



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**FACTIBILIDAD DE USO DE CENIZAS DE LODOS RESIDUALES PROVENIENTES  
DE LA FABRICACIÓN DE PAPEL COMO POTENCIAL REEMPLAZANTE PARCIAL  
DE CEMENTO EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES**

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

**MARCO TULLIO DREYSE ORTUZAR**

PROFESOR GUIA:

JACQUES BORNAND ARAYA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

DAVID CAMPUSANO BROWN

MIGUEL ÁNGEL GONZÁLEZ TALEP

SANTIAGO DE CHILE

2016

**RESUMEN DEL INFORME FINAL  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: MARCO TULIO DREYSE ORTÚZAR.  
FECHA: 03/11/2016  
PROFESOR GUÍA: JACQUES BORNAND.**

**“FACTIBILIDAD DE USO DE CENIZAS DE LODOS RESIDUALES PROVENIENTES DE LA FABRICACIÓN DE PAPEL COMO POTENCIAL REEMPLAZANTE PARCIAL DE CEMENTO EN LA FABRICACIÓN DE HORMIGONES”**

El presente trabajo trata sobre la reutilización de un residuo de la industria papelera para su uso en la industria cementera, la que a raíz de la creciente preocupación por el medioambiente ha de buscar métodos de disminuir su huella ecológica y que a la vez sean eficientes y convenientes para la industria.

El objetivo de esta memoria es investigar si los lodos residuales de la industria papelera pueden ser utilizados como reemplazante parcial del cemento al fabricar hormigón, inquietud que surge a raíz de la composición mineralógica de los lodos de papel, la que da un indicio de que sometidos a un proceso de calcinación podrían presentar propiedades puzolánicas y/o hidráulicas.

El trabajo contempló dos fases, la primera consistió en investigar las variables involucradas en la calcinación de los lodos que permitieran optimizar la actividad puzolánica y/o hidráulica de las cenizas. Para ello se evaluó la actividad puzolánica de lodos calcinados a diferentes temperaturas, obteniendo como resultado que las cenizas obtenidas de una calcinación a 750°C por 3 horas, son las que presentan mayor actividad puzolánica y/o hidráulica.

En la segunda fase, y con el objetivo de evaluar el efecto de las cenizas en las mezclas de hormigón, se confeccionaron morteros de prueba en donde se reemplazó, en parte, dosis de cemento por ceniza obtenida a 750°C. Posteriormente se evaluó la resistencia a compresión en morteros con reemplazos entre un 0% y 8% de cemento por cenizas, a las edades de 7, 14, 28, 42 y 56 días.

Los resultados obtenidos muestran que es factible la utilización de cenizas de lodos de papel como material cementicio suplementario. En efecto, comparando con la muestra patrón, se pudo observar que a mediano plazo (14-42 días) las diferentes mezclas no pierden resistencia. En el caso de las muestras con bajo reemplazo de cenizas (1% - 3%) incluso se puede observar que a primeras edades presentan un alza en la resistencia, manteniéndose por sobre el patrón hasta los 56 días. Por su parte, las mezclas con mayores porcentajes de reemplazo muestran que las cenizas también poseen reactividad puzolánica y/o hidráulica, ya que si bien en las primeras edades obtienen valores de resistencia menores al patrón, a mediano plazo logran igualar los valores obtenidos por la muestra sin reemplazo. En síntesis, el uso de cenizas como reemplazante parcial de cemento es factible, ya que se demostró que poseen propiedades hidráulicas y/o puzolánicas. Estas cenizas en bajas dosis de reemplazo son capaces, incluso, de aumentar la resistencia de la mezcla y en dosis mayores, si bien generan una caída de la resistencia inicial, a mediano plazo logran que las mezclas adquieran resistencias comparables con respecto a la mezcla patrón.

Para mi familia.

## **Agradecimientos**

El más importante agradecimiento por supuesto es para mis padres, Carlos y Mireya, los que siempre me apoyaron en este proceso y me ayudaron a seguir adelante.

A mis hermanas Ximena y Sofía junto con mi hermano Hugo que también siempre fueron de ayuda en todo momento.

A mis amigos guatones, Suen, Lu, Warri, Chele, Toño, Nacho, Andrés y Rey por todos lo vivido juntos y que de seguro sin ellos nada de la experiencia de la universidad hubiese sido igual.

A mis amigos del colegio, Seba, Frodo, Waldo y Nicolás que también son parte fundamentales en lo extra programático.

A mis amigos civiles Alan, Camilo y Walter que fueron muy importantes en la segunda etapa de la universidad.

A mi profesor guía Jacques Bornand por todo el apoyo y disposición que tuvo a lo largo de la memoria.

A Braulio Burgos, Jaime Bravo y todos los laboratoristas de IDIEM que siempre tuvieron una gran disposición a enseñarme y ayudarme en la fase experimental de mi memoria.

A los Miguel Peña y Gabriela Silva de CMPC por la ayuda y materiales proporcionados.

Y a todas las personas que me hayan ayudado tanto en la memoria como a lo largo de toda la carrera.

## Tabla de Contenido

Capítulo 1 Introducción .....	1
<b>1.1 Introducción</b> .....	1
<b>1.2 Objetivos</b> .....	2
<b>1.3 Alcance</b> .....	2
Capítulo 2 Antecedentes .....	3
<b>2.1 Tipos de cemento</b> .....	3
2.1.1 Cemento Portland .....	3
2.1.2 Cemento con adición puzolánica .....	3
<b>2.2 Reacciones de hidratación</b> .....	4
2.2.1 Cemento Portland .....	4
2.2.2 Cemento con adiciones .....	5
<b>2.3 Adiciones cementicias</b> .....	5
2.3.1 Ceniza volante .....	5
2.3.2 Microsílice .....	5
2.3.3 Escoria básica granulada de alto horno .....	5
2.3.4 Agregado tipo A .....	6
2.3.5 Pozolanas naturales .....	6
2.3.6 Metacaolín .....	6
<b>2.4 Estudios previos</b> .....	6
<b>2.5 Normativa actual y ensayos</b> .....	7
2.5.1 NCh148.Of68 Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales....	7
2.5.2 NCh158.Of67 Cementos – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento..	7
2.5.3 NCh161.Of69 Cemento – Pozolana para uso en cementos .....	12
2.5.4 ASTM C311 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use in Portland-Cement Concrete .....	12
2.5.5 ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete .....	12
Capítulo 3 Estudio experimental .....	13
<b>3.1 Materiales</b> .....	13
3.1.1 Agua .....	13

3.1.2 Cemento Portland .....	13
3.1.3 Arena normal .....	14
3.1.3 Ceniza de Lodos de Papel.....	14
<b>3.2 Fase experimental</b> .....	<b>15</b>
3.2.1 Calcinación de Lodos .....	15
3.2.2 Confección de morteros.....	20
3.2.3 Plan de confección y ensayo de probetas .....	21
3.2.4 Curado de morteros .....	21
3.2.5 Ensayo .....	22
Capítulo 4 Resultados.....	24
<b>4.1 Introducción</b> .....	<b>24</b>
<b>4.2 Resultados Fase I</b> .....	<b>24</b>
<b>4.3 Resultados Fase II</b> .....	<b>25</b>
Capítulo 5 Análisis Resultados.....	26
<b>5.1 Introducción</b> .....	<b>26</b>
<b>5.2 Análisis Resultados Fase I</b> .....	<b>26</b>
<b>5.3 Análisis Resultados Fase II</b> .....	<b>27</b>
Capítulo 6 Conclusiones.....	33
Capítulo 7 Bibliografía.....	34

# Capítulo 1 Introducción

## 1.1 Introducción

Actualmente, a nivel mundial, la industria cementera es una de las principales productoras de  $CO_2$  en el mundo, aportando aproximadamente el 7% de la producción de gases de efecto invernadero (1), principalmente por la fase de fabricación de Clínker donde se calcina caliza y arcilla, entre otros compuestos, a temperaturas aproximadamente de entre  $1300^{\circ}$ - $1500^{\circ}C$ .

Por otra parte, está la industria papelera en Chile, la que si bien fabrica una parte importante de sus productos con material reciclado, sigue enfrentada a grandes costos monetarios y ambientales por los residuos producidos que actualmente no tienen un uso posterior.

En un mundo donde la sustentabilidad es cada vez más importante, tanto en el ámbito social como económico, buscar nuevas formas de reducir la contaminación, como también de optimizar los diferentes procesos productivos existentes, es una tarea a realizar por todos los sectores pertinentes de la industria y el país.

La idea de utilizar los lodos de papel en la industria cementicia surge a raíz de la composición mineral de estos lodos, ya que está compuesta de materiales que podrían ser activados como componentes cementicios. De ser esto efectivo, sería un gran aporte en diferentes ámbitos, tanto en el medioambiental como en el económico, ya que se utilizaría un residuo de la industria papelera para fabricar un material cementicio de un costo monetario y medioambiental menor al cemento, disminuyendo la huella medioambiental de ambas industrias como también produciendo un posible beneficio económico.

Investigando diferentes formas de reutilizar los lodos residuales de papel, se pudo observar, revisando estudios realizados en España y la India, que calcinando los lodos a diferentes temperaturas entre  $600^{\circ}C$  y  $900^{\circ}C$  para posteriormente reemplazar en ciertos porcentajes esta ceniza por cemento, se puede aumentar la resistencia del hormigón a compresión. Estos resultados varían según cada investigación, como por supuesto variarían si se realizaran en Chile, debido a las diferentes propiedades que presentan tanto el lodo como el cemento mismo. (2) (3) (4)

La presente memoria propone estudiar este tema para su adaptación en Chile, encontrando mediante un plan experimental las variables de calcinación que otorguen mayor actividad puzolánica y/o hidráulica para, posteriormente, utilizar estas cenizas para investigar qué porcentaje de reemplazo con respecto al cemento es el más apropiado para su uso buscando optimizar la resistencia a compresión posible.

