



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

**APROVECHAMIENTO DE CENIZAS DE COMBUSTIÓN DE LECHO FLUIDIZADO (FBC)
PARA ELABORACIÓN DE ÁRIDOS LIVIANOS.**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

CLAUDIA A. CID PERLEY

**PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONARDO MASSONE S.
ERNESTO CROQUEVIELLE P.**

**SANTIAGO DE CHILE
JULIO 2008**

A mi madre por su amor y apoyo incondicional.
A mi abuelita por su paciencia y perseverancia.
En memoria a mi abuelo Jorge.

Esto es de ustedes...

Agradecimientos

Esta memoria marca el término de muchos años de esfuerzo, el comienzo de una nueva etapa en mi vida y la oportunidad de agradecer a todos aquellos que estuvieron a mi lado todo este tiempo y que de alguna u otra manera hicieron posible que llegara a cumplir esta meta.

En primer lugar quiero mencionar a mi madre y abuelita, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida, pues son las que me han brindado todo su amor y apoyo; y a través de mucho sacrificio hicieron posible que llegara hasta estas instancias.

Quiero darle las gracias a mi padre por su incansable alegría y entusiasmo que en muchos momentos me levantaron.

A Samir, que ha estado junto a mí todo este tiempo entregándome todo su amor, apoyo y energía en los momentos difíciles.

De forma especial quiero agradecer a Ángel Molina por su disposición para llevar a cabo el desarrollo de este trabajo, a los miembros de la comisión por sus comentarios y sugerencias para hacerlo llegar a buen término y especialmente a mi Profesor Guía, Federico Delfín, por su apoyo y preocupación constante, que ha sido fundamental para sacar adelante esta memoria.

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL
POR: CLAUDIA CID PERLEY
FECHA: 17-06-2008
PROF. GUÍA: SR. FEDERICO DELFÍN A.

“APROVECHAMIENTO DE CENIZAS DE COMBUSTIÓN DE LECHO FLUIDIZADO
(FBC) PARA ELABORACIÓN DE ÁRIDOS LIVIANOS”

El propósito general de este trabajo de título es evaluar la factibilidad técnica de producción de un árido sintético hecho a partir de cenizas de combustión de lecho fluidizado (FBC), con el objeto de disminuir el impacto ambiental inherente a la generación de energía eléctrica de una importante planta de nuestro país. Se pretende proveer antecedentes suficientes para introducir este residuo dentro de las materias primas utilizadas en construcciones de hormigón, en este caso en particular, como un árido liviano para hormigones livianos estructurales.

La Refinería ENAP Bio Bio, emplazada en la comuna de Talcahuano, Región de la Araucanía, cuenta con la planta cogeneradora de energía eléctrica Petropower S.A., la cual se retroalimenta del *petcoke*, material combustible de alto contenido de azufre, producido en el proceso de refinamiento de petróleo. La combustión del *petcoke*, que se realiza en una cámara de combustión donde se adiciona cal, produce cenizas con alto contenido de sulfato cálcico (CaSO_4), óxido cálcico (CaO), carbonato cálcico (CaCO_3), fracciones de material alúmimo-silíceo e impurezas. Es debido a la presencia de los compuestos de calcio, que se sugiere la activación de éstos mediante la confección de una mezcla de cenizas y puzolana, de modo de obtener un material cementicio de carácter hidráulico.

La evaluación de la factibilidad de producción del árido sintético se basó en la caracterización física y química del material resultante de mezclar ceniza FBC, puzolana y agua; y la determinación de un proceso de fabricación de pellets por extrusión.

Dentro de los ensayos realizados a la ceniza FBC y a los áridos sintéticos se encuentran: análisis de distribución de partículas mediante equipo láser, superficie específica mediante método *Blaine* y peso específico para las cenizas; y resistencia a compresión, absorción de agua y densidades a los pellets. Estos ensayos arrojaron resultados que hacen factible continuar con la investigación y posterior utilización de los pellets sintéticos en el hormigón.

