figura 2.3 se muestra el efecto de incrementar las cantidades de puzolana en el calor de hidratación del cemento portland puzolánico.

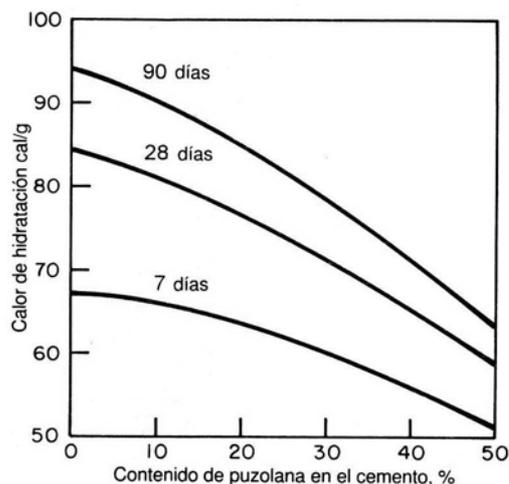


Figura 2.3 Efecto de sustituir una puzolana natural italiana, sobre el calor de hidratación de un cemento portland.⁷

2.2.4.2 Resistencia.

En un cemento portland con adición puzolánica, la puzolana en él funciona como un elemento inerte en el corto plazo, pero en el mediano y largo plazo aparece como una componente activa, cuyos óxidos ácidos (sílice, alúmina e incluso, óxido de hierro) se combinan gradualmente con la cal liberada en la hidratación de los silicatos del cemento portland (hidróxido de calcio), para así formar nuevos compuestos hidráulicos estables (gel de tobermorita).

Cuando materiales reactivos adecuados son utilizados en relación moderada (es decir, 15 a 30 por ciento de puzolana) y el curado húmedo está disponible por períodos largos, las resistencias últimas de los cementos con adición puzolánica son más altas que las resistencias del cemento portland del que estos cementos están hechos, esto se puede apreciar en la Figura 2.4. Este comportamiento es debido al refinamiento del poro asociado con las reacciones puzolánicas y el incremento del gel de tobermorita y otros productos de hidratación a expensas del hidróxido de calcio.

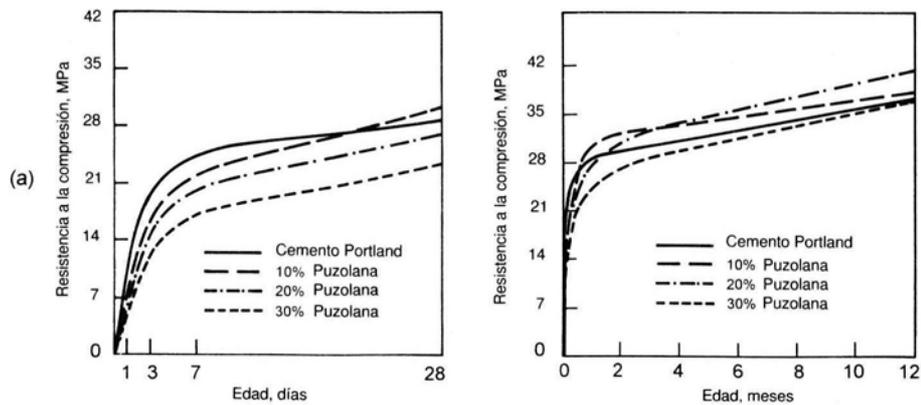


Figura 2.4 Resistencia a la compresión de cemento portland (finura $< 4000 \text{ cm}^2/\text{g}$) mezclado con puzolana natural mineral griega.⁷

Además, en los cementos con adición puzolánica, el incremento de la resistencia a la flexotracción es más rápido que el de la compresión, manteniendo siempre más elevado el factor tracción/compresión, lo que conduce a materiales más flexibles, más elásticos, por la naturaleza de sus productos hidratados, que en los cementos portland puros. Esto es una garantía frente a la posible fisuración térmica.⁷

2.2.4.3 Durabilidad.

2.2.4.3.1 Permeabilidad.

Se define como la capacidad de un material para permitir que un fluido lo atravesase sin alterar su estructura interna. Se dice que un material es permeable si deja pasar a través de él una cantidad apreciable de fluido en un tiempo dado: e impermeable, si la cantidad de fluido es despreciable.

Con base a estudios de microscopia electrónica exploratoria y de distribución del tamaño del poro, es posible concluir que hay dos efectos físicos de la reacción química entre las partículas puzolánicas y el hidróxido de calcio:

Refinamiento del tamaño del poro.

Se llama así al proceso de formación de productos secundarios de hidratación (principalmente hidratos de silicato de calcio) alrededor de las partículas de puzolana, tiende a llenar los grandes huecos capilares con un material microporoso y, por lo tanto, de baja densidad.

Refinamiento del tamaño del grano.

Se llama así al proceso de transformación de un sistema que contiene grandes granos de componente en un producto que contiene granos más pequeños. Esto producto de la nucleación de hidróxido de calcio alrededor de las partículas finas y bien distribuidas de la puzolana.

Tanto el proceso de refinamiento del tamaño del poro como el del tamaño del grano refuerzan la pasta de cemento y la hacen más impermeable.

2.2.4.3.2 Resistencia a los sulfatos y a los ambientes ácidos.

La mayor resistencia de los cementos con adición puzolánica frente a los sulfatos y a los ambientes ácidos, es debida al efecto combinado de mejor impermeabilidad a una relación agua/cemento dada y grado de hidratación y al reducido contenido de hidróxido de calcio producto de la acción puzolánica. Los iones de sulfatos atacan al hidróxido de calcio que es vulnerable a su acción, pero debido a su baja concentración, y a la impermeabilidad desarrollada por el cemento con adición puzolánica, estos ataques no son importantes y no producen fisuras.

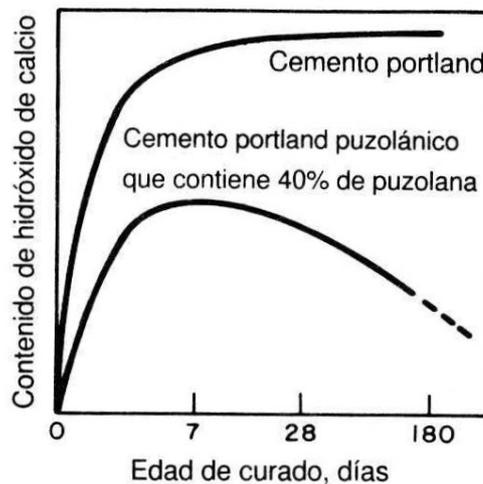


Figura 2.5 Efecto de la edad del curado y del contenido de puzolana en el hidróxido de calcio en la pasta de cemento.⁷

En la Figura N°2.5 se aprecia el efecto de reducción del hidróxido de calcio en la pasta de cemento hidratada, que es debido tanto al efecto de dilución como a la reacción puzolánica, es una razón para que el hormigón hecho 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 del cemento se incrementa debido a la hidratación del cemento portland presente, más tarde comienza a abatirse con el avance de la reacción puzolánica.

2.2.4.3.3 Reacción álcali-árido.

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 2.6 se muestra que las puzolanas son muy efectivas en reducir la expansión asociada con la reacción álcali-árido.

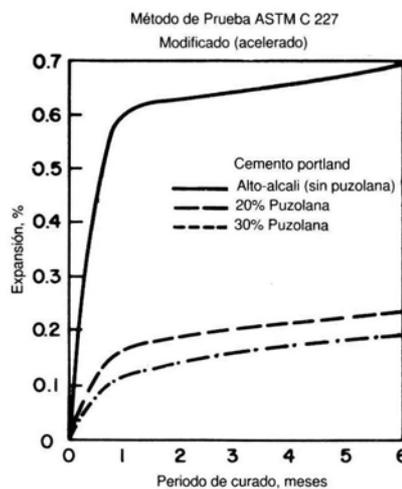


Figura 2.6 Influencia de la adición de puzolana en la expansión álcali-agregado.⁷

Capítulo 3 Estabilidad dimensional.

De manera general, la fisuración en el hormigón armado tiene origen en un incremento del esfuerzo de tracción en el hormigón por sobre la resistencia de éste, lo cual conduce a la formación de una discontinuidad, la cual llamamos fisura. Este incremento en el esfuerzo de tracción puede deberse a esfuerzos externos, o deformaciones inducidas en el elemento.

En este trabajo nos centraremos principalmente en las fisuras debidas a cambios de volumen, y en particular los de retracción por secado, acompañados de una condición restrictiva que se opone a este cambio dimensional, la que en consecuencia, genera el incremento en el esfuerzo de tracción en el hormigón.

El fenómeno de fisuración puede manifestarse tanto durante las primeras horas, como luego de meses o años, y esta ligado a fenómenos físicos, químicos, mecánicos o ambientales. La demora en la aparición de ciertas fisuras, esta controlado por la capacidad que presente el hormigón para absorber las deformaciones y la velocidad con que se desarrollan los fenómenos que gatillan los cambios dimensionales. Los cambios dimensionales que son de interés en este estudio son los provocados por la retracción del elemento, básicamente la literatura identifica cuatro tipos de retracción, estas son retracción plástica, retracción autógena, retracción por secado y retracción térmica, esta última no tratada debido a su irrelevancia en la investigación.

3.1 Retracción plástica.

Cuando la pasta de cemento es plástica, experimenta una retracción volumétrica, cuya magnitud es del orden del 1 por ciento 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 o por succión del hormigón inferior 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.

Usualmente las grietas se producen sobre obstrucciones a un asentamiento uniforme, por ejemplo, ante el acero de refuerzo o partículas grandes de agregado.

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. Más cemento en la mezcla, el uso de cemento fino, y la adición de polvo de sílice, incrementan 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

3.2 Retracción autógena.

Aún después del fraguado ocurren cambios de volumen en forma de retracción o dilatación. Una continua hidratación, cuando hay abastecimiento de agua, puede llevar a una expansión, sin embargo, cuando no se permite el movimiento de humedad, bien sea hacia adentro o hacia 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 no es necesario tomarla en cuenta como factor separado de la retracción causada por el secado externo del hormigón. Lo anterior se conoce como retracción por secado y normalmente incluye aquella retracción causada con cambios autógenos.⁸

3.3 Retracción por secado.

La retracción por secado, se produce por la pérdida de agua en el hormigón. Este fenómeno puede ocasionar en la pasta de cemento, retracciones de longitud de hasta un 1%. Afortunadamente en el hormigón los áridos agregados reducen estas deformaciones a valores cercanos a un 0,06% (ACI 224. 1R-93).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 pocas palabras, la deformación de retracción por secado está principalmente relacionada con la remoción de agua adsorbida 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

A continuación se estudia el mecanismo y los factores que afectan la retracción por secado.

3.3.1 Mecanismo de la retracción por secado.

El cambio de volumen durante el secado del hormigón no es igual al volumen de agua removida. La pérdida de agua libre provocada por la retracción plástica causa una retracción muy pequeña o nula. A medida que continúa el secado el agua absorbida es eliminada y el cambio de volumen de la pasta de cemento no deformada en esta etapa es igual (aproximadamente) a la pérdida de una película de agua del espesor de una molécula de la superficie de todas las partículas del gel. Ya que el “espesor” de una molécula de agua es del orden del 1 por ciento del tamaño de una partícula de gel, se deberá esperar un cambio lineal del orden de 10.000×10^{-6} en las dimensiones de la pasta de cemento completamente seca. Se han podido observar valores hasta de 4.000×10^{-6} .

También es posible que la retracción esté parcial o totalmente relacionada con el movimiento del agua zeolítica. Se ha demostrado que el silicato de calcio hidratado tiene un cambio en el espacio interno de 14 a 9 Å durante el secado. El C_4A y el sulfoaluminato de calcio hidratado muestran un comportamiento similar.

Por lo tanto, no se sabe si el movimiento de humedad asociado con la retracción es inter o intracrystalino, pero como las pastas elaboradas con cemento portland y cemento aluminoso y el monoaluminato de calcio puro y molido exhiben en esencia la retracción, la causa fundamental de ésta debe buscarse en la estructura física del gel, no en sus características químicas o mineralógicas.⁸

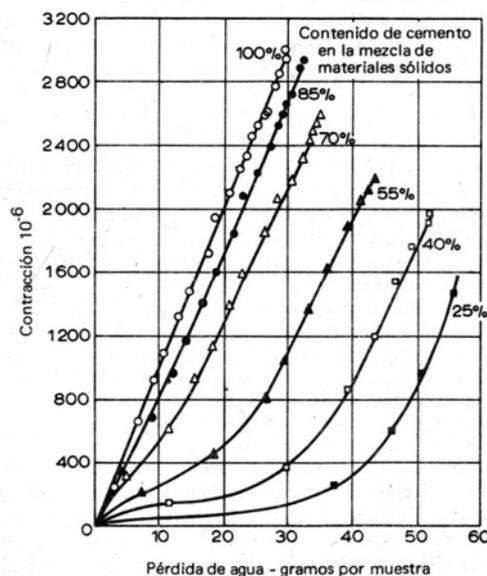


Figura 3.1 Relación entre la concentración y la pérdida de agua de muestras de pasta de sílice-cemento pulverizada, curadas por 7 días a 21° y secadas posteriormente.⁸

La relación entre el peso del agua pérdida y la retracción se muestran en la Figura 3.1. 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 pulverizado, 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 3.1 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.

3.3.2 Factores que afectan la retracción.

3.3.2.1 Cemento.

Las propiedades del cemento tienen poca influencia sobre la retracción del hormigón. Swayze⁸ 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. La influencia de la finura del cemento resulta sensible tan sólo para partículas más gruesas de 75 μm (No. 200), que, al tener comparativamente poca hidratación, actúan respectivamente como agregado. En los demás casos un cemento más fino no aumentará la retracción del hormigón (Figura 3.2), aunque la retracción de la pasta pura de cemento sí se incrementa.

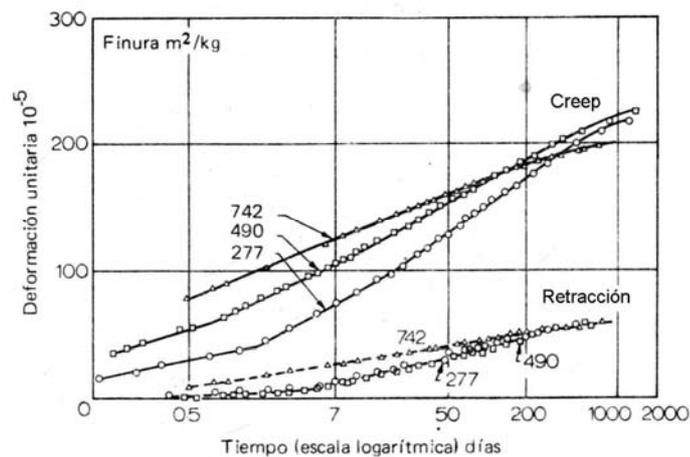


Figura 3.2 Creep y retracción de hormigones elaborados con cementos de diferente finura (todos los hormigones tienen las mismas proporciones de mezcla; en el caso de las muestras para medir el creep, la edad se escogió de modo que la relación esfuerzo/resistencia fuera de 0,5 para todos los hormigones).⁸

3.3.2.2 Agua.

El contenido de agua afecta también a la retracción, al reducirse la cantidad de agregado restrictivo. Por lo tanto, el contenido de agua de la mezcla indicará generalmente la cantidad previsible de retracción (de acuerdo con el esquema general de la Figura 3.3) pero el contenido de agua no es un factor primordial.

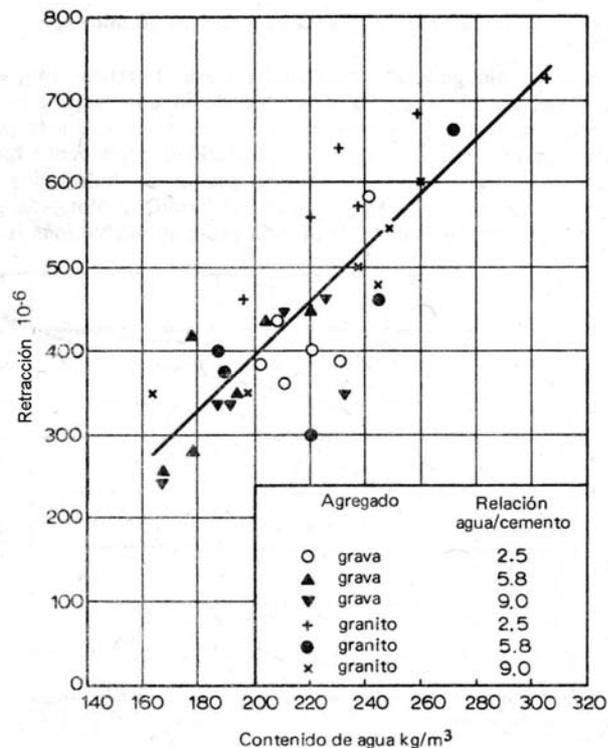


Figura 3.3 Relación entre el contenido de agua del hormigón fresco y la retracción por secado.⁸

3.3.2.3 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. Si al cambiar el tamaño máximo del agregado de 6.3 mm a 152 mm, el contenido del agregado puede incrementarse de un 60 al 80 por ciento del volumen total de hormigón, entonces, como se ve en la Figura 3.4, la retracción se reduce en un factor de 3.

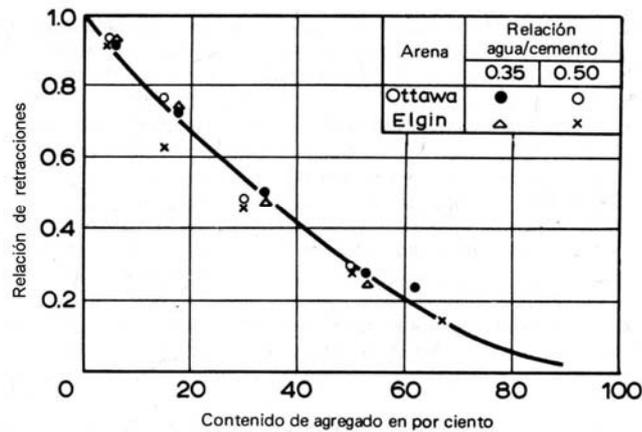


Figura 3.4 Influencia del contenido de agregado del hormigón (por volumen) sobre la relación de la retracción del hormigón a la retracción de la pasta pura de cemento.⁸

Asimismo, para una resistencia dada, un hormigón de baja trabajabilidad contiene más agregado que una mezcla de alta trabajabilidad elaborada con agregado del mismo tamaño y, en consecuencia, la mezcla resultante presenta menos retracción. Por ejemplo, si se aumenta el contenido de agregado del hormigón de 71 al 74 por ciento (con la misma relación agua/cemento), la retracción se reducirá aproximadamente 20 por ciento (Figura 3.4).

Tabla N°3.1 Valores típicos de la retracción de muestras de mortero y hormigón de 127 mm por lado y de sección transversal cuadrada, almacenadas a una humedad relativa del 50 por ciento a 12°C.⁸

Relación A/C	Retracción después de 6 meses (10^{-6}) para relaciones agua cemento de:			
	0,4	0,5	0,6	0,7
3	800	1200	-----	-----
4	550	850	1050	-----
5	400	600	750	850
6	300	400	550	650
7	200	300	400	500

En la Tabla 3.1 se dan los valores típicos de retracción por secado de muestras de mortero y hormigón de 127 mm, cuya sección transversal es cuadrada, almacenada a una temperatura de 21°C y a una humedad relativa del 50 por ciento durante 6 meses. Estos valores son únicamente una guía, ya que la retracción esta bajo la influencia de muchos factores.

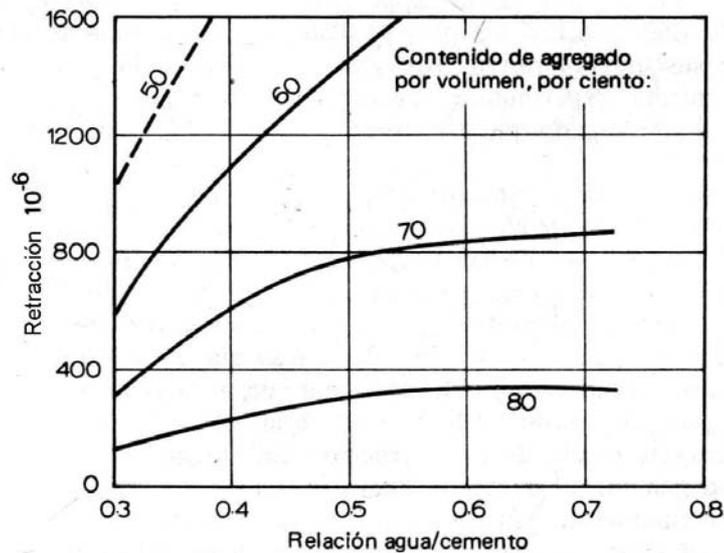


Figura 3.5 Influencia de la relación agua/cemento y el contenido de agregado, sobre la retracción.⁸

La influencia de la relación agua/cemento y del contenido de agregado (Tabla 3.1 y Figura 3.4) pueden combinarse en una sola grafica; esto se ha hecho en la Figura 3.5, pero debemos recordar que los valores dados de la retracción corresponden al secado en clima templado.

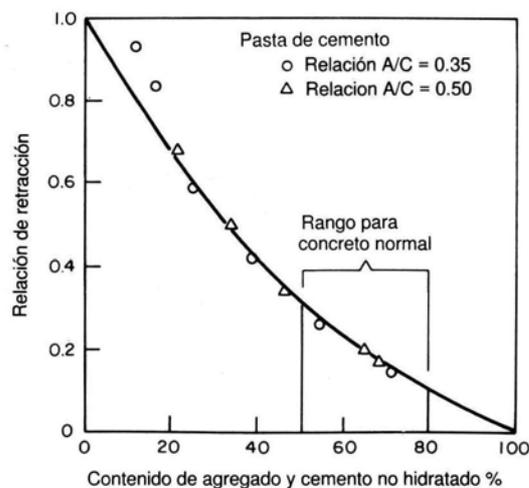


Figura 3.6 Influencia del contenido de agregado sobre la retracción por secado. El contenido del agregado en el hormigón es el factor más importante que afecta la retracción por secado. El cemento no hidratado no se contrae y por lo tanto puede ser incluido en el agregado.⁷

La mayoría de las fórmulas teóricas para predecir la retracción por secado del hormigón, suponen que el módulo de elasticidad de éste puede proporcionar una medida adecuada del grado de restricción contra la deformación y que como una primera aproximación, el módulo de elasticidad del agregado determina el módulo de elasticidad del hormigón. Cuando al módulo de elasticidad del agregado se vuelve parte de una fórmula matemática, es conveniente relacionar la retracción por secado, con la fracción de agregado y no con la

fracción de pasta de cemento en el hormigón. Esto se hace fácilmente porque la suma de las dos es constante.

Powers⁷ investigó la retracción por secado de hormigones que contenían dos agregados diferentes y relaciones agua/cemento de 0.35 ó 0.50. Por los datos que se muestran en la Figura 3.6, la relación de la retracción del hormigón (S_C) y la retracción de la pasta de cemento (S_P) se pueden relacionar exponencialmente con la fracción de volumen del agregado (g) en el hormigón.

$$\frac{S_C}{S_P} = (1 - g)^n$$

L' Hermite encontró que los valores de (n) variaban entre 1.2 y 1.7 dependiendo del módulo de elasticidad del agregado. Desde el punto de vista de las causas de la retracción y de los constituyentes de restricción a la retracción en el hormigón. Powers sugirió que cualquier cemento no hidratado presente puede ser considerado una parte del agregado (Figura 3.6).⁷

3.3.2.4 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 efectuar una mejor dispersión de las partículas del cemento anhidro en el agua, también conducen al refinamiento de poros en el producto hidratación. Puesto 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 reafinar los poros, generalmente muestran una retracción por secado más alta.

3.3.2.5 Curado y las condiciones de almacenamiento.

El curado prolongado con humedad retrasa la retracción, pero el efecto del curado sobre la magnitud de la retracción es pequeño, aunque bastante complejo. En lo que se refiere a la pasta pura de cemento, cuanto mayor sea la cantidad de cemento hidratado, tanto menor será el volumen de granos no hidratados que restringen la retracción; por lo tanto, el curado prolongado provoca una retracción mayor, pero la pasta se vuelve más fuerte con el tiempo y

resulta capaz de resistir la tendencia a contraerse sin fisurarse. Sin embargo, si hay fisuramiento, por ejemplo alrededor de partículas de agregado, la retracción total medida en una muestra de hormigón disminuye. Un hormigón bien curado se contrae más rápidamente y, por lo tanto, los esfuerzos que se presentan después, debidos al creep, son menores; además, un hormigón más resistente posee un grado menor de creep. Estos factores pueden compensar la alta resistencia a la tensión del hormigón bien curado y producir fisuramiento. En vista de esto, no nos sorprende que se hayan reportado resultados contradictorios sobre los efectos del curado en la retracción, pero, en general, puede afirmarse que la duración de los períodos de curado no es un factor importante en la retracción.

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 una fractura. El secado rápido no permite que el creep libere esfuerzos y puede llevar a un agrietamiento más profundo. No obstante, ni el viento ni la convección forzada tienen efecto alguno sobre la rapidez del secado del hormigón endurecido ya que la conductividad de humedad del hormigón es tan pequeña que no hay sino muy poca evaporación; esta rapidez no se ve incrementada por el movimiento de aire. Esto se ha confirmado experimentalmente.

La humedad relativa ambiente afecta mucho la magnitud de retracción del hormigón, como se ve, por ejemplo, en la Figura 3.7. En la misma figura se muestra también la mayor magnitud absoluta de la retracción comparada con la expansión en el agua que es unas 6 veces menor que la retracción en aire a una humedad relativa del 70 por ciento u ocho veces menor que la retracción en aire al 50 por ciento.

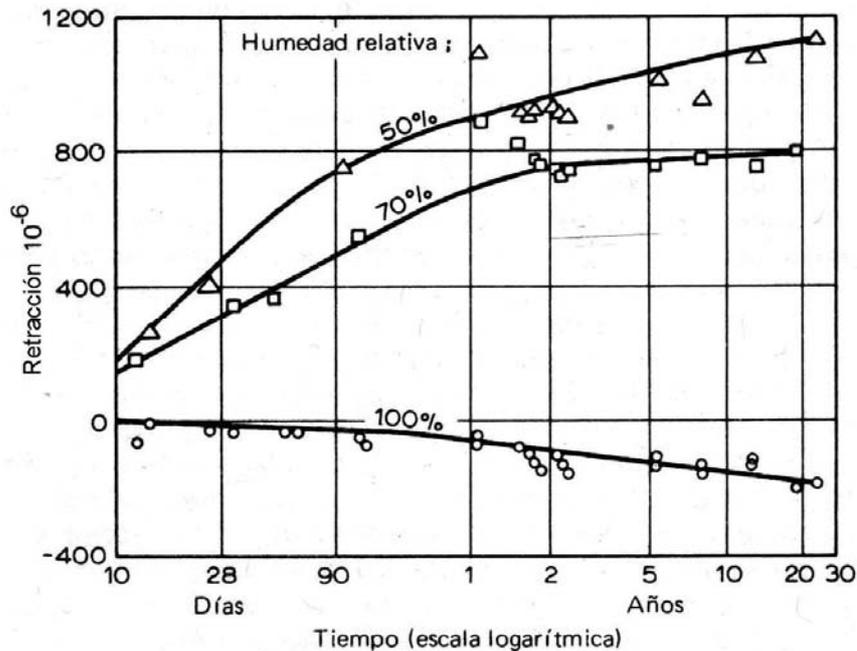


Figura 3.7 Relación entre la retracción y el tiempo para hormigones almacenados a diferentes humedades relativas. El tiempo empieza a contar al terminar el curado húmedo a la edad de 28 días.⁸

Por lo tanto, vemos que el hormigón colocado en aire “seco” (no saturado) se retrae, pero se expande en agua o en aire con humedad relativa del 100 por ciento. Esto podría indicar que la presión de vapor dentro de la pasta de cemento es siempre menor que la presión de vapor saturado y es lógico suponer que existe una humedad intermedia en la cual la pasta alcanzaría un equilibrio hidráulico. De hecho, Lorman⁸ encontró que esta humedad era del 94 por ciento, pero en la práctica el equilibrio no es posible en muestras pequeñas y no restringidas.

Al exponer un espécimen de hormigón no restringido a condiciones de baja humedad relativa, se causa una retracción por secado que se incrementa con el tiempo. Sin embargo, si el espécimen es restringido, es decir, si no tiene movimiento libre, la deformación será cero, pero los esfuerzos de tensión se desarrollarán con el paso del tiempo. Esta condición es la razón de la mayoría de las fisuras debidas a retracción por secado.

3.3.2.6 Geometría del elemento.

Debido a la resistencia del agua a transportarse del interior del hormigón a la atmósfera, la velocidad de la pérdida de agua será obviamente controlado por la longitud de la senda recorrida por el agua que está siendo expelida durante la retracción por secado. A una humedad relativa 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 del tamaño y la forma por una simple cantidad de términos de espesor efectivo o espesor

teórico, que es igual al área de la sección dividida entre el semiperímetro en contacto con la atmósfera. Las relaciones entre el espesor teórico y la retracción por secado se ilustran en la Figura 3.8

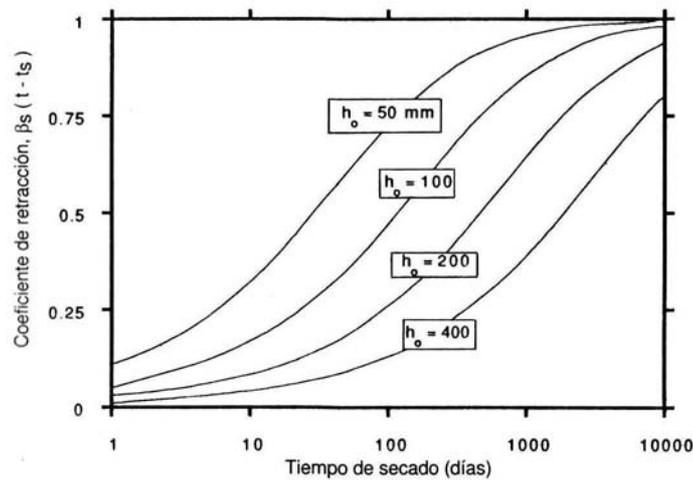


Figura 3.8 Influencia del tiempo de exposición y tamaño del espécimen en el coeficiente de la retracción por secado.⁷

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 (Figura 3.9), y como dicho aumento puede ser varias veces mayor que la deformación unitaria debida a la carga, el creep reviste considerable importancia en la mecánica estructural.

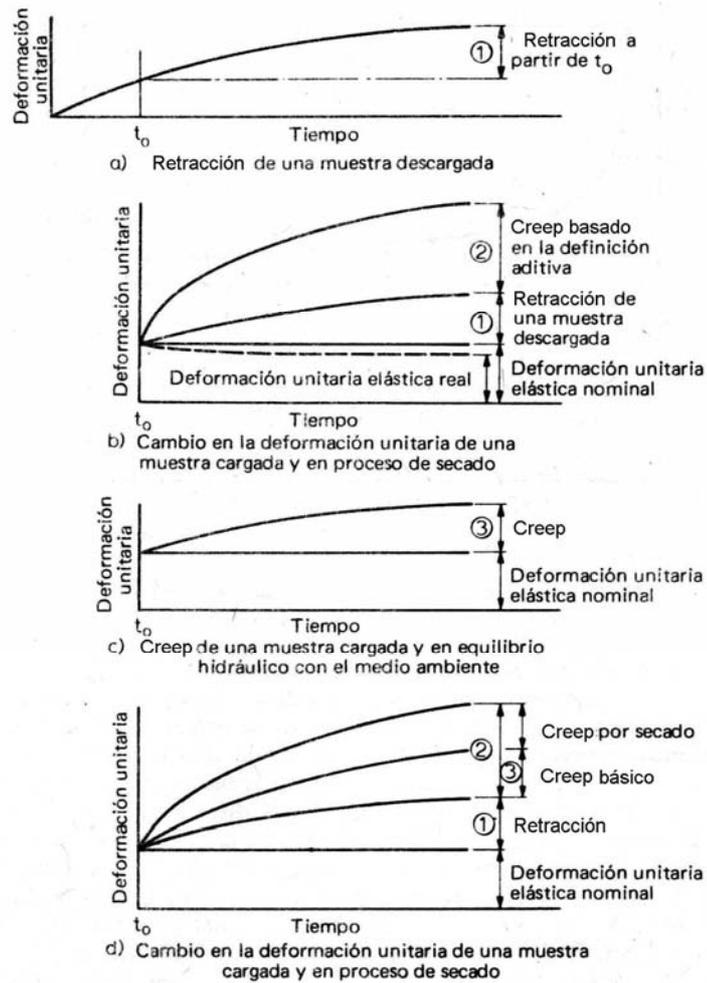


Figura 3.9 Deformaciones que dependen del tiempo en un hormigón sometido a carga.⁸

El creep puede considerarse desde otro punto de vista: si las restricciones son tales que una muestra de hormigón bajo esfuerzo se ve sometida a una deformación unitaria constante, el creep aparecerá como una reducción progresiva del esfuerzo con el tiempo. Esta forma de relajación se muestra en la Figura 3.10.

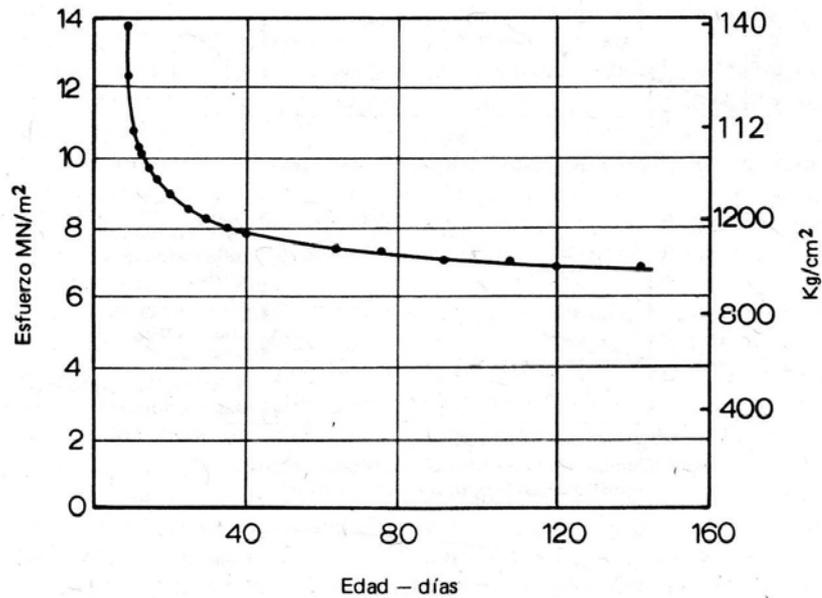


Figura 3.10 Relación del esfuerzo bajo una deformación constante de 360×10^{-6} .⁸

En condiciones normales de carga, la deformación unitaria instantánea observada depende de la rapidez de aplicación de la carga, de modo que no sólo incluye la deformación unitaria por carga, sino también algo de creep. Es difícil diferenciar exactamente la deformación unitaria elástica inmediata y el creep temprano, pero esto no tiene importancia práctica, ya que lo que nos interesa es la deformación unitaria total inducida por la aplicación de la carga. Ya que el módulo de elasticidad del hormigón aumenta con la edad, la deformación elástica disminuye gradualmente y, en sentido estricto, el creep debe considerarse como una deformación unitaria adicional a la deformación unitaria elástica, en el momento en que se determina (Figura 3.9). A menudo, no se determina el módulo de elasticidad a diferentes edades y en estos casos el creep se considera como un aumento en la deformación unitaria por encima de la deformación unitaria elástica inicial. Es más conveniente el uso de esta definición que, aunque teóricamente menos correcta, no introduce ningún error serio.

Hasta aquí hemos considerado el creep del hormigón almacenado en condiciones tales que no hay retracción ni expansión. Si una muestra se seca bajo carga, se supone que la retracción y el creep se suman; por lo tanto, se calcula el creep como la diferencia entre la deformación total de la muestra cargada y la retracción de una muestra similar sin carga, almacenada en las mismas condiciones durante el mismo periodo (Figura 3.9). Esto es una simplificación cómoda, la retracción y el creep no son fenómenos independientes sobre los que se pueda aplicar el principio de superposición y, de hecho, el efecto de la retracción sobre el creep consiste en aumentar su magnitud. En el caso de muchas estructuras, sin embargo, el creep y la retracción ocurren simultáneamente y, desde un punto de vista práctico, conviene estudiar ambos procesos simultáneamente.

Por esta razón y también porque una gran mayoría de los datos actuales sobre el creep se han obtenido bajo las propiedades de aditividad del creep y la retracción, se considerará el creep como deformación en exceso de la retracción. Sin embargo, cuando sea necesario adoptar un criterio más preciso se hará una distinción entre el creep del hormigón en condiciones sin movimiento por humedad, hacia o desde el medio ambiente (creep básico) y el creep adicional, causado por el secado (creep por secado).

Los términos y definiciones se ilustran en la Figura 3.9.

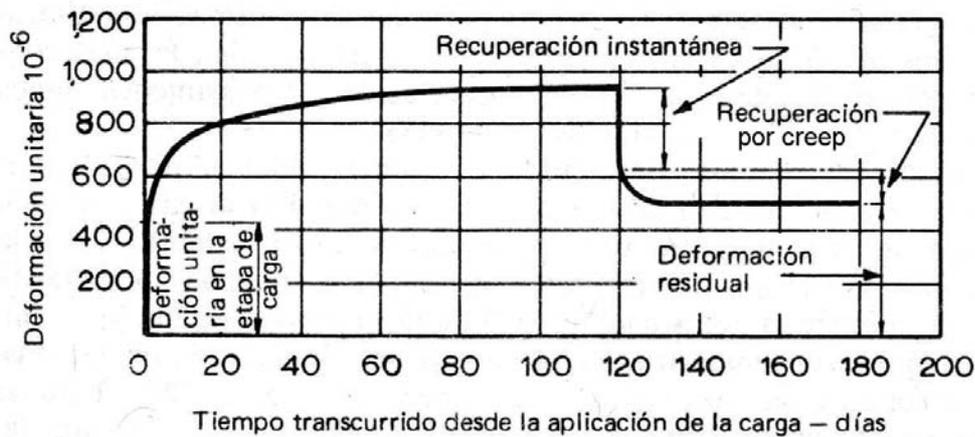


Figura 3.11 Creep y recuperación de una muestra de mortero almacenada al aire a una humedad relativa del 95 por ciento, sometida a un esfuerzo de 148 MN/m^2 (151 kg/cm^2) y descargada después.⁸

Si se retira una carga sostenida, la deformación unitaria disminuye inmediatamente en una cantidad igual a la deformación unitaria elástica a la edad dada, que por lo general es menor que la deformación unitaria elástica al aplicar la carga. Esta recuperación instantánea va seguida por una disminución gradual en la deformación unitaria llamada recuperación de creep (Figura 3.11). La forma de la curva de recuperación del creep se asemeja a la de la curva del creep, pero la recuperación se acerca a su valor máximo con mayor rapidez. La reversibilidad del creep no es total y este fenómeno no tiene reversibilidad simple.

Cuando una pasta de cemento hidratada está sujeta a esfuerzos sostenidos, dependiendo de la magnitud y duración del esfuerzo aplicado, el H-S-C perderá una gran cantidad del agua físicamente absorbida y la pasta mostrará una deformación por el creep. Esto no sugiere que no haya otras causas que contribuyan al creep en el hormigón: sin embargo, la pérdida de agua absorbida bajo presión sostenida parece ser la causa más importante. En pocas palabras el creep en el hormigón, se supone esta relacionado principalmente con la remoción de agua absorbida de la pasta de cemento hidratada. Pero las causas del creep en el hormigón son más complejas. Se acepta en general que además de los movimientos de humedad, existan otras causas que contribuyen al fenómeno del creep.

3.4.1 Factores que influyen en el creep.

En la mayoría de las investigaciones el creep se ha estudiado empíricamente a fin de determinar cómo es afectado por las distintas propiedades del hormigón. Una dificultad de interpretación de muchos de los datos actuales parte del hecho que en la proporción de los componentes del hormigón no es posible cambiar un factor sin alterar, por lo menos, otro. Por ejemplo, la riqueza y la relación agua/cemento de una mezcla de una trabajabilidad determinada varía simultáneamente. Sin embargo, existen algunas influencias obvias.