La metodología a seguir consistió en una primera parte, en calcinar los lodos a diferentes temperaturas, buscando encontrar a qué temperatura las cenizas presentan mayores propiedades cementicias. En una segunda parte, con las variables de calcinación definidas, se procedió a realizar morteros con diferentes porcentajes de reemplazos para ensayarlos a diferentes edades y ver el comportamiento de los diferentes porcentajes de reemplazo a primeras edades y mediano plazo.

## **1.2 Objetivos**

Los objetivos de la memoria son estudiar las variables de calcinación de lodos de papel que produzcan la ceniza con mayor actividad puzolánica y/o hidráulica, para posteriormente evaluar el porcentaje de reemplazo óptimo que maximice el efecto de las cenizas al someter las mezclas a un ensayo de resistencia a compresión.

## **1.3 Alcance**

En este estudio se utilizó como materia prima los lodos de papel de la planta de Puente Alto de la empresa CMPC Tissue, los que fueron posteriormente calcinados para obtener las cenizas a estudiar, junto con un conjunto de materiales determinados, por lo que los resultados obtenidos en esta memoria pueden variar al utilizar otros lodos y cementos, entre otros materiales.

El cemento utilizado corresponde a Cemento Portland de alta resistencia junto con arena normalizada y agua potable de acuerdo a la norma chilena NCh148 Of.68.

## Capítulo 2 Antecedentes

La industria cementera no ha quedado ajena a la necesidad de lograr un desarrollo sustentable en concordancia con las necesidades actuales del planeta, por este motivo, sumado a beneficios económicos, hace varios años ya que la industria utiliza residuos de otras industrias como adiciones activas para la elaboración de diferentes tipos de cementos, tales como cenizas volantes, microsílíce y escorias, aprovechando que presentan propiedades puzolánicas y/o hidráulicas.

### 2.1 Tipos de cemento

#### 2.1.1 Cemento Portland

La norma NCh148 Of.68, define al cemento como un “material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire” y particularmente al cemento Portland como el “producto que se obtiene de la molienda conjunta de Clínker y yeso y que pueda aceptar hasta un 3% de materias extrañas, excluido el sulfato de calcio hidratado”

El cemento Portland se fabrica mezclando y calcinando, principalmente, arcilla con caliza para formar el Clínker, que posteriormente se mezcla con yeso que le da al cemento la capacidad de fraguar y endurecerse al mezclarse con agua.

El Clínker está compuesto principalmente por silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato dicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) (5) y compone, en peso, más del 90% del cemento Portland.

#### 2.1.2 Cemento con adición puzolánica

Los cementos con adiciones puzolánicas presentan mejoras en el proceso de hidratación, ya que éstas producen reacciones secundarias a las propias de la hidratación del cemento.

Las puzolanas son definidas en la norma NCh148 Of.68 como un “material silíceo-aluminoso que, aunque no posee propiedades aglomerantes por sí solo, las desarrolla cuando está finamente dividido y en presencia de agua, por reacción química con hidróxido de calcio a la temperatura ambiente”.

La norma NCh148 Of.68 clasifica los cementos de acuerdo a su composición en las siguientes clases:

- Cemento Portland puzolánico: cemento en cuya composición habrá una proporción de puzolana no superior a 30% del peso del producto terminado
- Cemento puzolánico: cemento en cuya composición habrá una proporción de puzolana comprendida entre el 30% y 50% del peso del producto terminado
- Cemento Portland siderúrgico: cemento en cuya composición habrá escoria básica granulada de alto horno en una proporción no superior al 30% del peso del producto terminado
- Cemento siderúrgico: cemento en cuya composición habrá una proporción de escoria básica granulada comprendida entre el 30% y 75% del peso del producto terminado

- Cemento Portland con agregado tipo A: cemento en cuya composición habrá agregado tipo A en una proporción no superior al 30% del peso del producto terminado
- Cemento con agregado tipo A: cemento en cuya composición habrá una proporción de agregado tipo A comprendida entre el 30% y 50% del peso del producto terminado

## 2.2 Reacciones de hidratación

### 2.2.1 Cemento Portland

El cemento (Portland en este caso) en el hormigón cumple la tarea de aglomerante, capacidad que resulta de la hidratación de los minerales que lo forman, principalmente silicatos de calcio.

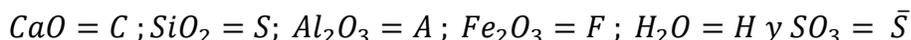
El cemento Portland está compuesto principalmente por silicato tricálcico ( $C_3S$ ), silicato dicálcico ( $C_2S$ ), aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) y ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ).

Estos compuestos al mezclarse con agua comienzan una fase de hidratación la que forma una pasta que al secarse con el paso del tiempo se transforma en un material firme.

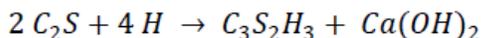
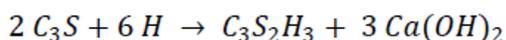
Las fases de hidratación de los silicatos y aluminatos son las siguientes:

El primero en reaccionar es el  $C_3S$  contribuyendo a la resistencia a corto y mediano plazo del cemento mientras que el  $C_2S$  actúa después contribuyendo a la resistencia a mediano y largo plazo. El resultado de la hidratación de los silicatos, como se verá a continuación, son el gel de tobermorita  $C_3S_2H_3$  y  $Ca(OH)_2$  que es simplemente cal.

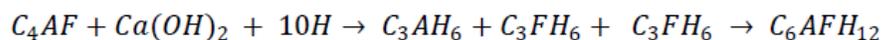
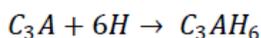
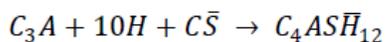
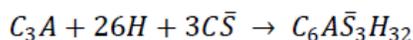
Siguiendo esta nomenclatura:



Se pueden expresar las reacciones con las siguientes ecuaciones.



Los silicatos son el principal componente del cemento, ya que son los responsables de las propiedades mecánicas del hormigón, mientras que los aluminatos actúan como “fundentes”, o sea, facilitan la combinación de cal y sílice bajando la temperatura de cocción del Clínger. Su hidratación produce etringita ( $C_6A\bar{S}_3H_{32}$ ) y monosulfoaluminato ( $C_4AS\bar{H}_{12}$ ) cuyas ecuaciones de reacción se ven a continuación



### 2.2.2 Cemento con adiciones

Ahora, un cemento Portland al ser mezclado con puzolanas produce las mismas reacciones, pero ahora el hidróxido cálcico es consumido por las puzolanas produciendo más gel de tobermorita, lo que, disminuye la porosidad de la mezcla otorgando características que el cemento Portland no posee por sí solo. (5)

## 2.3 Adiciones cementicias

Las adiciones cementicias son materiales que presentan propiedades puzolánicas o hidráulicas que permiten mejorar el desempeño ya sea en estado fresco o a largo plazo, como también, presentan una ventaja medioambiental, ya que al reemplazar al Clínter mejora la huella energética del cemento aprovechando residuos de otras industrias con el consiguiente beneficio que significa tanto económicamente para la industria como también un alivio para el medioambiente.

Entre los diferentes tipos de puzolanas naturales y artificiales que se usan actualmente en Chile y que cumplen parámetros establecidos en las normas chilenas están las siguientes:

### 2.3.1 Ceniza volante

Las cenizas volantes son subproducto de los hornos de centrales termo eléctricas alimentadas a carbón, por ende, son consideradas una puzolana artificial.

Las centrales termo eléctricas dejan en suspensión en los humos de combustión partículas fundidas de carbón pulverizado, no combustible, las que posteriormente al enfriarse se solidifican formando cenizas volantes vítreas, las que posteriormente son obtenidas por precipitación utilizando precipitadores electrostáticos evitando la emisión de material particulado a la atmósfera atrapando hasta el 99% de este.

El resto de las cenizas que por ser de mayor tamaño no quedan en suspensión, se retira antes del proceso de precipitación y son las cenizas escoria.

### 2.3.2 Microsílice

Es un material puzolánico de alta reactividad que provienen de la producción de material silíceo o ferro silíceo. Tal como la ceniza volante se obtiene de los hornos a carbón de centrales termo eléctricas, la microsíllice se obtiene de las chimeneas de hornos de arco eléctrico. La microsíllice es extremadamente fina, formando un polvo alrededor de 100 veces más fino que el cemento y se utiliza como adición para cementos de alta resistencia o que requieran baja permeabilidad de agua.

### 2.3.3 Escoria básica granulada de alto horno

La escoria básica granulada de alto horno es un subproducto no metálico formado por silicatos proveniente de la fusión de hierro en un alto horno. La escoria se obtiene de enfriar bruscamente la masa fundida no metálica proveniente del horno, la que es molida hasta llegar a una finura similar a la del cemento Portland y tiene propiedades cementicias de por sí, las que se ven mejoradas al mezclarse con cemento Portland.

La norma chilena NCh148 Of.68 establece que su composición química debe cumplir con el siguiente requisito:

$$\frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} > 1$$

### 2.3.4 Agregado tipo A

Se define en la norma NCh148 Of.68 como “una mezcla de sustancias compuestas de un material calcáreo-arcilloso que ha sido calcinado a una temperatura superior a 900 °C y otros materiales a base de óxidos de silicio, aluminio y fierro. El contenido de calcio del agregado, expresado como  $C_aO$  total, fluctuará entre 5% mínimo y 30% máximo”.

### 2.3.5 Puzolanas naturales

También se pueden encontrar materiales naturales que poseen propiedades puzolánicas o con la capacidad de poseerlos una vez procesados. Estas puzolanas actúan formando productos de hidratación a través de reacciones secundarias a la reacción principal de hidratación de los componentes del cemento. (5)

### 2.3.6 Metacaolín

El Metacaolín (MK) es un producto obtenido de la activación térmica de la caolinita. Sus propiedades puzolánicas son conocidas y por lo mismo ya forma parte de los productos puzolánicos comerciales.