Se concluye que la resistencia máxima obtenida en los ensayos de compresión de las probetas (21,0 MPa) y el peso específico obtenido a partir de la densidad real seca del árido ($\sim 1400 \text{ kg/m}^3$), permiten caracterizar al árido sintético hecho a partir de la mezcla de ceniza y puzolana como un árido potencialmente apto para la confección de hormigones livianos estructurales, bloques de hormigón liviano y rellenos; introduciendo una nueva línea de investigación en temas de desarrollo sustentable en nuestro país.

**APROVECHAMIENTO DE CENIZAS DE COMBUSTIÓN DE LECHO FLUIDIZADO
(FBC) PARA ELABORACIÓN DE ÁRIDOS LIVIANOS.**

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	7 -
1.1 Motivación	8 -
1.2 Alcances y Relevancia	9 -
1.3 Logros y objetivos	9 -
2. ANTECEDENTES	11 -
2.1 La problemática de la generación de subproductos del carbón	11 -
2.1.1 Combustión en Lecho Fluidizado	13 -
2.1.1.1 Origen de las cenizas de combustión	14 -
2.1.2 Reutilización de subproductos de combustión del carbón	15 -
2.1.3 Trazas de metales presentes en las cenizas	18 -
2.2 Áridos sintéticos para hormigón liviano estructural	19 -
2.2.1 Áridos fabricados a partir de subproductos de la combustión del carbón	20 -
3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	23 -
3.1 Variables a investigar	23 -
3.2 Programa de los ensayos	24 -
3.2.1 Composición y procesamiento	24 -
4. DESARROLLO DE LA ETAPA EXPERIMENTAL	26 -
4.1 Materiales	26 -
4.2 Equipos	27 -
4.3 Metodología para la obtención de los áridos	28 -
4.3.1 Preparación de las mezclas	29 -
4.3.2 Ensayo de resistencia a la compresión	31 -
4.3.3 Proceso de pelletización	33 -
4.3.4 Caracterización de los áridos	36 -
5. RESULTADOS	37 -
5.1 Ensayo de estabilidad dimensional	37 -
5.2 Determinación del tamaño de las partículas mediante método láser	40 -
5.3 Difracción de rayos X	41 -
5.4 Ensayo a compresión de las probetas	41 -
5.5 Densidades y absorción	43 -
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	44 -
6.1 Generalidades	44 -
6.2 Análisis estadístico	46 -
6.2.1 Valores dispersos	46 -
6.2.2 Valores medios y desviaciones	50 -
6.2.3 Distribución T-Student	52 -
6.3 Resultados de ensayos a compresión	56 -
7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN	68 -
7.1 Valores obtenidos	68 -
7.1.1 Resistencias mecánicas	68 -
7.1.2 Absorción	68 -

7.1.3 Densidades	- 69 -
7.2 Factibilidad	- 69 -
8. RECOMENDACIONES	- 70 -
9. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	- 72 -
ANEXOS	- 74 -
Anexo A	- 74 -
Ensayo determinación de distribución de partículas y superficie específica.....	- 74 -
Anexo B.....	- 76 -
Ensayo de difracción de Rayos X.....	- 76 -
Anexo C	- 79 -
Tabla de valores de resistencia a la compresión.....	- 79 -
Anexo D	- 92 -
Ensayo de densidad aparente de los áridos.....	- 92 -
Anexo E.....	- 93 -
Ensayo de actividad puzolánica.....	- 93 -
Anexo F.....	- 94 -
Ensayo de densidades y absorción de los áridos sintéticos	- 94 -

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

La preocupación por el medio ambiente está jugando un rol importante y fundamental en el desarrollo de la industria del cemento y del hormigón a nivel mundial, sumando, para estos efectos, nuevas normativas de control de las emisiones generadas en los procesos de producción e incentivando la asimilación del concepto de construcción sustentable, la cual se caracteriza por el impacto medioambiental mínimo que trae consigo la ejecución de una estructura confeccionada con materiales que permiten dicho tipo de construcción.