3.4.1.1 Cemento.

El tipo de cemento afecta el creep en la medida en que influye en la resistencia del hormigón al tiempo de la aplicación de la carga. Por esta razón, en cualquier comparación entre el creep de hormigones elaborados con diferentes cementos, debe tomarse en cuenta la influencia del tipo de cemento sobre la resistencia a edad temprana.

La finura del cemento afecta el desarrollo de resistencia a edades tempranas y, por lo tanto, influye sobre el creep. Sin embargo, la finura en sí no parece afectar el creep: muchos de los resultados contradictorios pueden deberse a la influencia indirecta del yeso. Cuando más fino sea el cemento, se requiere un mayor contenido de yeso, de modo tal que al volver a molerlo en el laboratorio, sin agregar yeso, se produce un cemento inadecuadamente retardado, que presenta un grado mayor de retracción y creep.

En fechas recientes, los estudios sobre la influencia de la finura del cemento sobre el creep se han extendido a cementos portland de ultra alta resistencia temprana cuya finura está por encima de los 7000 cm²/g. Las pruebas de creep se hicieron a una humedad relativa del 55 por ciento, siendo todas las mezclas de la misma relación agua/cemento y la misma relación esfuerzo/resistencia de 0,5. La edad de carga se escogió de modo que todos los hormigones tuvieran la misma resistencia. La Figura 3.2 muestra que, si bien con el cemento más fino el creep fue máximo, después de 1000 días resultó mínimo. Esto probablemente se deba al gran aumento en resistencia del cemento fino, lo cual provoca una rápida reducción en la relación esfuerzo/resistencia.

3.4.1.2 Agregado.

El agregado usual de peso normal no es susceptible al creep de manera evidente, por lo cual resulta sensato postular que el creep proviene de la pasta de cemento, pero el agregado influye sobre el creep del hormigón a través de sus efectos restrictivos de manera similar al caso de la retracción y de algunas propiedades de la roca original.

El efecto restrictivo consiste en que la pasta de cemento experimenta creep mientras el agregado no, de modo tal que el agregado actúa reduciendo el creep efectivo del hormigón. Por lo tanto el creep está en función del contenido volumétrico de cemento en el hormigón, pero la relación no es lineal. Se ha comprobado que el creep del hormigón, f , el contenido del agregado, g , y el contenido volumétrico de cemento no hidratado, u , se relacionan por:

$$\log \frac{f_p}{f} = \alpha \log \frac{1}{1 - g - u}$$

Donde f_p es el creep de una pasta pura de cemento de la misma calidad que la del hormigón, y:

$$\alpha = \frac{3(1 - \mu)}{1 + \mu + 2(1 - 2\mu_a) \frac{E}{E_a}}$$

Aquí, μ_a = relación de Poisson del agregado, μ = relación de Poisson del material que lo rodea (hormigón), E_a = módulo de elasticidad del agregado y E = módulo de elasticidad del material que lo rodea. Esta relación se aplica a hormigones elaborados tanto con agregado normal como ligero.

En la Figura 3.12 se ilustra la relación entre el creep del hormigón y su contenido de agregado (no se toma en cuenta el volumen de cemento no hidratado). Se puede notar que, en la mayoría de las mezclas usuales, la variación en el contenido de agregado y en el creep resultante es pequeña.

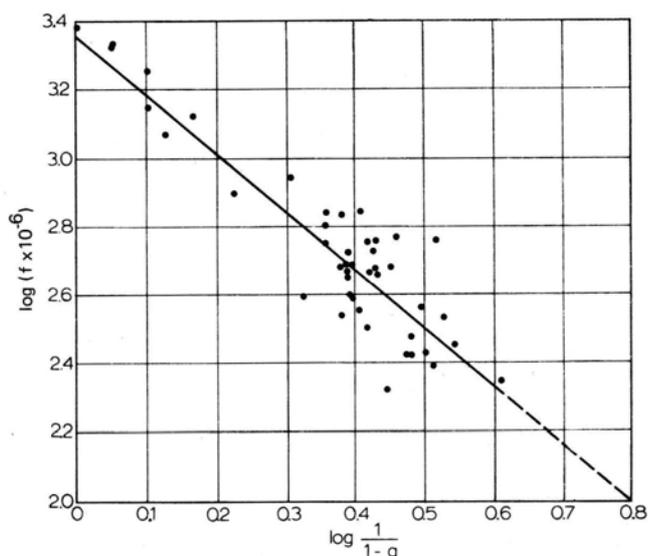


Figura 3.12 Relación entre el creep f después de 28 días bajo carga y contenido de agregado g para muestras almacenadas en humedad, cargadas a la edad de 14 días, con una relación esfuerzo/resistencia de 0.50.⁸

Se ha sugerido que la granulometría, el tamaño máximo y la forma del agregado, afectan al creep. No obstante, hoy en día se piensa que estos factores actúan tan sólo en cuanto al efecto que tienen directa o indirectamente sobre el contenido del agregado, siempre y cuando haya en todos los casos una compactación completa del hormigón.

Existen, sin embargo, algunas propiedades físicas del agregado que influyen en el creep de éste. El módulo de elasticidad del agregado es probablemente el factor más importante. Mientras mayor sea el módulo de elasticidad, mayor será la restricción que ofrece al creep potencial de la pasta de cemento; esto se desprende claramente de la ecuación para α , escrita anteriormente.

Se ha encontrado que la porosidad del agregado también afecta al creep del hormigón, pero como los agregados porosos tienen menor módulo de elasticidad, es posible que en este caso la porosidad no sea un factor independiente. Por otro lado, se puede ver que la porosidad del agregado y aún más, la absorción, desempeñan un papel directo en la transferencia de humedad dentro del hormigón; esta transferencia puede asociarse con el creep.

Debido a las grandes variaciones en el agregado de cualquier tipo mineralógico o petrológico, no es posible hacer ningún enunciado general acerca del creep del hormigón elaborado con diferentes tipos. Sin embargo, los datos de la Figura 3.13 tienen considerable importancia: después de 20 años de almacenamiento a una humedad relativa del 50 por ciento, el hormigón elaborado con agregado arenisco presentó más del doble de creep que un hormigón elaborado con piedra caliza. En investigaciones anteriores encontraron una diferencia mayor entre las deformaciones unitarias de creep correspondientes a distintos agregados. Después de 18 meses bajo carga a una humedad relativa del 65 por ciento, el creep máximo fue 5 veces

mayor que el valor mínimo; en este experimento los agregados utilizados fueron, en orden de menor a mayor creep: basalto, cuarzo, grava, mármol, granito y arenisca.⁸

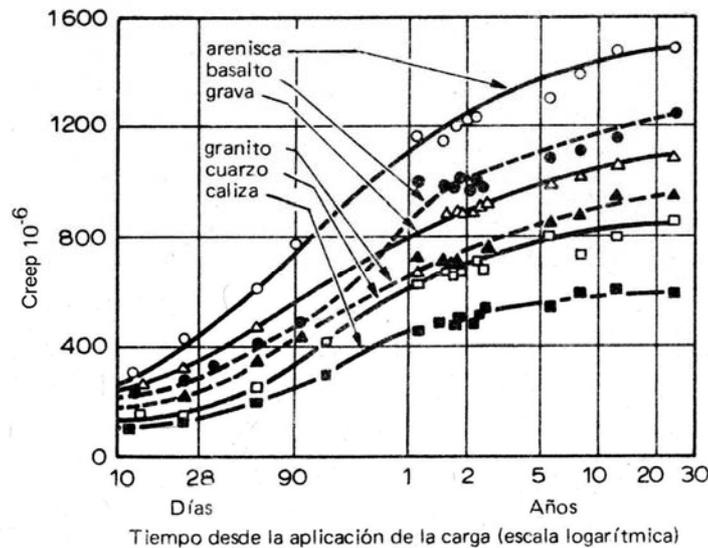


Figura 3.13 Creep del hormigón de proporciones de mezcla fijas pero de diferentes agregados, cargados a la edad de 28 días y almacenados al medio ambiente a 21°C, a una humedad relativa del 50 por ciento.⁸

El agregado ligero merece una mención especial, ya que comúnmente se cree que produce un creep considerablemente mayor que el agregado de peso normal. Trabajos anteriores indican que no hay ninguna diferencia fundamental entre el agregado normal y el agregado ligero en lo que se refiere a sus propiedades de creep y que el valor más alto de creep en hormigones de agregado ligero tan sólo refleja el módulo de elasticidad menor del agregado. No hay diferencias inherentes en el comportamiento de agregados con recubrimientos o sin éstos, ni entre los que se obtienen mediante distintos procesos de manufactura, pero esto, desde luego, no significa que todos los agregados produzcan el mismo creep.⁸

3.4.1.3 Aditivos.

Se ha observado que en muchos casos, pero no en todos, los aditivos reductores de agua y los retardadores de fraguado aumentan el creep ya que conducen al refinamiento de poros en el producto hidratación. En general, es de esperar que los aditivos que incrementan la retracción por secado incrementaran el creep. Por lo tanto, si el creep reviste importancia para una estructura dada, será preciso examinar cuidadosamente la influencia de cualquier aditivo que se piense utilizar.

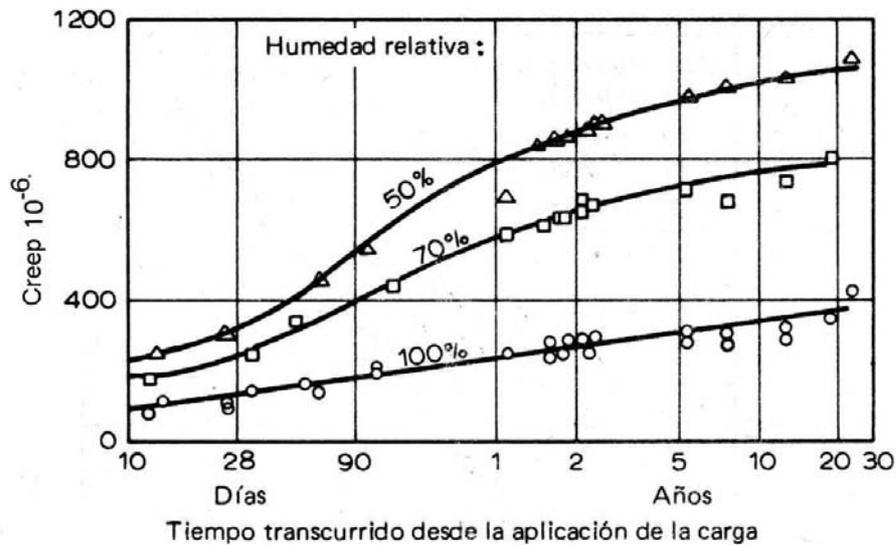


Figura 3.14 Creep del hormigón curado en niebla durante 28 días, y cargado y almacenado después de diferentes humedades relativas.⁸

3.4.1.4 Humedad relativa.

Una de las influencias más importantes es la humedad relativa del medio que rodea al hormigón. Para un hormigón determinado el creep será mayor mientras menor sea la humedad relativa. La Figura 3.14 ilustra el caso de muestras curadas a una humedad relativa de 100 por ciento que después se han cargado y expuesto a diferentes humedades. Tal tratamiento produce retracciones muy variables en distintas muestras durante las primeras etapas después de la aplicación de la carga sostenida. Los valores del creep varían también según la humedad, pero a edades posteriores los valores se aproximan unos a otros. Por lo tanto, el secado bajo carga eleva el creep del hormigón, es decir, induce el creep adicional por secado (Figura 3.9). La influencia de la humedad relativa es mucho menor, o nula en el caso de muestras que han alcanzado un equilibrio hidráulico con el medio que los rodea antes de la aplicación de la carga (Figura 3.15). El creep alcanzado por el hormigón en este estado es llama creep básico. En consecuencia, el creep del hormigón cargado a una edad avanzada se ve muy poco afectado por la humedad relativa del medio ambiente.

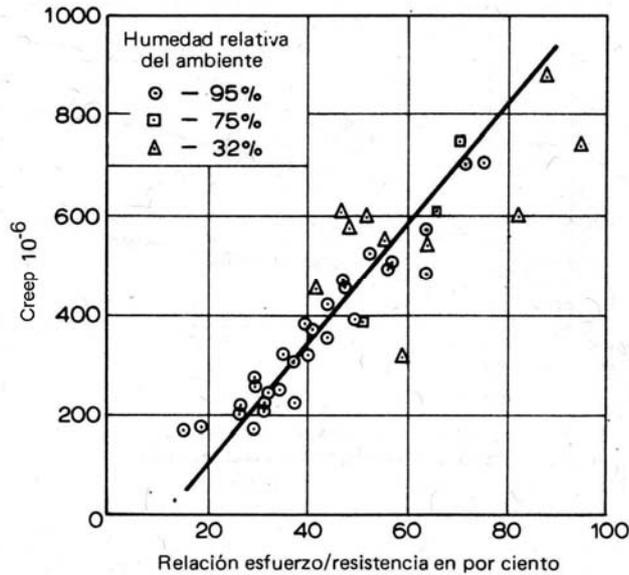


Figura 3.15 Creep de muestras de mortero curadas y almacenadas a diferentes humedades.⁸

3.4.1.5 Tiempo.

La magnitud del creep se ve muy afectado por la edad a la que se aplica la carga y esto posiblemente se deba, sobre todo, a un aumento en la resistencia del hormigón con la edad. Por la misma razón, la madurez afecta la fluencia como se muestra en la Figura 3.16.

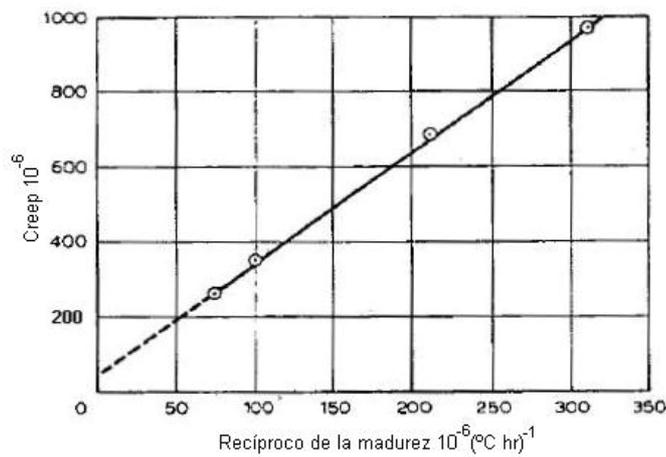


Figura 3.16 Influencia de la madurez del hormigón (cargado a la edad de 7 días) sobre el creep después de 420 días bajo carga.⁸

3.4.1.6 Geometría del elemento.

En muchas pruebas se encontró que el creep disminuye cuando aumenta el tamaño de la muestra. Esto puede deberse a los efectos de la retracción ya que el creep superficial se produce en condiciones de secado y, por lo tanto, es mayor que dentro del núcleo de la

muestra, donde las condiciones se aproximan a las de curado masivo. Aunque con el tiempo, el secado alcance al núcleo, éste ya se habrá hidratado ampliamente y tendrá una resistencia mayor, lo que se traduce a un menor creep. En el hormigón de curado masivo no pueden observarse efectos de tamaño.

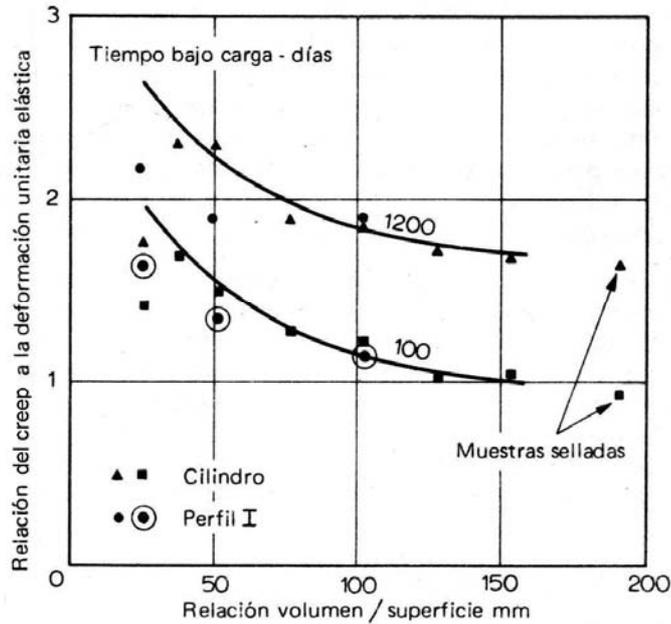


Figura 3.17 Comparación entre la relación del creep a la deformación unitaria elástica y la relación volumen/superficie.⁸

El efecto del tamaño puede expresarse en términos de la relación superficie/volumen del miembro de hormigón: la relación se muestra en la Figura 3.17. Se puede ver que la forma de la muestra tiene menos importancia que en el caso de la retracción. También la disminución en el creep cuando aumenta el tamaño es menor que en el caso de la retracción (Figura 3.18). Pero los valores de aumento del creep y de la retracción son iguales, lo cual indica que ambos fenómenos son función de la misma relación superficie/volumen. Estos datos se aplican a la retracción y al creep a una humedad relativa del 50 por ciento.

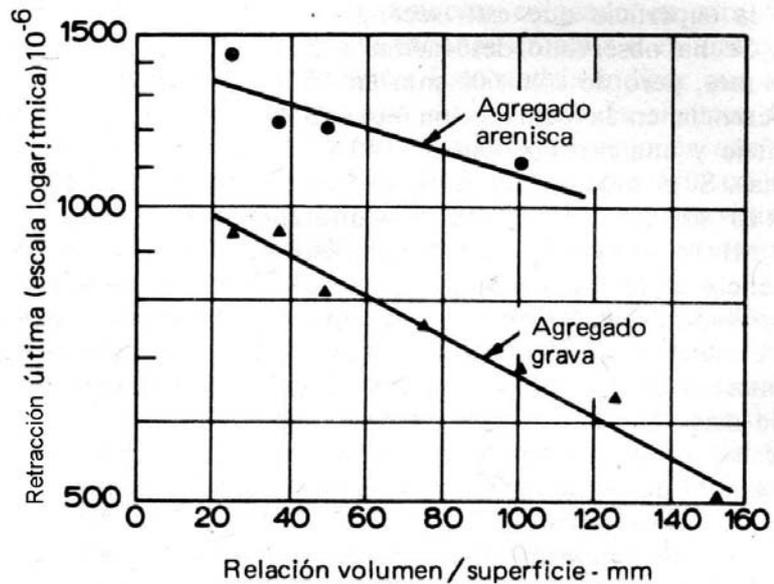


Figura 3.18 Comparación entre la retracción última y la relación volumen/superficie.⁸

3.5 Fisuramiento inducido por la retracción.

La importancia de la retracción en las estructuras está directamente relacionada con el fisuramiento. En un sentido estricto, nuestro campo de interés es la tendencia al fisuramiento ya que la aparición o la ausencia de fisuras no depende solamente de la retracción potencial. Por lo tanto, la magnitud de la deformación por retracción es solamente uno de los factores que rigen el agrietamiento del hormigón.

En la Figura 3.19, queda claro que los otros factores son:

- El módulo de elasticidad. A más bajo módulo de elasticidad, más baja será la cantidad del esfuerzo elástico de tensión inducido para una magnitud dada de retracción.
- El creep plástico. A más alto creep, más alta será la cantidad de relajamiento de esfuerzo y más bajo el esfuerzo neto de tensión.
- La resistencia a la tensión. Cuanto mas alta es la resistencia a la tensión, más bajo será el riesgo de que el esfuerzo por tensión exceda la resistencia y agriete el material.

La combinación de los factores convenientes para reducir el riesgo del agrietamiento en el hormigón, pueden describirse por un solo término llamado extensibilidad. Se dice que el hormigón tiene un alto grado de extensibilidad cuando puede someterse a grandes deformaciones sin fisurarse. Obviamente, para un riesgo mínimo de fisuramiento, el hormigón

deberá sufrir no solamente una menor retracción sino también deberá tener un alto grado de extensibilidad (es decir, bajo módulo de elasticidad, alto creep y alta resistencia a la tensión). En general, los hormigones de alta resistencia pueden ser más propensos a fisurarse debido a la mayor retracción térmica y menor relajamiento de esfuerzo; por otra parte, los hormigones de baja resistencia tienden a fisurarse menos, debido a una menor retracción térmica y un mayor relajamiento de esfuerzo. Nótese que la afirmación anterior es aplicable a los elementos de hormigón masivo; con secciones delgadas, el efecto de la deformación por retracción por secado será; más importante.

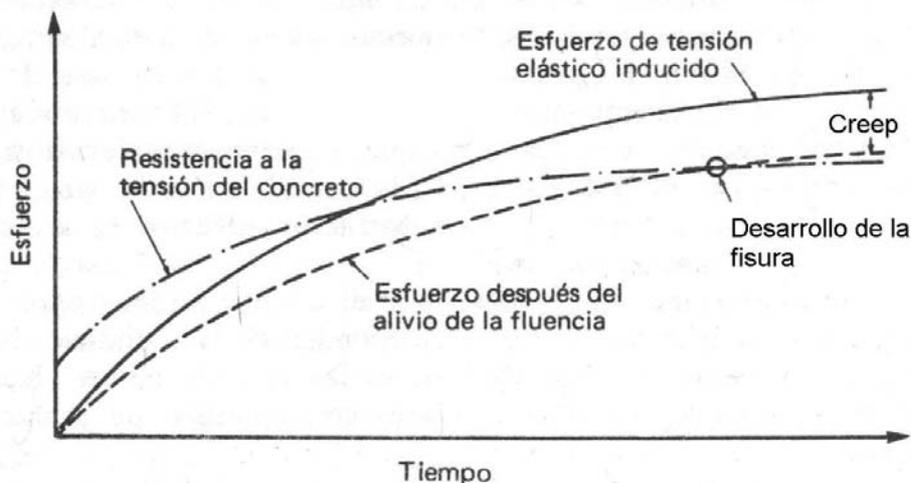


Figura 3.19 Configuración esquemática de la evolución de la fisura cuando se libera por creep el esfuerzo de tensión debido a la retracción restringida.⁸

Una gran extensibilidad en el hormigón es generalmente favorable, porque le permite soportar mayores cambios de volumen.

En la Figura 3.19 se muestra la pauta del fisuramiento cuando el esfuerzo se libera mediante creep. El fisuramiento puede evitarse solamente si el esfuerzo inducido por la deformación unitaria de retracción libre, reducida por el creep, es en todo los puntos menor que el esfuerzo de tensión que puede soportar el hormigón. Por lo tanto, el tiempo tiene un doble efecto: la resistencia se incrementa y, por lo tanto, se reduce el peligro de fisuramiento; pero, por otro lado, el módulo de elasticidad también aumenta, de modo que el esfuerzo inducido por una retracción dada se vuelve mayor. Más aún la liberación del creep disminuye con la edad de modo que la tendencia al fisuramiento aumenta.

3.5.1 Factores que afectan el agrietamiento.

Puede ser de interés el señalar que muchos factores que reducen la retracción por secado del hormigón también tenderán a reducir la extensibilidad. Por ejemplo, un incremento en el contenido del agregado o rigidez, reducirá la retracción por secado pero al mismo tiempo reducirá el relajamiento de esfuerzo y la extensibilidad. Este ejemplo demuestra la dificultad de tratar la tecnología del hormigón a partir de consideraciones puramente teóricas.

3.5.1.1 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 de 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 agrietamiento.

3.5.1.2 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 una mayor retracción que 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 fisura.

3.5.1.3 Energía.

Debemos notar que, desde el punto de vista de la energía, 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 agregado.

3.6 Estudios Anteriores.

En Chile se ha investigado el fenómeno de la retracción y creep en los hormigones producidos con cementos nacionales, Masana en el 2001, desarrollo un estudio en el cual determinó los principales parámetros que influyen en la retracción del hormigón en Chile. Las conclusiones al respecto fueron:

- La variable asentamiento del cono de Abrams, no sería una variable importante en la retracción hidráulica en el hormigón ya que, para igual asentamiento del cono de Abrams de dos hormigones diferentes, las dosis de agua pueden ser muy distintas y por lo tanto, la retracción hidráulica de cada uno de ellos también lo será.
- La dosis de agua afecta de manera importante la magnitud de la retracción hidráulica, ya que, mientras mayor sea la dosis utilizada en la fabricación del hormigón, mayor será también la retracción hidráulica.
- El tamaño máximo del árido afecta la magnitud de retracción hidráulica, de manera que, a mayor tamaño máximo del árido utilizado en la fabricación del hormigón menor será la retracción hidráulica, debido a que el volumen absoluto de árido restringiendo la deformación de la pasta también será mayor.
- Las dimensiones del elemento, caracterizadas por la razón entre el volumen del elemento y la superficie expuesta al secado (V/S), afectan la curva de evolución de la retracción hidráulica, de manera que, en probetas de menores dimensiones (menor razón V/S) se tendrá una evolución más rápida de retracción hidráulica que en probetas de mayores dimensiones (mayor V/S). Sin embargo, las probetas más pequeñas detienen su proceso de evolución antes que en las más grandes y por lo tanto, se deberían igualar para llegar a un mismo valor de retracción hidráulica última. Este hecho se cumpliría para razón V/S en un adecuado rango de diferencias ya que, en elementos muy grandes nunca llegarían a presentar la retracción hidráulica última de elementos más pequeños; debido a la retracción hidráulica diferencial que se produce entre el interior del elemento y la superficie expuesta a secado por condiciones de humedad.
- La clase de cemento afecta la evolución de la retracción hidráulica del hormigón, de modo tal que los hormigones con cemento portland tienen una evolución más lenta que hormigones con cemento portland puzolánico. Así también, la clase de cemento afectaría la magnitud de la retracción hidráulica última, por lo que, los hormigones con cemento portland tienen una menor retracción hidráulica que los hormigones de cemento portland puzolánico. Esta conclusión es

valida hasta los 448 días de secado ya que, las tendencias indican que la retracción hidráulica de ambos cementos seguirá aumentando aunque, la evolución del cemento portland puzolánico a esa edad haya comenzado a desacelerarse y por lo tanto, en el largo plazo la retracción hidráulica última podría ser similar.

- Existe una fuerte relación entre la pérdida de peso y la retracción hidráulica en el hormigón, puesto que, está afectada por los mismos factores que condicionan la magnitud de la retracción hidráulica en el hormigón. Esta relación permitiría justificar el comportamiento de la retracción hidráulica en cuanto a la magnitud que se obtendría de acuerdo a la pérdida de peso que tenga ese hormigón.

Sin embargo, la pérdida de peso no permite relacionar claramente la forma de evolución de la retracción hidráulica de hormigones con cemento portland y portland puzolánico ya que, tienen valores similares de pérdida de peso y que sin embargo, afectan considerablemente la evolución de la retracción hidráulica.

Además, se propone una fórmula para determinar la magnitud de la retracción para hormigones chilenos, en particular para los hechos con cementos de la clase portland puzolánicos

Considerando el estudio realizado por Masana, se realizó un estudio por Videla, Covarrubias y Masana (2001), para determinar la validez de los modelos de predicción de la retracción hidráulica en los hormigones chilenos, concluyo que:

Los modelos de predicción de la retracción hidráulica desarrollados en el extranjero no son capaces de estimar adecuadamente la retracción hidráulica de hormigones fabricados con hormigones chilenos. Diferencias principalmente en la clase de cemento y en la naturaleza de los áridos utilizados producen diferencias significativas en la retracción hidráulica de los hormigones fabricados en nuestro país. A tiempo de secado superiores a 90 días, en general todos los modelos subestiman la retracción hidráulica medida en hormigones fabricados con ambos tipos de cementos chilenos, con excepción de los modelos GZ, GL y Sakata que aplicados a hormigones con cementos portland presentan una estimación adecuada. Para hormigones fabricados con cemento portland puzolánicos, las retracciones medidas son en promedio 73, 73, 56, 51, 24 y 10% superiores que las estimadas con los modelos ACI 209, CEB 90, B3, GZ, GL y Sakata, respectivamente. A tiempos de secado menores a 90 días la diferencia disminuye y la relación entre retracción hidráulica medida y calculada es variable,

debido fundamentalmente a que la función del tiempo de la retracción hidráulica de los hormigones fabricados con cementos chilenos sería diferente a la informada en la bibliografía.

La retracción hidráulica de hormigones con cemento portland y portland puzolánicos es distinta tanto en evolución como en magnitud, encontrándose que hormigones con cemento portland puzolánico presentan en promedio una retracción hidráulica 25% mayor que en hormigones con cemento portland, cuando son comparados a igualdad de resistencia a compresión a los 28 días de edad (30 a 40 MPa). Una observación de relevante importancia es que la retracción hidráulica de hormigones con cementos portland puzolánicos se desarrolla inicialmente a mayor velocidad y luego se desacelera antes que en hormigones con cementos portland, probablemente debido al incremento de la permeabilidad 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 a edades tempranas.²

Capítulo 4 Planteamiento del programa experimental.

4.1 Planteamiento de la investigación.

Actualmente más del 80% del cemento producido en el país tiene adición puzolánica. Estas adiciones según la NCh148. varían entre 0 y 30% para cementos portland puzolánicos y entre 30 y 50% para cementos puzolánicos.

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

En el Capítulo 3 se explicó que la variación de volumen experimentada por el hormigón es un fenómeno normal y la retracción por secado es una de los más importantes a lo largo de la vida del hormigón, si a este fenómeno se suma la restricción de movimiento del hormigón se crean fuerzas las cuales lo tensionan y hacen que la extensibilidad del hormigón juegue un papel importante al momento de contrarrestar este fenómeno y así evitar la fisuración. Para estudiar el efecto de las adiciones puzolánicas en los cementos chilenos en este fenómeno se usarán cuatro cementos, cada uno con distinta dosis de puzolana, el rango de variación estará entre 0% de adición a 30% de adición.

4.1.1 Variables del estudio.

El estudio fue realizado procurando mantener constante la mayor cantidad de variables posibles, para así tener un mayor control del fenómeno en estudio.

Los ensayos se realizan a escala de mortero ocupando una arena normalizada, el motivo de esta decisión es para reducir el grado de heterogeneidad otorgada por la grava.

Además los resultados obtenidos con los morteros de prueba servirán para el objetivo principal de este estudio, en cuanto entrega información sobre la influencia del tipo de cemento en el nivel de retracción y potencial de fisuración.

También se mantuvo constante el tipo y finura de la puzolana y la razón agua cemento.

4.2 Materias primas.

4.2.1 Cemento.

Los cementos empleados en el trabajo experimental corresponden a cementos comerciales producidos por una planta cementera nacional, ambos cementos están elaborados según norma NCh 148 Of68. Estos cementos son:

- Cemento Portland puro, de Grado Alta Resistencia.
- Cemento Portland Puzolánico, de Grado Alta Resistencia.

Cada tipo de cemento fue homogeneizado y envasado en bolsas de polietileno selladas al vacío y se guardó hasta su uso. Tanto las bolsas como las cajas estaban marcadas como cemento portland puro y cemento portland puzolánico comercial respectivamente.

4.2.2 Puzolana.

La puzolana empleada en el trabajo experimental es la misma puzolana que se emplea en las plantas cementeras nacionales. Esta puzolana se encuentra en la Región Metropolitana en la comuna de Pudahuel.

La puzolana fue extraída desde los acopios, en fábrica y fue envasada en un saco el cual fue guardado hasta su uso.

4.2.3 Arena.

La arena ocupada en el trabajo experimental es normalizada bajo la norma NCh 158 Of67. Esta arena normal es producida y certificada por IDIEM, es envasada y sellada en bolsas de polietileno en cantidades de 1500 g. y embalada en cajas de 10 unidades En la Figura 4.1 se muestra la banda granulométrica por la cual se rige la arena.

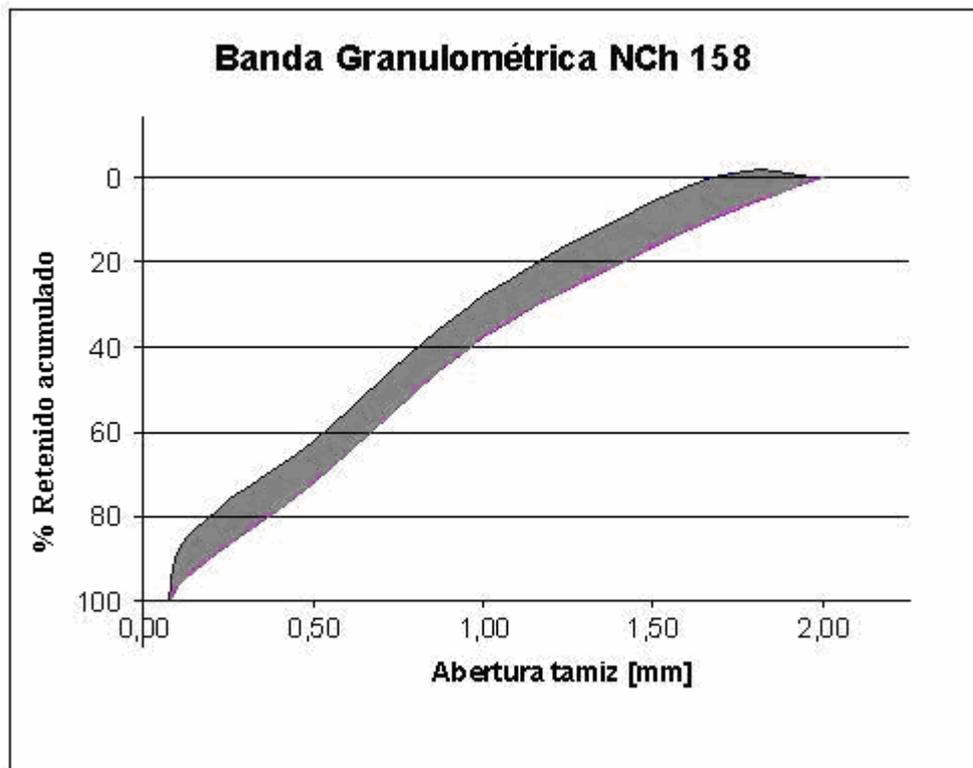


Figura 4.1 Banda granulométrica NCh 158

4.2.4 Agua.

El agua ocupada en el trabajo experimental es agua potable, conservada a una temperatura de 23 ± 2 °C.

4.3 Elaboración de cementos portland puzolánicos de laboratorio.

4.3.1 Procesamiento de la puzolana.

Dado que la puzolana fue extraída en su estado natural debe pasar por procesos previos antes de ser usada en la elaboración de los cementos de laboratorio.

4.3.1.1 Secado.

La puzolana fue secada en el horno a una temperatura de 110 °C hasta peso constante, luego de enfriarse se envasó en bolsas selladas al vacío y se guardó hasta trasladarla a las dependencias donde se procedería a la molienda. El secado de la puzolana se realizó en las dependencias de la sección de aglomerantes del IDIEM.

4.3.1.2 Molienda.

Apoyado en el estudio de Esteban Sepúlveda¹⁸, donde se hizo una estimación de la finura lograda v/s horas de molienda con el molino a ocupar, se fijó el tiempo de molienda acorde a la finura que se esperaba lograr. El tiempo definitivo de molienda fue de 270 minutos, en cargas de 5 kilos. La molienda de la puzolana se realizó en los laboratorios del IDIEM ubicados en la comuna de Cerrillos

4.3.1.3 Homogeneización y envasado.

Una vez terminado el proceso de la molienda de la puzolana a emplear, se procedió a homogeneizarla por 30 minutos, seguido de esto se envasó en bolsas de 5 kilos selladas al vacío y se guardó en cajas hasta su uso.

4.3.1.4 Caracterización de la puzolana.

Las características químicas de la puzolana a emplear son muy importantes para así conocer su composición. A continuación en la Tabla 4.1 se presenta el análisis químico de la puzolana a emplear en la fabricación de los cementos de laboratorio.

Tabla N°4.1 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

Después de homogeneizada y envasada la puzolana, se extrae una muestra representativa y se le realiza el ensayo de superficie específica según la norma NCh 159 Of.70, el resultado se presenta en la Tabla 4.2.

Tabla N°4.2 Superficie específica de la puzolana.

SUPERFICIE ESPECÍFICA						
Puzolana	Peso específico relativo (g/ml)	T (°C)	P (g)	e (l)	T (seg)	S (cm²/g)
	2,42	22,2	2,021	0,50	224,9	6998
		21,9	2,021	0,50	224,5	6988
					Promedio	7000

4.3.2 Cementos de laboratorio.

Para la elaboración de los cementos de laboratorio se debe mezclar la puzolana procesada según dosificación con el cemento portland. Se elaboraron 2 cementos de laboratorio a partir de la mezcla de cemento portland puro y puzolana, estos cementos tienen 20 y 30 por ciento del peso total del cemento en adición puzolánica. La nomenclatura para definir a los cementos comerciales mencionados en punto 4.2.1. se definen en la Tabla 4.3.

Tabla N°4.3 Nomenclatura cementos comerciales.

Abreviación	Nombre
CPN	Cemento portland puro.
CPPC	Cemento portland puzolánico comercial.

4.3.2.1 Cemento portland puzolánico al 20%.

4.3.2.1.1 Dosificación.

Este cemento es elaborado a partir de cemento CPN y puzolana, la dosificación de puzolana es al 20% del peso total del cemento.

4.3.2.1.2 Homogeneización y envasado.

Una vez terminado el proceso de elaboración, todo el cemento portland puzolánico al 20%. se homogeneizó por 30 minutos, seguido de esto se envasó en bolsas de 2 kilos selladas al vacío y se guardó en cajas hasta su uso. Tanto las bolsas como las cajas estaban marcadas como cemento portland puzolánico al 20%.

4.3.2.2 Cemento portland puzolánico al 30%.

4.3.2.2.1 Dosificación.

Este cemento es elaborado a partir de cemento CPN y puzolana, la dosificación de puzolana es al 30% del peso total del cemento.

4.3.2.2.2 Homogeneización y envasado.

Una vez terminado el proceso de elaboración, todo el cemento portland puzolánico al 30% se homogeneizó por 30 minutos, seguido de esto se envasó en bolsas de 2 kilos selladas al vacío y se guardó en cajas hasta su uso. Tanto las bolsas como las cajas estaban marcadas como cemento portland puzolánico al 30%.

La nomenclatura que se usará para los cementos de laboratorio mencionados en 4.3.2.1. y 4.3.2.2. se define en la Tabla 4.4.

Tabla N°4.4 Nomenclatura de cementos de laboratorio.

Abreviación	Nombre	Composición
CPPA	Cemento portland puzolánico al 20%	CPN + 20% puzolana.
CPPB	Cemento portland puzolánico al 30%	CPN + 30% puzolana.

Finalmente se muestra en la Tabla 4.5 los cuatro tipos de cementos a ocupar en el trabajo experimental

Tabla N°4.5 Nomenclatura de cementos a ocupar.

Abreviación	Nombre	Composición
CPN	Cemento portland puro.	Clinker + Yeso
CPPA	Cemento portland puzolánico al 20%	CPN + 20% puzolana.
CPPB	Cemento portland puzolánico al 30%	CPN + 30% puzolana.
CPPC	Cemento portland puzolánico comercial.	Clinker + Yeso + 28% puzolana

4.4 Caracterización de los cementos.

4.4.1 Ensayos físicos a cementos.

4.4.1.1 Peso específico relativo.

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

El ensayo de determinación del peso específico 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.

4.4.1.2 Superficie específica.

La finura se define como la medida o tamaño de las partículas que componen el cemento; se expresa en cm^2/g lo cual llamamos superficie específica; esto se refleja en el proceso de 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.

4.4.1.3 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 de Vicat).

4.4.1.4 Tiempos 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 del 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 del 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 sonda de un aparato normalizado (aparato de Vicat). Los tiempos de fraguado, inicial y final, se expresarán en horas y minutos, con aproximación de 10 min.

4.4.2 Ensayos químicos a cementos.

4.4.2.1 Pérdida por calcinación.

Indica los constituyentes accidentales 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 el cemento se calienta en una mufla a una temperatura determinada y la pérdida en peso representa normalmente el agua higroscópica, la de prehidratación y el dióxido de carbono.

4.4.2.2 Trióxido de azufre (SO_3).

El trióxido de azufre nos indica la cantidad de yeso que contiene el cemento, además 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.

4.4.2.3 Residuo insoluble.

Indica las materias insolubles en ácido clorhídrico diluido que se encuentran 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 HC y posteriormente con NaOH.