El MK tiene gran actividad puzolánico debido principalmente a su estructura amorfa y gran área superficial, disminuyendo la porosidad de la mezcla. En el cemento Portland, reacciona con el hidróxido cálcico (CH) para formar silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), gellenita hidratada ( $C_2ASH_8$ ) entre otros. (6)

## 2.4 Estudios previos

Esta memoria surge de la inquietud de personal de CMPC Tissue sobre posibles usos de los lodos de papel que quedan del proceso de fabricación de papel.

Con esto en mente se investigó el estado del arte del uso de residuos de la industria papelera por parte de la industria cementera encontrando algunos casos interesantes, sobre todo de investigadores españoles e indios, los que observaron que los lodos de papel están constituidos mineralógicamente por calcita, caolinita, talco entre otros filosilicatos y que, al ser calcinados, se podía activar la caolinita para transformarla en metacaolín el que es un reconocido producto con alta reactividad puzolánica.

De los siguientes estudios se sacaron las bases teóricas para el plan experimental a seguir.

Para el proceso de calcinación de los lodos, recomiendan una temperatura entre 700 °C y 800 °C con una duración de 3 horas, obteniendo el mejor resultado con una quema de 3 horas a 700 °C.

Para el estudio de la resistencia a compresión utilizaron muestras con un reemplazo en peso de 10% de ceniza de lodo calcinado por cemento con ensayos a 1,3,7 y 14 días.

Estos estudios sirven como base para obtener rangos sobre los que sentar el proceso experimental, pero en ningún caso se busca replicarlos ya que tanto los lodos de papel como el cemento pueden presentar propiedades muy diferentes al tratarse de países diferentes, los que

aparte de utilizar otra normativa, utilizan diferentes materias primas en sus industrias, tanto la papelera como la cementera.

## 2.5 Normativa actual y ensayos

El instituto Nacional de Normalización, INN, organismo a cargo del estudio y preparación de las normas técnicas a nivel nacional, tiene varias normas que definen, clasifican y dan especificaciones tanto al cemento como a los posibles productos que pueden ser añadidos a éste, tanto en contenido, proceso de fabricación, almacenamiento y requisitos de resistencias entre otros.

A continuación, se nombran las normas pertinentes a esta memoria, como también los procedimientos incluidos en ellas que fueron utilizados en la fase experimental.

### 2.5.1 NCh148.Of68 Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales

Esta norma establece los términos empleados para los cementos, su clasificación y las especificaciones generales de los cementos Portland, Siderúrgicos, Puzolánico y con agregado Tipo A.

Esta norma aparte de definir que es el cemento y de que está compuesto, también clasifica los diferentes tipos de cementos de acuerdo a su composición en cinco clases: cemento Portland, Siderúrgico, Puzolánico, con agregado tipo A y para fines especiales, definidos ya en la sección “Adiciones cementicias”.

Además, para cada clase, la norma clasifica los cementos de acuerdo a su resistencia en dos grados:

- Cemento corriente
- Cemento de alta resistencia

Particularmente en esta memoria se utilizó cemento Portland de alta resistencia.

### 2.5.2 NCh158.Of67 Cementos – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento

Esta norma establece procedimientos para determinar la resistencia a la flexión y a la compresión de morteros de cementos que hayan de emplearse en la confección de morteros y hormigones.

Define los matices, matraz, moldes y maquinaria junto con los pasos y tiempos necesarios para llevar a cabo los ensayos.

Los procedimientos de confección y ensayos de probetas descritos en esta norma son los utilizados en esta memoria y el detalle se muestra a continuación.

Moldes (cláusula 3.4 en norma): Son de un material que no puede ser atacado por el mortero de cemento, están divididos en tres compartimientos prismáticos que permiten confeccionar tres probetas. Las dimensiones interiores de cada uno de los compartimientos son los siguientes:

- Longitud  $l = 160 \text{ mm}$ , tolerancia  $\pm 0,4 \text{ mm}$ ;
- Ancho  $a = 40 \text{ mm}$ , tolerancia  $\pm 0,1 \text{ mm}$ ; y
- Altura  $h = 40 \text{ mm}$ , tolerancia  $\pm 0,1 \text{ mm}$

Las paredes de los moldes son de espesor superior o igual a 6 mm cuyas caras interiores son planas con aproximación de 0,02 mm y forman entre si ángulos de 90° con tolerancias de  $\pm 0,5^\circ$ .

Los moldes están provistos de un marco metálico superpuesto para facilitar el llenado, el cual consta de tres compartimentos prismáticos de 20 a 40 mm de altura cuya abertura inferior es aproximadamente coincidente con la de los moldes, a la cual sobrepasa en una magnitud no superior a 0,4 mm.

Mezcladora (cláusula 3.5): Compuesta de un recipiente de acero inoxidable de  $5\frac{3}{4}L$  de capacidad de forma y dimensiones indicadas en la figura 1.

Tiene una paleta de la forma y dimensiones indicadas en la imagen 1, la que realiza un movimiento de rotación alrededor de su propio eje, y un movimiento planetario alrededor del eje del motor. Funciona a las velocidades que se indican en la tabla 1.

Tabla 1 "Velocidades paleta Según Norma"

	Rotación de la paleta (r. p. m.)	Revolución de la paleta (r. p. m.)
Velocidad lenta	140 +- 5	62 +- 5
Velocidad rápida	285 +- 10	125 +- 10

En posición de partida y durante la marcha, debe haber una distancia libre de alrededor de 2,5 mm entre la paleta y el fondo del recipiente y de alrededor de 0,4 mm entre aquella y la pared de éste.

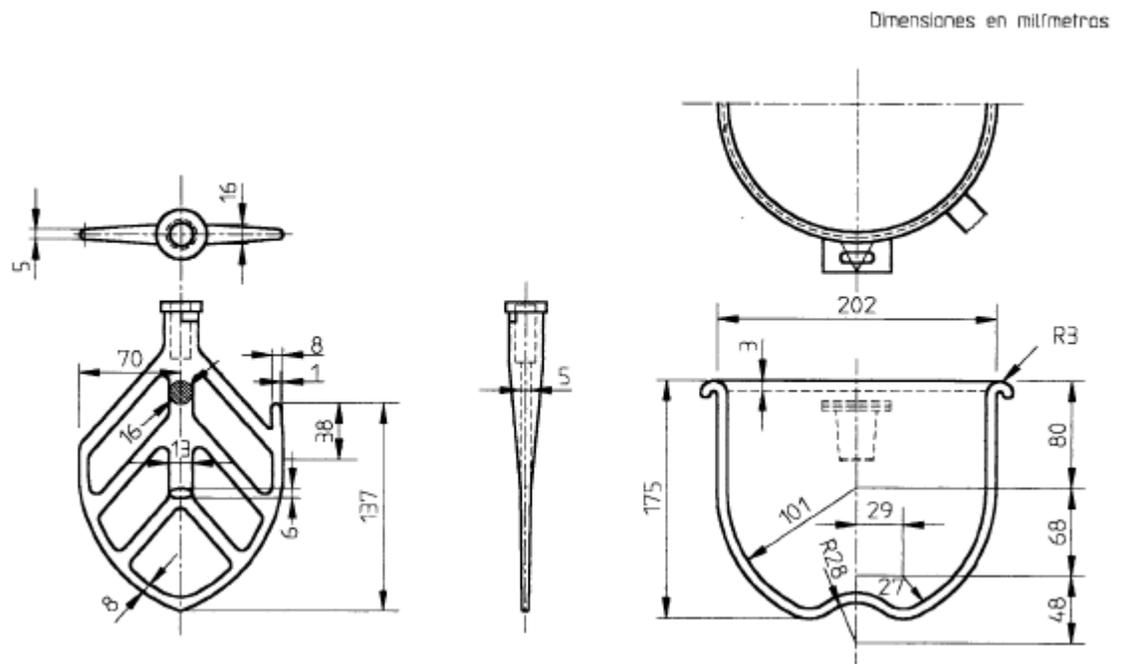


Figura 1 "Disposición y dimensiones mezcladora"

Mesa de compactación (cláusula 3.6): Está constituida por una plancha metálica horizontal, unida a un dispositivo accionado por un motor que le comunica un movimiento de subida hasta una altura de 15 mm y la deje caer libremente desde esa altura a una razón de una caída por segundo.

El peso del conjunto de la parte móvil de la mesa, molde, dispositivos superpuestos y de sujeción es de  $20 \text{ kg} \pm 1 \text{ kg}$ .

Máquina para ensayo de flexión (cláusula 3.7): Tiene una precisión superior o igual a 1%, dos rodillos de 10 mm situados a una distancia de 100 mm o 106,7 mm, un rodillo equidistante de los de apoyo y de igual diámetro que ellos, los que son móviles alrededor de su centro para permitir una repartición uniforme de las cargas.

Máquina para ensayo de compresión (cláusula 3.8): Tiene una precisión superior o igual a  $\pm 1,5\%$  en todo el intervalo de cargas utilizado en los ensayos. El dispositivo tiene un sistema de placas, el cual se coloca entre los platillos de la máquina de ensayo a compresión y que consta de dos placas de presión, rectangulares, de las siguientes dimensiones:

- Espesor superior o igual a 10mm;
- Ancho de  $40 \pm 0,1$ mm;
- Longitud superior a 40mm

Estas placas serán de acero, de dureza Vickers superior o igual a 600 o de carburo de Tungsteno, guiadas sin frotamiento y una de ellas será solidaria con un sistema de rótula y podrá inclinarse ligeramente. Las caras de las placas serán planas con una tolerancia de 0,01 mm en la superficie de contacto.

Los materiales utilizados son tres, los que deben cumplir con las siguientes especificaciones:

- Agua: Potable según norma NCh409/1
- Cemento: Debe conservarse en envase cerrado y protegerse de la humedad hasta el momento del ensayo
- Arena normal: Composición granulométrica tal que cumpla con los valores anotados en la tabla 2

Tabla 2 “Detalle tamices según Norma”

Apertura Tamices	Designación Tamices, NCh	Retención Acumulado, %
0,074	-15	98 +- 2
0,149	-11	88 +- 5
0,5	-4	67 +- 5
1	0	33 +- 5
1,68	3	5 +- 5
2	4	0

La verificación de la granulometría de la arena se hace por tamizado de una muestra representativa de 100 g de arena por cada uno de los tamices que aparecen en la tabla 2. El tamizado se mantiene hasta que a través de cada tamiz pase menos de 0,5 g por minuto.