El impacto ambiental de los procesos involucrados en una obra civil es incidente a lo largo de todo el ciclo de vida de una estructura, el cual incluye, desde la etapa de procesamiento, en la cual son confeccionados los materiales u obtenidas las materias primas, hasta la etapa de reutilización de los elementos o, como sucede también en el caso de las estructuras de hormigón, el proceso del reciclaje.

Esperando contribuir a la disminución del nivel de impacto ambiental debido a procesos industriales, es que se ha hecho necesaria la búsqueda de una manera de reutilizar los desechos derivados de estos procesos. Con este objetivo, es que esta investigación pretende determinar la factibilidad de incluir a un desecho industrial, generado de uno de los tantos procesos de una planta termoeléctrica, dentro del grupo de materias primas utilizadas para la construcción en hormigón, pues, de esta forma, se habrá encontrado una manera de disminuir el costo social inherente a la generación de energía eléctrica de una importante planta de nuestro país.

1.1 Motivación

Uno de los materiales más utilizados en la construcción es el hormigón. Sin embargo, la producción del cemento *Portland*, uno de sus constituyentes esenciales, conduce a liberar cantidades significativas de CO₂ y otros gases invernadero. Los efectos en el medioambiente asociados a las emisiones de CO₂ generadas en el proceso de producción del cemento *Portland*, la demanda de energía y el impacto económico, producen la demanda un material cementante suplementario que minimice estos efectos. Otro impacto ambiental importante que trae consigo la confección del hormigón es el producido por la extracción de áridos en nuestro país. Este impacto, más el producido por la fabricación del cemento *Portland* hacen de la producción del hormigón un proceso que no se puede dejar de lado al hablar de medioambiente y bienestar social.

La ceniza volante o *Fly Ash* es un subproducto de la combustión del carbón generada en plantas termoeléctricas, la cual puede ser obtenida tanto de la combustión del carbón pulverizado como de la combustión de *Petcoke*. La ceniza volante corresponde a un residuo finamente dividido que resulta de la combustión del carbón la cual es transportada mediante conductos¹ para su almacenamiento, las cuales a su vez, pueden ser utilizadas en distintas cantidades en reemplazo del cemento *Portland* en el hormigón.

En nuestro país, específicamente en la comuna de Hualpén en la VIII Región, la planta cogeneradora Petropower S.A., emplazada en las dependencias de la refinería Enap Bio-Bio, utiliza tecnología de punta para la generación de energía eléctrica mediante la fuerza del vapor. La tecnología utilizada corresponde a la Combustión de Lecho Fluidizado, la cual utiliza *Petcoke* como combustible. Este tipo de combustible posee cantidades considerablemente altas de azufre, lo que trae consigo importantes emanaciones de SO₃ en la combustión y la generación de cenizas que contienen metales residuales provenientes del crudo original en la forma de óxidos, sulfatos y silicatos.

La ceniza obtenida de la combustión de *Petcoke*, correspondiente a una mezcla de ceniza volante (*Fly Ash*) y ceniza de fondo de la cámara de combustión (*Bottom Ash*), es generada a una razón aproximada de 80 toneladas por día y transportada a una planta de acopiamiento. Estas cenizas se

¹ Definición de Ceniza Volante norma ASTM C-618-05.

diferencian del resto de las cenizas de combustión de subproductos de carbón en su composición, pues a raíz del método de abatimiento, utilizado en el proceso de combustión para aminorar la toxicidad de las emanaciones, contienen una cantidad de cal importante dando lugar a un material que hace factible su utilización en materiales de construcción.

1.2 Alcances y Relevancia

Al definir una forma de reutilizar un desecho industrial, siendo indiferente en cuanto a la tasa de generación de éste, se permiten evitar los impactos típicos que conlleva el hecho de acumularlos en un botadero; pues, el significado ambiental y toxicológico de la ceniza se encuentra directamente relacionado con su producción, que involucra la combustión del *Petcoke*, su almacenamiento y finalmente su transporte y posicionamiento.