4.5 Ensayos para caracterización del comportamiento de los morteros.

4.5.1 Resistencias mecánicas.

Para cada mortero estudiado se determinan las resistencias a la flexión y a compresión en probetas prismáticas de 4x4x16 cm, de acuerdo a las especificaciones de la norma chilena NCh158. Of67. Esta norma establece procedimientos de mezclado, compactación, desmolde, conservación y condiciones de ensayo para las probetas fabricadas. Para cada ensayo se confeccionan tres probetas, que se rompen a la flexión y los trozos restantes se ensayan a la compresión. Las resistencias finales a la flexión y a la compresión se expresan como el promedio de los resultados parciales.

Para cada mortero se determinan las resistencias mecánicas a las edades de 7 y 28 días.

Para el ensayo de resistencia mecánica, se consideran los ensayos de resistencia a flexotracción y a compresión, que se evalúan como la media aritmética de 3 y 6 probetas respectivamente.

4.5.2 Retracción libre.

Para cada mortero estudiado se determina la curva de retracción libre hasta la edad de 28 días, el procedimiento se realiza de acuerdo a las especificaciones de la norma NCh2221 Of94.

Para cada serie se confeccionan cuatro probetas prismáticas de 25x25x285 mm.

Se utiliza un reloj comparador marca Soiltest modelo CT384 para realizar las mediciones.

4.5.3 Retracción restringida.

Para cada mortero estudiado se determina la edad de fisuración mediante la confección de dos probetas por serie, para esto se ha implementado en el trabajo de investigación la norma ASTM C 1581-04.

4.5.3.1 Implementación de Normativa.

Este ensayo consiste en confinar el mortero u hormigón en un moldaje circular alrededor de un anillo de acero, el anillo de acero se encuentra equipado con strain gages para medir pequeñas deformaciones las cuales son causadas por la tensión ejercida sobre el anillo de acero, ya que al estar confinado el mortero u hormigón el proceso de retracción se ve impedido y al querer retraerse la mezcla ejerce presión a las paredes del anillo, esta presión es percibida por los strain gages que están conectados al sistema de adquisición de datos. El ensayo termina cuando existe una caída de más de 30 microstrain 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.

4.5.3.1.1 Aparatos.

4.5.3.1.1.1 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 rectificado 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

4.5.3.1.1.2 Strain gages.

Se utilizó strain gages marca BLH, en cada anillo se instalaron 2 strain gages a media altura del anillo y ubicados diametralmente opuestos uno con respecto al otro.

4.5.3.1.1.3 Sistema de adquisición de datos.

Para la adquisición de datos se utilizó un equipo marca TML Digital Strainmeter, modelo TC-31K y un Switching Box de 5 canales marca TML para TC-31K.

4.5.3.1.1.4 Anillo exterior (moldaje).

Estructura de madera diámetro exterior de 406 ± 3 mm y una altura de 150 ± 6 mm. La estructura está formada por dos medias cañas las cuales se ensamblan para formar el moldaje y se desarman para desmoldar la probeta.

4.5.3.1.1.5 Base no absorbente.

Base metálica cuadrada de 500×500 mm, tratada con pintura.

En la Figura 4.2 y Tabla N° 4.6 se muestran un esquema del montaje del ensayo y las dimensiones respectivas.

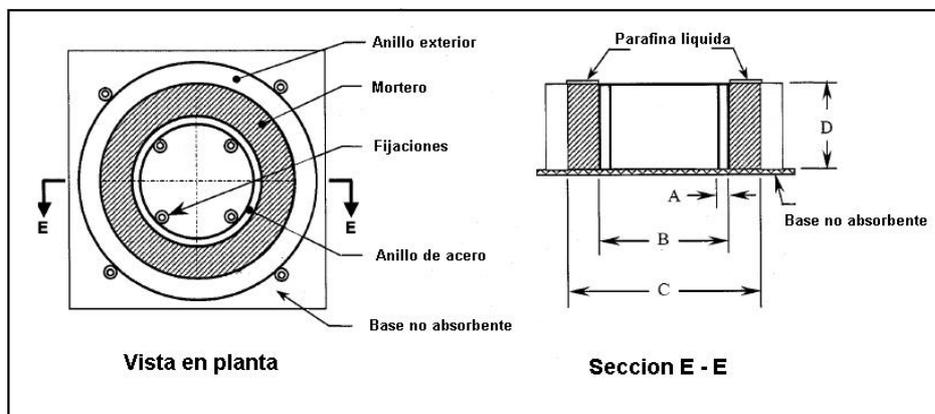


Figura 4.2 Montaje del ensayo.

Tabla N°4.6 Detalle de medidas.

	Dimensión		Tolerancia	unidad
A	12,5	±	0,13	[mm]
B	330	±	3	[mm]
C	406	±	3	[mm]
D	150	±	6	[mm]

4.5.4 Módulo de elasticidad.

Para cada mortero estudiado se determina el módulo de elasticidad a distintas edades según normativa ASTM C 469-94. Se confeccionan 6 probetas cilíndricas por cada serie las dimensiones de cada probeta son de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura.

Los módulos de elasticidad se obtienen a los 3, 7, 14 y 28 días de edad.

Capítulo 5 Desarrollo experimental.

5.1 Realización de ensayos.

De los ensayos nombrados en el Capítulo anterior la Sección de Aglomerantes de IDIEM realizó la batería completa de los ensayos físicos a cementos y ensayos químicos a cementos, además realizó el ensayo de resistencias mecánicas a morteros. Estos ensayos se realizaron a los cuatro tipos de cementos.

Los ensayos restantes fueron realizados en el laboratorio de investigación de la Sección de Hormigones de IDIEM, estos ensayos se detallan a continuación.

5.2 Fabricación de morteros.

5.2.1 Materiales.

Cemento: Variable, CPN, CPPA, CPPB, CPPC

Arena: Arena Normal según NCh 158 Of67.

Agua: Potable a una temperatura de 23°C ±3

5.2.2 Dosificación.

Se usa una razón A/C de 0,5 y una razón de Arena/Cemento de 3

5.2.3 Equipo.

Se usa una mezcladora con capacidad para preparar 30 litros de mortero de 3 velocidades lenta (1), media (2) y rápida (3) marca Blakeslee & Co modelo B - 20 (Figura 5.1)



Figura 5.1 Mezcladora.

5.2.4 Preparación del mortero.

Se vierte en la mezcladora el agua y luego el cemento, se selecciona la velocidad 1 en la mezcladora y se enciende por un minuto, luego de un minuto se vierte toda la arena a la mezcla, (en velocidad 1). Luego de añadir toda la arena a la mezcladora se mezcla por un minuto en velocidad 1. Se detiene la mezcladora y se varilla por los costados el bolo y luego se pone la mezcladora en velocidad 2 por dos minutos.

5.3 Confección de probetas.

5.3.1 Preparación de probetas.

5.3.1.1 Retracción libre.

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.

5.3.1.2 Retracción restringida.

Para el caso de 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.

5.3.1.3 Módulo de elasticidad.

Se apreta cada tuerca del moldaje cilíndrico, para después encajar los moldajes a su base respectiva y fijarlos a ella apretando las mariposas. Después se debe aplicar una capa de desmoldante en las paredes interiores del molde.

5.3.2 Llenado de probetas.

Para el correcto llenado de probetas se necesitan los siguientes materiales.

Pisón.

Poruña.

Espátula larga (para enrasar).

5.3.2.1 Retracción libre.

Se vierte la primera capa de la mezcla y con los dedos se presiona para compactar, luego se vierte la segunda capa de la mezcla, se levanta el molde y se golpea 5 veces hasta ver la lechada, luego se enrasa. Se repite el mismo procedimiento para cada molde.



Figura 5.2 Probetas de retracción libre.

5.3.2.2 Retracción restringida.

Se vierte una capa de mezcla hasta completar media altura del anillo (75 mm) y con el pisón se dan 75 golpes alrededor del anillo, luego se vierte la segunda capa de mezcla y con el pisón se dan otros 75 golpes, luego de esto se levanta la base y se deja caer 5 veces de cada lado hasta ver la lechada, después de esto se enrasa. Se repite el mismo procedimiento para cada molde.



Figura 5.3 Probetas de retracción restringida.

5.3.2.3 Módulo de elasticidad.

Se vierte la primera capa de la mezcla y con el pisón se dan 10 golpes, luego se vierte la segunda capa de la mezcla y se vuelve a dar 10 golpes con el pisón, después se levanta y deja caer 5 veces hasta ver la lechada, luego se enrasa del centro hacia fuera. Se repite el mismo procedimiento para cada molde.



Figura 5.4 Probetas cilíndricas.

5.3.3 Curado de las probetas.-

Después de 10 minutos de preparada cada probeta se mueve al ambiente de prueba.

Todas la probetas se curarán bajo condiciones de $23^{\circ}\text{C} \pm 2$, se usa una arpillera mojada para cubrir todas las probetas, el tiempo de curado es de 24 horas.

5.3.4 Desmolde.

5.3.4.1 Retracción libre.

Después de terminado el curado se desmolda cada probeta cuidadosamente evitando golpes que dañen la probeta, terminado el desmolde identificar cada probeta con el tipo de cemento y un número correlativo del 001 al 004.



Figura 5.5 Probetas de retracción libre en la cámara seca.

5.3.4.2 Retracción restringida.

Después de terminado el curado, se sella la parte superior del anillo con parafina líquida, después de esto se quitan las fijaciones de ambos anillos y se retira el anillo exterior, luego se traslada el anillo a la mesa giratoria y se centra traspasando los cuadrantes que están en la mesa giratoria al anillo de mortero con un plumón.



Figura 5.6 Probetas de retracción restringida en la cámara seca.

5.3.4.3 Módulo de elasticidad.

Después de terminado el curado cada probeta se desmolda y se identifica cada una de ellas con el tipo de cemento y un número correlativo del 001 al 006.



Figura 5.7 Probetas cilíndricas en la cámara seca.

5.4 Ambiente de Prueba.

Todas las probetas después del desmolde están en un ambiente de prueba con condiciones de $23^{\circ}\text{C} \pm 2$ y $50\% \pm 4\%$, donde se lleva a cabo su secado.



Figura 5.8 Cámara seca

El ambiente de prueba regula automáticamente la temperatura y la humedad ambiente, sin embargo se controló la temperatura y la humedad llevando un registro diario con un termohidrógrafo (Figura 5.9)

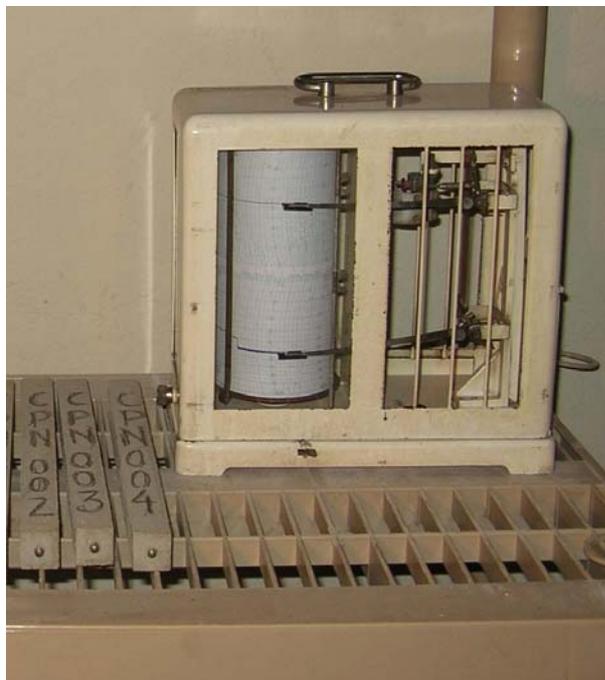


Figura 5.9 Termohidrógrafo.

5.5 Mediciones.

Para calcular la edad de cada probeta se considera como día cero el día que se preparó el mortero, es decir el desmolde se realiza cuando las probetas tienen la edad de un día.

Para todos los ensayos las mediciones terminan a la edad de 28 días.

5.5.1 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 (Figura 5.10). Este será el día uno de cada probeta, las mediciones usando el comparador serán cada 3, 7, 11, 14, 21 y 28 días después de iniciado el secado.



Figura 5.10 Medición de probetas de retracción libre.

5.5.2 Retracción restringida.

Una vez que la probeta esta en su lugar definitivo se deben conectar los cables de cada strain gages al Switching Box y así registrar la primera medición, éste será el inicio de secado, el strainmeter debe estar programado para registrar datos cada 30 minutos, además se debe realizar una inspección visual como mínimo cada 3 días y cuando se registre un decaimiento de tensión la inspección visual se debe realizar todos los días. La inspección visual se debe realizar con una buena iluminación y con una lupa.

Una vez que una fisura ha aparecido se debe anotar la fecha, el tamaño y el grosor, se debe medir y controlar todos los días la fisura hasta terminar el ensayo.



Figura 5.11 Adquisición de datos de ensayo de retracción restringida.



Figura 5.12 Vista de las probetas de retracción restringida.

5.5.3 Módulo de Elasticidad.

Los cilindros marcados del 001 al 004 de cada serie se usan para el ensayo de resistencia a compresión cilíndrica a 3, 7, 14 y 28 días respectivamente, con cada cilindro se calcula el 40% de la carga de rotura para la edad respectiva, se aplican ciclos de carga con el 40% de la carga de rotura a los cilindros 005 y 006 de cada serie para el ensayo de módulo elástico.



Figura 5.13 Ensayo de compresión de cilindros.

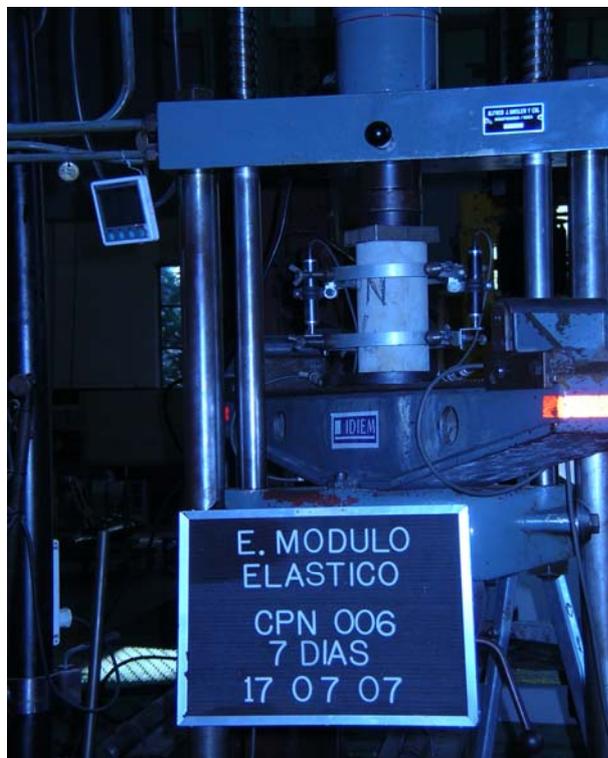


Figura 5.14 Ensayo de módulo elástico.

Capítulo 6 Resultados.

6.1 Propiedades físicas.

6.1.1 Peso específico relativo.

Según método de ensayo explicado en 4.4.1.1 se presentan los resultados correspondientes al peso específico relativo de cada cemento analizado.

6.1.1.1 Cemento CPN.

En la Tabla N°6.1 se presentan los resultados del ensayo de peso específico relativo para el cemento CPN.

Tabla N°6.1 Peso específico relativo de cemento CPN.

PESO ESPECÍFICO RELATIVO							
Cemento	N° de matraz	t1 °C	m [g]	V1 [ml]	V2 [ml]	t2 °C	Peso específico relativo [g/ml]
CPN	21	19,9	64,0	0,0	20,4	19,9	3,14
	25	19,9	64,0	0,0	20,4	19,9	3,14
Promedio							3,14

6.1.1.2 Cemento CPPA.

En la Tabla N°6.2 se presentan los resultados del ensayo de peso específico relativo para el cemento CPPA.

Tabla N°6.2 Peso específico relativo de cemento CPPA.

PESO ESPECÍFICO RELATIVO							
Cemento	N° de matraz	t1 °C	m [g]	V1 [ml]	V2 [ml]	t2 °C	Peso específico relativo [g/ml]
CPPA	3	20,0	64,0	0,0	21,7	20,0	2,95
	7	20,0	64,0	0,0	21,7	20,0	2,95
Promedio							2,95

6.1.1.3 Cemento CPPB.

En la Tabla N°6.3 se presentan los resultados del ensayo de peso específico relativo para el cemento CPPB.

Tabla N°6.3 Peso específico relativo de cemento CPPB.

PESO ESPECÍFICO RELATIVO							
Cemento	N° de matraz	t1 °C	m [g]	V1 [ml]	V2 [ml]	t2 °C	Peso específico relativo [g/ml]
CPPB	8	20,1	64,0	0,0	22,3	20,0	2,87
	12	20,0	64,0	0,0	22,3	20,0	2,87
Promedio							2,87

6.1.1.4 Cemento CPPC.

En la Tabla N°6.4 se presentan los resultados del ensayo de peso específico relativo para el cemento CPPC.

Tabla N°6.4 Peso específico relativo de cemento CPPC.

PESO ESPECÍFICO RELATIVO							
Cemento	N° de matraz	t1 °C	m [g]	V1 [ml]	V2 [ml]	t2 °C	Peso específico relativo [g/ml]
CPPC	15	20,0	64,0	0,0	21,6	20,0	2,96
	20	20,0	64,0	0,0	21,6	20,0	2,96
Promedio							2,96

6.1.2 Superficie específica.

Según método de ensayo explicado en 4.4.1.2 se presentan los resultados correspondientes a superficie específica de cada cemento analizado.

6.1.2.1 Cemento CPN.

En la Tabla N°6.5 se presentan los resultados del ensayo de superficie específica para el cemento CPN.

Tabla N°6.5 Superficie específica de cemento CPN.

SUPERFICIE ESPECIFICA					
Cemento	T [°C]	P [g]	e	T [seg]	S [cm²/g]
CPN	20,8	2,630	0,50	72,5	3050
	21,0	2,630	0,50	72,1	3043
				Promedio	3050

6.1.2.2 Cemento CPPA.

En la Tabla N°6.6 se presentan los resultados del ensayo de superficie específica para el cemento CPPA.

Tabla N°6.6 Superficie específica de cemento CPPA.

SUPERFICIE ESPECIFICA					
Cemento	T [°C]	P [g]	e	T [seg]	S [cm²/g]
CPPA	21,4	2,463	0,50	115,5	4114
	21,6	2,463	0,50	115,9	4122
				Promedio	4100

6.1.2.3 Cemento CPPB.

En la Tabla N°6.7 se presentan los resultados del ensayo de superficie específica para el cemento CPPB.

Tabla N°6.7 Superficie específica de cemento CPPB.

SUPERFICIE ESPECIFICA					
Cemento	T [°C]	P [g]	e	T [seg]	S [cm²/g]
CPPB	21,5	2,396	0,50	131,5	4512
	21,5	2,396	0,50	130,5	4492
				Promedio	4500

6.1.2.4 Cemento CPPC.

En la Tabla N°6.8 se presentan los resultados del ensayo de superficie específica para el cemento CPPC.

Tabla N°6.8 Superficie específica de cemento CPPC.

SUPERFICIE ESPECIFICA					
Cemento	T [°C]	P [g]	e	T [seg]	S [cm²/g]
CPPC	21,9	2,472	0,50	151,7	4699
	22,0	2,472	0,50	151,3	4691
				Promedio	4700

6.1.3 Agua de consistencia normal.

Según método de ensayo explicado en 4.4.1.3 se presentan los resultados correspondientes a consistencia normal de cada cemento analizado.

En la Tabla N°6.9 se presentan los resultados del ensayo de consistencia normal realizado para los cuatro cementos en estudio.

Tabla N°6.9 Agua de consistencia normal de cemento CPN, CPPA, CPPB y CPPC.

Agua de consistencia Normal			
Cemento	m [g]	agua consistencia normal	
		[ml]	[%]
CPN	500	139	27,80
CPPA	500	140	28,00
CPPB	500	142	28,40
CPPC	500	160	32,00

6.1.4 Tiempos de fraguado.

Según método de ensayo explicado en 4.4.1.4 se presentan los resultados correspondientes a tiempos de fraguado de cada cemento analizado.

En la Tabla N°6.10 se presentan los resultados del ensayo de tiempos de fraguado realizado para los cuatro cementos en estudio.

Tabla N°6.10 Tiempos de fraguado de cemento CPN, CPPA, CPPB y CPPC.

Tiempos de Fraguado						
Cemento	N°	t1 [h:min]	t2 [h:min]	t3 [h:min]	Tiempo de fraguado	
	molde				inicial [h:min]	final [h:min]
CPN	Z	10:10	13:10	14:20	3:00	4:10
CPPA	I	10:40	13:10	14:30	2:30	3:50
CPPB	T	10:50	13:10	14:30	2:20	3:40
CPPC	G	11:10	13:20	14:30	2:10	3:20

6.2 Propiedades químicas.

6.2.1 Pérdida por calcinación.

Según método de ensayo explicado en 4.4.2.1 se presentan los resultados correspondientes a pérdida por calcinación de cada cemento analizado.

En la Tabla N°6.11 se presentan los resultados del ensayo de pérdida por calcinación realizado para los cuatro cementos en estudio.

Tabla N°6.11 Pérdida por calcinación de cemento CPN, CPPA, CPPB y CPPC.

Análisis Químico	
Cemento	PXC %
CPN	2,0
CPPA	2,3
CPPB	2,5
CPPC	2,8

6.2.2 Trióxido de azufre.

Según método de ensayo explicado en 4.4.2.2 se presentan los resultados correspondientes a trióxido de azufre de cada cemento analizado.

En la Tabla N°6.12 se presentan los resultados del ensayo de trióxido de azufre realizado para los cuatro cementos en estudio.

Tabla N°6.12 Trióxido de azufre de cemento CPN, CPPA, CPPB y CPPC.

Análisis Químico	
Cemento	SO ₃ %
CPN	1,7
CPPA	1,5
CPPB	1,3
CPPC	2,0

6.2.3 Residuo insoluble.

Según método de ensayo explicado en 4.4.2.3 se presentan los resultados correspondientes a residuo insoluble de cada cemento analizado.

En la Tabla N°6.13 se presentan los resultados del ensayo de residuo insoluble realizado para los cuatro cementos en estudio.

Tabla N°6.13 Residuo insoluble de cemento CPN, CPPA, CPPB y CPPC.

Análisis Químico	
Cemento	RESIDUO INSOLUBLE %
CPN	0,4
CPPA	14,9
CPPB	23,3
CPPC	20,5

6.3 Caracterización del comportamiento de los morteros.

6.3.1 Resistencias mecánicas.

Según método de ensayo explicado en 4.5.1 se presentan los resultados correspondientes a resistencias mecánicas de cada mortero estudiado.

6.3.1.1 Mortero CPN.

En la Tabla N°6.14 y Tabla N°6.15 se presentan los resultados del ensayo de resistencias mecánicas para el mortero CPN a 7 y 28 días respectivamente.

Tabla N°6.14 Resistencias mecánicas a los 7 días de mortero CPN.

Edad	7			
Cemento	Probeta N°	flexión [kN]	compresión [kN]	
			1	2
CPN	1	2,656	51,9	52,2
	2	2,714	51,4	51,6
	3	2,716	52,4	53,3
R [kgf/cm²]		64	332	

Tabla N°6.15 Resistencias mecánicas a los 28 días de mortero CPN.

Edad	28			
Cemento	Probeta N°	flexión [kN]	compresión [kN]	
			1	2
CPN	1	3,618	81,1	78,4
	2	3,660	78,8	77,4
	3	3,517	81,0	79,4
R [kgf/cm²]		86	506	

6.3.1.2 Mortero CPPA.

En la Tabla N°6.16 y Tabla N°6.17 se presentan los resultados del ensayo de resistencias mecánicas para el mortero CPPA a 7 y 28 días respectivamente.

Tabla N°6.16 Resistencias mecánicas a los 7 días de mortero CPPA.

Edad	7			
Cemento	Probeta N°	flexión [kN]	compresión [kN]	
			1	2
CPPA	1	2,400	50,4	49,7
	2	2,560	50,3	49,9
	3	2,355	49,9	50,5
R [kgf/cm²]		58	319	

Tabla N°6.17 Resistencias mecánicas a los 28 días de mortero CPPA.

Edad	28			
Cemento	Probeta N°	flexión [kN]	compresión [kN]	
			1	2
CPPA	1	3,282	75,4	72,9
	2	3,430	75,2	74,1
	3	3,267	74,2	73,0
R [kgf/cm²]		79	473	

6.3.1.3 Mortero CPPB.

En la Tabla N°6.18 y Tabla N°6.19 se presentan los resultados del ensayo de resistencias mecánicas para el mortero CPPB a 7 y 28 días respectivamente.

Tabla N°6.18 Resistencias mecánicas a los 7 días de mortero CPPB.

Edad	7			
Cemento	Probeta N°	flexión [kN]	compresión [kN]	
			1	2
CPPB	1	2,251	43,4	41,3
	2	2,280	43,0	41,5
	3	2,214	42,7	41,4
R [kgf/cm²]		54	269	

Tabla N°6.19 Resistencias mecánicas a los 28 días de mortero CPPB.

Edad	28			
Cemento	Probeta N°	flexión [kN]	compresión [kN]	
			1	2
CPPB	1	2,885	68,6	69,9
	2	3,178	67,1	68,8
	3	3,241	66,7	69,1
R [kgf/cm²]		74	436	

6.3.1.4 Mortero CPPC.

En la Tabla N°6.20 y Tabla N°6.21 se presentan los resultados del ensayo de resistencias mecánicas para el mortero CPPC a 7 y 28 días respectivamente.

Tabla N°6.20 Resistencias mecánicas a los 7 días de mortero CPPC.

Edad	7			
Cemento	Probeta N°	flexión [kN]	compresión [kN]	
			1	2
CPPC	1	2,782	57,2	58,4
	2	2,819	58,2	58,9
	3	2,799	57,6	57,7
	R [kgf/cm²]	67	370	

Tabla N°6.21 Resistencias mecánicas a los 28 días de mortero CPPC.

Edad	28			
Cemento	Probeta N°	flexión [kN]	compresión[kN]	
			1	2
CPPC	1	3,101	72,3	70,7
	2	3,148	72,6	71,0
	3	3,140	72,2	74,2
	R [kgf/cm²]	75	460	

6.3.2 Retracción libre.

Según método de ensayo explicado en 4.5.2 se presentan los resultados correspondientes a retracción libre de cada mortero estudiado.

6.3.2.1 Mortero CPN.

En la Tabla N°6.22 se presentan los resultados del ensayo de retracción libre para el mortero CPN hasta los 28 días de edad.

Tabla N°6.22 Retracción libre para mortero CPN.

Tipo cemento	Fecha	día 0	día 2	día 3	día 6	día 7	día 12	día 14	día 19	día 21	día 27	día 28
		CPN	Probeta 1	4,002	3,78	3,738	3,884	3,886	3,849	3,849	3,858	3,876
CPN	Probeta 2	5,018	4,796	4,752	4,902	4,906	4,868	4,866	4,876	4,898	4,867	4,854
CPN	Probeta 3	4,64	4,422	4,377	4,53	4,528	4,487	4,486	4,499	4,511	4,487	4,47
CPN	Probeta 4	4,269	4,052	4,015	4,157	4,155	4,118	4,115	4,126	4,144	4,115	4,099
	Patrón	6,824	6,655	6,651	6,828	6,833	6,804	6,806	6,825	6,847	6,833	6,819

6.3.2.2 Mortero CPPA.

En la Tabla N°6.23 se presentan los resultados del ensayo de retracción libre para el mortero CPPA hasta los 28 días de edad.

Tabla N°6.23 Retracción libre para mortero CPPA.

Tipo cemento	Fecha	día 0	día 4	día 7	día 12	día 13	día 14	día 15	día 18	día 20	día 25	día 28
		CPPA	Probeta 1	4,288	4,152	4,127	4,15	3,968	3,963	3,944	4,122	4,13
CPPA	Probeta 2	4,61	4,465	4,445	4,466	4,277	4,275	4,258	4,439	4,444	4,397	4,438
CPPA	Probeta 3	3,887	3,746	3,728	3,754	3,575	3,572	3,561	3,741	3,741	3,688	3,733
CPPA	Probeta 4	3,514	3,38	3,355	3,464	3,278	3,238	3,157	3,328	3,329	3,27	3,434
	Patrón	6,825	6,816	6,816	6,84	6,657	6,655	6,644	6,828	6,834	6,795	6,840

6.3.2.3 Mortero CPPB.

En la Tabla N°6.24 se presentan los resultados del ensayo de retracción libre para el mortero CPPB hasta los 28 días de edad.

Tabla N°6.24 Retracción libre para mortero CPPB.

Tipo cemento	Fecha	día 0	día 5	día 7	día 11	día 14	día 15	día 16	día 19	día 21	día 25	día 28
		CPPB	Probeta 1	4,787	4,642	4,643	4,613	4,476	4,472	4,46	4,635	4,645
CPPB	Probeta 2	5,634	5,482	5,484	5,447	5,315	5,318	5,299	5,475	5,481	5,439	5,435
CPPB	Probeta 3	4,803	4,654	4,66	4,625	4,494	4,485	4,477	4,649	4,655	4,628	4,625
CPPB	Probeta 4	5,682	5,543	5,537	5,483	5,342	5,342	5,294	5,469	5,59	5,429	5,409
	Patrón	6,816	6,816	6,820	6,787	6,657	6,654	6,641	6,816	6,826	6,804	6,815

6.3.2.4 Mortero CPPC.

En la Tabla N°6.25 se presentan los resultados del ensayo de retracción libre para el mortero CPPB hasta los 28 días de edad.

Tabla N°6.25 Retracción libre para mortero CPPC.

Tipo cemento	Fecha	día 0	día 3	día 7	día 11	día 14	día 17	día 22	día 23	día 24	día 25	día 28
		CPPC	Probeta 1	4,266	4,122	4,074	4,082	4,088	4,081	4,09	3,928	3,929
CPPC	Probeta 2	3,719	3,564	3,514	3,522	3,525	3,52	3,53	3,371	3,373	3,351	3,535
CPPC	Probeta 3	3,58	3,423	3,377	3,386	3,381	3,379	3,395	3,225	3,222	3,209	3,386
CPPC	Probeta 4	3,141	3,008	2,951	2,961	2,965	2,964	2,972	2,81	2,802	2,788	2,967
	Patrón	6,821	6,826	6,805	6,813	6,816	6,813	6,824	6,661	6,660	6,646	6,827

6.3.3 Retracción restringida.

Según método de ensayo explicado en 4.5.3 se presentan los resultados correspondientes a inspección visual de las probetas de retracción restringida de cada mortero estudiado. El registro empieza después de haber detectado una fisura, ya sea por una caída de tensión registrada por el strain meter o por inspección visual.

6.3.3.1 Mortero CPN.

En la Tabla N°6.26 y Tabla N°6.27 se presenta la inspección visual realizada al anillo D1 de la serie CPN.

Tabla N°6.26 Control de fisura N°1 para mortero CPN anillo D1.

Inspección visual			Control de fisura						
Probeta	D1		Fecha	17-Jul	18-Jul	19-Jul	23-Jul	27-Jul	31-Jul
Tipo de cemento	CPN		Edad [días]	7	8	9	13	17	21
Fecha de confección	10-Jul		Largo [cm]	10	15	15	15	15	15
Hora	20:00		Ancho [mm]	0,05	0,05	0,1	0,15	0,15	0,2
Detección de fisura			Control de fisura						
Fecha-Hora	16-Jul	18:00	Fecha	03-Ago	07-Ago				
Edad [días]	5,9		Edad [días]	24	28				
Ubicación	320°		Largo [cm]	15	15				
Largo [cm]	7		Ancho [mm]	0,2	0,2				
Ancho [mm]	0,05								

Tabla N°6.27 Control de fisura N°2 para mortero CPN anillo D1.

Inspección visual			Control de fisura						
Probeta	D1		Fecha	19-Jul	23-Jul	27-Jul	31-Jul	03-Ago	07-Ago
Tipo de cemento	CPN		Edad [días]	9	13	17	21	24	28
Fecha de confección	10-Jul		Largo [cm]	15	15	15	15	15	15
Hora	20:10		Ancho [mm]	0,1	0,1	0,15	0,2	0,2	0,2
Detección de fisura			Control de fisura						
Fecha-Hora	16-Jul	18:00	Fecha						
Edad [días]	5,9		Edad [días]						
Ubicación	170°		Largo [cm]						
Largo [cm]	10		Ancho [mm]						
Ancho [mm]	0,05								

En la Tabla N°6.28 y Tabla N°6.29 se presenta la inspección visual realizada al anillo D2 de la serie CPN.

Tabla N°6.28 Control de fisura N°1 para mortero CPN anillo D2.

Inspección visual			Control de fisura						
Probeta	D2		Fecha	19-Jul	23-Jul	27-Jul	31-Jul	03-Ago	07-Ago
Tipo de cemento	CPN		Edad [días]	9	13	17	21	24	28
Fecha de confección	10-Jul		Largo [cm]	15	15	15	15	15	15
Hora	20:15		Ancho [mm]	0,1	0,15	0,4	0,5	0,5	0,5
Detección de fisura			Control de fisura						
Fecha-Hora	16-Jul	18:10	Fecha						
Edad [días]	5,9		Edad [días]						
Ubicación	20°		Largo [cm]						
Largo [cm]	6		Ancho [mm]						
Ancho [mm]	0,05								

Tabla N°6.29 Control de fisura N°2 para mortero CPN anillo D2.

Inspección visual	
Probeta	D2
Tipo de cemento	CPN
Fecha de confección	10-Jul
Hora	20:15
Detección de fisura	
Fecha-Hora	17-Jul 17:10
Edad [días]	6,9
Ubicación	240°
Largo [cm]	13
Ancho [mm]	0,05

Control de fisura						
Fecha	19-Jul	23-Jul	27-Jul	31-Jul	03-Ago	07-Ago
Edad [días]	9	13	17	21	24	28
Largo [cm]	15	15	15	15	15	15
Ancho [mm]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05

Control de fisura						
Fecha						
Edad [días]						
Largo [cm]						
Ancho [mm]						

6.3.3.2 Mortero CPPA.

En la Tabla N°6.30 y Tabla N°6.31 se presenta la inspección visual realizada al anillo C1 de la serie CPPA.

Tabla N°6.30 Control de fisura N°1 para mortero CPPA anillo C1.

Inspección visual	
Probeta	C1
Tipo de cemento	CPPA
Fecha de confección	28-Jun
Hora	22:00
Detección de fisura	
Fecha-Hora	06-Jul 19:00
Edad [días]	7,9
Ubicación	280°
Largo [cm]	8
Ancho [mm]	0,05

Control de fisura						
Fecha	09-Jul	13-Jul	19-Jul	23-Jul	24-Jul	25-Jul
Edad [días]	11	15	21	25	26	27
Largo [cm]	15	15	15	15	15	15
Ancho [mm]	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9

Control de fisura						
Fecha	26-Jul					
Edad [días]	28					
Largo [cm]	15					
Ancho [mm]	0,9					

Tabla N°6.31 Control de fisura N°2 para mortero CPPA anillo C1.

Inspección visual	
Probeta	C1
Tipo de cemento	CPPA
Fecha de confección	28-Jun
Hora	22:00
Detección de fisura	
Fecha-Hora	06-Jul 15:00
Edad [días]	7,9
Ubicación	170°
Largo [cm]	7,5
Ancho [mm]	0,05

Control de fisura						
Fecha	13-Jul	19-Jul	23-Jul	24-Jul	25-Jul	26-Jul
Edad [días]	15	21	25	26	27	28
Largo [cm]	15	15	15	15	15	15
Ancho [mm]	0,05	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05

Control de fisura						
Fecha						
Edad [días]						
Largo [cm]						
Ancho [mm]						

En la Tabla N°6.32 y Tabla N°6.33 se presenta la inspección visual realizada al anillo C2 de la serie CPPA.

Tabla N°6.32 Control de fisura N°1 para mortero CPPA anillo C2.

Inspección visual	
Probeta	C2
Tipo de cemento	CPPA
Fecha de confección	28-Jun
Hora	22:10
Detección de fisura	
Fecha-Hora	04-Jul 15:10
Edad [días]	5,7
Ubicación	340°
Largo [cm]	15
Ancho [mm]	0,05

Control de fisura						
Fecha	06-Jul	09-Jul	13-Jul	19-Jul	23-Jul	24-Jul
Edad [días]	8	11	15	21	25	26
Largo [cm]	15	15	15	15	15	15
Ancho [mm]	0,5	1	1	1	1	1

Control de fisura						
Fecha	25-Jul	26-Jul				
Edad [días]	27	28				
Largo [cm]	15	15				
Ancho [mm]	1	1				

Tabla N°6.33 Control de fisura N°2 para mortero CPPA anillo C2.

Inspección visual	
Probeta	C2
Tipo de cemento	CPPA
Fecha de confección	28-Jun
Hora	22:00
Detección de fisura	
Fecha-Hora	04-Jul 15:10
Edad [días]	5,7
Ubicación	180°
Largo [cm]	2
Ancho [mm]	0,05

Control de fisura						
Fecha	13-Jul	18-Jul	23-Jul	24-Jul	25-Jul	26-Jul
Edad [días]	15	20	25	26	27	28
Largo [cm]	2	0	0	0	0	0
Ancho [mm]	0,05	0	0	0	0	0

Control de fisura						
Fecha						
Edad [días]						
Largo [cm]						
Ancho [mm]						

6.3.3.3 Mortero CPPB.

En la Tabla N°6.34 y Tabla N°6.35 se presenta la inspección visual realizada al anillo B1 de la serie CPPB.

Tabla N°6.34 Control de fisura N°1 para mortero CPPB anillo B1.

Inspección visual	
Probeta	B1
Tipo de cemento	CPPB
Fecha de confección	27-Jun
Hora	21:00
Detección de fisura	
Fecha-Hora	03-Jul 18:00
Edad [días]	5,9
Ubicación	0°
Largo [cm]	15
Ancho [mm]	0,05

Control de fisura						
Fecha	04-Jul	06-Jul	09-Jul	13-Jul	19-Jul	23-Jul
Edad [días]	7	9	12	16	22	26
Largo [cm]	15	15	15	15	15	15
Ancho [mm]	0,4	1	1,4	1,4	1,3	1,2

Control de fisura						
Fecha	24-Jul	25-Jul				
Edad [días]	27	28				
Largo [cm]	15	15				
Ancho [mm]	1,2	1,2				

Tabla N°6.35 Control de fisura N°2 para mortero CPPB anillo B1.

Inspección visual		Control de fisura						
Probeta	B1	Fecha	09-Jul	13-Jul	17-Jul	23-Jul	24-Jul	25-Jul
Tipo de cemento	CPPB	Edad [días]	12	16	20	26	27	28
Fecha de confección	27-Jun	Largo [cm]	7	7	0	0	0	0
Hora	21:00	Ancho [mm]	0,05	0,05	0	0	0	0
Detección de fisura		Control de fisura						
Fecha-Hora	04-Jul	11:00	Fecha					
Edad [días]	6,6		Edad [días]					
Ubicación	180°		Largo [cm]					
Largo [cm]	7		Ancho [mm]					
Ancho [mm]	0,05							

En la Tabla N°6.36 y Tabla N°6.37 se presenta la inspección visual realizada al anillo B2 de la serie CPPB.

Tabla N°6.36 Control de fisura N°1 para mortero CPPB anillo B2.

Inspección visual		Control de fisura						
Probeta	B2	Fecha	06-Jul	09-Jul	13-Jul	19-Jul	23-Jul	24-Jul
Tipo de cemento	CPPB	Edad [días]	9	12	16	22	26	27
Fecha de confección	27-Jun	Largo [cm]	15	15	15	15	15	15
Hora	21:10	Ancho [mm]	0,1	0,5	0,6	0,8	0,8	0,8
Detección de fisura		Control de fisura						
Fecha-Hora	04-Jun	11:10	Fecha	25-Jul				
Edad [días]	6,6		Edad [días]	28				
Ubicación	260°		Largo [cm]	15				
Largo [cm]	8		Ancho [mm]	0,8				
Ancho [mm]	0,05							

Tabla N°6.37 Control de fisura N°2 para mortero CPPB anillo B2.