La arena es dividida en tres fracciones: fina, media y gruesa. La fracción fina pasa totalmente por el tamiz de 0,50mm de abertura; la fracción media está comprendida entre los tamices de 0,50mm y 1,00mm de abertura mientras que la fracción gruesa queda retenida totalmente en el tamiz de 1,00mm de abertura.

Cada fracción tiene una composición granulométrica tal que, mezcladas en partes iguales en peso se logra obtener una arena con la composición granulométrica como la indicada en la tabla 2.

Mortero normal: Se prepara tomando los materiales en la siguiente proporción en peso:

- Cemento: Dos partes;
- Arena normal seca: Seis partes; y
- Agua: Una parte

Acondicionamiento: La sala tiene una temperatura entre 18°C y 20°C con una humedad relativa no inferior a 50%, como también los aparatos y materiales usados en la preparación del mortero tienen una temperatura entre 18°C y 27°C, mientras que la cámara húmeda está constituida de tal modo que pueda conservarse en ella una humedad relativa superior o igual a 90% y se mantiene en ella una temperatura de 23°C +- 2°C.

Pesada de los materiales: Se pesan separadamente 500 g de cemento, 500 g de arena fina, 500 g de arena media y 500 g de arena gruesa y se miden 250 ml de agua. Estos se dejan en envases separados junto a la mezcladora.

Mezcla: La mezcla de los materiales se realiza de la siguiente forma.

- Estando el mezclador en posición de partida se vierte el agua en el recipiente y a continuación se agrega el cemento
- Se pone en marcha el mezclador a la velocidad lenta
- Después de 30 s de la puesta en marcha se agrega gradualmente la arena, primero la fracción fina, a continuación, la media y finalmente la gruesa. Esta operación se realiza en 30 s
- Se cambia a velocidad rápida que se mantiene durante 30 s
- Se detiene el mezclador durante 90 s. En los primeros 15 s se raspa el mortero adherido a la pared del recipiente con una espátula de goma o plástico no atacable empujándolo hacia el fondo. Después se tapa el recipiente por el tiempo restante (1 min 15 s).
- Se pone en marcha el mezclador con la velocidad rápida durante 1 min.

Probetas:

El procedimiento de preparación será el siguiente:

El molde se cubre interiormente con una delgada capa de aceite. Las uniones exteriores deben sellarse y junto con el marco se fijan sobre la mesa de compactación.

Se introduce en cada uno de los compartimentos una primera capa de 320 g de mortero directo desde el mezclador y se nivela con una espátula plana con dos movimientos de ida y vuelta apoyándose sobre el borde superior del dispositivo superpuesto.

Se hace funcionar la mesa dando 60 caídas en 60 segundos y posteriormente se pone una segunda capa de mortero siguiendo el mismo procedimiento de la primera capa y se vuelve a compactar por 60 segundos.

Se saca el molde y retira el marco, posteriormente se enrasa el mortero con la arista de una regla metálica, mantenida en posición casi vertical, que se desplaza con un movimiento de sierra, perpendicularmente a la longitud del molde y después se empareja la superficie alisándola con la regla que se mantiene débilmente inclinada sobre la horizontal.

Finalmente se identifican las probetas.

Conservación de las probetas:

Los moldes se cubren con una plancha de material no absorbente para evitar la evaporación de agua y se trasladan a la cámara húmeda que cumple con las condiciones descritas en la Norma NCh158 Of.67 subpárrafo 6.1.4 (acondicionamiento en este archivo)

Las probetas que se rompen a 24 h se desmoldan de 15 a 20 min antes del ensayo. Las demás probetas se desmoldan entre 20 y 24 horas después de haberlas moldeado. Si el mortero no ha adquirido suficiente resistencia para desmoldarlo sin peligro de deterioro, el desmolde se podrá postergar 24 h, pero debe anotarse en el informe.

Una vez desmoldadas, las probetas se limpian y pesan, se sumergen en posición vertical, en agua detenida saturada en cal, a  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ , hasta el momento del ensayo. El agua debe tener libre acceso sobre todas las caras de las probetas y renovarse por mitades cada 30 días. El volumen del agua de conservación es por lo menos 4 veces el del total de las probetas contenidas. Las probetas se sacan del agua por lo menos 15 min antes del ensayo. Si es necesario para satisfacer esta condición, las probetas se transportan a las máquinas de ensayo en un recipiente lleno de agua.

Ensayo: El procedimiento se realiza de la siguiente forma

Flexión: La probeta se apoya en una de las caras laterales del moldaje, sobre los rodillos de apoyo de la máquina a flexión y la carga se aplica a través del rodillo superior con una velocidad de carga de  $5 \pm 1$  kg/s. Los trozos de las probetas rotas a flexión, se conservan húmedos hasta el momento en que se sometan al ensayo de compresión.

Compresión: Cada trozo obtenido del ensayo a flexión se ensaya a compresión en una sección de  $40 \times 40$  mm, aplicándose la carga a las dos caras provenientes de las laterales del moldaje, colocándose entre las placas de la máquina de compresión. La velocidad de carga es tal que la presión sobre la probeta aumente entre 10 y  $20 \text{kg/cm}^2/\text{s}$ . Hasta la mitad de la carga de ruptura la carga puede aumentar a mayor velocidad, pero en todo caso la duración de cada ensayo es menor o igual a 10 s.

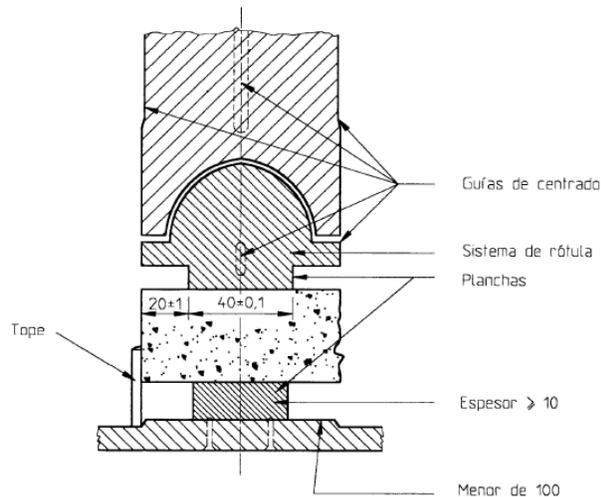


Figura 2 “Disposición ensayo a compresión”

Cálculo:

Las resistencias se expresan en  $\text{kg/cm}^2$  y calculados para la flexión según  $0,234 P$  ó  $0,250 P$ , dependiendo de la distancia entre los apoyos según sea  $100 \text{ mm}$  ó  $16,7 \text{ mm}$ , siendo  $P$ , la carga total de ruptura expresada en  $\text{kg}$ .

Las resistencias se determinan en tres probetas como mínimo para cada edad para el ensayo de flexión y sus correspondientes 6 probetas para el de compresión.

La resistencia a la flexión y compresión del mortero es la medida aritméticamente de los resultados de todos los ensayos realizados en cada fecha.

### 2.5.3 NCh161.Of69 Cemento – Puzolana para uso en cementos

Esta norma establece los requisitos que debe cumplir la puzolana que se utiliza en la fabricación de los cementos puzolánicos, fabricados según norma NCh148.

Define las propiedades mecánicas mínimas que debe cumplir la puzolana, junto con definir los aparatos y procedimientos necesarios para llevar a cabo el ensayo.

### 2.5.4 ASTM C311 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use in Portland-Cement Concrete

Norma ASTM que define métodos de prueba para cenizas volantes y puzolanas naturales para su uso en concreto con cemento Portland.

### 2.5.5 ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete

Norma ASTM establece requisitos mínimos para cenizas volantes y puzolanas naturales calcinadas para su uso en concreto con cemento Portland.

Establece que las cenizas sometidas a prueba de compresión deben resistir al menos un 75% de lo que resiste la muestra patrón.

## Capítulo 3 Estudio experimental

El programa experimental llevado a cabo en esta memoria consistió en una primera fase, en la calcinación de los lodos de papel a diferentes temperaturas con el fin de realizar ensayos para determinar la ceniza con mayor potencial puzolánico y/o hidráulico. Una vez obtenidos los resultados de estos ensayos se procedió a calcinar lodos exclusivamente a esta temperatura hasta alcanzar la cantidad de ceniza necesaria para realizar los ensayos principales que consistieron en confeccionar 9 tipos de morteros diferentes para someterlos a ensayos a compresión a 5 diferentes edades.

Para la obtención de los resultados de resistencia de las probetas se siguió el proceso establecido por la norma NCh158 Of1967 “Cementos – Ensayos de flexión y compresión de morteros de cemento” que establece los materiales, condiciones y procesos necesarios para llevar a cabo los ensayos a realizar para determinar la actividad puzolánica de los diferentes porcentajes de reemplazo de ceniza.

### Resumen Plan Experimental

- Obtención de cenizas
- Fase I
  - Calcinación de cenizas a diferentes temperaturas y tiempos
  - Confección y ensayo de probetas a compresión
  - Determinación de cenizas con mayor actividad puzolánica
- Fase II
  - Calcinación de cenizas a temperatura y tiempo determinado en Fase I
  - Confección y ensayos de probetas a compresión

## 3.1 Materiales

### 3.1.1 Agua

El agua utilizada fue agua potable de Santiago a  $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$  según norma NCh409/1

### 3.1.2 Cemento Portland

El cemento utilizado en la realización de esta materia fue cemento Portland de alta resistencia, sin adiciones puzolánicas, esto con la idea de que las cenizas no vean interferidas su acción por otras puzolanas como también tener la certeza de que los cambios de las diferentes muestras con respecto al patrón se deban exclusivamente debido a las cenizas.