El enfoque de este trabajo es, además de evitar o disminuir el impacto ambiental producido por almacenar las cenizas de combustión en un botadero y el que trae consigo la extracción de áridos en nuestro país, aprovechar todas las propiedades que poseen las cenizas de combustión de modo de innovar en cuanto a las investigaciones anteriormente realizadas sobre este tipo de cenizas. En este caso en particular, se pretende determinar la factibilidad de producción de un material sólido a partir de estas cenizas de combustión de lecho fluidizado a nivel de escala de laboratorio y posteriormente a escala industrial.

1.3 Logros y objetivos

Las cenizas volantes, son generalmente utilizadas a lo largo de todo el mundo como materias primas y/o adiciones en la producción de materiales de construcción utilizados en obras de ingeniería civil. Sin embargo, diversos estudios realizados, que han dado resultados satisfactorios, han permitido no sólo su utilización en el área de la construcción, sino que también, aunque en menor manera, en el rubro de la agricultura, minería, vialidad y otras áreas.

La preocupación por la búsqueda de reutilización de las cenizas de combustión de lecho fluidizado ha nacido debido a su gran tasa de generación, pues se producen aproximadamente 29.200 toneladas anuales que se han ido acumulando en la planta de acopiamiento Copiulemu, ubicada también en la VIII Región. Estudios realizados recientemente en Chile demostraron la

utilización de estas cenizas como estabilizador de suelos plásticos, mejorando de esta manera la estabilidad de los caminos arcillosos.

En nuestro país, la producción de energía eléctrica mediante el proceso de combustión de *Petcoke* en lecho fluidizado, se realiza en la planta Petropower S.A., fundada en el año 1998 y la única poseedora de esta tecnología en Chile. Es por esta razón y con el objetivo de contribuir con la minimización de la problemática ambiental inherente a la producción de la ceniza de la planta Petropower es que nace el objetivo de este trabajo, el cual corresponde a determinar la factibilidad técnica de producción de un árido liviano confeccionado en base a ésta ceniza, y su posible obtención a escala industrial. Para ello, en una primera etapa, se evaluarán las propiedades de la ceniza, principalmente el potencial aglomerante y contaminante, para distintas dosis de adiciones de material puzolánico y, a su vez, diferentes condiciones para lograr su hidratación. Como paso siguiente, se estudiará el proceso de pelletización de la mezcla de ceniza y puzolana a escala de laboratorio, y como método alternativo el procesamiento por extrusión. Finalmente, se evaluarán las características de los áridos obtenidos y se examinará su eventual comportamiento como agregado pétreo en un hormigón.

CAPÍTULO 2

2. ANTECEDENTES

Actualmente, la ingeniería civil desarrolla una activa preocupación por la realización de proyectos que se encuentren en armonía con el concepto de desarrollo sustentable, el cual involucra a materiales de alto desempeño y productos manufacturados con el menor costo medioambiental posible. Con este objetivo es que nace la necesidad de reutilizar la gran cantidad de ceniza de combustión de carbón producidas a nivel mundial, dando paso a diversas investigaciones sobre utilización de estos desechos. Estas investigaciones, principalmente los realizados por E.E.U.U., son de suma importancia para este trabajo, pues proporcionan antecedentes necesarios para el desarrollo del mismo.

2.1 La problemática de la generación de subproductos del carbón

Debido a que el 85% de la energía eléctrica en el mundo es obtenida a través de plantas termoeléctricas, que utilizan carbón como combustible, es indispensable desarrollar la tecnología de reciclaje y aplicación para el gran volumen de subproductos del carbón generados ya sea a través de tecnologías convencionales o *clean-coal*². El orden de magnitud para la reutilización potencial de estos productos, variable entre países, depende de las políticas y condiciones límite en cuanto al clima, impuestos y situación legal, imperantes en cada lugar.

A continuación se presenta un gráfico de producción de cenizas de combustión del carbón en el cual se indican los principales países productores de estos subproductos.

² Término que describe a distintas tecnologías que permiten reducir el impacto medioambiental asociado al uso del carbón. Frédéric Beauregard-Tellier. Clean Coal, 2005.