Inspección visual		Control de fisura						
Probeta	B2	Fecha	06-Jul	09-Jul	13-Jul	23-Jul	24-Jul	25-Jul
Tipo de cemento	CPPB	Edad [días]	9	12	16	26	27	28
Fecha de confección	27-Jun	Largo [cm]	15	15	15	15	15	15
Hora	21:15	Ancho [mm]	0,1	0,1	0,1	0,05	0,05	0,05
Detección de fisura		Control de fisura						
Fecha-Hora	04-Jul	11:10	Fecha					
Edad [días]	6,6		Edad [días]					
Ubicación	10°		Largo [cm]					
Largo [cm]	8		Ancho [mm]					
Ancho [mm]	0,05							

6.3.3.4 Mortero CPPC.

En la Tabla N°6.38 y Tabla N°6.39 se presenta la inspección visual realizada al anillo A1 de la serie CPPC.

Tabla N°6.38 Control de fisura N°1 para mortero CPPC anillo A1.

Inspección visual			Control de fisura						
Probeta	A1		Fecha	24-Jun	25-Jun	26-Jun	28-Jun	29-Jun	03-Jul
Tipo de cemento	CPPC		Edad [días]	6	7	8	10	11	15
Fecha de confección	18-Jun		Largo [cm]	13	15	15	15	15	15
Hora	20:00		Ancho [mm]	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Detección de fisura			Control de fisura						
Fecha-Hora	23-Jun	15:00	Fecha	04-Jul	09-Jul	16-Jul			
Edad [días]	4,8		Edad [días]	16	21	28			
Ubicación	250°		Largo [cm]	15	15	15			
Largo [cm]	8,5		Ancho [mm]	0,7	0,7	0,7			
Ancho [mm]	0,05								

Tabla N°6.39 Control de fisura N°2 para mortero CPPC anillo A1.

Inspección visual			Control de fisura						
Probeta	A1		Fecha	24-Jun	25-Jun	29-Jun	03-Jul	04-Jul	09-Jul
Tipo de cemento	CPPC		Edad [días]	6	7	11	15	16	21
Fecha de confección	18-Jun		Largo [cm]	12	15	15	15	15	15
Hora	20:00		Ancho [mm]	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,1
Detección de fisura			Control de fisura						
Fecha-Hora	23-Jun	15:00	Fecha	16-Jul					
Edad [días]	4,8		Edad [días]	28					
Ubicación	85°		Largo [cm]	15					
Largo [cm]	7,5		Ancho [mm]	0,1					
Ancho [mm]	0,05								

En la Tabla N°6.40 y Tabla N°6.41 se presenta la inspección visual realizada al anillo A2 de la serie CPPC.

Tabla N°6.40 Control de fisura N°1 para mortero CPPC anillo A2.

Inspección visual			Control de fisura						
Probeta	A2		Fecha	24-Jun	29-Jun	03-Jul	04-Jul	09-Jul	13-Jul
Tipo de cemento	CPPC		Edad [días]	6	11	15	16	21	25
Fecha de confección	18-Jun		Largo [cm]	15	15	15	15	15	15
Hora	20:10		Ancho [mm]	0,05	0,25	0,4	0,5	0,5	0,5
Detección de fisura			Control de fisura						
Fecha-Hora	23-Jun	15:10	Fecha	16-Jul	23-Jul				
Edad [días]	4,8		Edad [días]	28	35				
Ubicación	30°		Largo [cm]	15	15				
Largo [cm]	10		Ancho [mm]	0,5	0,6				
Ancho [mm]	0,05								

Tabla N°6.41 Control de fisura N°2 para mortero CPPC anillo A2.

Inspección visual			Control de fisura						
Probeta	A2		Fecha	24-Jun	29-Jun	03-Jul	04-Jul	09-Jul	13-Jul
Tipo de cemento	CPPC		Edad [días]	6	11	15	16	21	25
Fecha de confección	18-Jun		Largo [cm]	15	15	15	15	15	15
Hora	20:15		Ancho [mm]	0,05	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Detección de fisura			Control de fisura						
Fecha-Hora	23-Jun	15:10	Fecha	16-Jul	23-Jul				
Edad [días]	4,8		Edad [días]	28	35				
Ubicación	240°		Largo [cm]	15	15				
Largo [cm]	13		Ancho [mm]	0,2	0,2				
Ancho [mm]	0,05								

6.3.4 Módulo de elasticidad.

Según método de ensayo explicado en 4.5.4 se presentan los resultados correspondientes a resistencias cilíndricas a compresión y módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de cada mortero en estudio.

6.3.4.1 Mortero CPN.

En la Tabla N°6.42 se presentan las resistencias cilíndricas a compresión a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero CPN.

Tabla N°6.42 Resistencia a compresión de cilindros de mortero CPN.

Resistencias a compresión de cilindros							
día	3	día	7	día	14	día	28
Tipo	CPN	Tipo	CPN	Tipo	CPN	Tipo	CPN
Probeta	001	Probeta	002	Probeta	003	Probeta	004
F [KN]	133,9	F [KN]	190,5	F [KN]	238,7	F [KN]	268,3
f'c [MPa]	17,05	f'c [MPa]	25,53	f'c [MPa]	31,29	f'c [MPa]	34,16

En la Tabla N°6.43 se presenta el resultado del ensayo de módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero CPN probeta 005.

Tabla N°6.43 Módulo de elasticidad de mortero CPN probeta 005.

Módulo de elasticidad							
día	3	día	7	día	14	día	28
Tipo	CPN	Tipo	CPN	Tipo	CPN	Tipo	CPN
Probeta	005	Probeta	005	Probeta	005	Probeta	005
f'c [MPa]	17,05	f'c [MPa]	25,53	f'c [MPa]	31,29	f'c [MPa]	34,16
E [MPa]	20000	E [MPa]	25800	E [MPa]	25900	E [MPa]	25700

En la Tabla N°6.44 se presenta el resultado del ensayo de módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero CPN probeta 006.

Tabla N°6.44 Módulo de elasticidad de mortero CPN probeta 006.

Módulo de elasticidad							
día	3	día	7	día	14	día	28
Tipo	CPN	Tipo	CPN	Tipo	CPN	Tipo	CPN
Probeta	006	Probeta	006	Probeta	006	Probeta	006
f'c [MPa]	17,05	f'c [MPa]	25,53	f'c [MPa]	31,29	f'c [MPa]	34,16
E [MPa]	20900	E [MPa]	24400	E [MPa]	26400	E [MPa]	26800

6.3.4.2 Mortero CPPA.

En la Tabla N°6.45 se presentan las resistencias cilíndricas a compresión a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero CPPA.

Tabla N°6.45 Resistencia a compresión de cilindros de mortero CPPA.

Resistencias a compresión de cilindros							
día	3	día	7	día	14	día	28
Tipo	CPPA	Tipo	CPPA	Tipo	CPPA	Tipo	CPPA
Probeta	001	Probeta	002	Probeta	003	Probeta	004
F [KN]	123,2	F [KN]	197,5	F [KN]	243,6	F [KN]	247,3
f'c [MPa]	15,69	f'c [MPa]	25,15	f'c [MPa]	31,02	f'c [MPa]	31,49

En la Tabla N°6.46 se presenta el resultado del ensayo de módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero CPPA probeta 005.

Tabla N°6.46 Módulo de elasticidad de mortero CPPA probeta 005.

Módulo de elasticidad							
día	3	día	7	día	14	día	28
Tipo	CPPA	Tipo	CPPA	Tipo	CPPA	Tipo	CPPA
Probeta	005	Probeta	005	Probeta	005	Probeta	005
f'c [MPa]	15,69	f'c [MPa]	25,15	f'c [MPa]	31,02	f'c [MPa]	31,49
E [Mpa]	19100	E [Mpa]	23700	E [Mpa]	24300	E [Mpa]	23700

En la Tabla N°6.47 se presenta el resultado del ensayo de módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero CPPA probeta 006.

Tabla N°6.47 Módulo de elasticidad de mortero CPPA probeta 006.

Módulo de elasticidad							
día	3	día	7	día	14	día	28
Tipo	CPPA	Tipo	CPPA	Tipo	CPPA	Tipo	CPPA
Probeta	006	Probeta	006	Probeta	006	Probeta	006
f'c [MPa]	15,69	f'c [MPa]	25,15	f'c [MPa]	31,02	f'c [MPa]	31,49
E [MPa]	17800	E [MPa]	22600	E [MPa]	22600	E [MPa]	23300

6.3.4.3 Mortero CPPB.

En la Tabla N°6.48 se presentan las resistencias cilíndricas a compresión a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero CPPB.

Tabla N°6.48 Resistencia a compresión de cilindros de mortero CPPB.

Resistencias a compresión de cilindros							
día	3	día	7	día	14	día	28
Tipo	CPPB	Tipo	CPPB	Tipo	CPPB	Tipo	CPPB
Probeta	001	Probeta	002	Probeta	003	Probeta	004
F [KN]	99,5	F [KN]	191,7	F [KN]	235,9	F [KN]	238,8
f'c [MPa]	12,67	f'c [MPa]	24,41	f'c [MPa]	30,04	f'c [MPa]	30,41

En la Tabla N°6.49 se presenta el resultado del ensayo de módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero CPPB probeta 005.

Tabla N°6.49 Módulo de elasticidad de mortero CPPB probeta 005.

Módulo de elasticidad							
día	3	día	7	día	14	día	28
Tipo	CPPB	Tipo	CPPB	Tipo	CPPB	Tipo	CPPB
Probeta	005	Probeta	005	Probeta	005	Probeta	005
f'c [MPa]	12,67	f'c [MPa]	24,41	f'c [MPa]	30,04	f'c [MPa]	30,41
E [MPa]	17800	E [MPa]	22200	E [MPa]	23500	E [MPa]	23000

En la Tabla N°6.50 se presenta el resultado del ensayo de módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero CPPB probeta 006.

Tabla N°6.50 Módulo de elasticidad de mortero CPPB probeta 006.

Módulo de elasticidad							
día	3	día	7	día	14	día	28
Tipo	CPPB	Tipo	CPPB	Tipo	CPPB	Tipo	CPPB
Probeta	006	Probeta	006	Probeta	006	Probeta	006
f'c [MPa]	12,67	f'c [MPa]	24,41	f'c [MPa]	30,04	f'c [MPa]	30,41
E [MPa]	17700	E [MPa]	21000	E [MPa]	22500	E [MPa]	23300

6.3.4.4 Mortero CPPC.

En la Tabla N°6.51 se presentan las resistencias cilíndricas a compresión a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero CPPC.

Tabla N°6.51 Resistencia a compresión de cilindros de mortero CPPC.

Resistencias a compresión de cilindros							
día	3	día	7	día	14	día	28
Tipo	CPC	Tipo	CPC	Tipo	CPC	Tipo	CPC
Probeta	001	Probeta	002	Probeta	003	Probeta	004
F [KN]	158,7	F [KN]	201,2	F [KN]	236,3	F [KN]	242,7
f'c [MPa]	20,21	f'c [MPa]	25,62	f'c [MPa]	30,09	f'c [MPa]	30,90

En la Tabla N°6.52 se presenta el resultado del ensayo de módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero CPPC probeta 005.

Tabla N°6.52 Módulo de elasticidad de mortero CPPC probeta 005.

Módulo de elasticidad							
día	3	día	7	día	14	día	28
Tipo	CPPC	Tipo	CPPC	Tipo	CPPC	Tipo	CPPC
Probeta	005	Probeta	005	Probeta	005	Probeta	005
f'c [MPa]	20,21	f'c [MPa]	25,62	f'c [MPa]	30,09	f'c [MPa]	30,90
E [MPa]	21100	E [MPa]	23200	E [MPa]	25300	E [MPa]	24500

En la Tabla N°6.53 se presenta el resultado del ensayo de módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero CPPC probeta 006.

Tabla N°6.53 Módulo de elasticidad de mortero CPPC probeta 006.

Módulo de elasticidad							
día	3	día	7	día	14	día	28
Tipo	CPPC	Tipo	CPPC	Tipo	CPPC	Tipo	CPPC
Probeta	006	Probeta	006	Probeta	006	Probeta	006
f'c [MPa]	20,21	f'c [MPa]	25,62	f'c [MPa]	30,09	f'c [MPa]	30,90
E [MPa]	20400	E [MPa]	22600	E [MPa]	23300	E [MPa]	25000

Capítulo 7 Análisis de resultados.

7.1 Propiedades físicas.

7.1.1 Peso específico relativo.

7.1.1.1 Tablas y gráficos.

En la Tabla N°7.1 se presenta un resumen de las Tablas N°6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 las cuales corresponden al resultado del ensayo del peso específico relativo de cada cemento.

Tabla N°7.1 Resumen de Peso específico relativo.

Cemento	Peso específico relativo [g/ml]
CPN	3,14
CPPA	2,95
CPPB	2,87
CPPC	2,96

Con los datos de la Tabla N°7.1 se obtiene el Gráfico N°7.1 donde se presenta un gráfico de barras para comparar los valores de peso específico relativo de cada cemento.

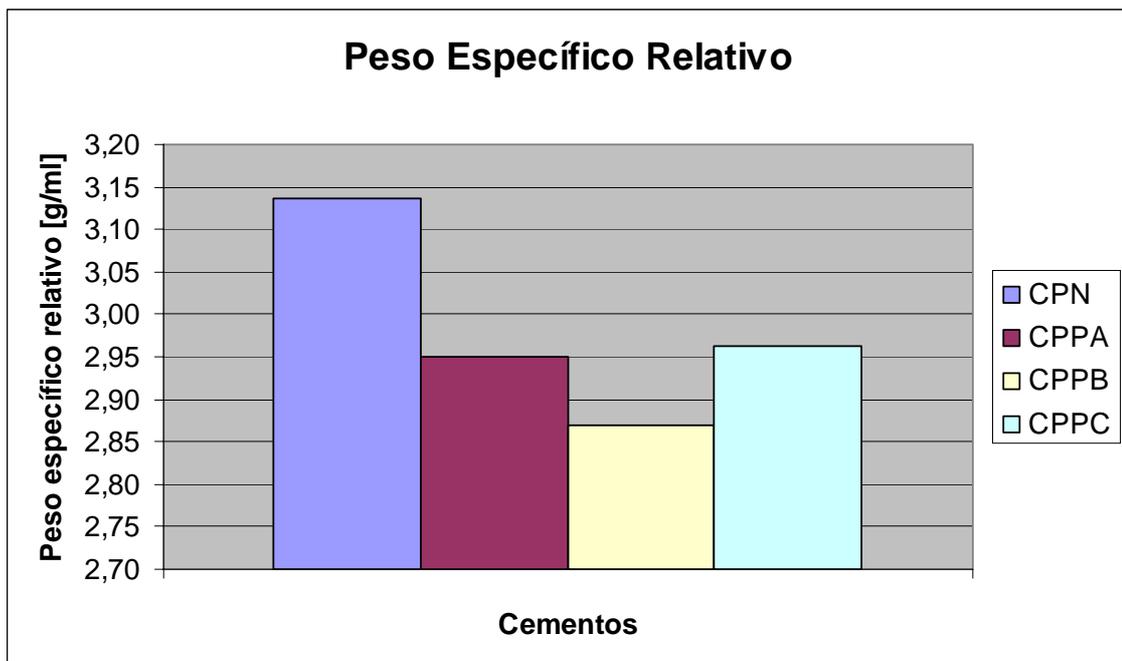


Gráfico N°7.1 Comparación del peso específico relativo de cada cemento.

7.1.1.2 Análisis.

En la Tabla N°7.1 se aprecia que el cemento CPN es el que tiene mayor peso específico relativo, esto se debe a que es un cemento portland puro y el CPPA, CPPB y CPPC son cementos puzolánicos, los cuales al poseer adición puzolánica (mineral más liviano que el cemento) tienen un peso específico relativo menor. Para los cementos CPPA y CPPB esta variación de peso específico relativo está relacionada con a la cantidad de puzolana adicionada en su confección que es de 20 y 30 por ciento respectivamente, mientras incrementa la cantidad de adición disminuye el peso específico relativo (comparado CPN). En el caso de CPPC su adición esta cerca del 28 por ciento, luego debería tener un peso específico relativo parecido al de CPPB, pero los resultados nos arrojan un valor parecido al de CPPA.

7.1.2 Superficie específica.

7.1.2.1 Tablas y gráficos.

En la Tabla N°7.2 se presenta un resumen de las Tablas N°6.5, 6.6, 6.7 y 6.8 las cuales corresponden al resultado del ensayo de superficie específica de cada cemento.

Tabla N°7.2 Resumen Superficie específica.

Cemento	S [cm ² /g]
CPN	3050
CPPA	4100
CPPB	4500
CPPC	4700

Con los datos de la Tabla N°7.2 se obtiene el Gráfico N°7.2 donde se presenta un gráfico de barras para comparar los valores de superficie específica de cada cemento.

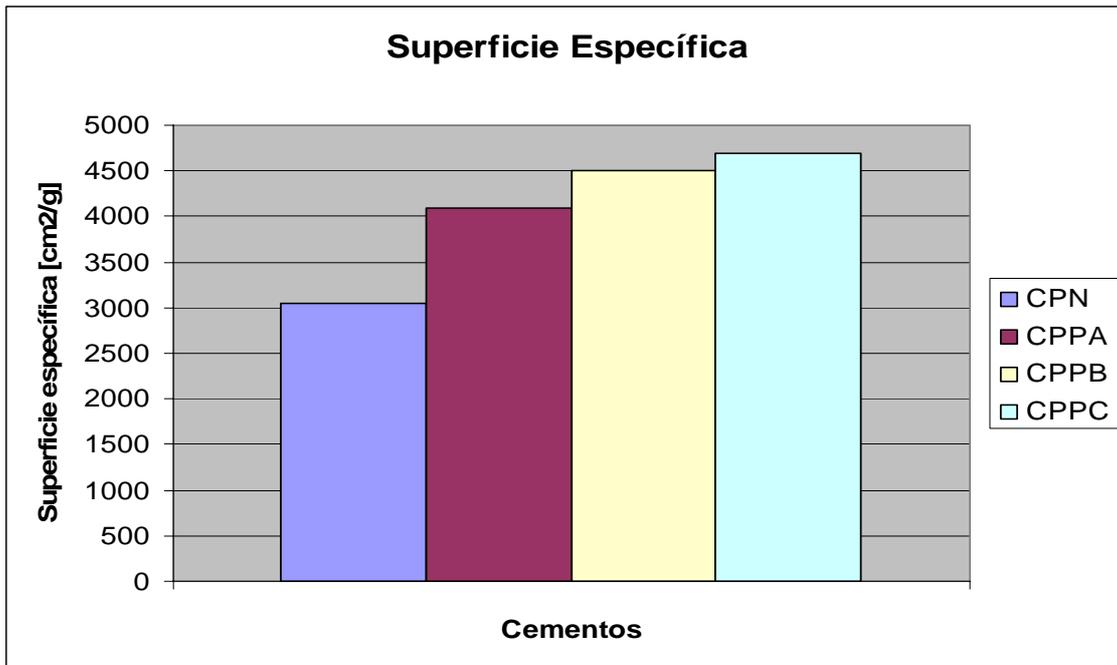


Gráfico N°7.2 Comparación de superficie específica de cada cemento.

7.1.2.2 Análisis.

En la Tabla N°7.2 se aprecia que la finura de los cementos experimentales (CPPA y CPPB) están del orden de la finura del cemento puzolánico comercial (CPPC) y bastante más lejos de la finura del cemento portland puro (CPN). Esto demuestra que al mezclar con puzolana el cemento portland puro la finura de la mezcla aumenta, esto se debe a que la puzolana añadida posee una finura mayor.

7.1.3 Agua de consistencia normal.

7.1.3.1 Tablas y gráficos.

La Tabla N°7.3 es un resumen de la Tabla N°6.9 la cual corresponde al resultado del ensayo de agua de consistencia normal de cada cemento.

Tabla N°7.3 Resumen de agua de consistencia normal

Cemento	Agua de consistencia normal	
	[ml]	[%]
CPN	139	27,80
CPPA	140	28,00
CPPB	142	28,40
CPPC	160	32,00

Con los datos de la Tabla N°7.3 se obtiene el Gráfico N°7.3 donde se presenta un gráfico de barras para comparar los de valores de agua de consistencia normal de cada cemento.

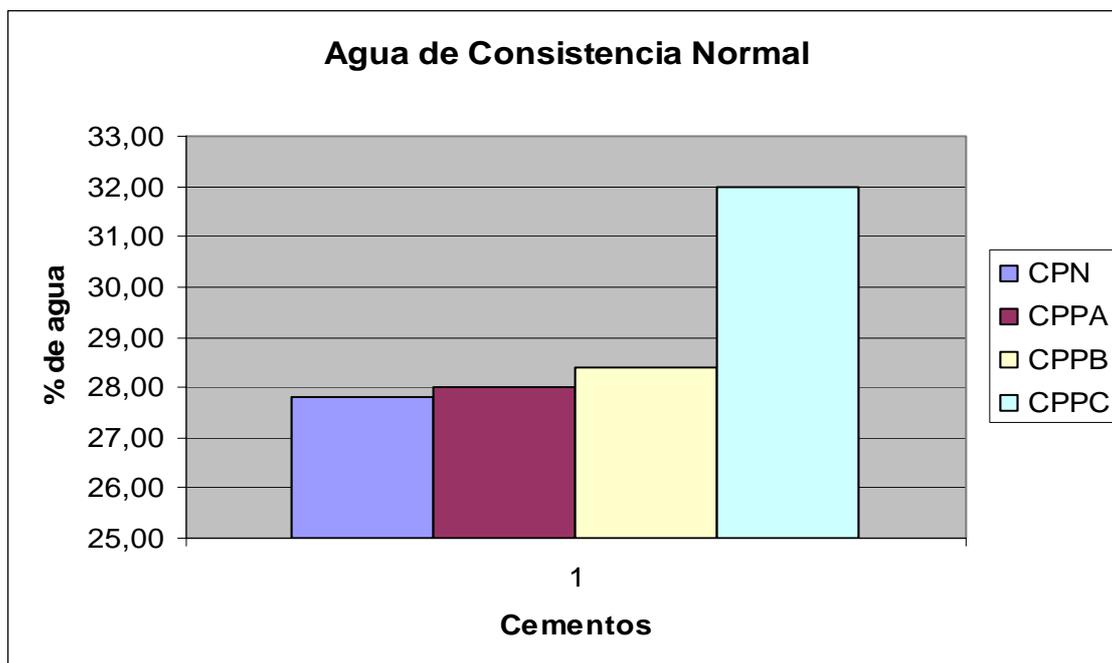


Gráfico N°7.3 Comparación de agua de consistencia normal de cada cemento.

7.1.3.2 Análisis.

En la Tabla N°7.3 se aprecia que el cemento CPN es el que necesita menor cantidad de agua para hidratarse, esto refleja dos cosas, que es el cemento que posee menor finura (Tabla N°7.2) y que los cementos portland puzolánicos necesitan más agua para hidratarse.

7.1.4 Tiempos de fraguado.

7.1.4.1 Tablas y gráficos.

7.1.4.1.1 Inicio de fraguado.

La Tabla N°7.4 es un resumen de la Tabla N°6.10 la cual corresponde al resultado del ensayo de tiempos de fraguado de cada cemento.

Tabla N°7.4 Resumen de tiempos de inicio de fraguado.

Cemento	inicial [h:min]
CPN	3:00
CPPA	2:30
CPPB	2:20
CPPC	2:10

Con los datos de la Tabla N°7.4 se obtiene el Gráfico N°7.4 donde se presenta un gráfico de barras para comparar los tiempos de inicio de fraguado de cada cemento.

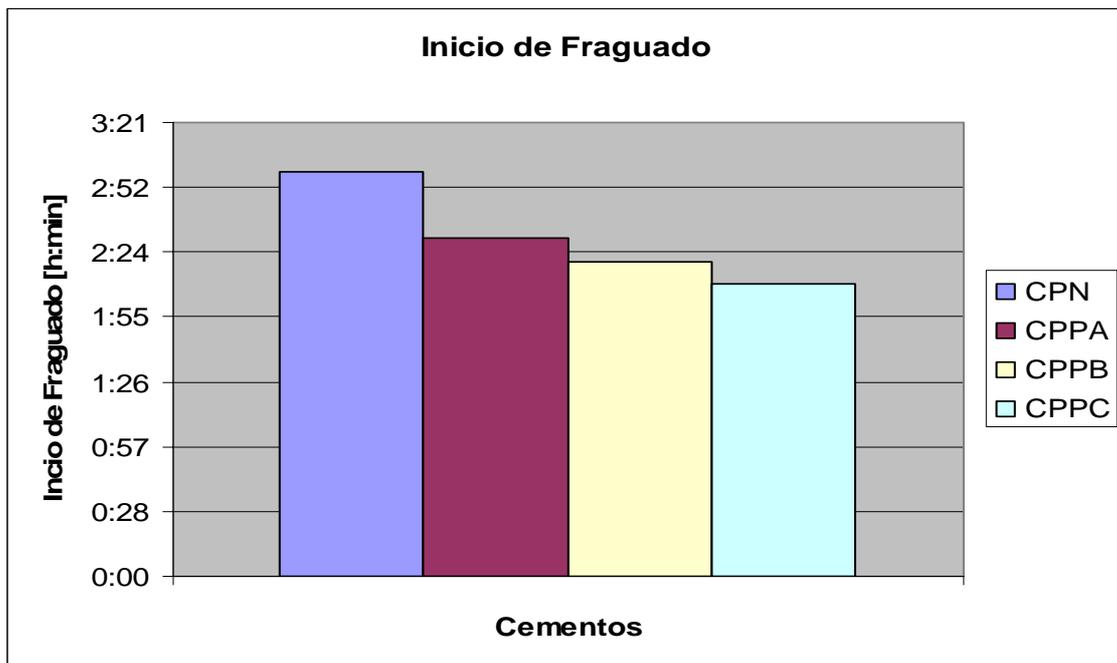


Gráfico N°7.4 Comparación de los tiempos de inicio de fraguado de cada cemento.

7.1.4.1.2 Final de Fraguado.

La Tabla N°7.5 está tomada de la Tabla N°6.10 la cual corresponde al resultado del ensayo de tiempos de fraguado de cada cemento.

Tabla N°7.5 Resumen de tiempos de final de fraguado.

Cemento	final [h:min]
CPN	4:10
CPPA	3:50
CPPB	3:40
CPPC	3:20

Con los datos de la Tabla N°7.5 se obtiene el Gráfico N°7.5 donde se presenta un gráfico de barras para comparar los tiempos de final de fraguado de cada cemento.

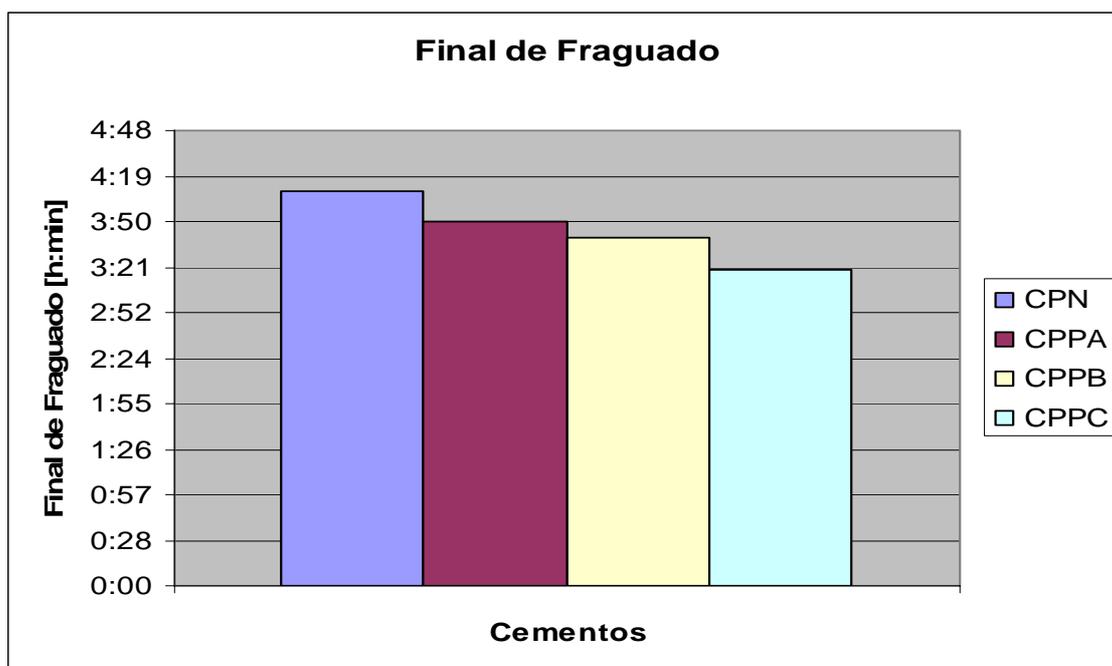


Gráfico N°7.5 Comparación de los tiempos de final de fraguado de cada cemento

7.1.4.2 Análisis.

En la Tabla N°7.4 se aprecian los tiempos de inicio de fraguado de cada cemento, para los cuales los puzolánicos tienen el menor tiempo de inicio de fraguado empezando por CPPC y luego CPPB, CPPA y por último el cemento portland puro (CPN). Esto concuerda con la teoría la cual dice que para cementos con una finura mayor se tendrá tiempos de inicio de fraguado menor.

En la Tabla N°7.5 se aprecian los tiempos de final de fraguado de cada cemento, para los cuales al igual que para el tiempo de inicio de fraguado los cementos puzolánicos tienen el menor tiempo empezando por CPPC y luego CPPB, CPPA para terminar con el cemento CPN, sin embargo el tiempo de fraguado de todos los cementos es en promedio de 1 hora con 15 minutos con una dispersión de ± 5 minutos.

Según la Tabla N°2.4 los valores de tiempos de inicio y fin de fraguado de cada cemento están de acorde con la norma NCh 148 y cumplen el requisito de clasificación tanto de cemento portland puro y cemento puzolánico según sea el caso

7.2 Propiedades químicas.

7.2.1 Pérdida por calcinación.

7.2.1.1 Tablas y gráficos.

La Tabla N°7.6 está tomada de la Tabla N°6.11 la cual corresponde al resultado del ensayo de pérdida por calcinación de cada cemento.

Tabla N°7.6 Resumen de Pérdida por calcinación.

Cemento	% PXC
CPN	2,0
CPPA	2,3
CPPB	2,5
CPPC	2,8

Con los datos de la Tabla N°7.6 se obtiene el Gráfico N°7.6 donde se presenta un gráfico de barras para comparar los valores de pérdida por calcinación de cada cemento.

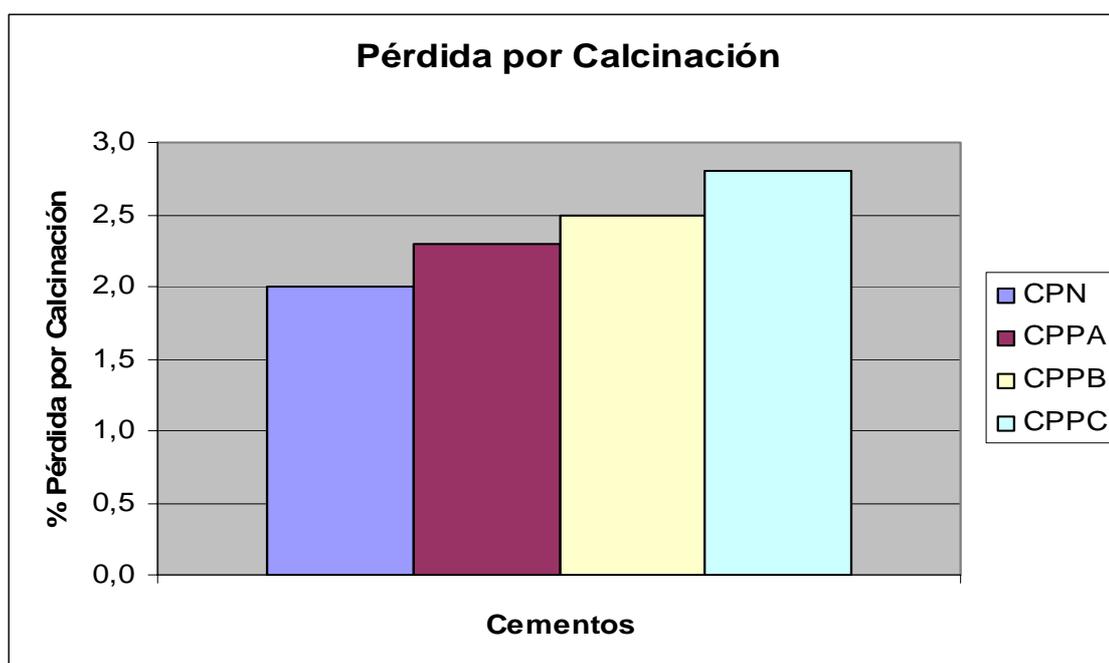


Gráfico N°7.6 Comparación de los valores de pérdida por calcinación de cada cemento

7.2.1.2 Análisis.

En la Tabla N°7.6 se aprecia que el cemento CPPC es el que posee mayor pérdida por calcinación, generalmente estos valores representan el agua que poseen materiales que no pasan por el horno, como el yeso, o la absorción de CO₂ por el cemento.

Dado que los cementos CPPA y CPPB solo se diferencian de CPN por su adición puzolánica se puede concluir que la diferencia corresponde agua cristalizada de la puzolana y se extiende esta razón al cemento CPPC.

7.2.2 Trióxido de azufre.

7.2.2.1 Tablas y gráficos.

La Tabla N°7.7 está tomada de la Tabla N°6.12 la cual corresponde al resultado del ensayo de trióxido de azufre de cada cemento.

Tabla N°7.7 Resumen de Trióxido de azufre.

Cemento	% SO ₃
CPN	1,7
CPPA	1,5
CPPB	1,3
CPPC	2,0

Con los datos de la Tabla N°7.7 se obtiene el Gráfico N°7.7 donde se presenta un gráfico de barras para comparar los valores de trióxido de azufre de cada cemento.

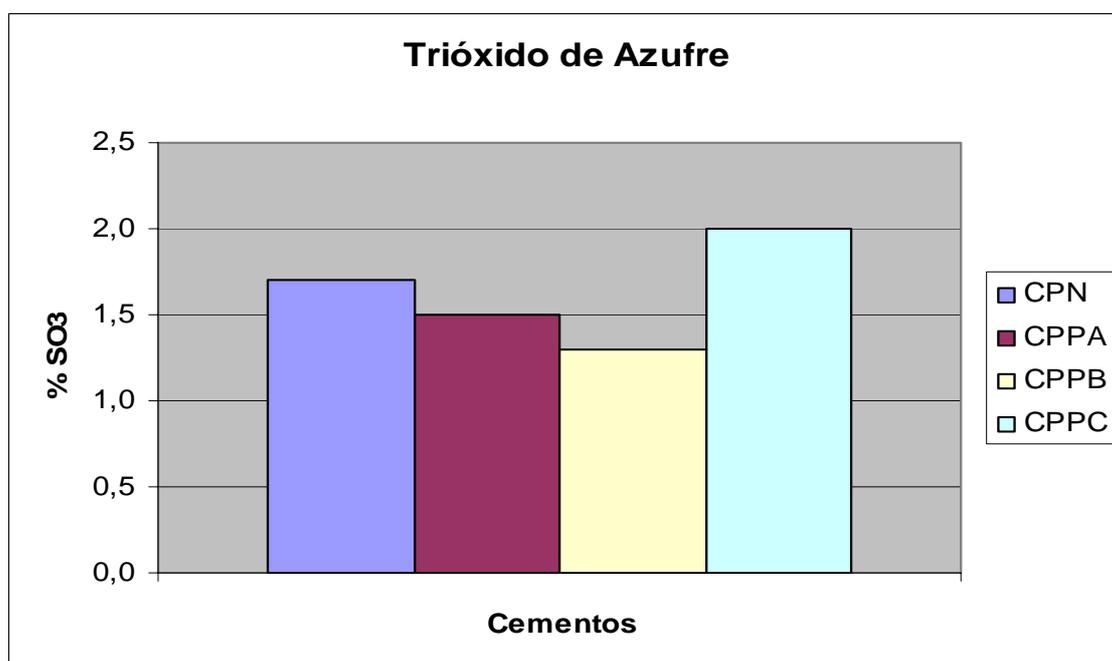


Gráfico N°7.7 Comparación de los valores de trióxido de azufre de cada cemento

7.2.2.2 Análisis.

En la Tabla N°7.7 se aprecia que los cementos CPPA y CPPB son los que poseen los valores más bajos de trióxido de azufre, esto se explica ya que estos dos cementos son una mezcla de CPN y puzolana, luego esto hace que el contenido de yeso en cada cemento experimental disminuya proporcionalmente a la adición de puzolana añadida. Además se aprecia que el cemento CPPC posee un mayor contenido de trióxido de azufre superando al cemento CPN. Cabe destacar que los cementos portland puro se mueven en un rango de SO₃ entre 2,2 a 2,7 por ciento, puntualmente este resultado está fuera del rango, pero dado que los cementos usados fueron homogeneizados antes de sus análisis se debe concluir que el resultado es real y que el resultado es representativo para la totalidad de cemento designado como CPN en esta investigación.

7.2.3 Residuo Insoluble.

7.2.3.1 Tablas y gráficos.

La Tabla N°7.8 está tomada de la Tabla N°6.13 la cual corresponde al resultado del ensayo de residuo insoluble de cada cemento.

Tabla N°7.8 Resumen de residuo insoluble.

Cemento	% RESIDUO INSOLUBLE
CPN	0,4
CPPA	14,9
CPPB	23,3
CPPC	20,5

Con los datos de la Tabla N°7.8 se obtiene el Gráfico N°7.8 donde se presenta un gráfico de barras para comparar los valores de residuo insoluble de cada cemento.

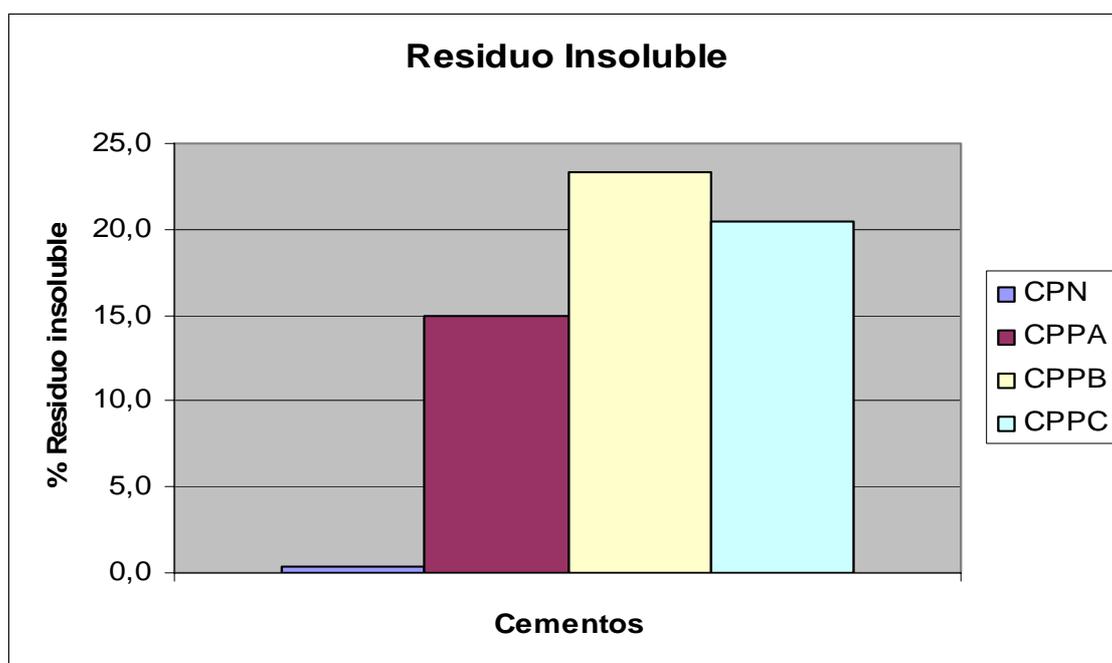


Gráfico N°7.8 Comparación de los valores de residuo insoluble de cada cemento

7.2.3.2 Análisis.

En la Tabla N°7.8 se aprecia que el cemento CPPB posee el valor más alto de porcentaje de residuo insoluble seguido de CPPC, CPPA y por último CPN. Este método de ensayo es un indicador para saber si la clinquerización ha sido completa, el 0,4 por ciento del cemento portland nos refleja un buen resultado al proceso llevado a cabo en el horno. Como el cemento CPPA y CPPB son mezclas de CPN con puzolana los porcentajes obtenidos en el ensayo para estos cementos reflejan el contenido de materiales insolubles en la adición puzolánica, esto mismo se puede concluir para el caso de CPPC.