A continuación, se presentan dos caracterizaciones de cemento Portland de alta resistencia realizado por IDIEM en octubre del 2016.

Tabla 3 “Caracterización cemento Portland alta resistencia”

Ensayos Realizados	Unidad	SAG 2363	Requisitos NCh148
Peso específico	g/ml	3,11	≥ 3,00
Superficie específica	cm <sup>2</sup> /g	4,00	No aplica
Agua de consistencia normal	%	28,25	No aplica
Tiempos de fraguado - Inicial	h:min	2:00	≥ 0:45
Tiempos de fraguado - Final	h:min	3:00	≤ 10:00
Expansión en autoclave	%	0,03	≤ 1,00
Resistencia mecánica - Flexión a 7 días	kgf/cm <sup>2</sup>	72	≥ 45
Resistencia mecánica - Flexión a 28 días	kgf/cm <sup>2</sup>	80	≥ 55
Resistencia mecánica - Compresión a 7 días	kgf/cm <sup>2</sup>	415	≥ 250
Resistencia mecánica - Compresión a 28 días	kgf/cm <sup>2</sup>	494	≥ 350
Pérdida por calcinación	%	1,90	≤ 3,00
Contenido de SO <sub>3</sub>	%	2,84	≤ 4,00
Residuo insoluble	%	0,70	≤ 1,50
Contenido de MgO	%	1,30	≤ 5,00

### 3.1.3 Arena normal

La arena utilizada fue la empleada normalmente por IDIEM para este tipo de ensayos que sigue la norma NCh158 Of1967, y que viene en el formato de una bolsa sellada de 1500 gramos.

El detalle de su composición granulométrica y características generales se encuentra en la sección 2.5.2 de esta memoria.

### 3.1.3 Ceniza de Lodos de Papel

La ceniza de lodo de papel utilizada fue la calcinada a 750° Celsius por 3 horas en uno de los hornos que IDIEM posee en la planta de Cerrillos.

La caracterización Físico-Química hecha por CMPC entrega los siguientes datos para dos muestras diferentes de lodos.

Tabla 4 “Análisis Físico-Químico de Lodos de Papel”

Ensayo	Unidad	SQC-24153
Humedad	% en peso	50,11
Nitrógeno Total	% en peso	0,83
Material Inerte	% en peso	<0,01
Amonio	% en peso	0,15
Nitrato	% en peso	0,03
Materia Orgánica	% en peso	23,80
Carbono Orgánico	% en peso	11,90
Densidad Aparente	Kg/m <sup>3</sup>	510

Como se observa en la tabla 3, la humedad de las muestras es aproximadamente de un 50%, posteriormente estas fueron secadas y después calcinadas obteniendo aproximadamente un

35% - 45% del peso seco, por lo que de la muestra inicial de lodos se obtiene en peso, aproximadamente un 20% de cenizas.

## 3.2 Fase experimental

### 3.2.1 Calcinación de Lodos

Los lodos de papel fueron obtenidos de la planta de Puente Alto de la empresa papelera CMPC división Tissue.

El material fue retirado desde la misma planta en Puente Alto y consistía en 100 kilogramos de material repartido en 3 bolsas como se observa en la figura 3



Figura 3 "Muestra Lodos"

Posteriormente el material fue llevado a la planta piloto de IDIEM en Cerrillos, donde se sacaron los lodos de la bolsa y se colocaron sobre una lona de plástico ubicada bajo techo (figura 4) para facilitar el manejo de los lodos y ayudar al proceso de secado.



Figura 4 "Lodos estado inicial"

Posteriormente se colocaron los lodos en bandejas (figura 5) para secar los lodos en el horno de la imagen 6 a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas.



*Figura 5 "Bandejas para secado de muestras"*



*Figura 6 "Secado de Lodos"*

Ya con los lodos secos, se procedió a la quema de éstos. Para aquello se utilizó el horno que se ve en la figura 7, el que tiene la capacidad de llegar a temperaturas de hasta 1500°C. Para quemar material en el horno se utiliza un crisol de carbono capaz de resistir dichas temperaturas el que podía quemar cargas de hasta 450 gramos de lodos aproximadamente.



*Figura 7 "Horno y Crisol"*

Los crisoles fueron llenados a su capacidad máxima como se ve en la imagen 7.

En la figura 8 se puede ver el panel de control del horno, el que básicamente consiste en un panel electrónico donde se ingresa la temperatura deseada y un interruptor que enciende el horno.

En la fase I del estudio, las temperaturas con las que se trabajó fueron 700°C, 750°C, 800°C, 850°C y 900°C por períodos de 3 horas.

En la fase II del estudio, solo se calcinó en una configuración de temperatura-tiempo.

Al calcinar los crisoles con material eran retirados del horno cada una hora con el fin de revolver los lodos en su interior y así conseguir una calcinación más homogénea del material (figura 9).



*Figura 8 "Panel de control Horno"*



*Figura 9 "Crisoles durante calcinación"*

Una vez alcanzado el tiempo determinado de calcinación, se retiraba el crisol del horno y se vertía su contenido en una fuente metálica donde se pesaba el material para posteriormente almacenarlo en bolsas plásticas con su respectiva identificación.



*Figura 10 "Cenizas resultantes"*



Figura 11 "Almacenamiento de cenizas"

Una vez obtenida cantidad de cenizas necesaria, se procedió a la molienda de éstas para obtener un tamaño de partícula igual o menor al del cemento.

Para esto se utilizó uno de los molinos de planta piloto de IDIEM (figura 12), el que consta de circunferencias sólidas de diferentes tamaños entre las que se colocan las cenizas a moler en pequeñas cantidades. Las cenizas al ser un material muy blando solo necesitaron de una molienda de dos segundos para alcanzar el tamaño deseado, logrando pasar el 100% del material por una malla #200.



Figura 12 "Molinos circulares"

Después de la molienda, las cenizas se guardaron en bolsas plásticas con su respectiva información quedando, de esta manera, listas para usar en la confección de los morteros de hormigón.

En la fase I se realizaron en total 15 calcinaciones de lodos. De estas 15 calcinaciones se obtuvieron los resultados para elegir la ceniza con mayor actividad puzolánica con la que seguir la memoria.

En la fase II, se realizaron 9 calcinaciones, todas en el horno a una temperatura de 750°C y 3 horas de duración, con breves pausas cada una hora para mezclar el material. Para la confección de las probetas necesarias para realizar los ensayos, sumado a probetas de pruebas y posibles errores se calculó que se necesitarían 1500 gramos de cenizas. De las 9 calcinaciones se obtuvieron 1582 gramos de cenizas.

### 3.2.2 Confección de morteros

Una vez calcinadas todas las cenizas necesarias se procedió a confeccionar los morteros en IDIEM Plaza Ercilla. Este proceso se realizó siguiendo la norma NCh158 Of.67.

Como ya se especificó en la parte de materiales, se utilizó cemento Portland de alta resistencia, ceniza, agua y arena normalizada según norma NCh158 Of.67.

Siguiendo lo indicado en la norma NCh158 Of.67 se utilizó una mezcladora automática Tonitechnik modelo 6210 según cláusula 3.5, tamices según cláusula 3.2, moldes según cláusula 3.4, mesa de compactación según cláusula 3.6.

En ambas fases del experimento se modificó el procedimiento de la norma ya que, en vez de 500 gramos de cemento, se reemplazó (por peso) éste por una cantidad determinada de cenizas, por lo que en total se utilizaron 500 gramos de cemento + cenizas, con una pequeña diferencia según la fase experimental

#### Fase I:

Aquí el reemplazo de ceniza por cemento fue de un 20%, o sea en vez de utilizar 500 gramos de cemento, se utilizaron 400 gramos más 100 gramos de cenizas.

#### Fase II:

En esta fase el reemplazo de ceniza por cemento fue de 1% a 8% o sea el reemplazo mínimo fue de 5 gramos de ceniza por cemento y el máximo fue de 40 gramos.

Todo el resto del proceso siguió estrictamente el procedimiento descrito por la norma NCh158Of.67



Figura 13 "Moldes y máquina de mezcla para confección de morteros"

### 3.2.3 Plan de confección y ensayo de probetas

#### 3.2.3.1 Fase I

En la fase I del experimento se ensayaron tres probetas para cada temperatura de calcinación más el patrón totalizando 15 ensayos de probetas. El procedimiento fue realizado siguiendo la norma ASTM C618, la que establece un porcentaje de reemplazo de 20% ajustando la cantidad de agua para cada mezcla para obtener la misma trabajabilidad que el patrón.

#### 3.2.3.2 Fase II

En esta fase se ensayaron un total de 135 probetas, 3 por cada par "porcentaje de reemplazo" compuestos por nueve porcentajes de reemplazo, de 0% a 8% ensayados a 7, 14, 28, 42 y 56 días, siguiendo el procedimiento establecido por la norma NCh158Of.67.

### 3.2.4 Curado de morteros

Una vez confeccionados los morteros son trasladados a una cámara húmeda con humedad relativa  $\geq 90\%$  y  $T 23^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ , tal como establece la norma, donde se dejan por 24 horas cubiertos por una pieza de plástico. 24 horas después fueron retirados del molde y colocados en una piscina por el tiempo de curado determinado para aquella muestra menos un día (imágenes 14 y 15).



Figura 14 "Moldes en cámara húmeda"



Figura 15 "Piscina de curado"

### 3.2.5 Ensayo

#### 3.2.5.1 Procedimiento de ensayo

Las probetas fueron sometidas a dos ensayos, uno de flexión donde las probetas se colocan sobre dos puntos de apoyo cerca de sus extremos y se les aplica una carga central quedando dividida en dos partes. Posteriormente cada una de estas partes es sometida a un ensayo de compresión donde se les aplica fuerza hasta fracturarse donde ya no resisten más carga. Todos estos ensayos se realizaron según dicta la norma NCh158Of.67 descrita en la parte de antecedentes.

#### 3.2.5.2 Cálculo de resistencia final

La máquina de ensayo, que cumple con las especificaciones de la norma NCh158Of.67, entrega los resultados de cada ensayo de forma automática a través de un display digital.

La cifra que entrega la máquina de ensayo es entregada en kilo Newtons y es transformada mediante una fórmula establecida por la norma NCh158Of.67 según el tipo base que la máquina posea, en este caso el cálculo fue realizado según la siguiente fórmula:

Compresión:

$$\text{Resistencia} \left( \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right) = (\text{promedio } F \text{ probetas}(kN)) * 102/16$$



*Figura 16 "Máquina de ensayos"*

## Capítulo 4 Resultados

### 4.1 Introducción

En el presente capítulo se presentarán los resultados obtenidos en fase I y fase II, los que constan de valores de resistencia buscando saber que mezcla es la que proporciona mayor valor puzolánico y/ hidráulico.

Los valores son entregados de forma resumida con el fin de dejar claro los resultados del proyecto y el detalle de ellos se encuentra en la sección de anexos.

### 4.2 Resultados Fase I

En esta fase se realizaron ensayos a probetas confeccionadas con cenizas calcinadas a diferentes temperaturas buscando encontrar la que produzca mayor valor puzolánico y/o hidráulico para continuar con la fase II del proyecto.

Se ensayaron cenizas calcinadas a 750°C, 800°C, 850°C, 900°C.

Los resultados de los ensayos a 7 días fueron los siguientes:

*Tabla 5 "Resultados Ensayos 7 días"*

Muestra	Fecha	T°	Flexión[kg/cm2]	Compresión[kg/cm2]	%flex	%comp
Patrón	12-may	Patrón	74	452	-	-
1	12-may	750	68	398	92%	88%
2	16-may	800	65	383	88%	85%
3	16-may	850	47	379	64%	84%
4	16-may	900	69	383	93%	85%

Los resultados de los ensayos a 28 días fueron los siguientes:

*Tabla 6 "Resultados ensayos 28 días"*

Muestra	Fecha	T°	Flexión[kg/cm2]	Compresión[kg/cm2]	%flex	%comp
Patrón	03-jun	Patrón	88	552	-	-
1	03-jun	750	70	456	80%	83%
2	06-jun	800	70	446	80%	81%
3	06-jun	850	60	450	68%	82%
4	09-jun	900	67	461	76%	84%

### 4.3 Resultados Fase II

En esta fase se ensayaron a compresión 135 probetas consistentes en tres probetas para cada una de los 45 tipos diferentes de morteros a ensayar, todos utilizando cenizas calcinadas a 750°.

Tabla 7 “Resultados ensayos a compresión”

Resistencia a compresión expresada en kgf/cm <sup>2</sup>									
Días	Patrón	1%	2%	3%	4%	5%	6%	7%	8%
7	450,2	422,6	428,1	429,0	434,9	435,5	442,3	450,6	439,8
14	491,6	511,2	512,7	513,1	495,7	494,6	484,9	493,6	488,1
28	544,1	550,0	554,4	552,1	550,8	539,2	531,3	539,3	525,3
42	572,9	578,4	580,0	580,9	571,8	566,9	561,2	564,0	559,9
56	584,7	590,6	596,6	598,0	583,1	585,2	587,4	585,1	576,8

Los resultados que se muestran son el promedio de la resistencia de las 6 mitades de probetas que resultan de la prueba a flexión.

## Capítulo 5 Análisis Resultados

### 5.1 Introducción

A continuación, se realiza el análisis de los resultados mostrados en la sección anterior.

### 5.2 Análisis Resultados Fase I

Como ya se ha mencionado antes, en esta fase se calcinaron los lodos a diferentes temperaturas buscando encontrar la que produzca las probetas con mayor resistencia a compresión. El comportamiento de las probetas confeccionadas con las diferentes cenizas se muestra a continuación:

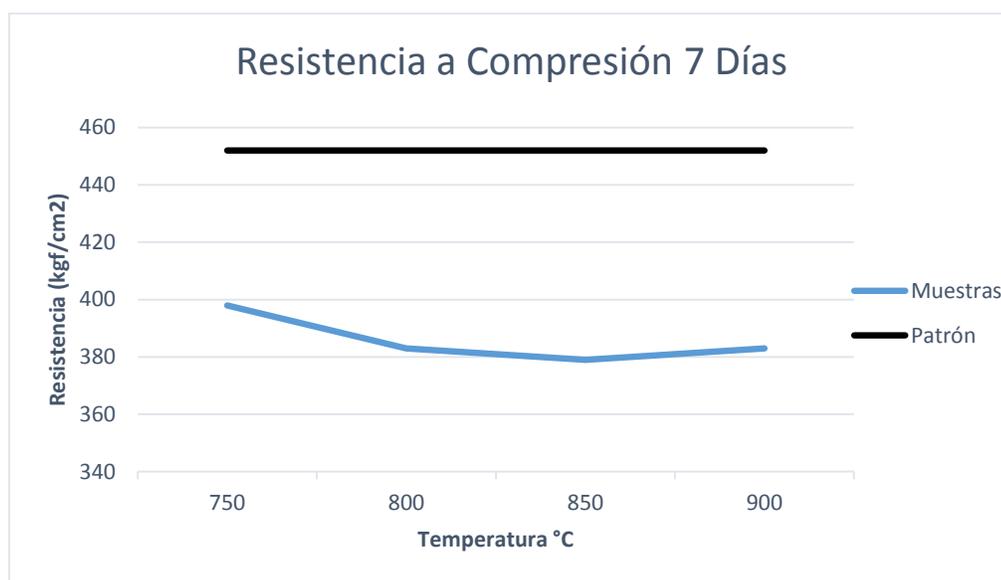


Gráfico 1 "Resistencia compresión 7 días"

Se puede observar claramente, en la resistencia a compresión a 7 días, como las muestras con un reemplazo de 20% de cemento por cenizas resisten bastante menos que la muestra patrón (hasta  $70 \frac{cm}{kgf^2}$  menos), algo esperable por el alto reemplazo de cemento, pero de todas maneras se puede observar claramente diferencias entre las diferentes cenizas, donde la de mayor resistencia vendría siendo la de cenizas quemadas a 750°C las que resisten un 88% de los que resiste la muestra patrón, valor que disminuye progresivamente con las cenizas que se obtuvieron a 800°C y 850°C para recuperar al final un poco de resistencia con las cenizas de 900°C.

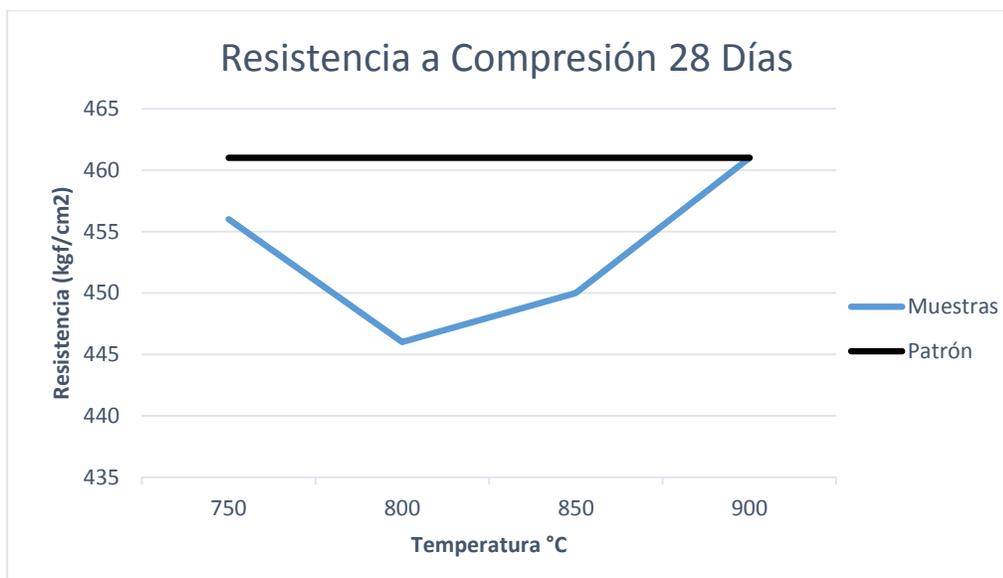


Gráfico 2 “Resistencia compresión 28 días”

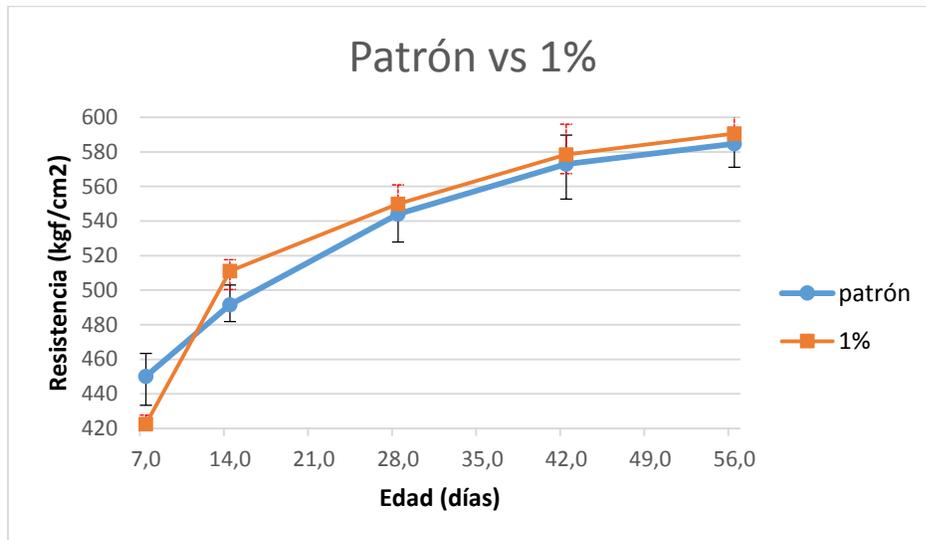
En las resistencias a 28 días, se puede observar que tal como se esperaba, las muestras con cenizas siguen obteniendo valores de resistencia menores al patrón, e incluso que las muestras realizadas a 7 días, donde se obtenían valores equivalentes al 88% del patrón mientras que a 28 días el mejor fue equivalente a un 84% del valor obtenido por la muestra patrón. Se puede observar que las cenizas obtenidas de calcinaciones a mayor temperatura logran alcanzar valores similares a las de 750°C, sobre todo las confeccionadas con cenizas de 900°C donde logra resistir un 84% de lo que resiste la muestra patrón, obteniendo un valor superior a las cenizas de 750°C que alcanzan un 83%.