Según la Tabla N°2.3 los valores de pérdida por calcinación, trióxido de azufre y residuo insoluble de cada cemento están de acorde con la norma NCh 148 y cumplen el requisito de clasificación tanto de cemento portland puro y cemento portland puzolánico según sea el caso.

7.3 Caracterización del comportamiento de los morteros.

7.3.1 Resistencias mecánicas.

7.3.1.1 Tablas y gráficos.

7.3.1.1.1 Resistencias a Flexión.

7.3.1.1.1.1 Mortero CPN.

En la Tabla N°7.9 se presenta un resumen de las Tablas N°6.14 y 6.15, las cuales corresponden al resultado del ensayo de resistencias mecánicas a los 7 y 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPN. En la Tabla N°7.9 se aprecian las resistencias mecánicas a flexión para 7 y 28 días de edad para el mortero CPN.

Tabla N°7.9 Resumen de resistencias mecánicas a la flexión de CPN.

CPN	
Resistencia a Flexión	
días	[kgf/cm ²]
0	0
7	64
28	86

Con los datos de la Tabla N°7.9 se obtiene el Gráfico N°7.9 donde se muestra la variación de resistencia a la flexión en el tiempo para el mortero confeccionado con cemento CPN.

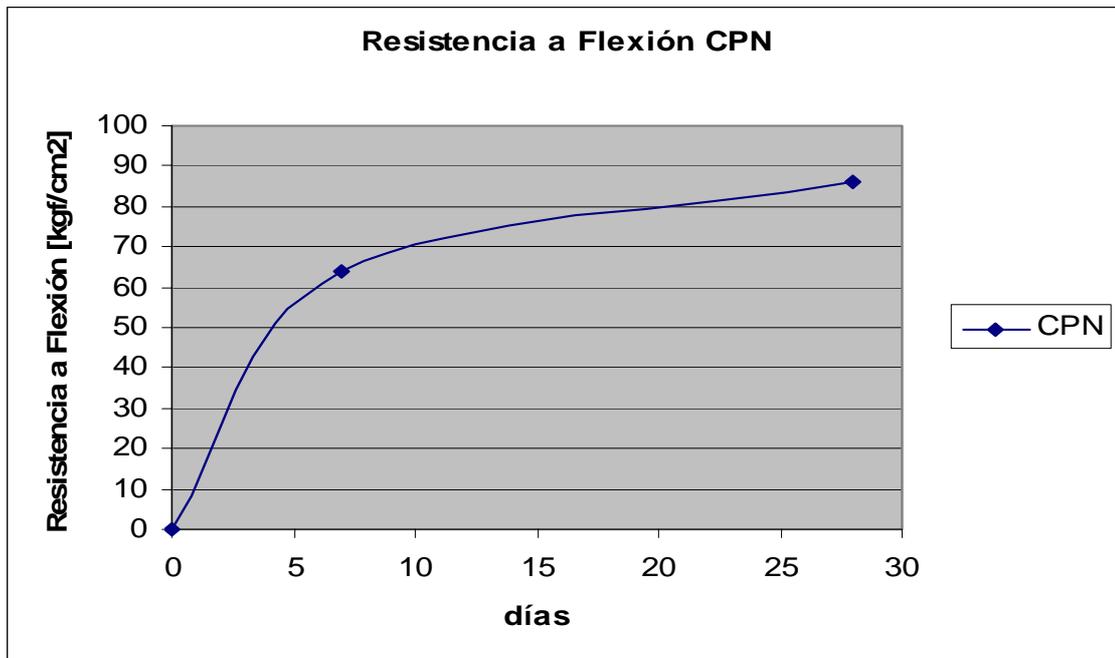


Gráfico N°7.9 Resistencia a la flexión en el tiempo para CPN.

7.3.1.1.2 Mortero CPPA.

En la Tabla N°7.10 se presenta un resumen de las Tablas N°6.16 y 6.17, las cuales corresponden al resultado del ensayo de resistencias mecánicas a los 7 y 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPPA. En la Tabla N°7.10 se aprecian las resistencias mecánicas a flexión para 7 y 28 días de edad para el mortero CPPA.

Tabla N°7.10 Resumen de resistencias mecánicas a la flexión de CPPA.

CPPA	
Resistencia a Flexión	
días	[kgf/cm ²]
0	0
7	58
28	79

Con los datos de la Tabla N°7.10 se obtiene el Gráfico N°7.10 donde se muestra la variación de resistencia a la flexión en el tiempo para el mortero confeccionado con cemento CPPA.

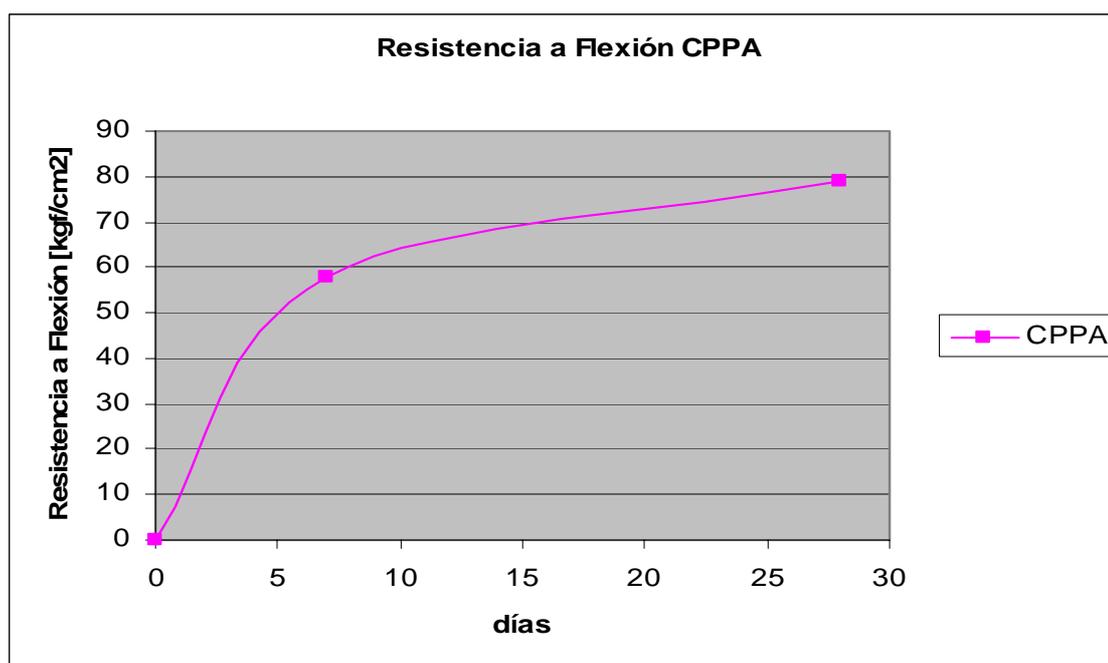


Gráfico N°7.10 Resistencia a la flexión en el tiempo para CPPA.

7.3.1.1.3 Mortero CPPB.

En la Tabla N°7.11 se presenta un resumen de las Tablas N°6.18 y 6.19, las cuales corresponden al resultado del ensayo de resistencias mecánicas a los 7 y 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPPB. En la Tabla N°7.11 se aprecian las resistencias mecánicas a flexión para 7 y 28 días de edad para el mortero CPPB.

Tabla N°7.11 Resumen de resistencias mecánicas a la flexión de CPPB.

CPPB	
Resistencia a Flexión	
días	[kgf/cm ²]
0	0
7	54
28	74

Con los datos de la Tabla N°7.11 se obtiene el Gráfico N°7.11 donde muestra la variación de resistencia a la flexión en el tiempo para el mortero confeccionado con cemento CPPB.

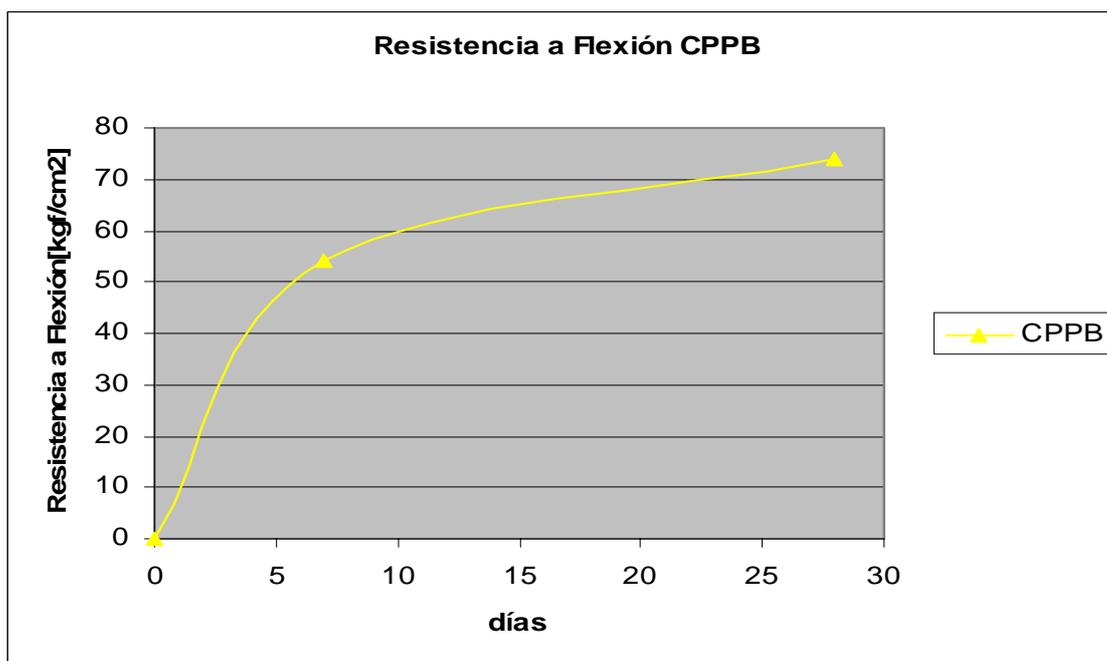


Gráfico N°7.11 Resistencia a la flexión en el tiempo para CPPB.

7.3.1.1.4 Mortero CPPC.

En la Tabla N°7.12 se presenta un resumen de las Tablas N°6.20 y 6.21, las cuales corresponden al resultado del ensayo de resistencias mecánicas a los 7 y 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPPC. En la Tabla N°7.12 se aprecian las resistencias mecánicas a flexión para 7 y 28 días de edad para el mortero CPPC.

Tabla N°7.12 Resumen de resistencias mecánicas a la flexión de CPPC.

CPPC	
Resistencia a Flexión	
días	[kgf/cm ²]
0	0
7	67
28	75

Con los datos de la Tabla N°7.12 se obtiene el Gráfico N°7.12 donde se muestra la variación de resistencia a la flexión en el tiempo para el mortero confeccionado con cemento CPPC.

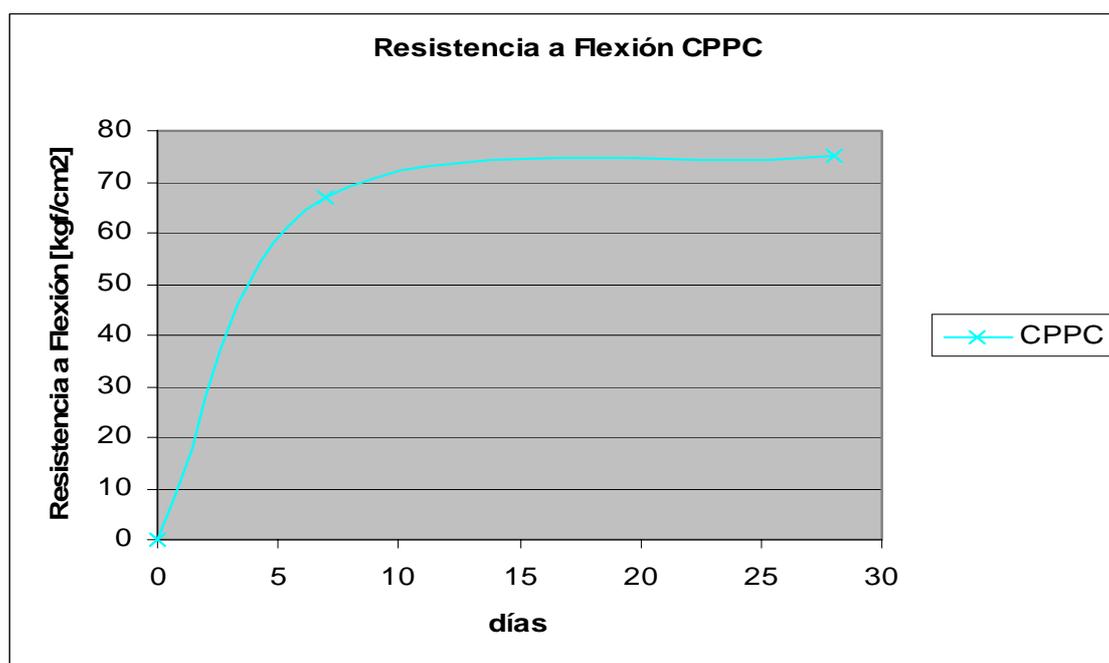


Gráfico N°7.12 Resistencia a la flexión en el tiempo para CPPC.

En la Tabla N°7.13 se presenta un resumen de las Tablas N°7.9, 7.10, 7.11 y 7.12 las cuales corresponden a los resultados de resistencias mecánicas de flexión a los 7 y 28 días de edad de los morteros confeccionados con los distintos tipos de cementos.

Tabla N°7.13 Resumen de las resistencias mecánicas a flexión de los morteros.

Resistencia a Flexión				
Cemento	CPN	CPPA	CPPB	CPPC
días	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]
0	0	0	0	0
7	64	58	54	67
28	86	79	74	75

Con los datos de la Tabla N°7.13 se obtiene el Gráfico N°7.13 donde se aprecia la variación de resistencia a la flexión en el tiempo para cada mortero confeccionado con su respectivo cemento.

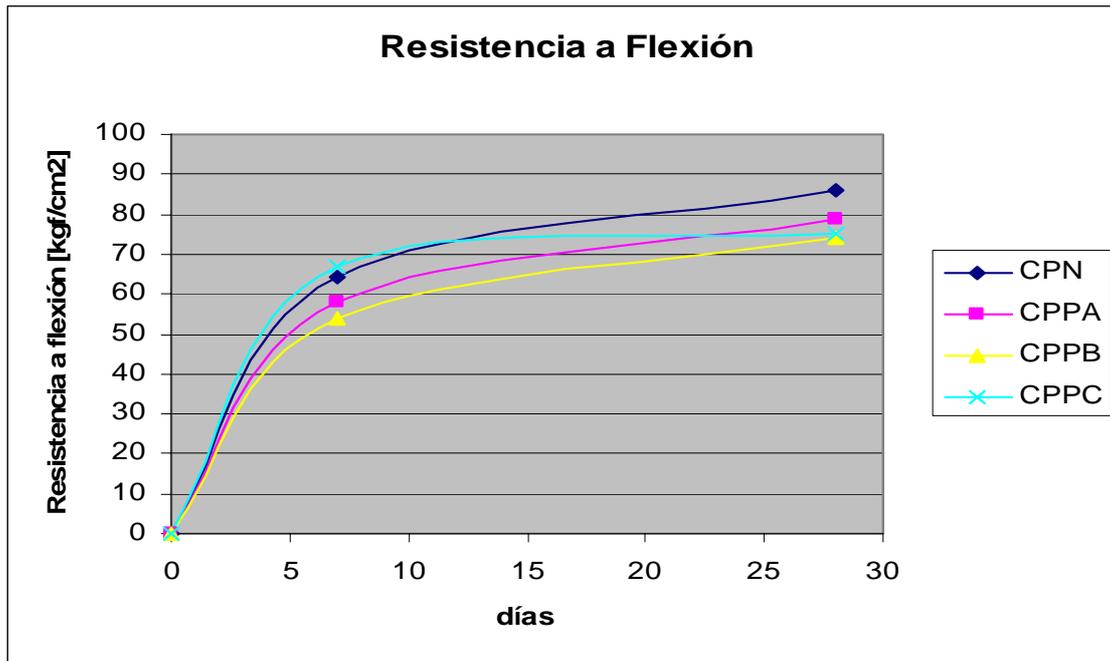


Gráfico N°7.13 Comparación de los valores resistencia a la flexión de cada mortero.

7.3.1.1.2 Resistencias a Compresión.

7.3.1.1.2.1 Mortero CPN.

En la Tabla N°7.14 se presenta un resumen de las Tablas N°6.14 y 6.15, las cuales corresponden al resultado del ensayo de resistencias mecánicas a los 7 y 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPN. En la Tabla N°7.14 se aprecian las resistencias mecánicas a compresión para 7 y 28 días de edad para el mortero CPN.

Tabla N°7.14 Resumen de resistencias mecánicas a la compresión de CPN.

CPN	
Resistencia a Compresión	
días	[kgf/cm ²]
0	0
7	332
28	506

Con los datos de la Tabla N°7.14 se obtiene el Gráfico N°7.14 donde se muestra la variación de resistencia a la compresión en el tiempo para el mortero confeccionado con cemento CPN.

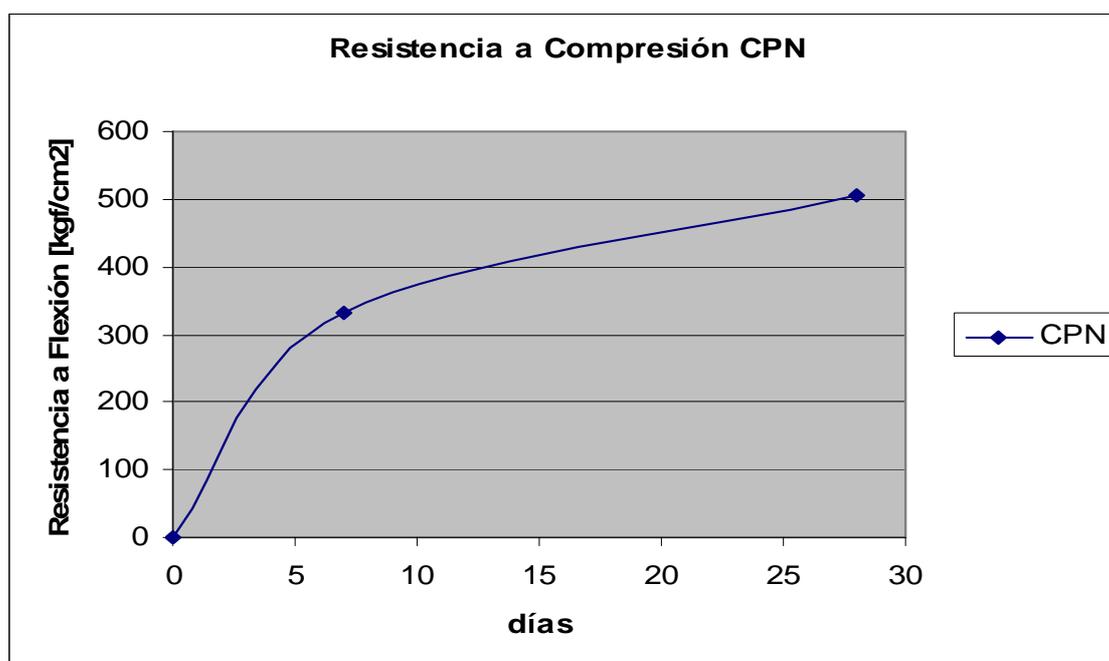


Gráfico N°7.14 Resistencia a la compresión en el tiempo para CPN.

7.3.1.1.2.2 Mortero CPPA.

En la Tabla N°7.15 se presenta un resumen de las Tablas N°6.16 y 6.17, las cuales corresponden al resultado del ensayo de resistencias mecánicas a los 7 y 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPPA. En la Tabla N°7.15 se aprecian las resistencias mecánicas a compresión para 7 y 28 días de edad para el mortero CPPA.

Tabla N°7.15 Resumen de resistencias mecánicas a compresión de CPPA.

CPPA	
Resistencia a Compresión	
días	[kgf/cm²]
0	0
7	319
28	473

Con los datos de la Tabla N°7.15 se obtiene el Gráfico N°7.15 donde se muestra la variación de resistencia a la compresión en el tiempo para el mortero confeccionado con cemento CPPA.

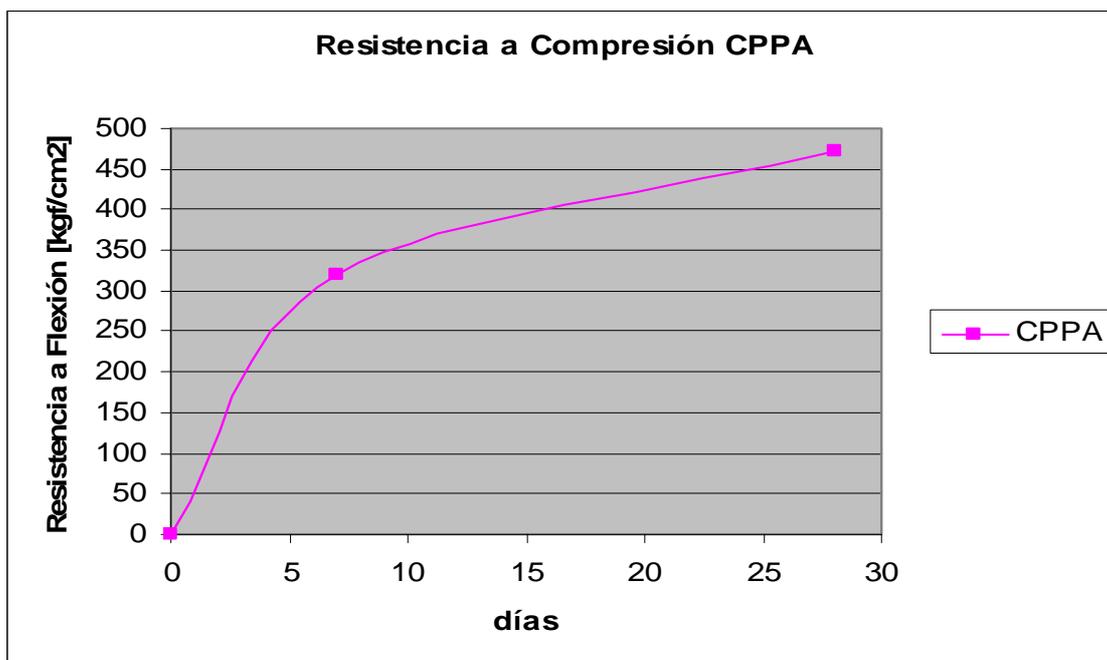


Gráfico N°7.15 Resistencia a la compresión en el tiempo para CPPA.

7.3.1.1.2.3 Mortero CPPB.

En la Tabla N°7.16 se presenta un resumen de las Tablas N°6.18 y 6.19, las cuales corresponden al resultado del ensayo de resistencias mecánicas a los 7 y 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPPB. En la Tabla N°7.16 se aprecian las resistencias mecánicas a compresión para 7 y 28 días de edad para el mortero CPPB.

Tabla N°7.16 Resumen de resistencias mecánicas a compresión de CPPB.

CPPB	
Resistencia a Compresión	
días	[kgf/cm²]
0	0
7	269
28	436

Con los datos de la Tabla N°7.16 se obtiene el Gráfico N°7.16 donde se muestra la variación de resistencia a la compresión en el tiempo para el mortero confeccionado con cemento CPPB.

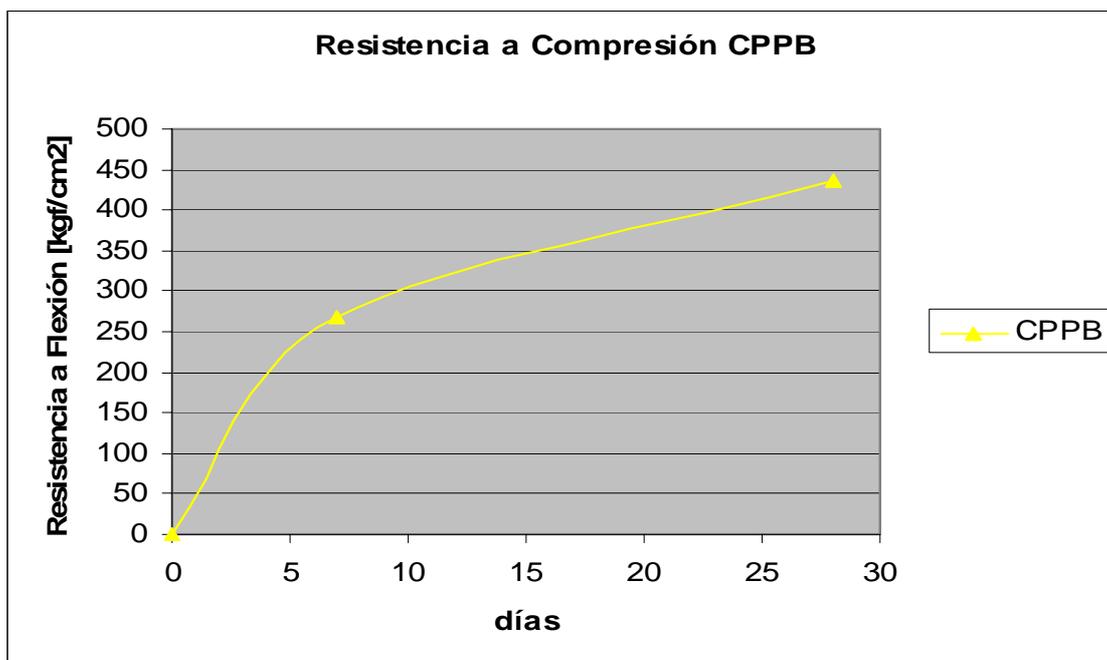


Gráfico N°7.16 Resistencia a la compresión en el tiempo para CPPB.

7.3.1.1.2.4 Mortero CPPC.

En la Tabla N°7.17 se presenta un resumen de las Tablas N°6.20 y 6.21, las cuales corresponden al resultado del ensayo de resistencias mecánicas a los 7 y 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPPC. En la Tabla N°7.17 se aprecian las resistencias mecánicas a compresión para 7 y 28 días de edad para el mortero CPPC.

Tabla N°7.17 Resumen de resistencias mecánicas a compresión de CPPC.

CPPC	
Resistencia a Compresión	
días	[kgf/cm ²]
0	0
7	370
28	460

Con los datos de la Tabla N°7.17 se obtiene el Gráfico N°7.17 donde se muestra la variación de resistencia a la compresión en el tiempo para el mortero confeccionado con cemento CPPC.

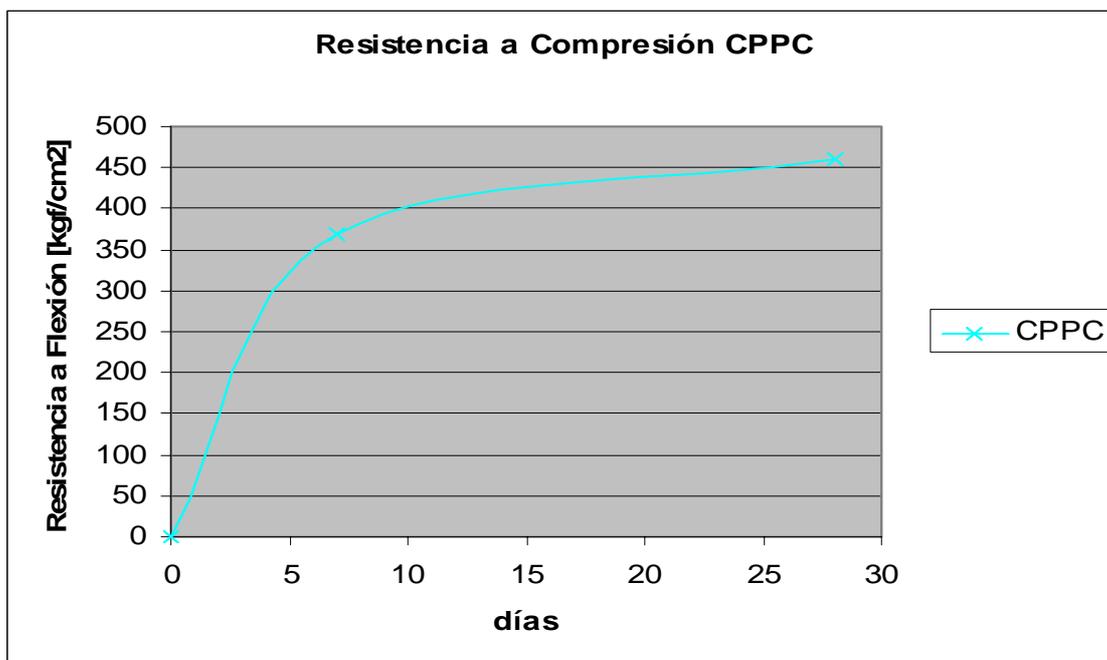


Gráfico N°7.17 Resistencia a la compresión en el tiempo para CPPC.

En la Tabla N°7.18 se presenta un resumen de las Tablas N°7.14, 7.15, 7.16 y 7.17 las cuales corresponden al resultado del ensayo de resistencias mecánicas a compresión a los 7 y 28 días de edad de los morteros confeccionados con los distintos tipos de cementos.

Tabla N°7.18 Resumen de las resistencias mecánicas a compresión de los morteros.

Resistencia a Compresión				
Cemento	CPN	CPPA	CPPB	CPPC
días	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]	[kgf/cm ²]
0	0	0	0	0
7	332	319	269	370
28	506	473	436	460

Con los datos de la Tabla N°7.18 se obtiene el Gráfico N°7.18 donde se aprecia la variación de resistencia a la compresión en el tiempo para cada mortero confeccionado con su respectivo cemento.

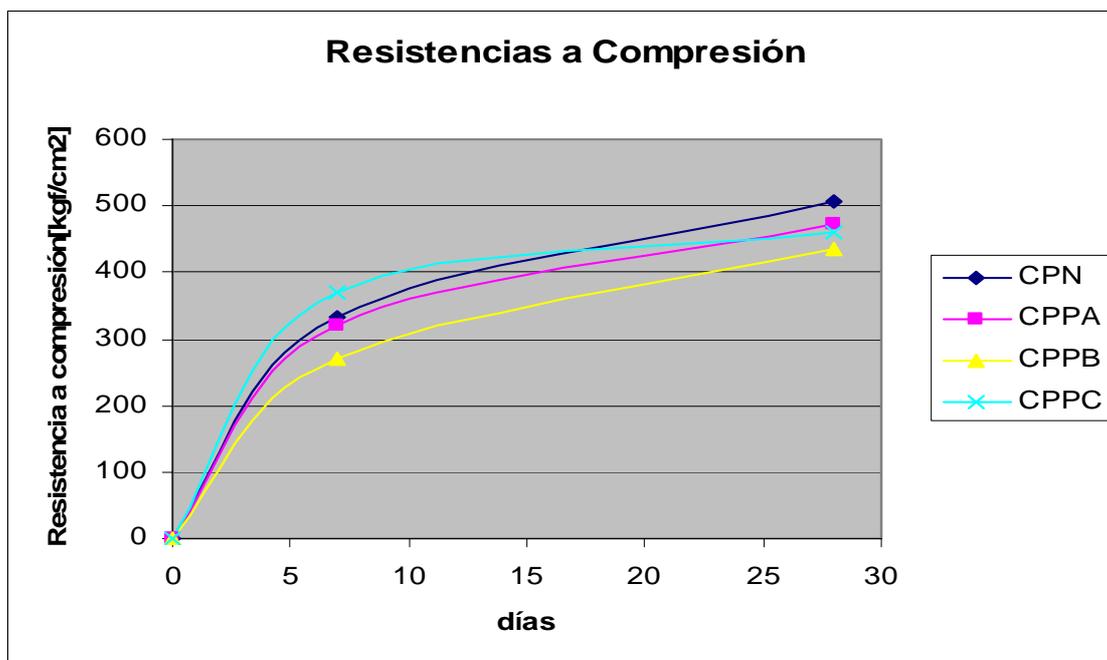


Gráfico N°7.18 Comparación de los valores resistencia a la compresión de cada mortero.

7.3.1.2 Análisis.

Se aprecia en las Tablas N°7.13 y N°7.18 que el mortero confeccionado con CPN a la edad de 28 días muestra una resistencia tanto a la flexión como a la compresión superior frente a los demás morteros, los valores en ambos casos, para los demás morteros confeccionados con cementos puzolánicos van descendiendo según su porcentaje de adición de menor a mayor, es decir en orden decreciente las resistencias obtenidas por los morteros son CPPA, CPPC y finalmente CPPB. Este comportamiento es lógico dado que los cementos puzolánicos desarrollan su resistencia más tarde que los portland puros ya que la puzolana se comporta como agregado los primeros días hasta que la cal libre reacciona con ella formando gel de tobermorita, desarrollando a la largo plazo resistencias iguales o superiores en algunos casos que los cementos portland. La mayor resistencia en los primeros días a la flexión y compresión por CPPC se debe a que es un cemento portland puzolánico de alta resistencia.

Según la Tabla N°4.2 los valores de resistencias mecánicas de cada cemento están de acorde con la norma NCh 162 y cumplen el requisito de clasificación tanto de cemento portland puro y cemento puzolánico según sea el caso.

7.3.2 Retracción libre.

7.3.2.1 Tablas y gráficos.

7.3.2.1.1 Mortero CPN.

En la Tabla N°7.19 se presenta un resumen de la Tabla N°6.22 la cual corresponde al resultado del ensayo de retracción libre hasta los 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPN. En la Tabla N°7.19 se aprecia la variación de longitud experimentada por el mortero CPN con respecto a su longitud inicial.

Tabla N°7.19 Retracción libre mortero CPN.

Mortero CPN		
día	Delta [mm]	Deformación unitaria 10⁻⁶
0	0,000	0,00
1	0,021	73,94
2	0,051	178,70
3	0,089	312,50
6	0,118	415,49
7	0,123	431,34
12	0,132	463,91
14	0,135	476,23
19	0,144	505,28
21	0,148	521,13
27	0,163	573,06
28	0,164	576,58

Con los datos de la Tabla N°7.19 se obtiene el Gráfico N°7.19 donde se muestra la retracción experimentada en el tiempo por el mortero confeccionado con cemento CPN.

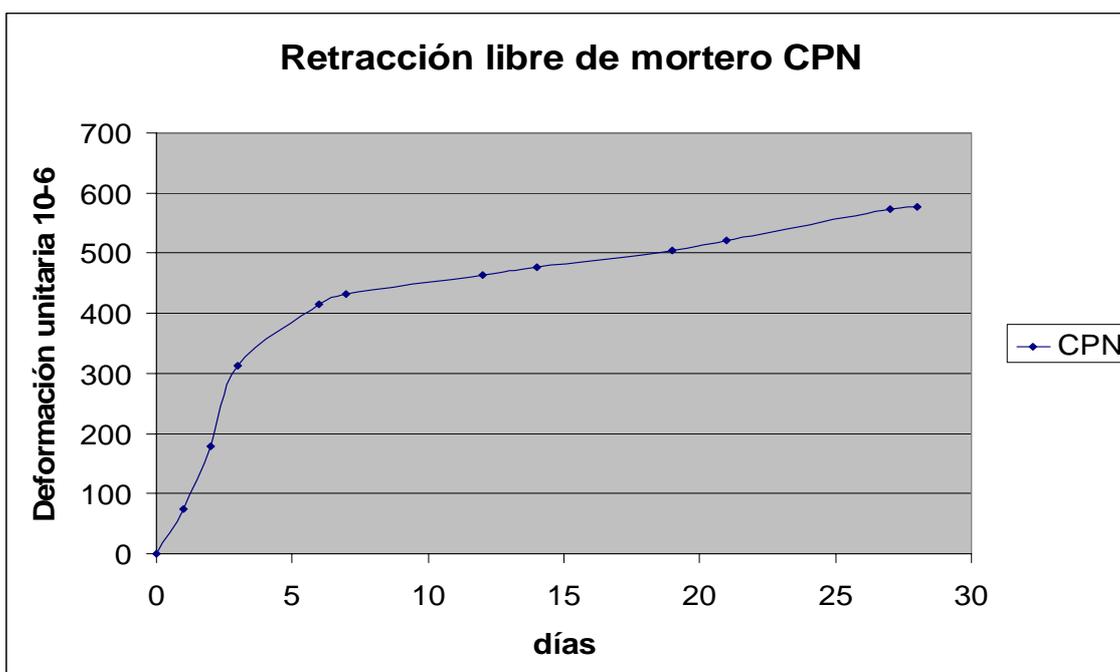


Gráfico N°7.19 Retracción libre mortero CPN.

7.3.2.1.2 Mortero CPPA.

En la Tabla N°7.20 se presenta un resumen de la Tabla N°6.23 la cual corresponde al resultado del ensayo de retracción libre hasta los 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPPA. En la Tabla N°7.20 se aprecia la variación de longitud experimentada por el mortero CPPA con respecto a su longitud inicial.

Tabla N°7.20 Retracción libre mortero CPPA.

Mortero CPPA		
día	Delta [mm]	Deformación unitaria 10-6
0	0,000	0,00
4	0,132	463,62
7	0,153	537,56
12	0,153	539,91
13	0,154	541,08
14	0,155	545,77
15	0,160	562,21
18	0,164	577,46
20	0,166	583,33
25	0,176	620,89
28	0,179	629,11

Con los datos de la Tabla N°7.20 se obtiene el Gráfico N°7.20 donde se muestra la retracción experimentada en el tiempo por el mortero confeccionado con cemento CPPA.

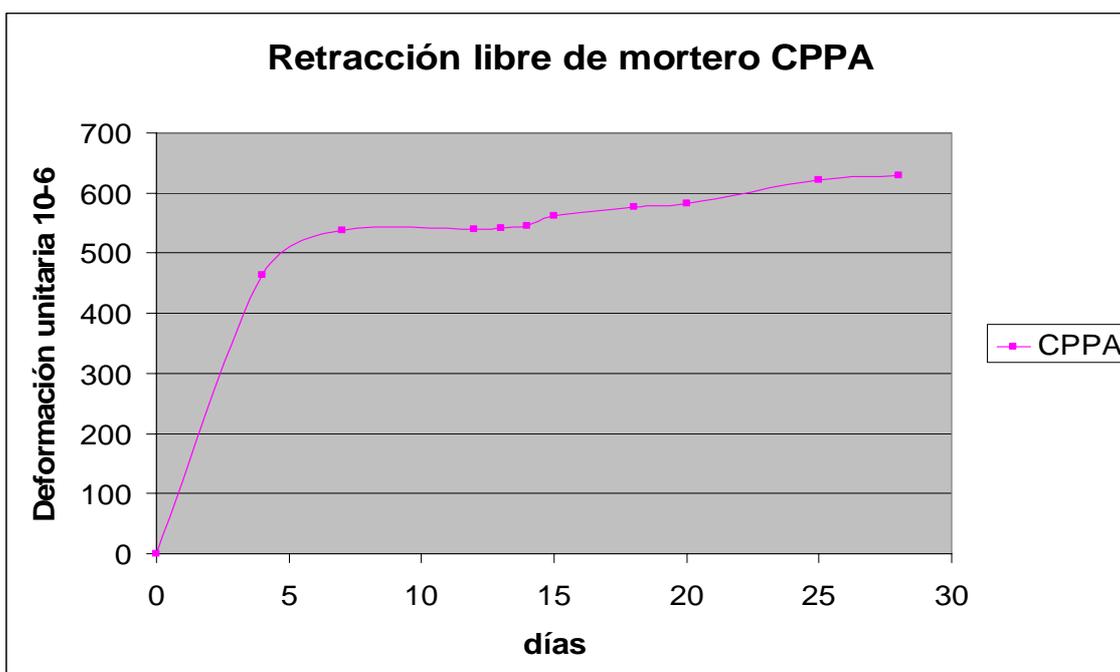


Gráfico N°7.20 -Retracción libre mortero CPPA.

7.3.2.1.3 Mortero CPPB.

En la Tabla N°7.21 se presenta un resumen de la Tabla N°6.24 la cual corresponde al resultado del ensayo de retracción libre hasta los 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPPB. En la Tabla N°7.21 se aprecia la variación de longitud experimentada por el mortero CPPB con respecto a su longitud inicial.

Tabla N°7.21 Retracción libre mortero CPPB.

Mortero CPPB		
día	Delta [mm]	Deformación unitaria ¹⁰⁻⁶
0	0,000	0,00
5	0,149	523,47
7	0,150	527,00
11	0,151	530,52
14	0,154	542,25
15	0,154	543,43
16	0,154	543,43
19	0,155	545,77
21	0,158	555,16
25	0,169	596,24
28	0,184	646,71

Con los datos de la Tabla N°7.21 se obtiene el Gráfico N°7.21 donde se muestra la retracción experimentada en el tiempo por el mortero confeccionado con cemento CPPB.

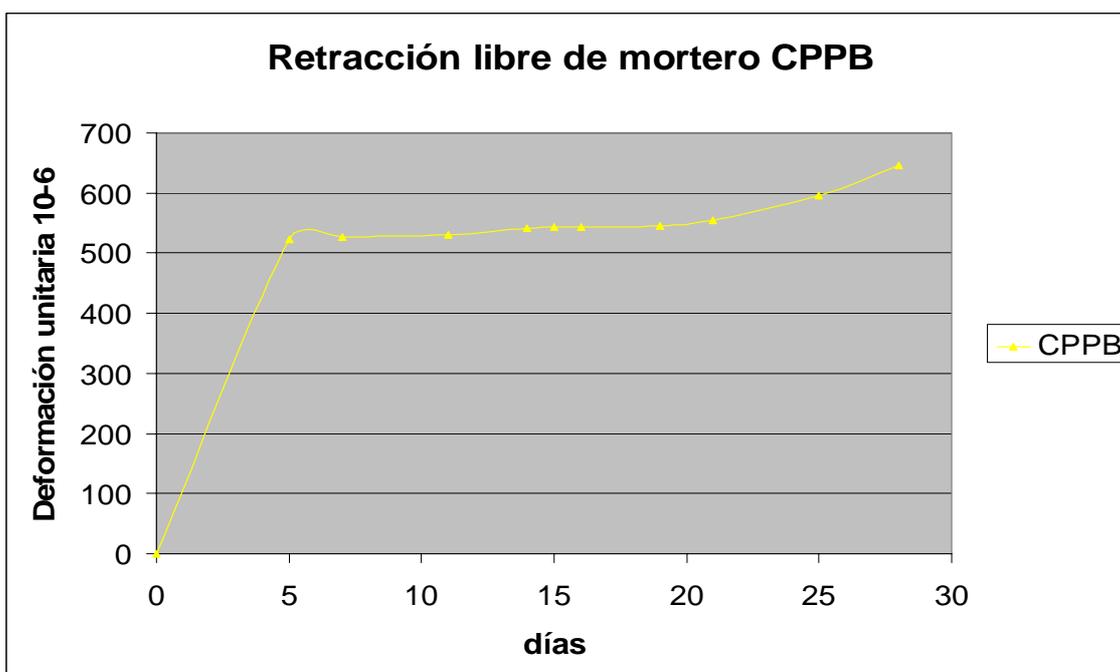


Gráfico N°7.21 Retracción libre mortero CPPB.

7.3.2.1.4 Mortero CPPC.

En la Tabla N°7.22 se presenta un resumen de la Tabla N°6.25 la cual corresponde al resultado del ensayo de retracción libre hasta los 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPPC. En la Tabla N°7.22 se aprecia la variación de longitud experimentada por el mortero CPPC con respecto a su longitud inicial.

Tabla N°7.22 Retracción libre mortero CPPC.

Mortero CPPC		
día	Delta [mm]	Deformación unitaria 10 ⁻⁶
0	0,000	0,00
3	0,152	536,09
7	0,182	639,08
11	0,182	639,33
14	0,182	639,96
17	0,183	642,61
22	0,183	643,49
23	0,183	644,37
24	0,184	647,89
25	0,186	654,93
28	0,189	663,73

Con los datos de la Tabla N°7.22 se obtiene el Gráfico N°7.22 donde se muestra la retracción experimentada en el tiempo por el mortero confeccionado con cemento CPPC.

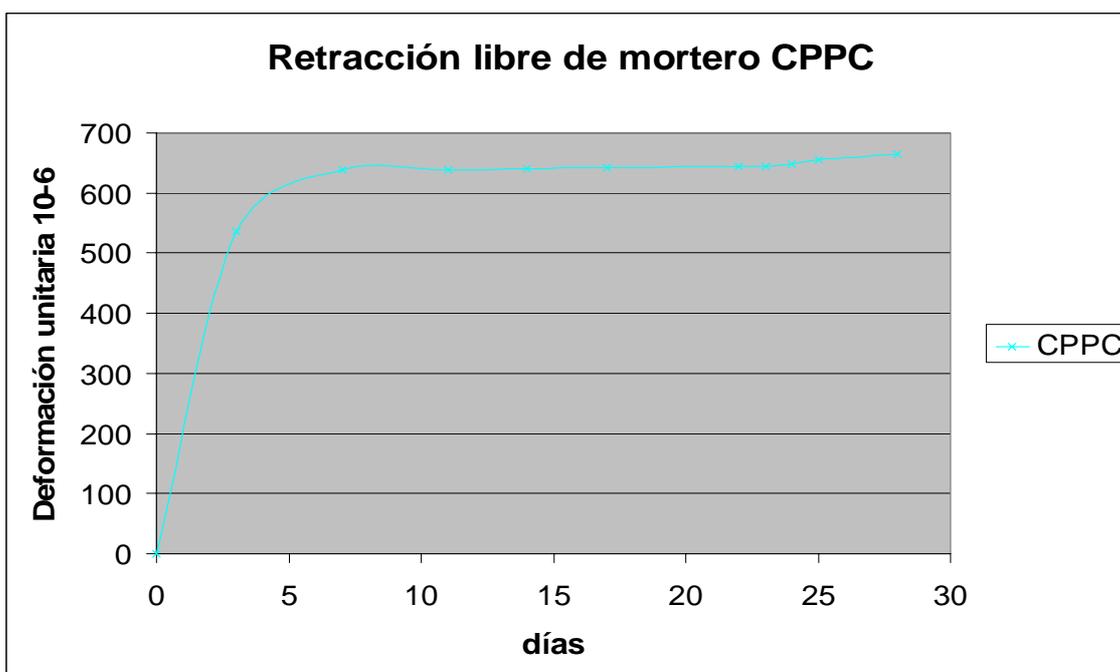


Gráfico N°7.22 Retracción libre mortero CPPC.

En la Tabla N°7.23 se presentan las Tablas N°7.19, N°7.20, N°7.21 y N°7.22 las cuales corresponden al resultado del ensayo de retracción libre hasta los 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPN, CPPA, CPPB y CPPC respectivamente. En la Tabla N°7.23 se aprecia la variación de longitud experimentada por cada mortero con respecto a su longitud inicial.

Tabla N°7.23 Resumen retracción libre de morteros.

Mortero CPN		Mortero CPPA		Mortero CPPB		Mortero CPPC	
día	Deformación unitaria 10 ⁻⁶	día	Deformación unitaria 10 ⁻⁶	día	Deformación unitaria 10 ⁻⁶	día	Deformación unitaria 10 ⁻⁶
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00
2	178,70	4	463,62	5	523,47	3	536,09
3	312,50	7	537,56	7	527,00	7	639,08
6	415,49	12	539,91	11	530,52	11	639,33
7	431,34	13	541,08	14	542,25	14	639,96
12	463,91	14	545,77	15	543,43	17	642,61
14	476,23	15	562,21	16	543,43	22	643,49
19	505,28	18	577,46	19	545,77	23	644,37
21	521,13	20	583,33	21	555,16	24	647,89
26	573,06	25	620,89	25	596,24	25	654,93
28	576,58	28	629,11	28	646,71	28	663,73

Con los datos de la Tabla N°7.23 se obtiene el Gráfico N°7.23 donde se presenta un gráfico comparativo que muestra la retracción experimentada en el tiempo por los morteros CPN, CPPA, CPPB y CPPC.

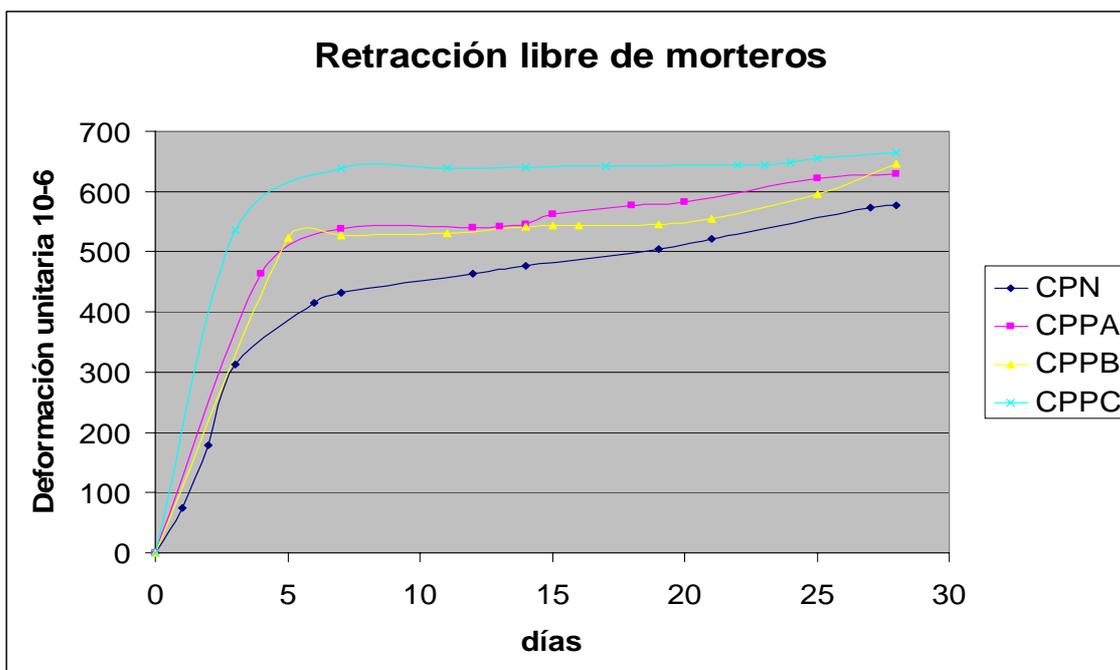


Gráfico N°7.23 Comparación de la retracción libre experimentada por cada mortero.

7.3.2.2 Análisis.

Del Gráfico N°7.23 se puede decir que el mortero CPN posee la menor pendiente de retracción, hasta los 7 días sólo ha desarrollado el 74,8 por ciento de su retracción total, después de los 7 días su comportamiento es casi lineal y desarrolla una tasa de retracción de 0,002 mm/día y se comporta así hasta el fin del ensayo (28 días).

Para el mortero CPPA se aprecia en el gráfico que durante los primeros 7 días de edad desarrolla el 86 por ciento de su retracción total, luego de esta edad, entre los 7 y 14 días se estabiliza desarrollando sólo un 3,6 por ciento de la retracción total, para que finalmente entre los 14 y 28 días desarrolle el 10,6 por ciento de la retracción faltante, en este último tramo se aprecia un pequeño incremento en la pendiente de la curva

Para el mortero CPPB se aprecia un comportamiento similar al presentado por CPPA durante los primeros 7 días desarrolla en 81,5 por ciento de su retracción total, luego de esta edad, entre los 7 y 21 días se estabiliza desarrollando sólo un 4,3 por ciento de la retracción total, pero entre los 21 días y 28 días de edad su pendiente cambia bruscamente desarrollando el 14,2 por ciento de retracción faltante en sólo 7 días.

Para el mortero CPPC se aprecia que desde los primeros días presenta una retracción mayor que los demás morteros observándose una pendiente mucho más pronunciada hasta alrededor de los 7 días de edad donde desarrolla el 96,3 por ciento de su retracción total, entre los 7 y 28 días su retracción se estabiliza en el tiempo y se retrae el 3,7 por ciento restante respecto a su retracción final.

Esto nos muestra que antes de los 7 días de edad los morteros confeccionados con cementos portland puzolánicos (CPPA, CPPB y CPPC) desarrollan en promedio el 87,9 por ciento de su retracción total (más de un 13 por ciento de la desarrollada por CPN a esa edad), la teoría nos dice que si bien es cierto que los cementos puzolánicos se retraen más, en este caso durante los primeros 28 días de edad a lo largo del tiempo la retracción desarrollada por ambos tipos de cementos es relativamente la misma.

7.3.3 Retracción restringida.

7.3.3.1 Tablas y gráficos.

7.3.3.1.1 Mortero CPN.

En la Tabla N°7.24 se presenta un resumen de la Tabla N°6.26 y Tabla N°6.27 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para mortero confeccionado con cemento CPN. En la Tabla N°7.24 se aprecia la variación del ancho de la fisuras desarrolladas en el anillo D1 realizado con mortero CPN.

Tabla N°7.24 Control de fisuras para mortero CPN anillo D1.

Mortero CPN anillo D1			
edad	Fisura N°1 [mm]	edad	Fisura N°2 [mm]
0	0	0	0
5,9	0,05	5,9	0,05
7	0,05	9	0,1
8	0,05	13	0,1
9	0,1	17	0,15
13	0,15	21	0,2
17	0,15	24	0,2
21	0,2	28	0,2
24	0,2		
28	0,2		

Con los datos de la Tabla N°7.24 se obtiene el Gráfico N°7.24 donde se muestra la variación en el tiempo de las dos fisuras producidas en el anillo D1 de mortero CPN.

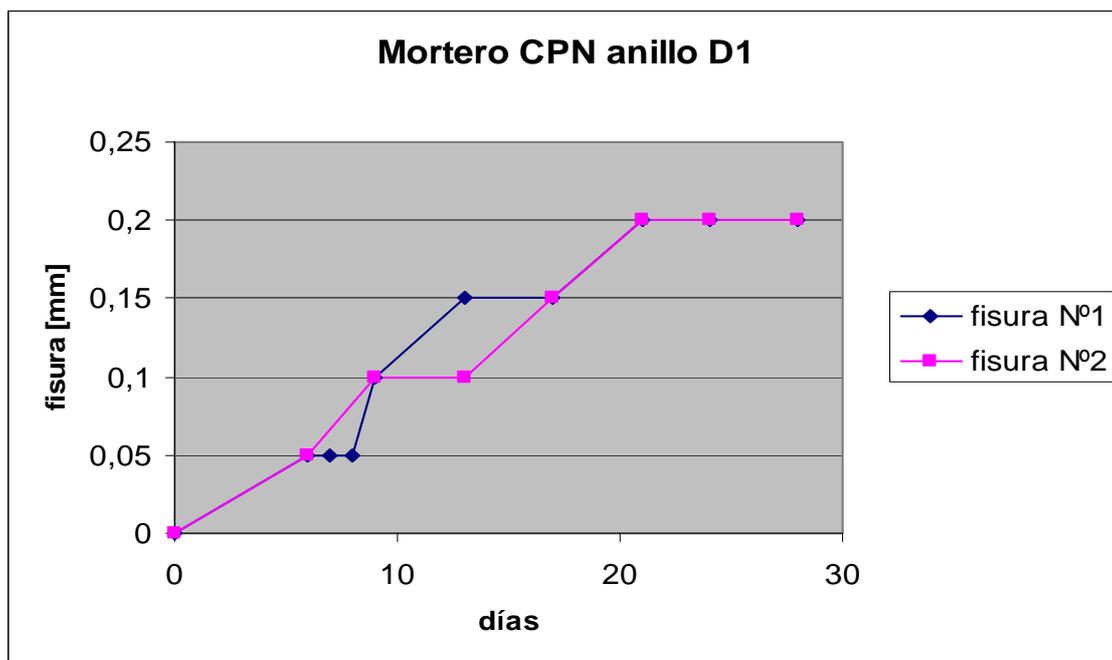


Gráfico N°7.24 Variación en el tiempo de ancho de fisuras para mortero CPN anillo D1.

En la Tabla N°7.25 se presenta un resumen de la Tabla N°6.28 y Tabla N°6.29 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para mortero confeccionado con cemento CPN. En la Tabla N°7.25 se aprecia la variación del ancho de la fisuras desarrolladas en el anillo D2 realizado con mortero CPN.

Tabla N°7.25 Control de fisuras para mortero CPN anillo D2.

Mortero CPN anillo D2			
edad	Fisura N°1 [mm]	edad	Fisura N°2 [mm]
0	0	0	0
5,9	0,05	6,9	0,05
9	0,1	9	0,05
13	0,15	13	0,05
17	0,4	17	0,05
21	0,5	21	0,05
24	0,5	24	0,05
28	0,5	28	0,05

Con los datos de la Tabla N°7.25 se obtiene el Gráfico N°7.25 donde se muestra la variación en el tiempo de las dos fisuras producidas en el anillo D2 de mortero CPN.

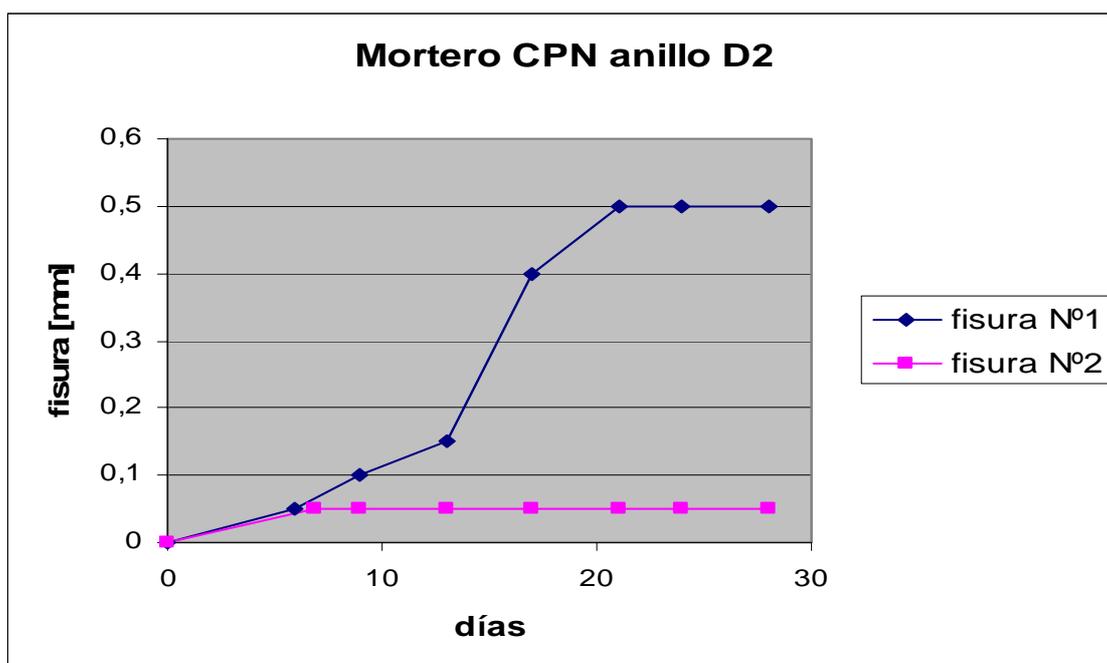


Gráfico N°7.25 Variación en el tiempo de ancho de fisuras para mortero CPN anillo D2.

7.3.3.1.2 Mortero CPPA.

En la Tabla N°7.26 se presenta un resumen de la Tabla N°6.30 y Tabla N°6.31 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para mortero confeccionado con cemento CPPA. En la Tabla N°7.26 se aprecia la variación del ancho de las fisuras desarrolladas en el anillo C1 realizado con mortero CPPA.

Tabla N°7.26 Control de fisuras para mortero CPPA anillo C1.

Mortero CPPA anillo C1			
edad	Fisura N°1 [mm]	edad	Fisura N°2 [mm]
0	0	0	0
7,9	0,05	7,9	0,05
11	0,8	15	0,05
15	0,8	21	0,1
21	0,8	25	0,1
25	0,9	26	0,05
26	0,9	27	0,05
27	0,9	28	0,05
28	0,9		

Con los datos de la Tabla N°7.26 se obtiene el Gráfico N°7.26 donde se muestra la variación en el tiempo de las dos fisuras producidas en el anillo C1 de mortero CPPA.

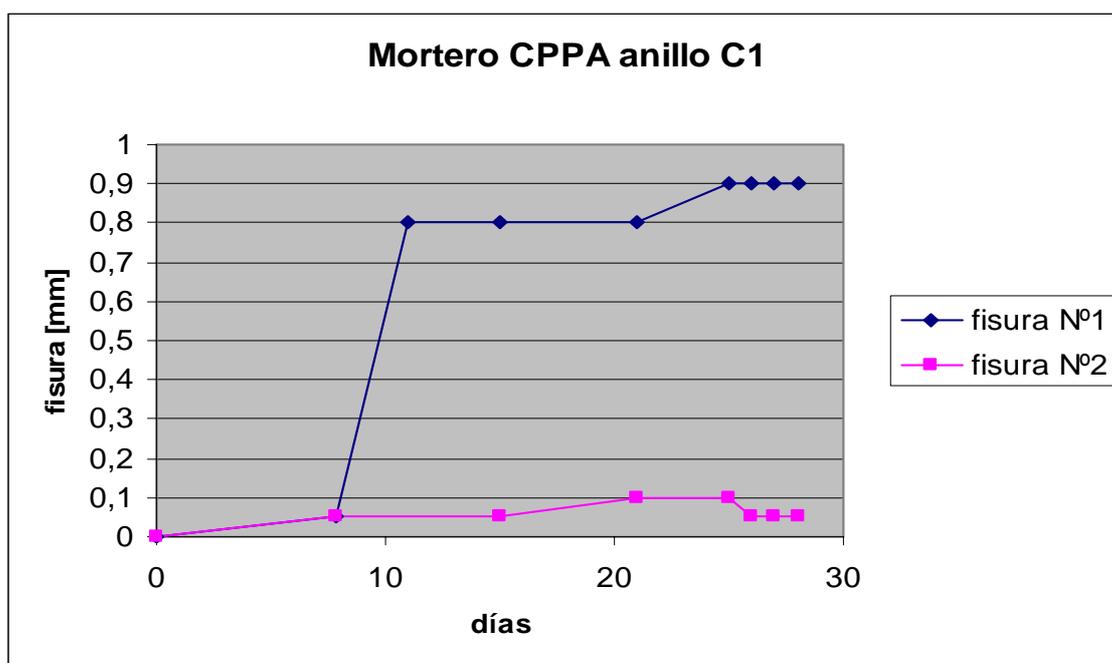


Gráfico N°7.26 Variación en el tiempo de ancho de fisuras para mortero CPPA anillo C1.

En la Tabla N°7.27 se presenta un resumen de la Tabla N°6.32 y Tabla N°6.33 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para mortero confeccionado con cemento CPPA. En la Tabla N°7.27 se aprecia la variación del ancho de la fisuras desarrolladas en el anillo C2 realizado con mortero CPPA.

Tabla N°7.27 Control de fisuras para mortero CPPA anillo C2.

Mortero CPPA anillo C2			
edad	Fisura N°1 [mm]	edad	Fisura N°2 [mm]
0	0	0	0
5,7	0,05	5,7	0,05
8	0,5	15	0,05
11	1	25	0
15	1	26	0
21	1	27	0
25	1	28	0
26	1		
27	1		
28	1		

Con los datos de la Tabla N°7.27 se obtiene el Gráfico N°7.27 donde se muestra la variación en el tiempo de las dos fisuras producidas en el anillo C2 de mortero CPPA.

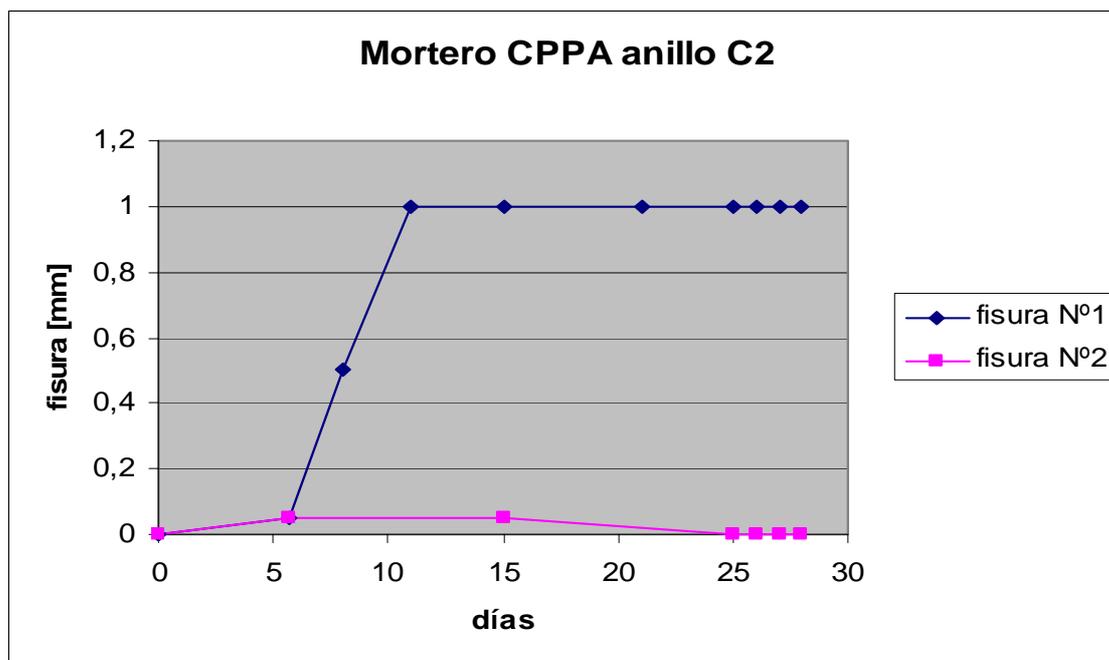


Gráfico N°7.27 Variación en el tiempo de ancho de fisuras para mortero CPPA anillo C2.

7.3.3.1.3 Mortero CPPB.

En la Tabla N°7.28 se presenta un resumen de la Tabla N°6.34 y Tabla N°6.35 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para mortero confeccionado con cemento CPPB. En la Tabla N°7.28 se aprecia la variación del ancho de la fisuras desarrolladas en el anillo B1 realizado con mortero CPPB.

Tabla N°7.28 Control de fisuras para mortero CPPB anillo B1.

Mortero CPPB anillo B1			
edad	Fisura N°1 [mm]	edad	Fisura N°2 [mm]
0	0	0	0
5,9	0,05	6,6	0,05
7	0,4	12	0,05
9	1	16	0,05
12	1,4	26	0
16	1,4	27	0
22	1,3	28	0
26	1,2		
27	1,2		
28	1,2		

Con los datos de la Tabla N°7.28 se obtiene el Gráfico N°7.28 donde se muestra la variación en el tiempo de las dos fisuras producidas en el anillo B1 de mortero CPPB.

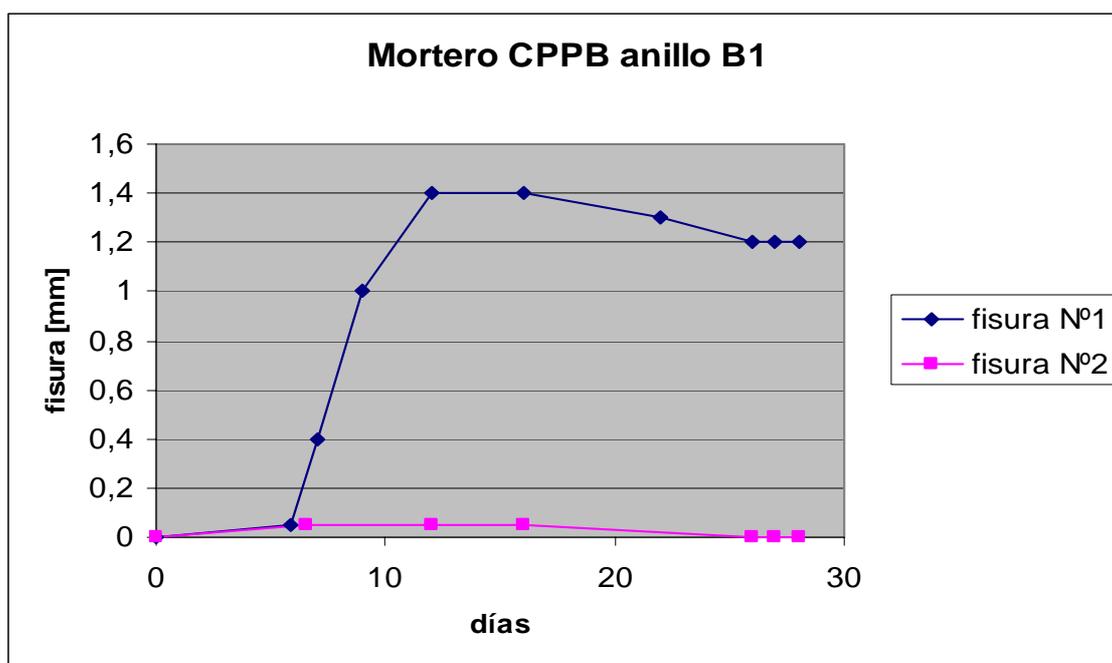


Gráfico N°7.28 Variación en el tiempo de ancho de fisuras para mortero CPPB anillo B1.

En la Tabla N°7.29 se presenta un resumen de la Tabla N°6.36 y Tabla N°6.37 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para mortero confeccionado con cemento CPPB. En la Tabla N°7.29 se aprecia la variación del ancho de la fisuras desarrolladas en el anillo B2 realizado con mortero CPPB.

Tabla N°7.29 Control de fisuras para mortero CPPB anillo B2.

Mortero CPPB anillo B2			
edad	Fisura N°1 [mm]	edad	Fisura N°2 [mm]
0	0	0	0
6,6	0,05	6,6	0,05
9	0,1	9	0,1
12	0,5	12	0,1
16	0,6	16	0,1
22	0,8	26	0,05
26	0,8	27	0,05
27	0,8	28	0,05
28	0,8		

Con los datos de la Tabla N°7.29 se obtiene el Gráfico N°7.29 donde se muestra la variación en el tiempo de las dos fisuras producidas en el anillo B2 de mortero CPPB.

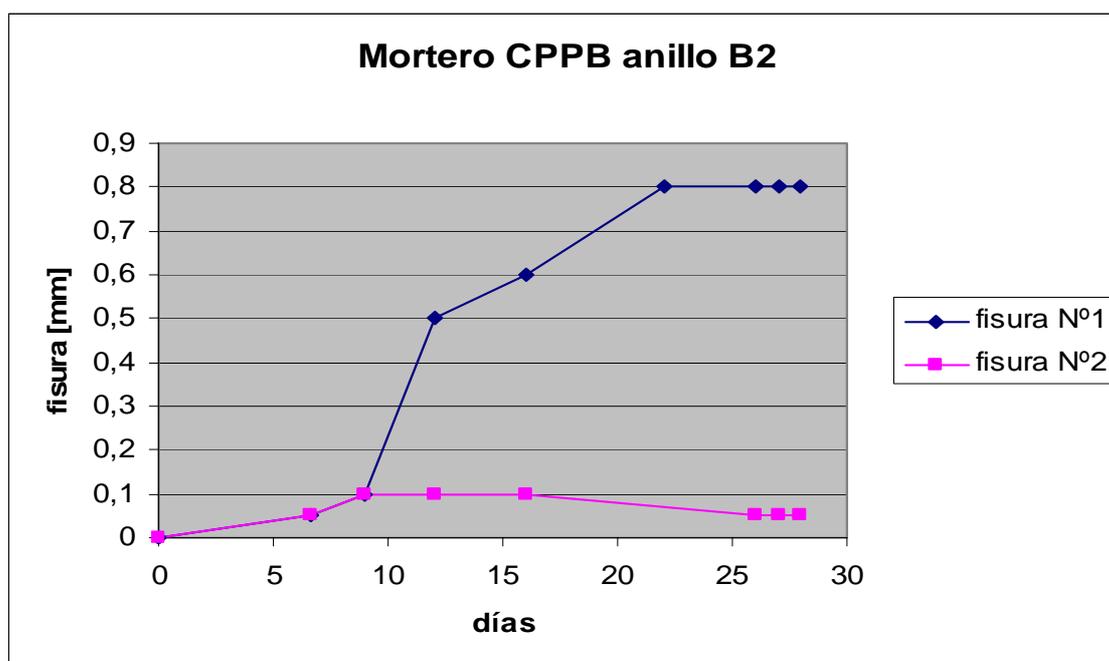


Gráfico N°7.29 Variación en el tiempo de ancho de fisuras para mortero CPPB anillo B2.

7.3.3.1.4 Mortero CPPC.

En la Tabla N°7.30 se presenta un resumen de la Tabla N°6.38 y Tabla N°6.39 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para mortero confeccionado con cemento CPPC. En la Tabla N°7.30 se aprecia la variación del ancho de la fisuras desarrolladas en el anillo A1 realizado con mortero CPPC.

Tabla N°7.30 Control de fisuras para mortero CPPC anillo A1.

Mortero CPPC anillo A1			
edad	Fisura N°1 [mm]	edad	Fisura N°2 [mm]
0	0	0	0
4,8	0,05	4,8	0,05
6	0,1	6	0,05
7	0,2	7	0,05
8	0,3	11	0,05
10	0,4	15	0,05
11	0,5	16	0,1
15	0,6	21	0,1
16	0,7	28	0,1
21	0,7		
28	0,7		

Con los datos de la Tabla N°7.30 se obtiene el Gráfico N°7.30 donde se muestra la variación en el tiempo de las dos fisuras producidas en el anillo A1 de mortero CPPC.

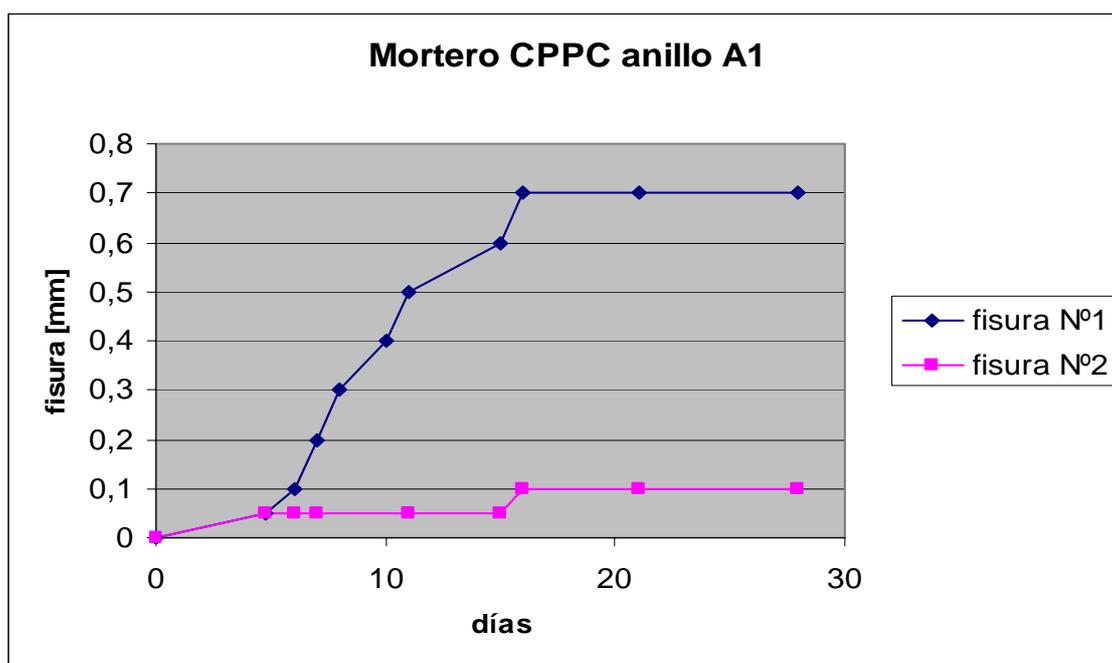


Gráfico N°7.30 Variación en el tiempo de ancho de fisuras para mortero CPPC anillo A1.

En la Tabla N°7.31 se presenta un resumen de la Tabla N°6.40 y Tabla N°6.41 las cuales corresponden a los resultados del control de fisuras del ensayo de retracción restringida para mortero confeccionado con cemento CPPC. En la Tabla N°7.31 se aprecia la variación del ancho de la fisuras desarrolladas en el anillo A2 realizado con mortero CPPC.

Tabla N°7.31 Control de fisuras para mortero CPPC anillo A2.

Mortero CPPC anillo A2			
edad	Fisura N°1 [mm]	edad	Fisura N°2 [mm]
0	0	0	0
4,8	0,05	4,8	0,05
6	0,05	6	0,05
11	0,25	11	0,2
15	0,4	15	0,2
16	0,5	16	0,2
21	0,5	21	0,2
25	0,5	25	0,2
28	0,5	28	0,2

Con los datos de la Tabla N°7.30 se obtiene el Gráfico N°7.30 donde se muestra la variación en el tiempo de las dos fisuras producidas en el anillo A2 de mortero CPPC.

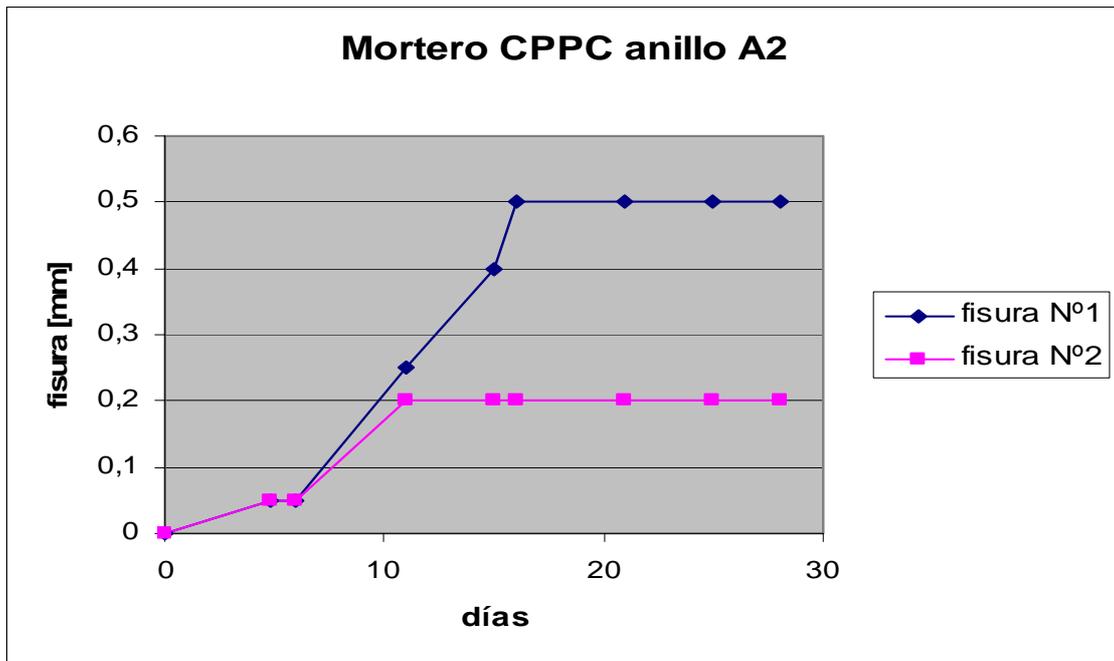


Gráfico N°7.31 Variación en el tiempo de ancho de fisuras para mortero CPPC anillo A2.

En la Tabla N°7.32 se presenta un cuadro resumen con el tiempo promedio en días desde que se prepara el mortero hasta que visualmente se encuentra una fisura en la probeta, esta Tabla se prepara con los datos de las fichas de inspección visual de cada serie presentadas en 6.3.2

Tabla N°7.32 Tiempo promedio en aparecer fisuras en los morteros de prueba.

	Mortero			
	CPN	CPPA	CPPB	CPPC
Promedio de días	6,2	6,8	6,4	4,8

Con los datos de la Tabla N°7.32 se obtiene el Gráfico N°7.32 donde se muestra el tiempo promedio en fisurarse de cada mortero.