Para la fase II del proyecto se escogió fabricar y utilizar cenizas obtenidas de lodos calcinados a 750°C ya que fue la de mayor rendimiento a 7 días con clara ventaja por sobre las demás y la de mayor rendimiento junto con las de 900°C en los ensayos a 28 días.

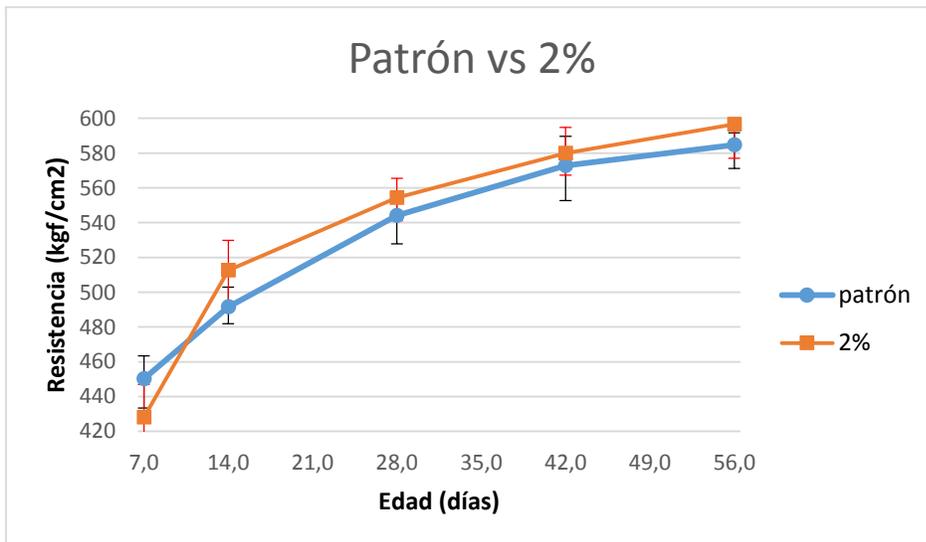
En esta fase se quemaron lodos a 700°C los que no se utilizaron para fabricar morteros ya que los lodos no salían 100% calcinados tomando forma de carbón en vez de cenizas haciendo inviable su uso para el experimento.

### 5.3 Análisis Resultados Fase II

Para visualizar de mejor forma los resultados obtenidos en esta fase, a continuación, se muestran gráficas comparando el comportamiento de cada uno de los porcentajes de reemplazo a lo largo de los días con el patrón.



*Gráfico 3 “Resistencia compresión 1% de reemplazo”*



*Gráfico 4 “Resistencia compresión 2% de reemplazo”*

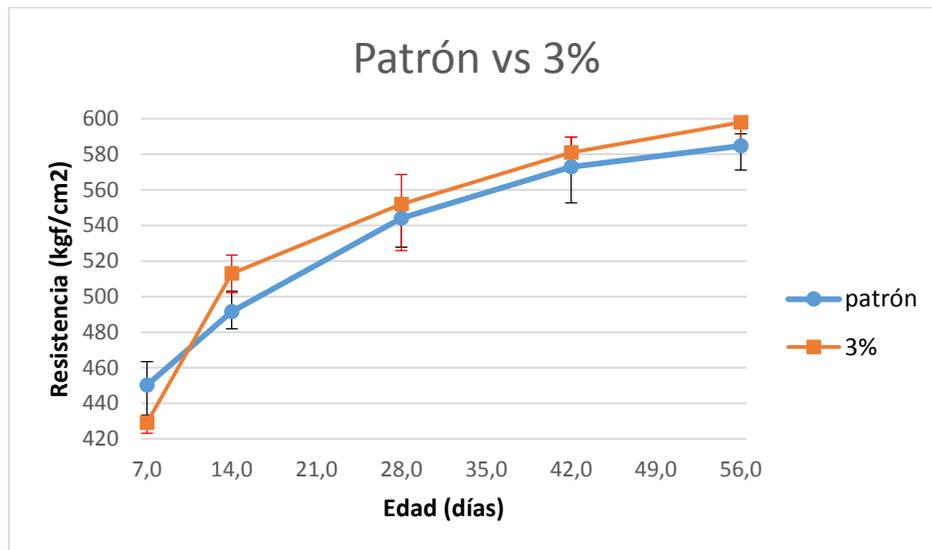


Gráfico 5 “Resistencia compresión 3% de reemplazo”

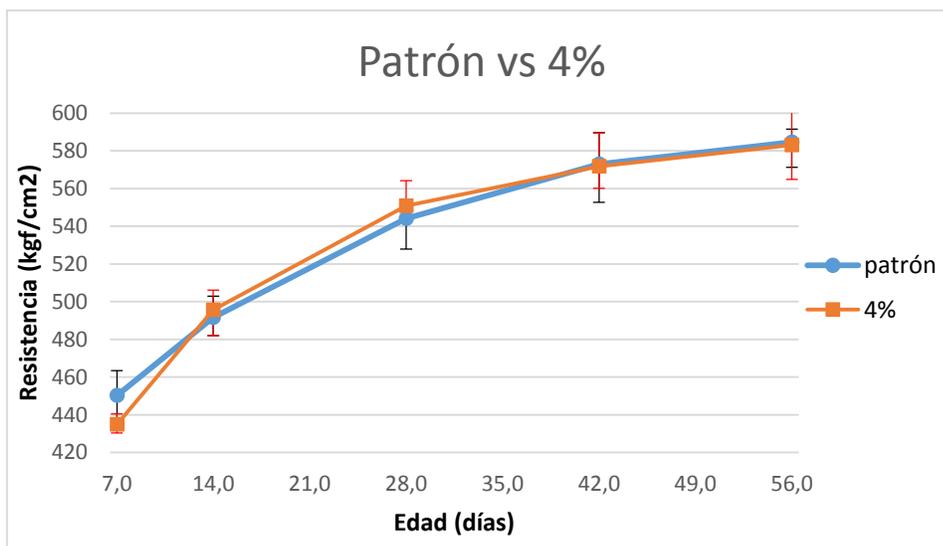
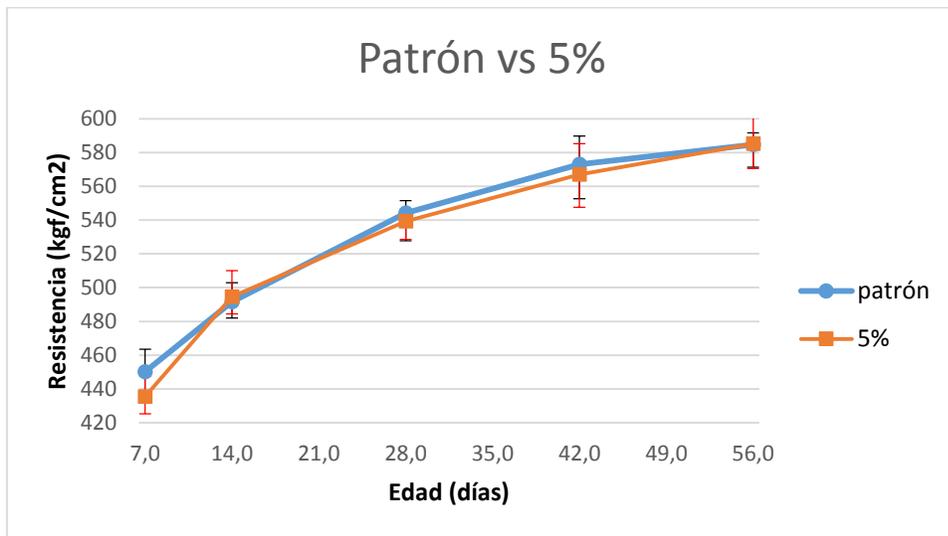
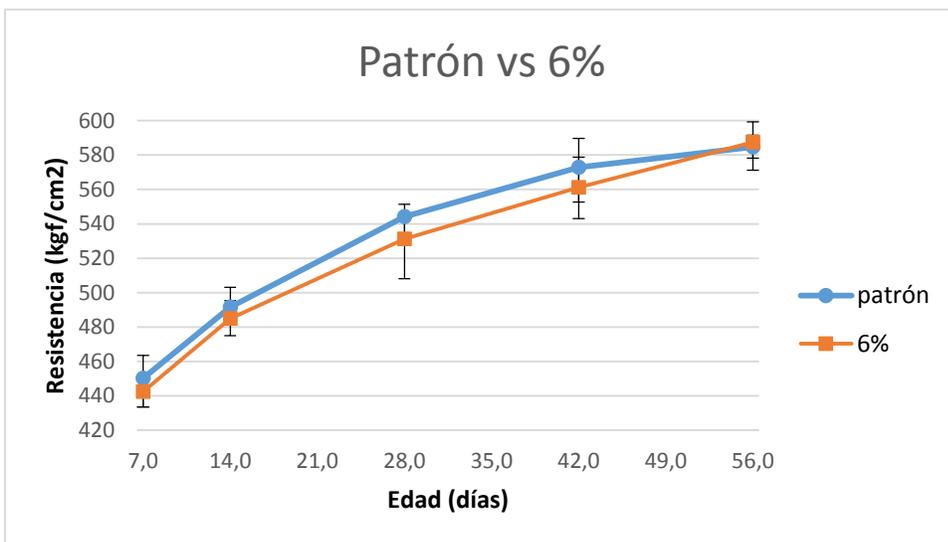