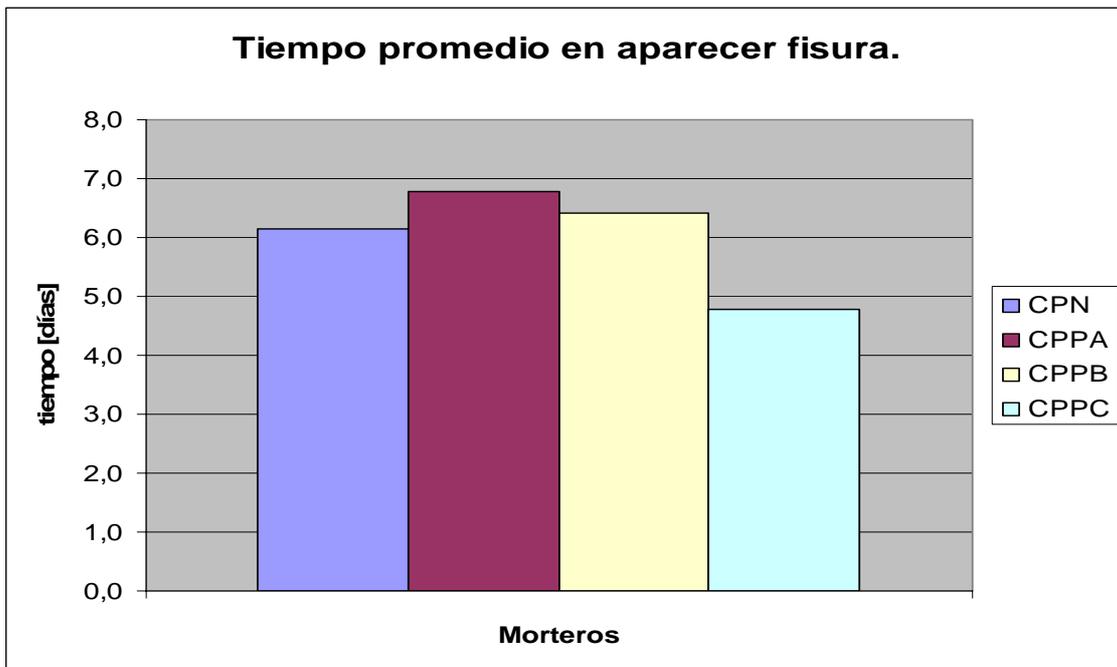


Gráfico N°7.32 Tiempo promedio en aparecer fisuras en los morteros de prueba.

En la Tabla N°7.33 se presenta un cuadro resumen con el promedio del ancho de las fisuras a los 28 días de edad de cada mortero.

Tabla N°7.33 Promedio de ancho de fisura a los 28 días.

	Mortero			
	CPN	CPPA	CPPB	CPPC
fisura [mm]	0,238	0,488	0,513	0,375

Con los datos de la Tabla N°7.33 se obtiene el Gráfico N°7.33 donde se muestra el ancho promedio de fisura alcanzado por cada mortero.

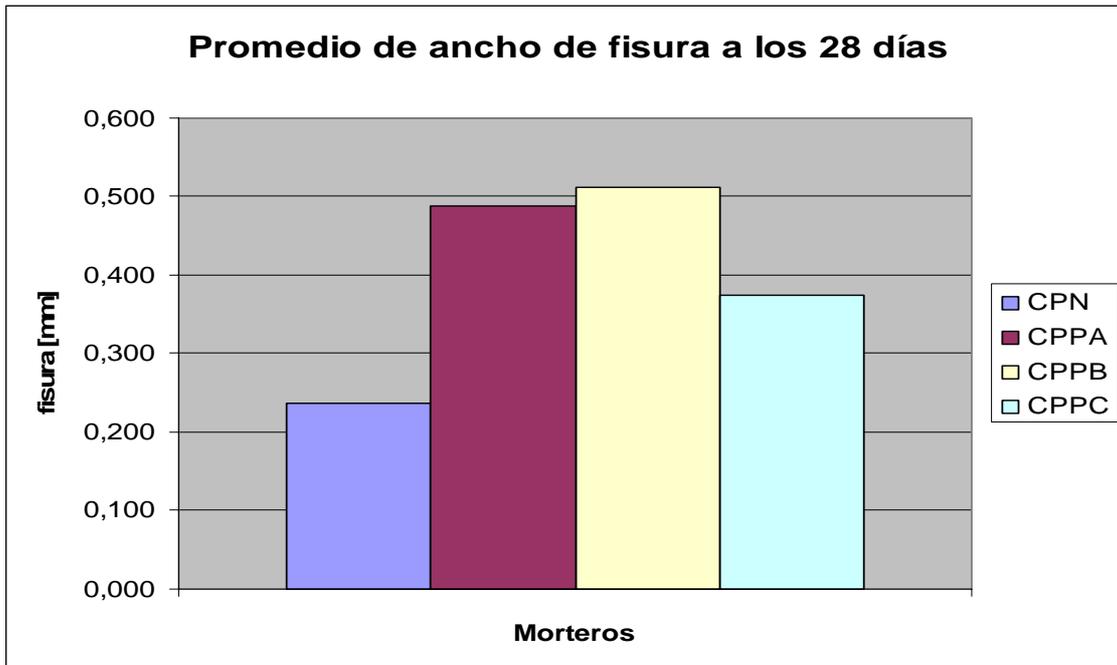


Gráfico N°7.33 Promedio de ancho de fisura a los 28 días.

7.3.3.2 Monitoreo Digital.

Se presenta a continuación, en los gráficos siguientes, el monitoreo digital de deformaciones medidas en los anillos realizado con el Strainmeter a las probetas de retracción restringida.

7.3.3.2.1 Mortero CPN.

En el Gráfico N°7.34 se presenta el monitoreo digital para CPN.

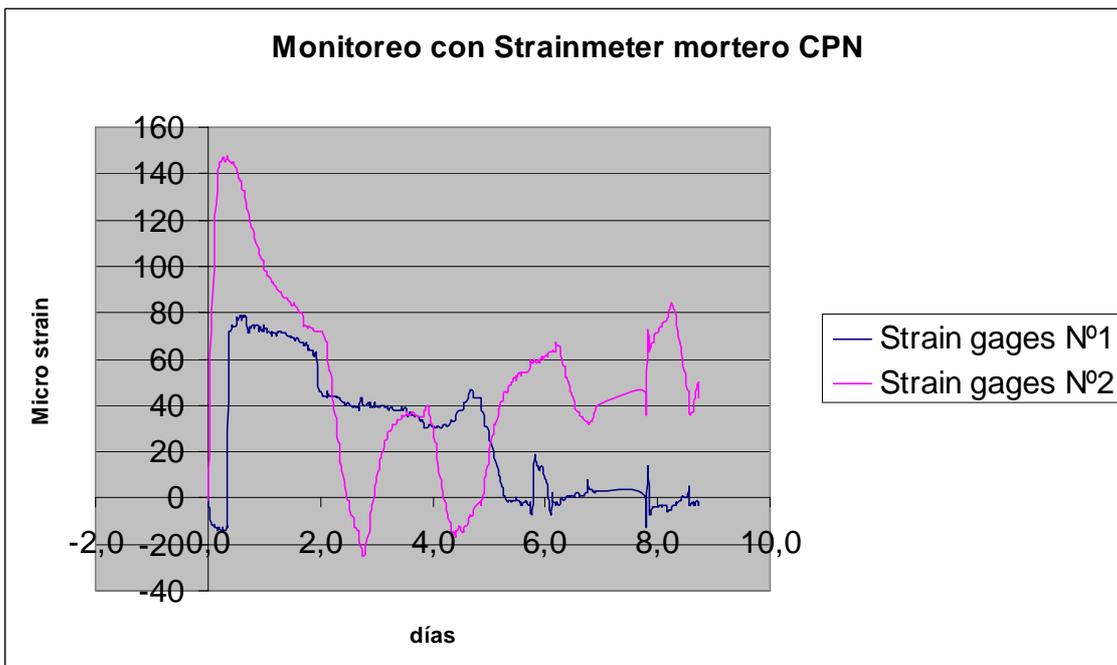


Gráfico N°7.34 Monitoreo digital para retracción restringida mortero CPN.

7.3.3.2.2 Mortero CPPA.

En el Gráfico N°7.35 se presenta el monitoreo digital para CPPA.

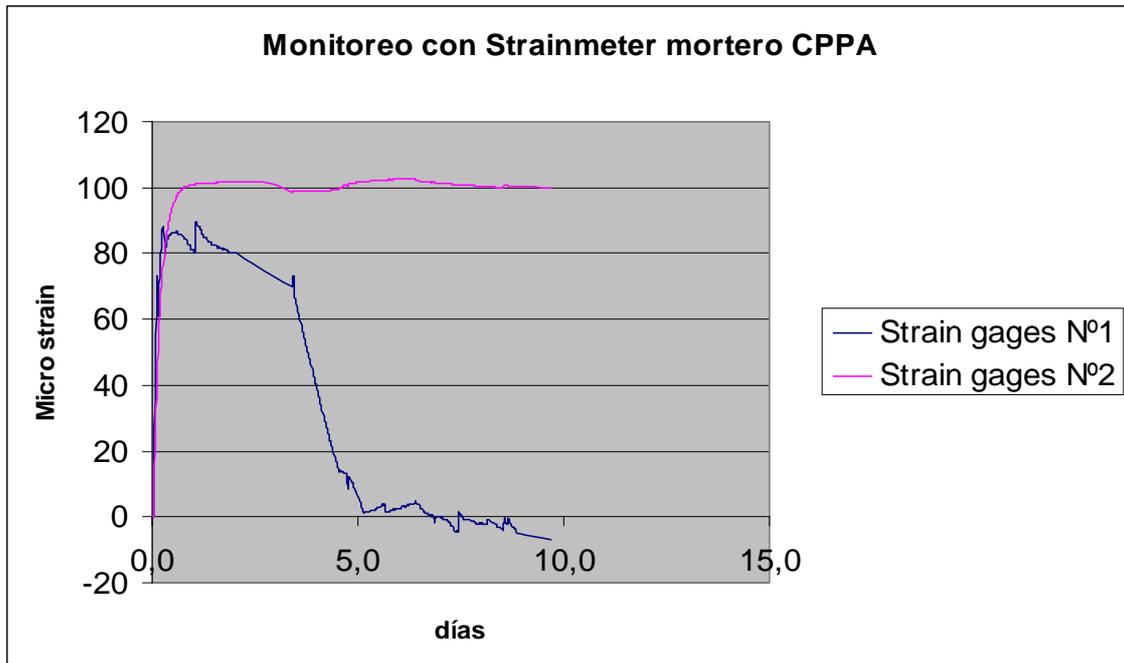


Gráfico N°7.35 Monitoreo digital para retracción restringida mortero CPPA.

7.3.3.2.3 Mortero CPPB.

En el Gráfico N°7.36 se presenta el monitoreo digital para CPPB.

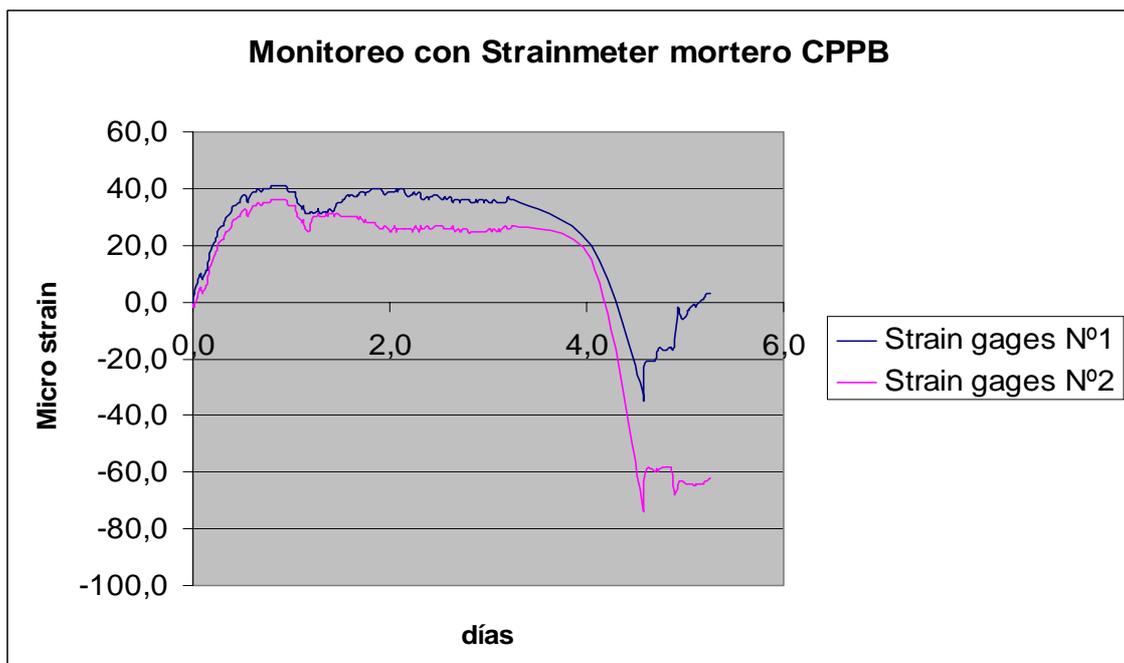


Gráfico N°7.36 Monitoreo digital para retracción restringida mortero CPPB.

7.3.3.2.4 Mortero CPPC.

En el Gráfico N°7.37 se presenta el monitoreo digital para CPPC.

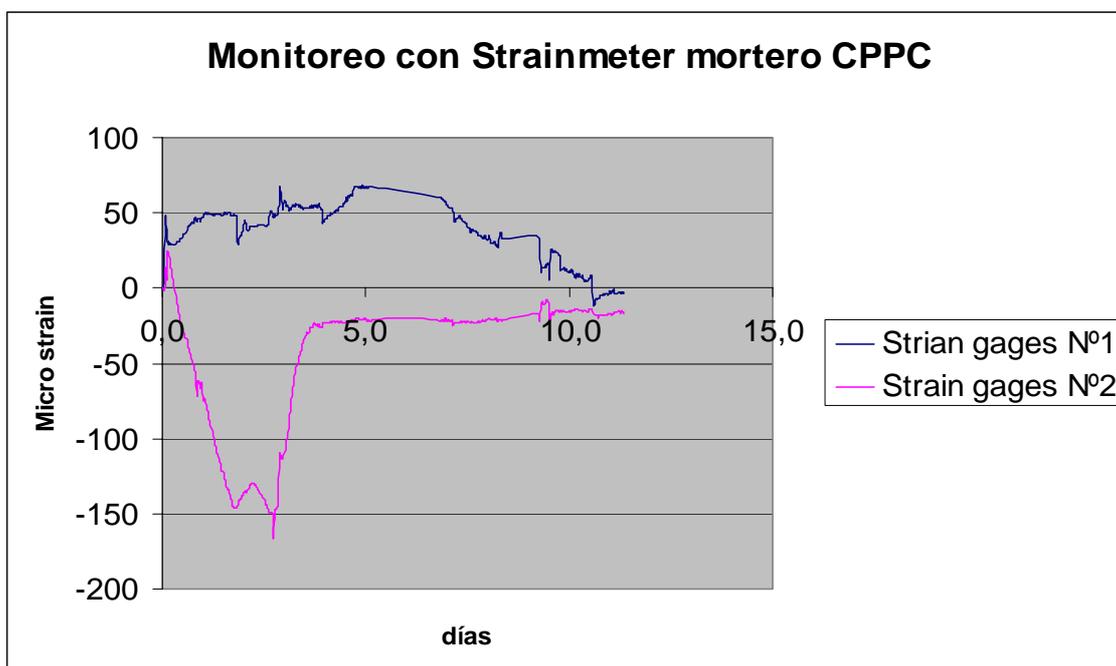


Gráfico N°7.37 Monitoreo digital para retracción restringida mortero CPPC.

7.3.3.3 Análisis.

Este ensayo sirve para determinar la edad de fisuración de morteros u hormigones (en nuestro caso para morteros). Según el registro llevado para cada probeta todas ellas se fisuraron durante el tiempo que duró el ensayo, el cual es de 28 días. En las Tablas de inspección visual presentadas en 6.3.3 se anotó la ubicación en grados sexagesimales de cada fisura con respecto a un cero marcado en cada mesa rotatoria, a lo largo del ensayo todas las probetas desarrollaron dos fisuras las cuales estaban ubicadas aproximadamente diametralmente opuestas. Estas fisuras crecieron a lo largo del tiempo y se estabilizaron al final del ensayo, pero esto no quiere decir que no sigan creciendo en el tiempo ya que el proceso de retracción continúa, pero los resultados obtenidos nos aportan información acerca de la edad promedio de fisuración y el ancho alcanzado para cada tipo de mortero (Tablas y Gráficos 7.32 y 7.33). En la Tabla y Gráfico 7.32 se aprecia que el mortero CPPC es el que desarrolló en promedio más tempranamente una fisura la cual fue creciendo gradualmente en el tiempo, para los demás morteros la edad de fisuración fue a los seis días variando solo por horas. Con respecto al ancho promedio alcanzado podemos decir que en los morteros con cementos experimentales las fisuras que se desarrollaron primero crecieron más rápido que en el caso de

los morteros confeccionados con los cementos CPN y CPPC, en el caso de estos cementos las fisuras crecieron gradualmente. Para sólo un caso (mortero CPN anillo D1) la energía ocupada en crear cada fisura generó fisuras iguales, pero en los demás casos la energía sólo se concentró en una de ellas generando pares de fisuras con anchos distintos, es decir una fisura “grande” y una “pequeña” como se ve reflejado en los Gráficos N°7.24 a N°7.31. Para comparar los anchos de fisura se hizo un promedio de fisuras de cada tipo de mortero lo que se presenta en la Tabla y Gráfico N°7.33, con esta información podemos decir que el mortero confeccionado con cemento CPN desarrolló en un periodo de tiempo de 28 días un ancho promedio de fisuras de 0,238 mm, seguido por los morteros confeccionados con CPPC, CPPA y CPPB con un ancho promedio de 0,375 mm, 0,488 mm y 0,513 respectivamente, esto refleja que durante el período de tiempo que duró el ensayo los morteros experimentales generaron fisuras en promedio más anchas que el mortero confeccionado CPN y como la única diferencia entre estos 3 morteros era la dosis de puzolana podemos atribuir a ésta el resultado.

Los resultados del monitoreo con el Strainmeter nos sirvió para indicarnos cuándo aparecería la fisura en la probeta, las caídas de tensión no se producen los mismos días en los cuales se encontró la fisura correspondiente a cada mortero ya que la alta sensibilidad del equipo detecta antes la creación de una fisura registrando el momento en que la tensión hacia el anillo producto de la retracción restringida disminuye. Además el hecho de sólo tener 2 strain gages por anillo hace que el monitoreo no sea tan exacto.

7.3.4 Módulo de elasticidad.

7.3.4.1 Tablas y gráficos.

7.3.4.1.1 Mortero CPN.

En la Tabla N°7.34 se presenta un resumen de las Tablas N°6.42, N°6.43 y N°6.44 las cuales corresponde a los resultados de resistencias cilíndricas a compresión y módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPN.

Tabla N°7.34 Resistencia cilíndrica a compresión y módulo elástico de mortero CPN.

día	f'c [MPa]	f'c [kgf/cm ²]	E [Mpa]	E [kgf/cm ²]
0	0,00	0,00	0	0
3	17,05	173,85	20450	208532
7	25,53	260,37	25100	255949
14	31,29	319,07	26150	266656
28	34,16	348,34	26250	267676

Con los datos de la Tabla N°7.34 se obtienen los Gráficos N°7.38, N°7.39 y N°7.40 en los cuales se muestra la variación de la resistencia cilíndrica experimentada en el tiempo, la variación del módulo de elasticidad experimentada en el tiempo y la relación de módulo de elasticidad y resistencia cilíndrica a compresión del mortero confeccionado con cemento CPN respectivamente.

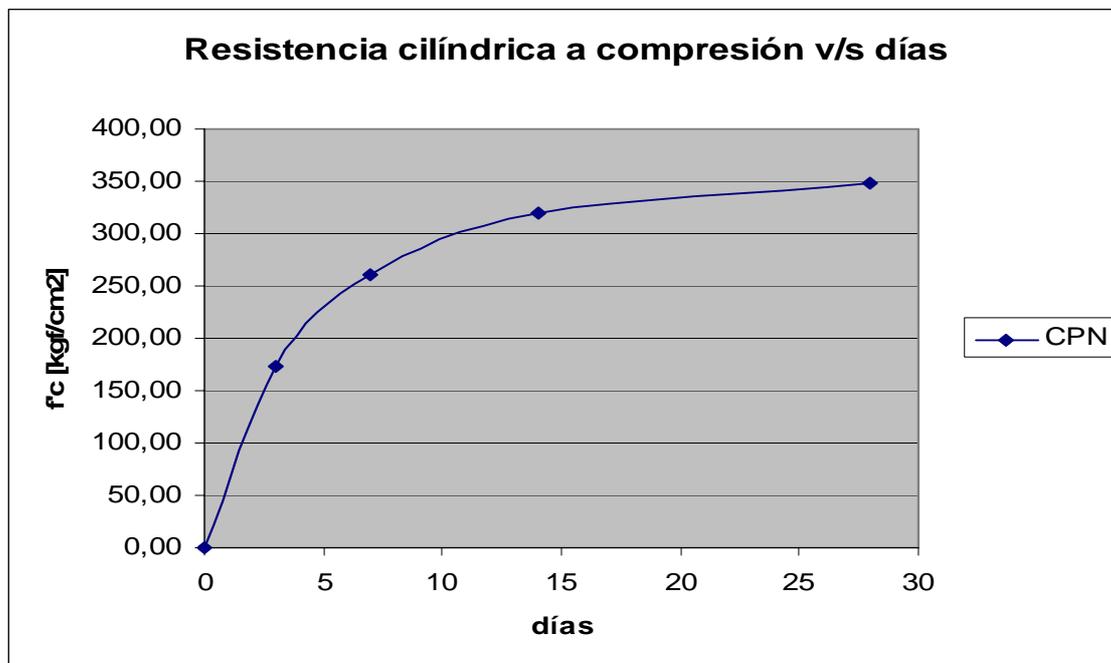


Gráfico N°7.38 Resistencia cilíndrica a compresión de mortero CPN.

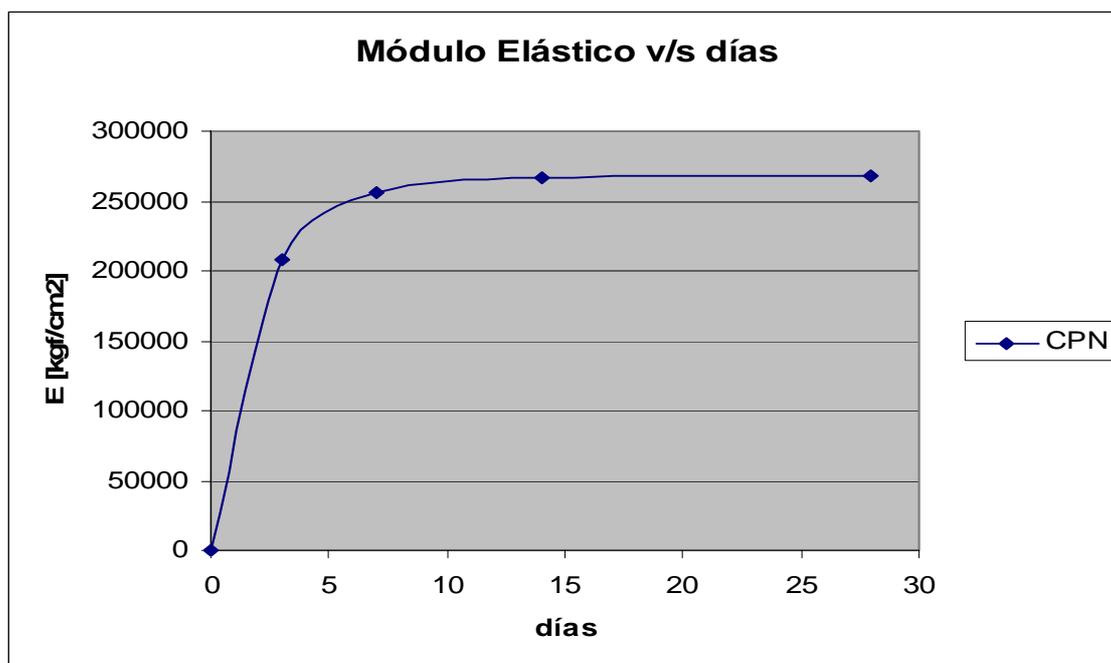


Gráfico N°7.39 Módulo de elasticidad de mortero CPN.

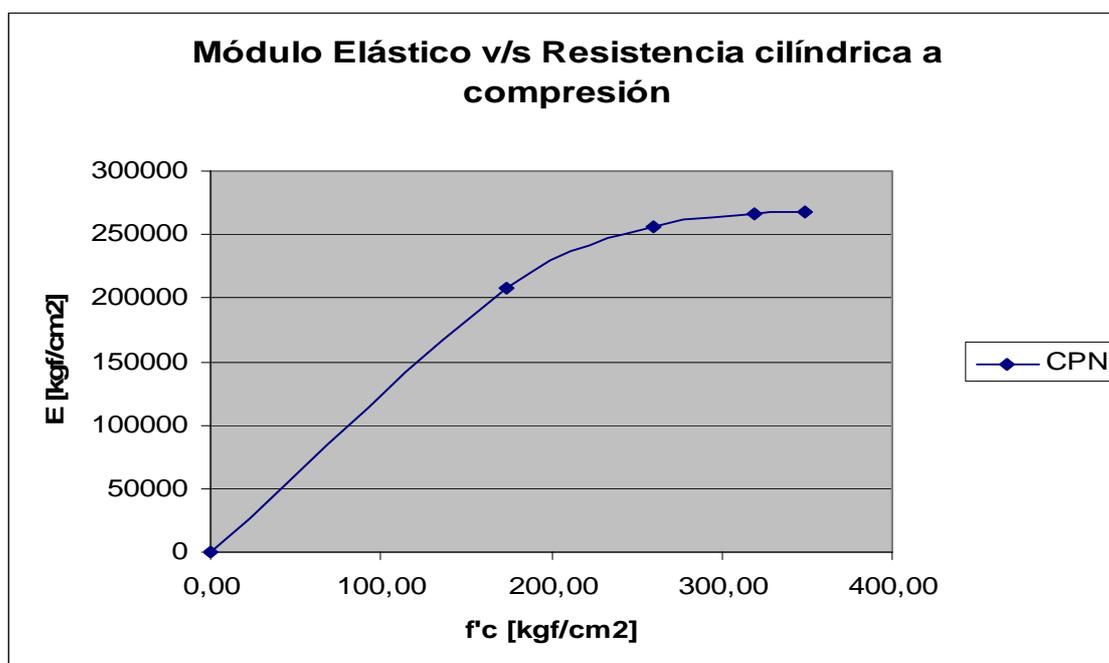


Gráfico N°7.40 Módulo de elasticidad y resistencia cilíndrica a compresión de mortero CPN.

7.3.4.1.2 Mortero CPPA.

En la Tabla N°7.35 se presenta un resumen de las Tablas N°6.45, N°6.46 y N°6.47 las cuales corresponde a los resultados de resistencias cilíndricas a compresión y módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPPA.

Tabla N°7.35 Resistencia cilíndrica a compresión y módulo elástico de mortero CPPA.

día	f'c [MPa]	f'c [kgf/cm ²]	E [Mpa]	E [kgf/cm ²]
0	0,00	0,00	0	0
3	15,69	159,96	18450	188138
7	25,15	256,42	23150	236064
14	31,02	316,27	23450	239123
28	31,49	321,11	23500	239633

Con los datos de la Tabla N°7.35 se obtienen los Gráficos N°7.41, N°7.42 y N°7.43 en los cuales se muestra la variación de la resistencia cilíndrica experimentada en el tiempo, la variación del módulo de elasticidad experimentada en el tiempo y la relación de módulo de elasticidad y resistencia cilíndrica a compresión del mortero confeccionado con cemento CPPA respectivamente.

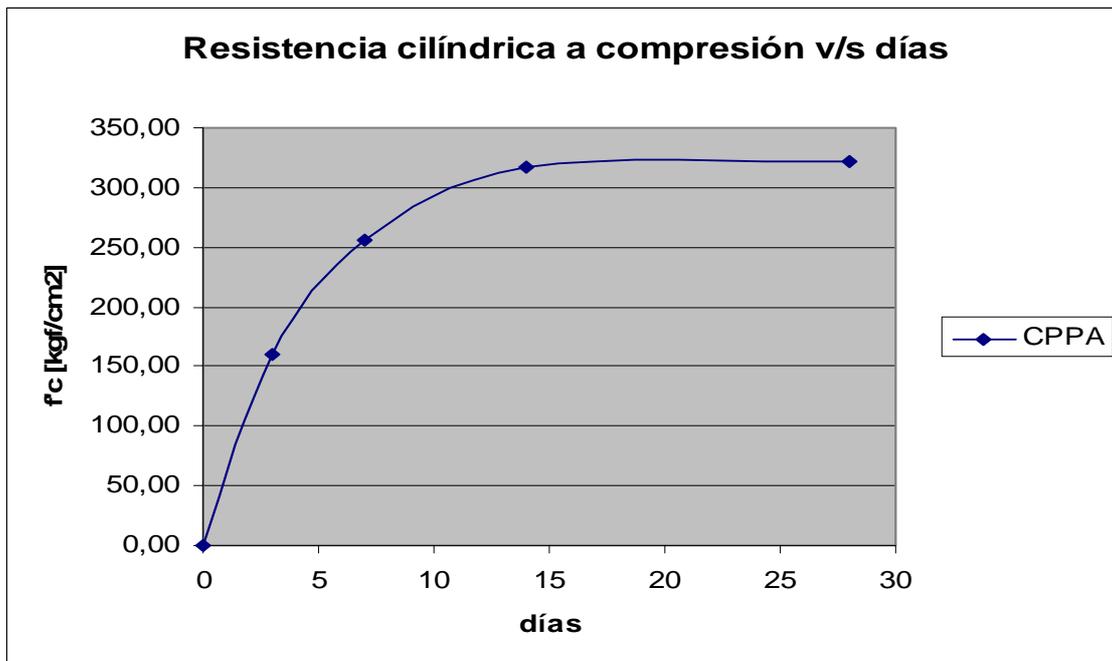


Gráfico N°7.41 Resistencia cilíndrica a compresión de mortero CPPA.

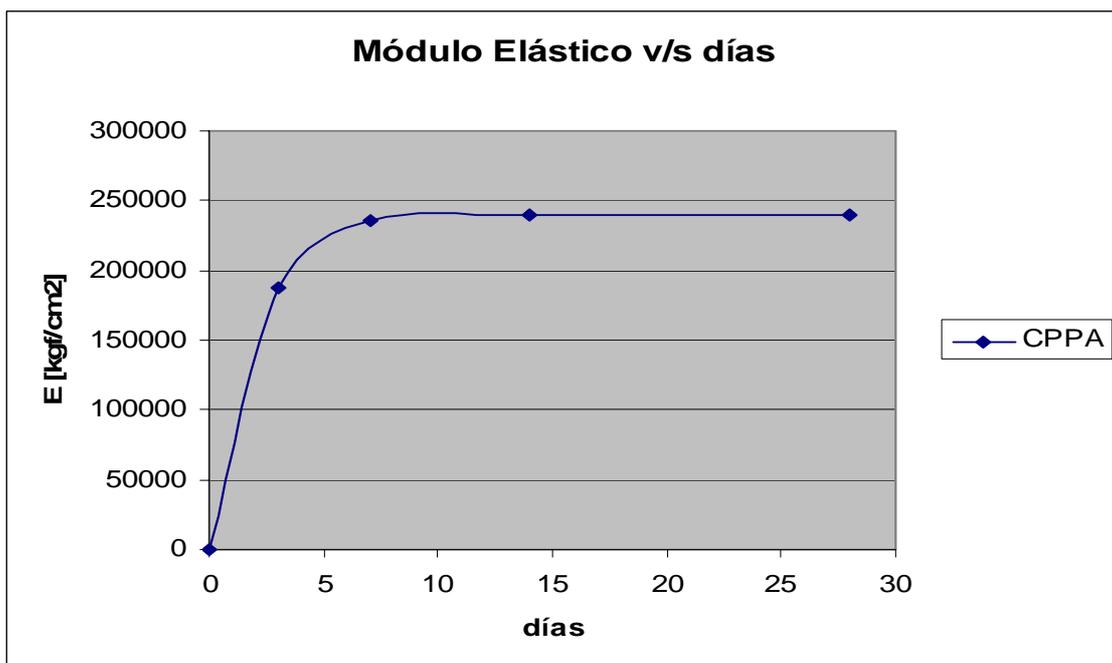


Gráfico N°7.42 Módulo de elasticidad de mortero CPPA.

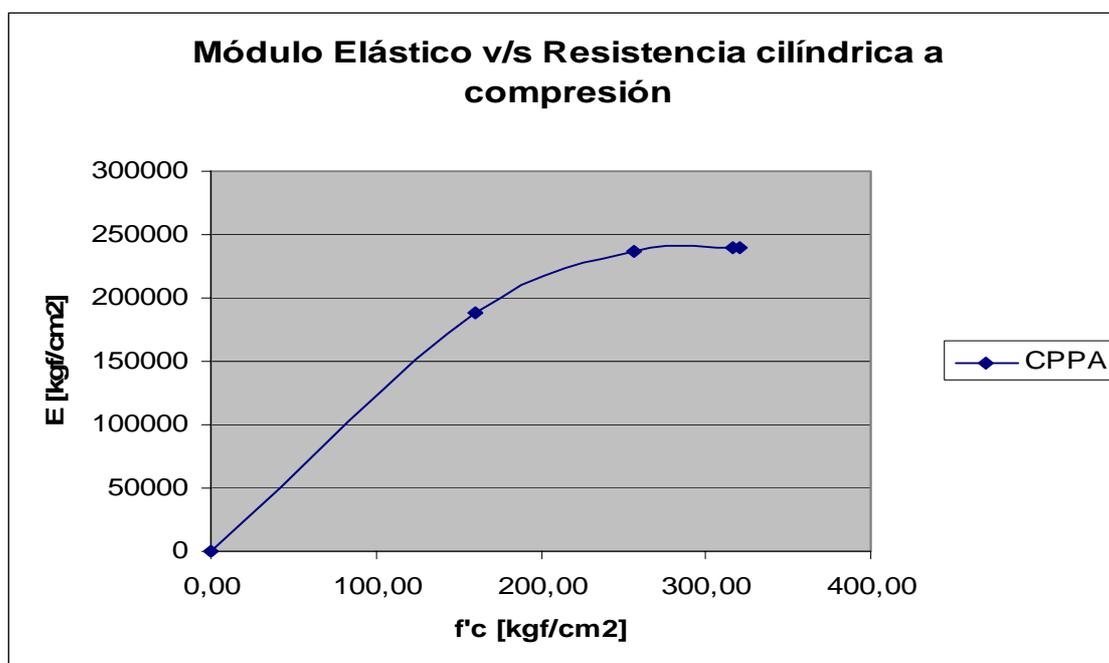


Gráfico N°7.43 Módulo de elasticidad y resistencia cilíndrica a compresión de mortero CPPA.

7.3.4.1.3 Mortero CPPB.

En la Tabla N°7.36 se presenta un resumen de las Tablas N°6.48, N°6.49 y N°6.50 las cuales corresponde a los resultados de resistencias cilíndricas a compresión y módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPPB.

Tabla N°7.36 Resistencia cilíndrica a compresión y módulo elástico de mortero CPPB.

día	f'c [MPa]	f'c [kgf/cm ²]	E [Mpa]	E [kgf/cm ²]
0	0,00	0,00	0	0
3	12,67	129,18	17750	181000
7	24,41	248,89	21600	220259
14	30,04	306,28	23000	234535
28	30,41	310,10	23150	236064

Con los datos de la Tabla N°7.36 se obtienen los Gráficos N°7.44, N°7.45 y N°7.46 en los cuales se muestra la variación de la resistencia cilíndrica experimentada en el tiempo, la variación del módulo de elasticidad experimentada en el tiempo y la relación de módulo de elasticidad y resistencia cilíndrica a compresión del mortero confeccionado con cemento CPPB respectivamente.

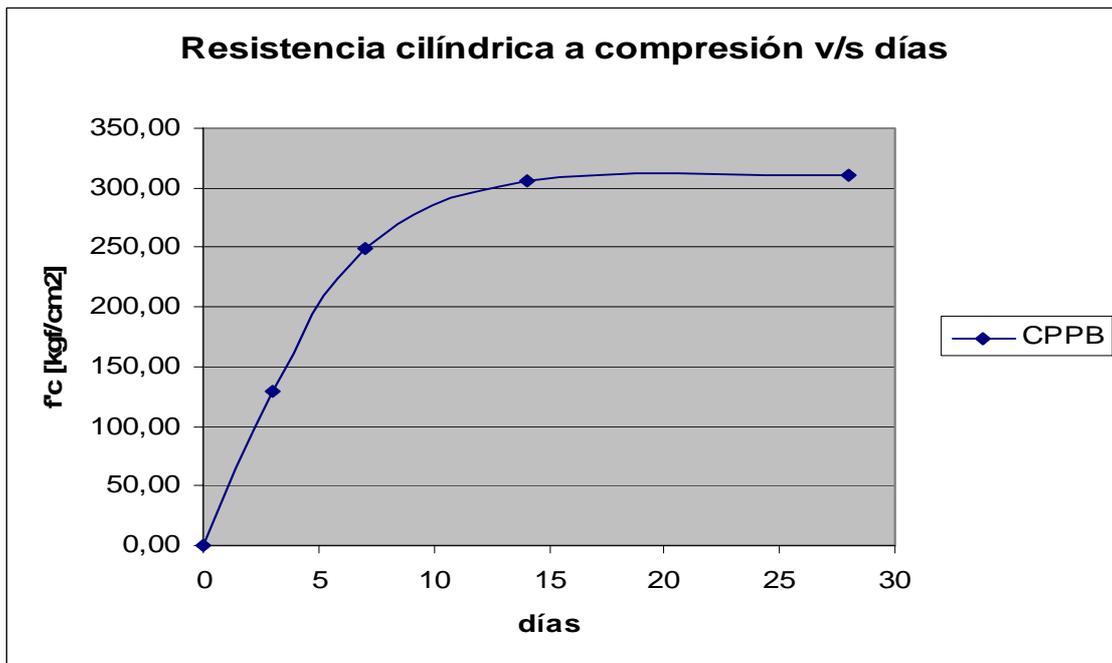


Gráfico N°7.44 Resistencia cilíndrica a compresión de mortero CPPB.

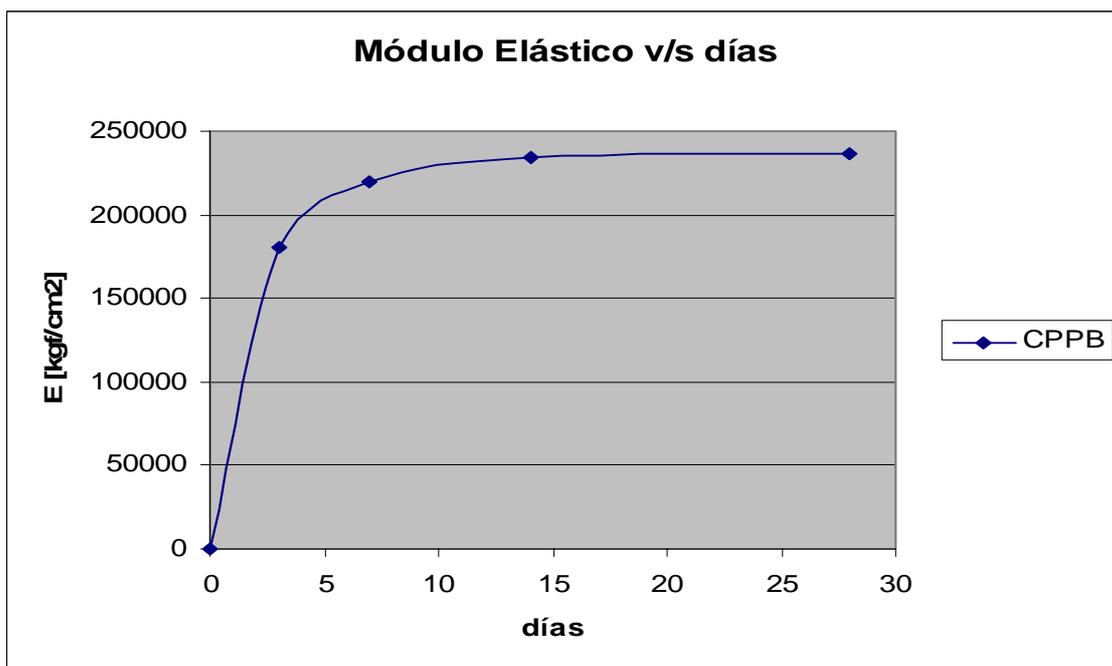


Gráfico N°7.45 Módulo de elasticidad de mortero CPPB.