Gráfico 6 “Resistencia compresión 4% de reemplazo”



*Gráfico 7 “Resistencia compresión 5% de reemplazo”*



*Gráfico 8 “Resistencia compresión 6% de reemplazo”*

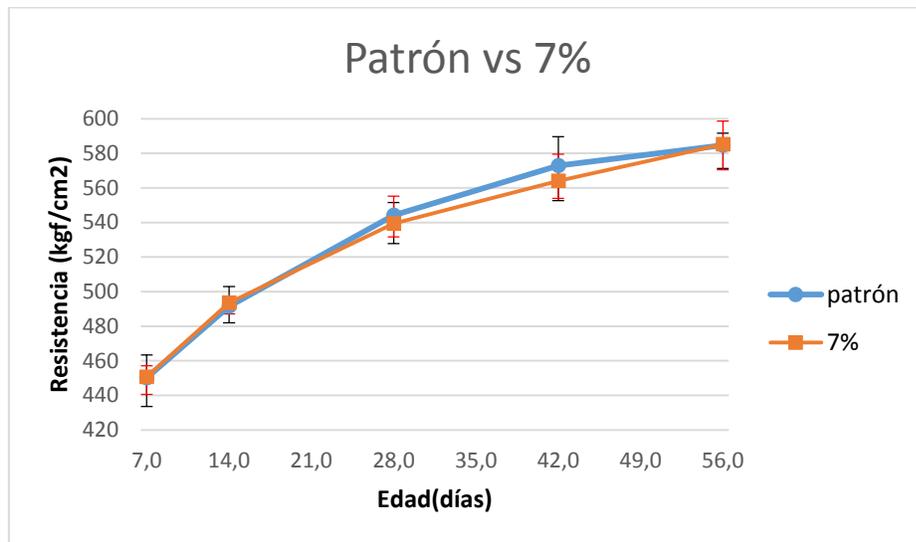


Gráfico 9 "Resistencia compresión 7% de reemplazo"

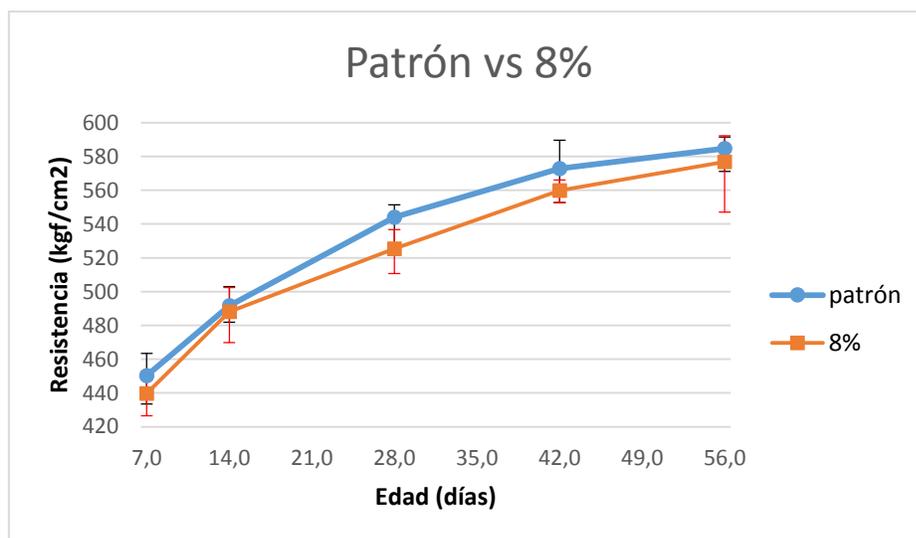


Gráfico 10 "Resistencia compresión 8% de reemplazo"

Se puede observar claramente como las muestras realizadas con bajos porcentajes de reemplazo (1%-3%) a partir de los 14 días obtuvieron resistencias superiores a las del patrón, mientras que las muestras con un reemplazo medio (4% y 5%) muestran un comportamiento muy similar a éste y las con mayor porcentaje de reemplazo (6%-8%) obtuvieron resistencias ligeramente menores al patrón.

Todas las probetas confeccionadas con cenizas, para una edad de 7 días obtuvieron valores menores que la muestra patrón, pero esta diferencia es mayor en las muestras con bajo porcentaje

de reemplazo. A los 14 días se puede observar como las muestras con cenizas superan a la muestra patrón, logrando mantener valores de resistencia comparables a mediano plazo para todos los reemplazos de cenizas y terminar a los 56 días con resistencias prácticamente iguales a la muestras sin cenizas.

Este comportamiento muestra que la inclusión de cenizas si tiene influencia en la resistencia de las probetas confeccionadas y que el efecto puzolánico y/o hidráulico de las cenizas ocurren claramente en las primeras edades.

Por el mecanismo de acción que las puzolanas tienen con el cemento a la hora de reaccionar con agua, visto en la parte de antecedentes, se puede ver que la inclusión de las cenizas produce ciertas reacciones hidráulicas que influyen positivamente en la resistencia de la muestra lo que indica que tienen acción puzolánica y/o hidráulica, ya que a pesar de que a las muestras se les retire cemento en algunos casos se obtienen valores mayores al patrón y en otros, los de mayor reemplazo, una baja muy poco significativa en la resistencia a compresión a pesar de estar retirando entre un 7% y 8% de cemento de la mezcla. En el caso de las muestras con mayor reemplazo, además, muestran que estas reacciones hidráulicas siguen ocurriendo hasta los 56 días desde su confección ya que como se observa en los gráficos (8,9 y 10), si bien desde los 7 hasta los 42 días muestran resistencias menores al patrón, van acercándose a este hasta casi igualarlo a los 56 días.

## Capítulo 6 Conclusiones

De la fase I del proyecto, se puede concluir que las variables de calcinación en las que se optimiza el potencial puzolánico y/o hidráulico de los lodos son al calcinar los lodos a 750°C por 3 horas, ya que las muestras confeccionadas con estas cenizas fueron las que obtuvieron mayores valores de resistencia a compresión. Además, al ser las muestras calcinadas a menor temperatura son las que requieren menor gasto energético haciéndolas más viables medioambiental y económicamente.

En la fase II es importante ver que las cenizas claramente no son un elemento inerte a la hora de agregarse a la mezcla, ya que producen variaciones en el hormigón según va variando la cantidad de ceniza que se reemplaza por cemento, incluso produciendo mejoras en la resistencia en algunos casos, mostrando que poseen propiedades puzolánicas y/o hidráulicas.

Si se utilizan estas cenizas para confeccionar hormigones, se espera un aumento en la resistencia de la mezcla en primeras edades, sobre todo entre 7 y 14 días utilizando bajos porcentajes de reemplazo, mientras que para mayores reemplazos se obtendrán valores comparables al hormigón sin cenizas a los 56 días.

El reemplazo de cemento por ceniza que presenta mayor rendimiento, se puede observar claramente que ocurre entre un 2% y 3% donde estas muestras obtuvieron valores de resistencias superiores al patrón a lo largo de casi todas las edades.

Para los mayores porcentajes de reemplazo, las muestras obtuvieron valores de resistencia menores al patrón a lo largo de todo el curado, llegando a obtener resistencias comparables a éste a los 56 días. Este resultado de todas maneras es positivo ya que muestra que incluso reemplazando un 8% de cemento de la mezcla aún se pueden obtener valores altos de resistencia a compresión, haciendo las cenizas un producto muy valorable ya que, a pesar de retirar un gran porcentaje de cemento, aún se logran obtener comportamientos similares a los de hormigones confeccionados sin adiciones.

Se puede concluir entonces que las cenizas muestran ser un producto absolutamente factible de utilizar en la industria cementera, ya que utilizando bajos porcentajes de reemplazo se obtienen aumentos en la resistencia a compresión, mientras que, los altos porcentajes de reemplazo no producen mermas significativas en el rendimiento de los morteros ensayados.

Además, al ser utilizado como reemplazo del cemento en la mezcla, las cenizas también producen una mejora medioambiental con respecto al cemento, ya que se utilizan lodos que actualmente van a un vertedero para crear un producto en otra industria, disminuyendo los costos y la huella de carbono tanto de la industria cementera como de la papelera.

## Capítulo 7 Bibliografía

1. *Study of Concrete Involving Use of Waste Paper Sludge Ash as Partial Replacement of Cement.* S. Ahmad, M. Iqbal Malik, M. Bashir, R. Ahmad.
2. *Nuevos materiales ecoeficientes a partir de residuos de la industria papelera como adiciones activas para la fabricación de cementos portland.* M. Frías, I. Vegas, R. García, R. Vigíl.
3. *Obtención de una adición puzolánica a partir de la calcinación controlada de destintado de papel: estudio de prestaciones en matrices de cemento I.* Vegas, M. Frías, J. Urreta, J. T. San José.
4. *Caracterización y transformación de un residuo industrial (lodo de papel).* M. Frías, R. Vigíl, R. García, E. Sabador, M. I. Sánchez de Rojas y J. T. San José.
5. *INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE ADICIONES PUZOLÁNICAS Y DEL PROCESO DE ELABORACIÓN DE LA MEZCLA EN LA RESISTENCIA MECÁNICA DEL HORMIGÓN.* Latorre, Verónica.
6. *Influence of Portland Cement Composition on Early age REactions With MK.* Lagier, F.
7. *NCh148 1968 - Terminología, clasificación y especificaciones generales.* INN.
8. *NCh158 1968 Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento.* INN.
9. *NCh161 1969 - Cemento - Puzolana para uso en cementos - Especificaciones.* INN.
10. *ASTM C311 Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for use in Portland-Cement Concrete.* ASTM.
11. *ASTM C618 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.* ASTM.
12. *Utilization of Waste Paper Pulp by Partial Replacement of Cement in Concrete.* Sumit A Balwaik, S. P. Raut.
13. *Reología y potencial zeta de pastas de cemento con lodos de embalse calcinados y escorias granuladas de horno alto.* B. Safi, A. Benmounah, M. Saidi.
14. *Report on the Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete.* ACI.