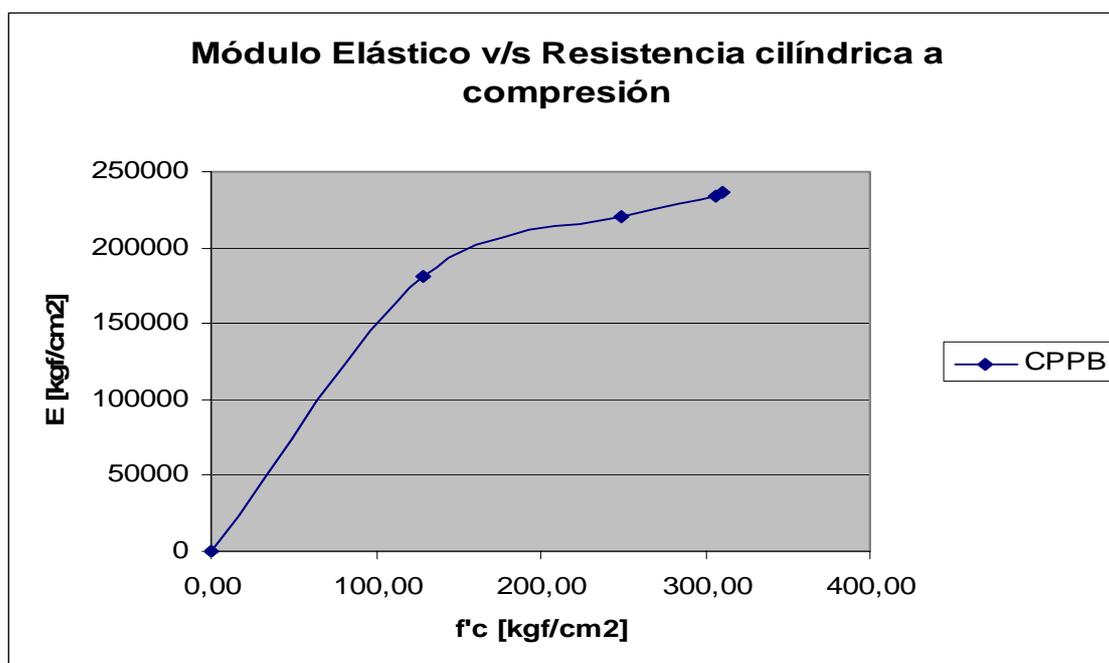


Gráfico N°7.46 Módulo de elasticidad y resistencia cilíndrica a compresión de mortero CPPB.

7.3.4.1.4 Mortero CPPC.

En la Tabla N°7.37 se presenta un resumen de las Tablas N°6.51, N°6.52 y N°6.53 las cuales corresponde a los resultados de resistencias cilíndricas a compresión y módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad del mortero confeccionado con cemento CPN.

Tabla N°7.37 Resistencia cilíndrica a compresión y módulo elástico de mortero CPPC.

día	f'c [MPa]	f'c [kgf/cm ²]	E [Mpa]	E [kgf/cm ²]
0	0,00	0,00	0	0
3	20,21	206,05	20750	211591
7	25,62	261,23	22900	233515
14	30,09	306,80	24300	247791
28	30,90	315,09	24750	252380

Con los datos de la Tabla N°7.37 se obtienen los Gráficos N°7.47, N°7.48 y N°7.49 en los cuales se presenta un gráfico que muestra la variación de la resistencia cilíndrica experimentada en el tiempo, la variación del módulo de elasticidad experimentada en el tiempo y la relación de módulo de elasticidad y resistencia cilíndrica a compresión del mortero confeccionado con cemento CPPC respectivamente.

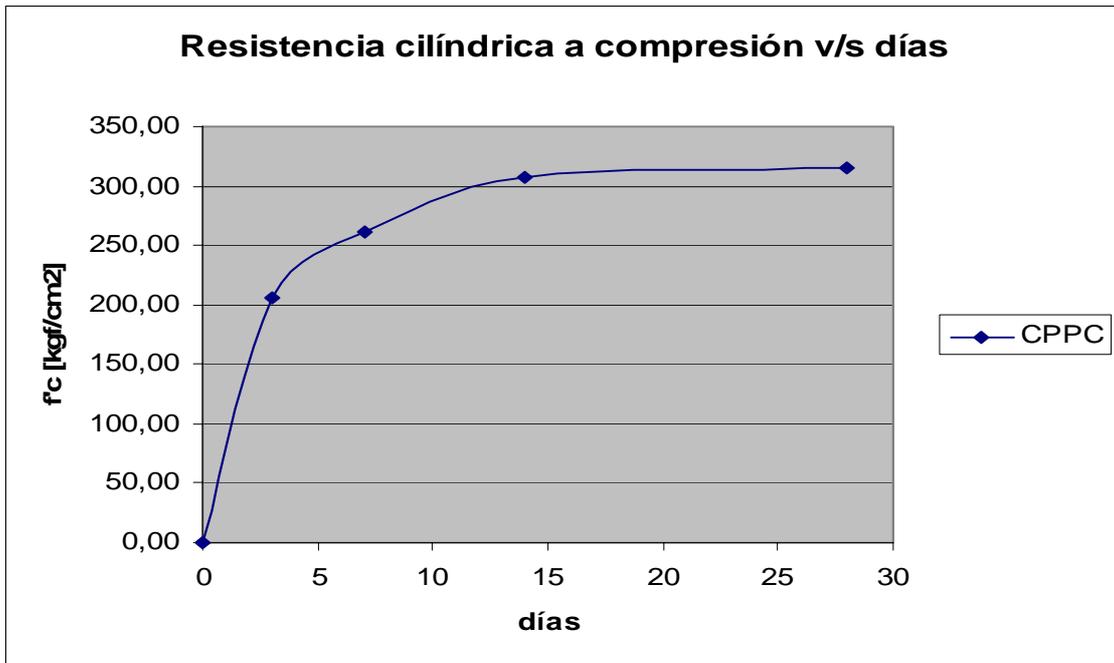


Gráfico N°7.47 Resistencia cilíndrica a compresión de mortero CPPC.

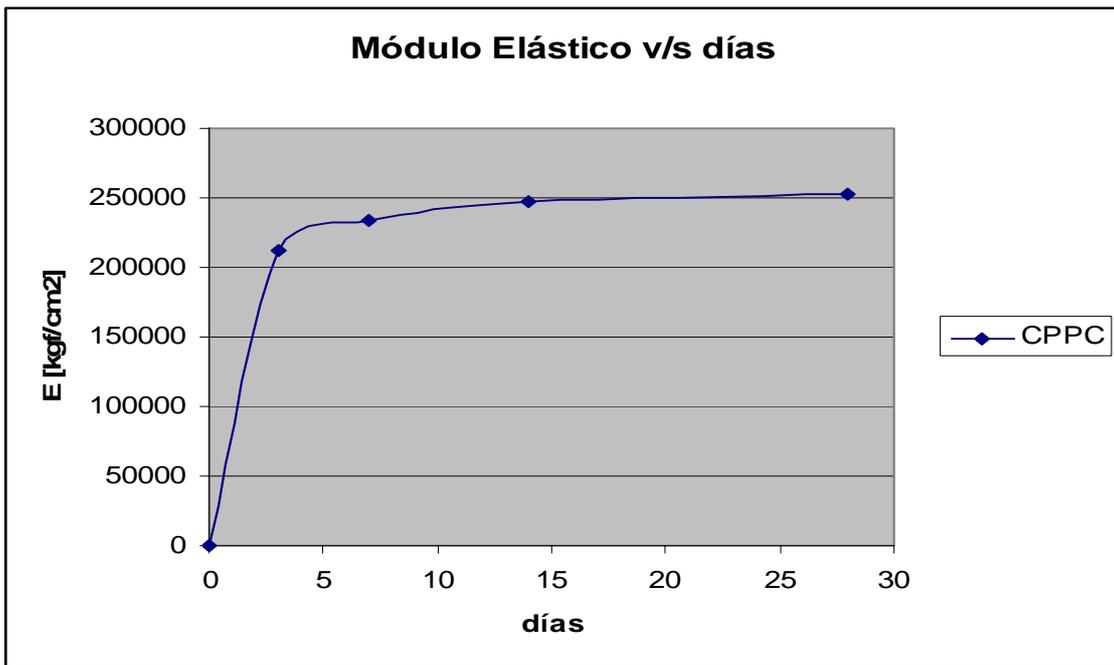


Gráfico N°7.48 Módulo de elasticidad de mortero CPPC.

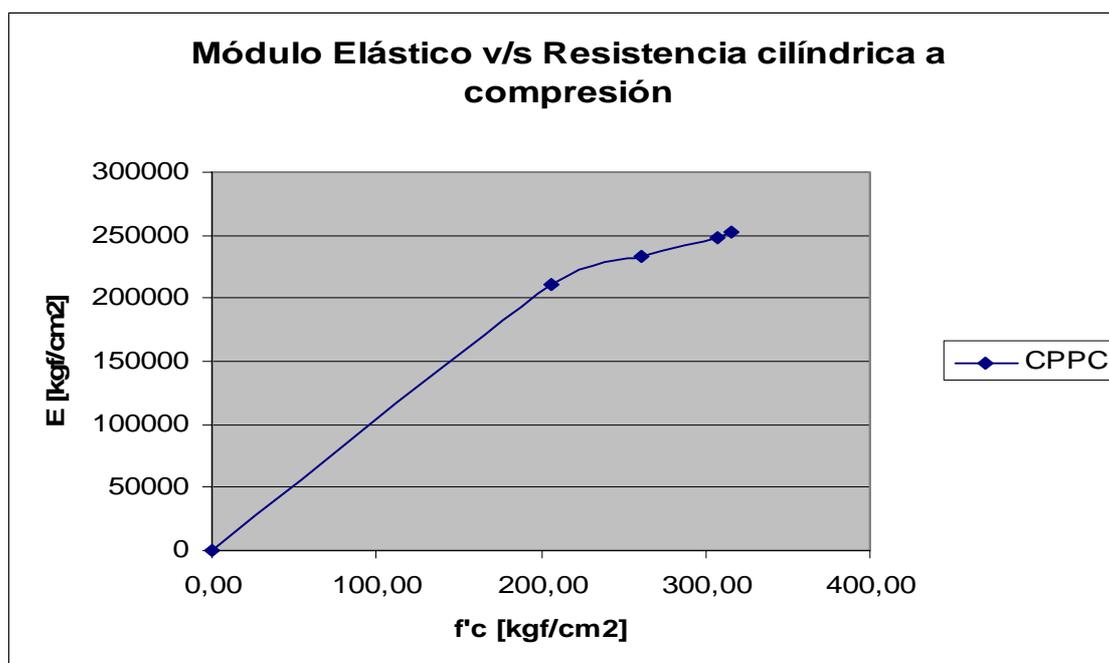


Gráfico N°7.49 Módulo de elasticidad y resistencia cilíndrica a compresión de mortero CPPC.

En la Tabla N°7.38 se presenta un resumen de las Tablas N°7.34, N°7.35, N°7.36 y N°7.37 las cuales corresponde a los resultados de resistencias cilíndricas a compresión y módulo de elasticidad a 3, 7, 14 y 28 días de edad de los morteros confeccionados con los distintos tipos de cementos.

Tabla N°7.38 Resumen de resistencia cilíndrica a compresión y módulo elástico de morteros.

día	CPN		CPPA		CPPB		CPPC	
	f'c [kgf/cm²]	E [kgf/cm²]						
0	0,00	0	0,00	0	0,00	0	0,00	0
3	173,85	208532	159,96	188138	129,18	181000	206,05	211591
7	260,37	255949	256,42	236064	248,89	220259	261,23	233515
14	319,07	266656	316,27	239123	306,28	234535	306,80	247791
28	348,34	267676	321,11	239633	310,10	236064	315,09	252380

Con los datos de la Tabla N°7.38 se obtienen los Gráficos N°7.50, N°7.51 y N°7.52 en los cuales se presenta un gráfico que compara la variación de la resistencia cilíndrica experimentada en el tiempo, la variación del módulo de elasticidad experimentada en el tiempo y la relación de módulo de elasticidad y resistencia cilíndrica a compresión de los morteros confeccionados con los distintos tipos de cementos.

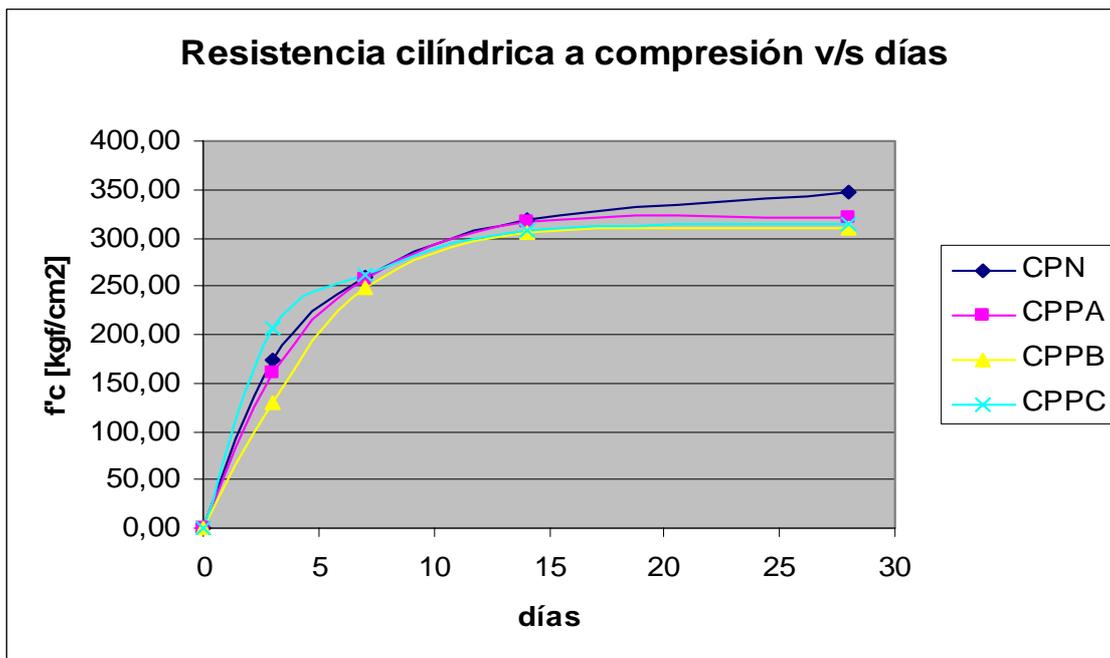


Gráfico N°7.50 Comparación de los valores de resistencia cilíndrica a compresión de cada mortero.

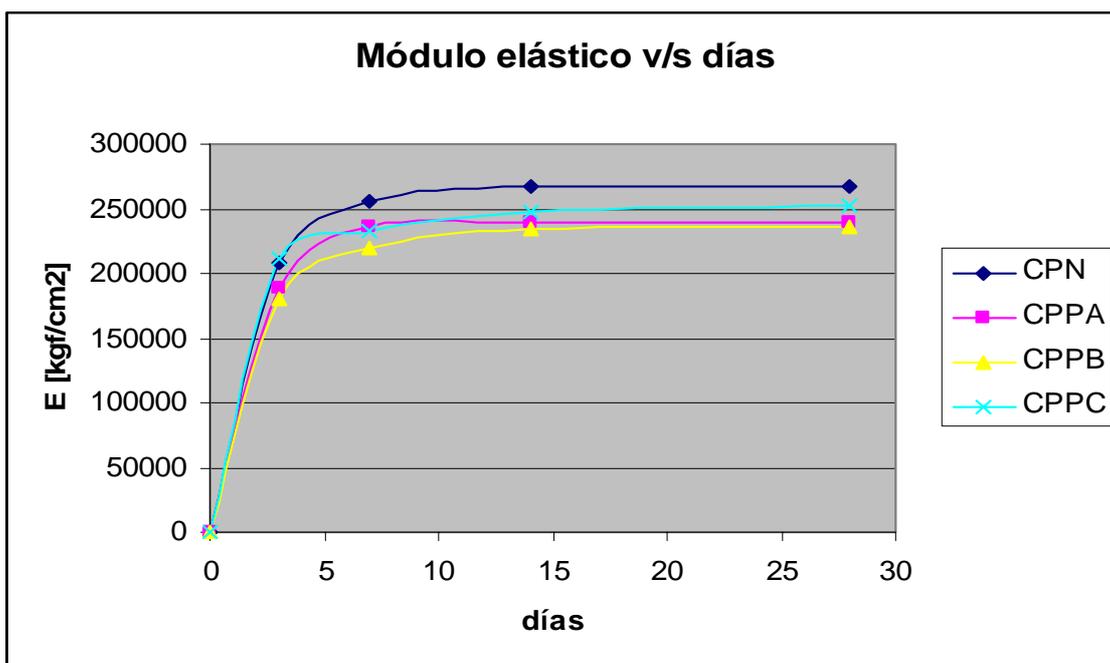


Gráfico N°7.51 Comparación de los valores de resistencia cilíndrica a compresión de cada mortero.

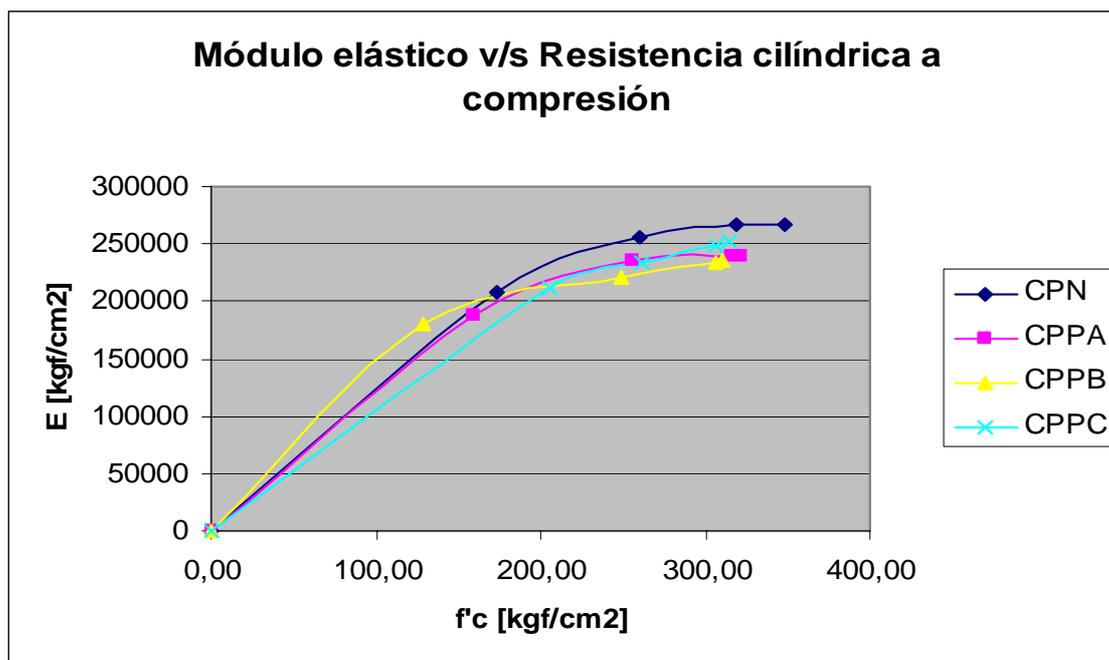


Gráfico N°7.52 Comparación de los valores de resistencia cilíndrica a compresión de cada mortero.

7.3.4.2 Análisis.

Al observar las curvas del Gráfico N°7.46 podemos notar cierto parecido con el Gráfico N°7.18 (resistencia a compresión de probetas RILEM) salvo por el comportamiento de CPPA el cual sobrepasa a la edad de 14 días la resistencia de CPN.

Del Gráfico N°7.47 se observa que todos los morteros experimentaron durante sus primeros días un gran aumento del módulo elástico, para luego estabilizarse y no variar mucho desde los 14 a los 28 días. La relación entre módulo elástico y resistencia se hace evidente al observar el Gráfico N° 7.48 y se puede concluir con estos valores que morteros con resistencias más altas poseen valores de módulo elásticos más altos

7.3.5 Estimación de Creep.

Con los datos de los ensayos de retracción libre y retracción restringida, se puede obtener la deformación unitaria producida en la retracción libre y la retracción restringida respectivamente. Para el caso de retracción libre con las Tablas N°7.19 a N°7.22 se obtiene la deformación promedio a la edad de 28 días de cada probeta. (Tabla N°7.39)

Tabla N°7.39 Deformación promedio a los 28 días en retracción libre.

Probeta	Promedio Lo [mm]	Promedio retracción [mm]
CPN	284	0,164
CPPA	284	0,179
CPPB	284	0,184
CPPC	284	0,189

Para el caso de retracción restringida con las Tablas N°7.24 a N°7.31 se obtienen el promedio de las fisuras formadas en cada probeta (Tabla N°7.40).

Tabla N°7.40 Promedio de fisuras a los 28 días.

Probeta	Perímetro probeta [mm]	Fisura 1 [mm]	Fisura 2 [mm]	Promedio fisuras [mm]
CPN D1	1275,97	0,2	0,2	0,20
CPN D2	1275,49	0,5	0,05	0,28
CPPA C1	1275,97	0,9	0,05	0,48
CPPA C2	1275,49	1	0	0,50
CPPB B1	1275,97	1,2	0	0,60
CPPB B2	1275,49	0,8	0,05	0,43
CPPC A1	1275,97	0,7	0,1	0,40
CPPC A2	1275,49	0,5	0,2	0,35

En la Tabla N°7.41 se presenta el promedio de fisuras para cada tipo de mortero ocupando la Tabla N7.40 y se obtiene la deformación unitaria para cada mortero a la edad de 28 días.

Tabla N°7.41 Deformación unitaria a los 28 días.

Probeta	Promedio Lo [mm]	Promedio retracción [mm]	Deformación unitaria
CPN	284	0,164	0,000577
CPPA	284	0,179	0,000629
CPPB	284	0,184	0,000647
CPPC	284	0,189	0,000664

Con los datos de la Tabla N°7.41 se obtiene el Gráfico N°7.53 en el cual se presenta un gráfico que compara la deformación unitaria promedio a los 28 días de cada mortero.

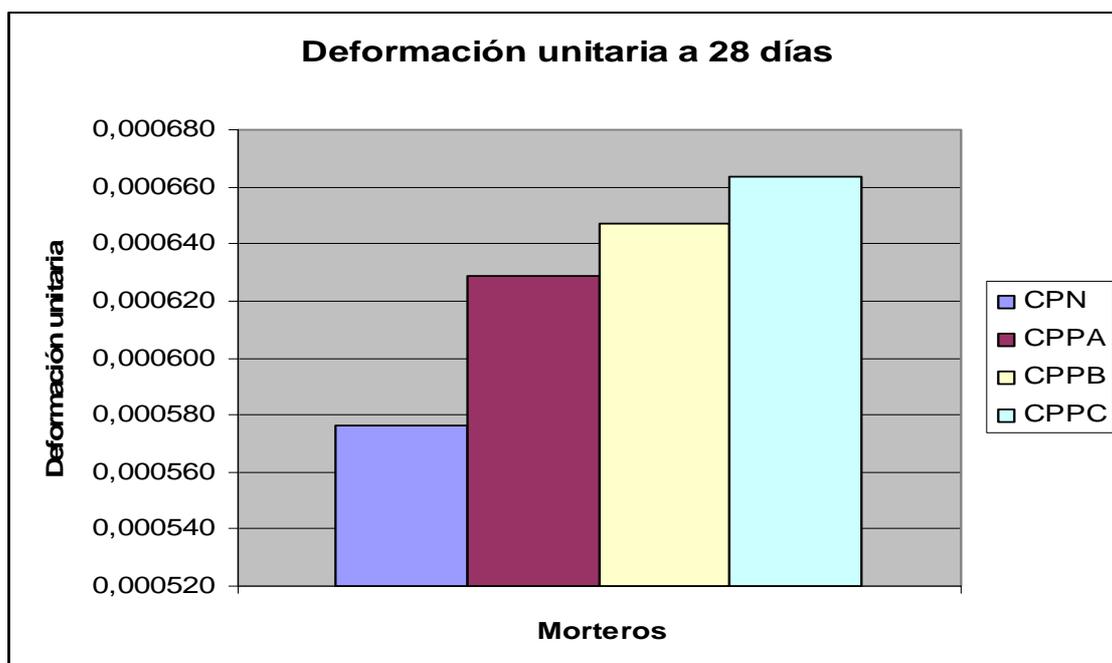


Gráfico N°7.53 Comparación de la deformación unitaria a los 28 días de cada mortero.

En la Tabla N°7.42 se presenta el promedio de deformación unitaria producto de la fisuración ocupando los datos de la Tabla N°7.40

Tabla N°7.42 Deformación unitaria producto de la fisuración.

Probeta	Promedio perímetro [mm]	Promedio fisuras [mm]	Deformación unitaria por fisura
CPN	1276	0,238	0,000186
CPPA	1276	0,488	0,000382
CPPB	1276	0,513	0,000402
CPPC	1276	0,375	0,000294

Con los datos de la Tabla N°7.42 se obtiene el Gráfico N°7.54 en el cual se presenta un gráfico que compara la deformación unitaria por la fisuración promedio a los 28 días de cada mortero.

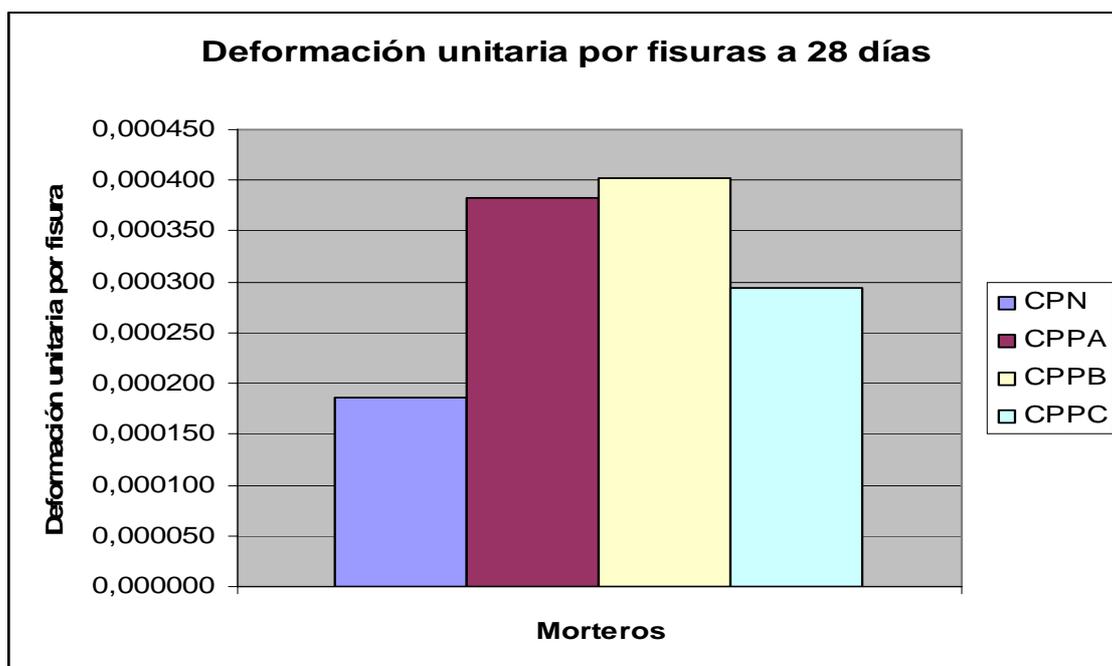


Gráfico N°7.54 Comparación de la deformación unitaria por fisuras a los 28 días de cada mortero.

En la Tabla N°7.43 se presenta la deformación unitaria y la deformación unitaria producto de la fisuración de cada mortero, la resta de estos valores se presenta como la estimación de creep para cada tipo de mortero estudiado.

Tabla N°7.43 Estimación de creep para cada mortero.

Probeta	Deformación unitaria	Deformación unitaria por fisura	Creep
CPN	0,000577	0,000186	0,000390
CPPA	0,000629	0,000382	0,000247
CPPB	0,000647	0,000402	0,000245
CPPC	0,000664	0,000294	0,000370

Con los datos de la Tabla N°7.43 se obtiene el Gráfico N°7.55 en el cual se presenta un gráfico que compara la estimación de creep hecha para cada tipo de mortero a la edad de 28 días.

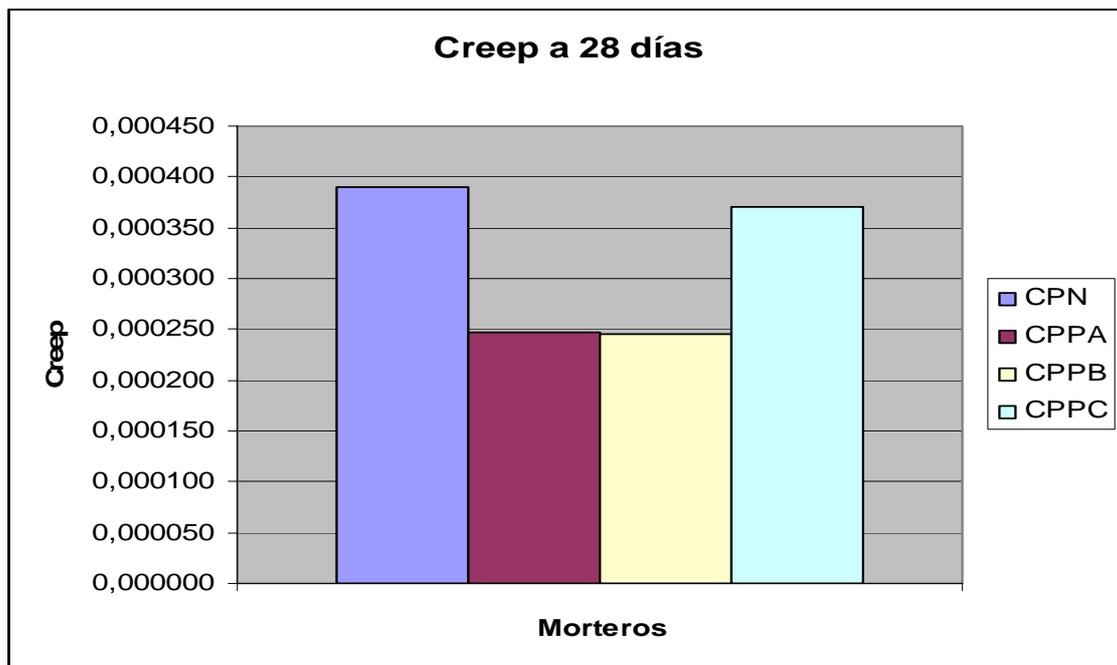


Gráfico N°7.55 Estimación de creep a los 28 días para cada mortero.

7.3.5.1 Análisis.

La estimación hecha para el creep de cada mortero es bastante básica y sólo es para tener un valor referencial ya que el proceso de secado no fue el mismo, mientras que las probetas de retracción libre tenían todas sus caras expuestas al ambiente, las probetas de retracción restringida tenían sólo el manto expuesto.

Del Gráfico N°7.55 se observa que el mortero CPN y CPPC tienen valores similares de creep a pesar que el mortero CPN tiene una deformación unitaria y deformación unitaria por fisuración menor. Esto nos muestra que ambos desarrollaron valores parecidos de relajación de esfuerzo frente las tensiones producto de la retracción restringida. Para el caso de los cementos portland puzolánicos, siendo éstos en los que se generaron un mayor tamaño de fisuras, era de suponer que la relajación de esfuerzo o creep sería menor.

Capítulo 8 Conclusiones.

El trabajo de investigación presentado nació con la intención de estudiar la susceptibilidad a la fisuración por retracción que experimenta el hormigón confeccionado a base de cementos con adiciones puzolánicas. Si bien es cierto que el estudio se hizo en morteros, podemos concluir que los resultados obtenidos para cada tipo de cemento son también aplicables a hormigones preparados con estos tipos de cementos.

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, para el caso del cemento comercial puzolánico CPPC su comportamiento se alejó del comportamiento de los cementos de laboratorio, este comportamiento se puede relacionar con el proceso de fabricación del cemento CPPC, dado que este cemento es un cemento comercial su fabricación se realiza bajo molienda conjunta, mientras que los cementos de laboratorio sólo se mezclan con la adición de puzolana correspondiente provocando diferencias en la granulometría final del producto. Esto nos hace comparar los resultados obtenidos para los morteros confeccionados con cemento CPPB y CPPC ya que relativamente poseen una composición similar de puzolana (30 y 28 por ciento respectivamente). Si revisamos los resultados de las pruebas de resistencia y módulo elástico el mortero CPPC obtuvo mayor resistencia y módulo a los 28 días que CPPB y si revisamos las estimaciones de creep el mortero CPPB desarrolló un menor creep en el tiempo lo que hace suponer que el mortero CPPC es más extensible y esto sería provocado por el proceso de fabricación del cemento (molienda conjunta), pero al comparar CPPC con el cemento CPN también se puede concluir lo mismo que para el caso de los cementos de laboratorio, es decir que al poseer puzolana un cemento lo hace más susceptible a la fisuración.

De los ensayos realizados en esta investigación podemos decir que los resultados obtenidos en los ensayos químicos y físicos a cementos nos entregaron la información para verificar que los cementos experimentales confeccionados, al igual que los cementos comerciales usados en la investigación, cumplían los requisitos de la norma chilena. En el caso de las resistencias mecánicas de los morteros se estuvo acorde con la teoría, demostrando así que los cementos portland puzolánicos desarrollan su resistencia en forma más lenta que los cementos portland, esto porque la puzolana necesita reaccionar con el producto de la hidratación de los silicatos, pero esto no es en perjuicio de la resistencia final que pueden llegar a tener los cementos portland puzolánicos, y que puede ser igual o superior que la de un cemento portland. Para el

caso de los resultados de retracción libre se confirmó que los cementos portland puzolánicos se retraen más que los cementos portland en un período de tiempo de 28 días. Para el caso del mortero con cemento CPPC se puede decir que fue el que más retracción desarrolló, seguido por el cemento CPPB, CPPA y finalmente el CPN. Si bien, es cierto que la retracción experimentada por CPPA y CPPB fue similar y, según los datos y el gráfico CPPA, estuvo por arriba de CPPB desde los 7 a 25 días aproximadamente, también es cierto que al final del ensayo, a los 28 días de edad, CPPB experimentó una mayor retracción comparado con CPPA. Así las cosas, con estos resultados se elaboró la curva de retracción libre para morteros con distinta dosificación de puzolana logrando y cumpliendo con uno de los objetivos del estudio. Con los datos del ensayo de módulo de elasticidad se verificó la teoría que relaciona la resistencia con el módulo elástico, y se puede apreciar que, en los resultados del ensayo, los cementos portland puzolánicos de laboratorio desarrollaron un menor módulo elástico en comparación con el cemento CPN, siendo la diferencia de estos valores decreciente a la cantidad de adición de los cementos. Mientras más adición menor valor de módulo elástico. Para el caso de CPPC su curva no se ubicó entre las curvas de los cementos portland puzolánicos, si no sobre ellos, pero de todos modos, y al igual que los cementos portland puzolánicos de laboratorio, éste no fue superior que la curva de CPN, confirmando así el comportamiento respecto del cemento portland puzolánico comparado con el cemento portland. Teniendo en vista los resultados del ensayo de retracción restringida de los morteros confeccionados con los cementos de laboratorio, y el mortero confeccionado con el cemento portland, se observó que durante los 28 días que duró la investigación las probetas confeccionadas con cementos CPPA y CPPB desarrollaron en promedio un ancho de fisuras mayores que las desarrolladas por CPN. El ancho fue creciente con respecto a la cantidad de adición puzolánica de los cementos de laboratorio, es decir CPPB en promedio desarrolló un mayor ancho de fisura que CPPA. Es necesario indicar que las fisuras en los tres tipos de cemento se generaron en promedio a los seis días de edad, así es que básicamente las fisuras tuvieron el mismo tiempo para desarrollarse y crecer. En el caso del mortero confeccionado con CPPC en promedio la edad de fisuración fue 4,8 días, tiempo mucho menor al comparado con los otros cementos, sin embargo al comparar el ancho promedio de fisuras entre CPPC y CPN se concluye lo mismo que en el caso de los cementos portland puzolánicos de laboratorio dado que el ancho de fisuras desarrollado por CPPC, es mayor que el ancho promedio de las fisuras desarrolladas por CPN.

En base a todos estos resultados presentados en el trabajo de investigación se puede concluir que el comportamiento de los morteros confeccionados con cementos de laboratorio fue distinto al comportamiento del mortero confeccionado con cemento portland puro. Ahora

bien, como la única diferencia que hay entre ellos es la adición de puzolana podemos decir que la puzolana influye directamente en los cambios físicos y químicos del mortero confeccionado con determinado cemento. Por lo tanto, en los morteros la adición puzolánica influye en la fisuración por retracción, provocando fisuras más grandes bajo condiciones similares. Con esto se cumple el objetivo principal del estudio que era determinar la influencia de la puzolana en la fisuración por retracción que experimentan hormigones fabricados con cementos con adición puzolánica.

El tercer objetivo de esta investigación también se cumplió, ya que para determinar la edad de fisuración de los morteros se implementó la norma ASTM C 1581 – 04. Al implementar esta norma se consigue tener una herramienta válida para determinar la edad de fisuración para morteros y hormigones, o para probar nuevos materiales que ayuden a disminuir la fisuración en ellos.

Si bien es cierto, este estudio es un pequeño avance para conocer los fenómenos que experimenta el hormigón a lo largo de su vida, asimismo de las variaciones que sufre al cambiar su composición, es un avance para obtener información sobre la influencia del tipo de cemento en el nivel de retracción y potencial de fisuración.

Capítulo 9 Referencias bibliográficas.

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, Sergio A., 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, Jorge A., 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., 1998 “Concreto: estructura, propiedades y materiales”.
8. Neville, Adam M., 1977 “Tecnología del Concreto”.
9. Norma ASTM C 1581 04 “Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage”.
10. Norma ASTM C 469 94 “Static Modulus of Elasticity and Poisson’s Ratio of Concrete in Compression”.

11. Norma NCh 147 Of69 “Cementos - Análisis químico”. Instituto Nacional de Normalización.
12. Norma NCh 159 Of70 “Cemento. Determinación de la superficie específica por el permeabilímetro según Blaine”. Instituto Nacional de Normalización.
13. Norma NCh 154 Of69 “Cemento. Determinación del peso específico relativo”. Instituto Nacional de Normalización.
14. Norma NCh 158 Of67 “Cemento: ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento”. Instituto Nacional de Normalización.
15. Norma NCh 151 Of69 “Cemento. Método de determinación de la consistencia normal”. Instituto Nacional de Normalización.
16. Norma NCh 152 Of71 “Cemento. Método de determinación del tiempo de fraguado”. Instituto Nacional de Normalización.
17. Norma NCh 148 Of68 “Cemento. Terminología, clasificación y especificaciones generales”. Instituto Nacional de Normalización.
18. Sepúlveda, Esteban A., 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.
19. Stern, C.R.; Amini, H.; Charrier, R.; Godoy, E.; Hervé, F.; Varela, J. 1984. “Petrochemistry and age of rhyolitic pyroclastic flows which occur along the drainage valleys of the Río Maipo and Río Cachapoal (Chile) and the Río Yaucha and Río Papagayos (Argentina)”. *Revista Geológica de Chile*, No. 23, p. 39-52.
20. Tomicic, Yuri M., 1999 “Revestimientos de impermeabilización (estucos) a base de aglomerantes hidráulicos”. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.