PRODUCCIÓN MUNDIAL ANUAL DE CENIZAS DE
COMBUSTIÓN DE CARBÓN

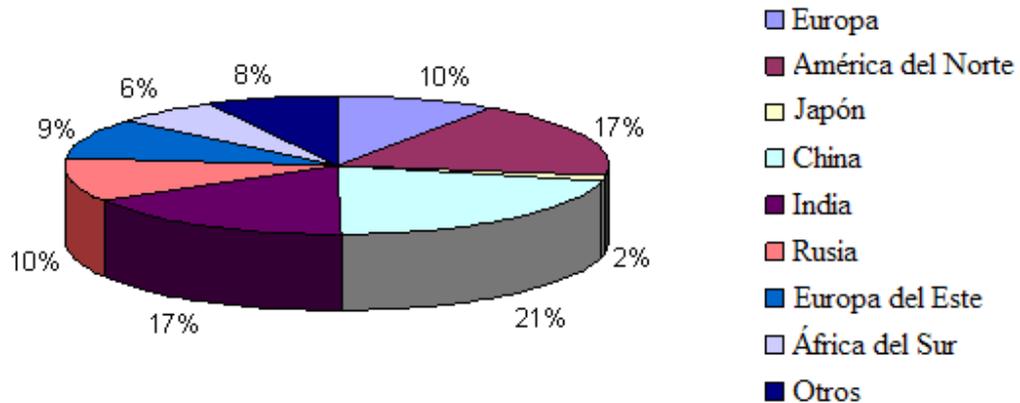


Figura N°1: Producción mundial de subproductos del carbón.

Los subproductos obtenidos de la combustión del carbón se distinguen entre sí principalmente por dos aspectos. El primero tiene relación con el tipo de carbón utilizado, y el segundo con el tipo de tecnología de combustión que utilice la Planta. Dentro de estos tipos de tecnología de combustión existen tres que son los principales.

- **Combustión de Carbón Pulverizado (*Pulverized Coal Combustión PCC*)**

Corresponde a la tecnología comúnmente usada en plantas termoeléctricas, en la cual las partículas de carbón son pulverizadas a tal punto que el 75% de ellas posee un tamaño por debajo de los 75 μ m. La combustión se desarrolla a temperaturas del orden 1300-1700 °C, donde el tiempo de residencia de la partícula dentro de la cámara de combustión es de 2-5 s.

- **Desulfurización de Gas (*Flue Gas Desulphurization FGD*)**

La tecnología FGD corresponde al sistema más utilizado en el control de las emisiones de azufre a nivel mundial. En este sistema, compuestos de calcio y sodio, que actúan como sorbentes, reaccionan con compuestos de azufre a la salida de la cámara de combustión. Esta tecnología generalmente es adicional a la tecnología PCC.

- **Combustión en lecho Fluidizado (*Fluidized Bed Combustión FBC*)**

Corresponde a una de las más prometedoras dentro de las tecnologías *clean-coal* emergentes. Permite la combustión de carbones de bajo poder calorífico, con alto contenido de azufre que no

pueden ser utilizados en la tecnología PCC. La combustión se desarrolla, para este caso, a temperaturas del orden 800-900 °C, lo cual permite una disminución de las emisiones de NO_x y admite un tamaño mucho mayor de partículas (hasta 3 mm). Este proceso posee un método de abatimiento que consiste en la adición de cal, la cual al calcinarse actúa como un sorbente del azufre liberado por la combustión. El hecho de adicionar cal directamente a la cámara de combustión otorga una posibilidad más económica de minimizar las emisiones de azufre sin la necesidad de un equipo FGD [4].

Tabla N°1: Comparación entre procesos PCC y FBC.

Parámetros	Combustión de Carbón Pulverizado <i>Pulverizad Coal Combustion (PCC)</i>	Combustión en Lecho Fluidizado <i>Fluidized Bed Combustion (FBC)</i>
CaO presente en la caldera	No	Si
Tamaño de partícula de carbón	< 75 µm	1-3 mm
Tiempo de permanencia de la partícula	segundos	minutos
Temperatura de combustión	Alta 1300-1700 °C	Baja 800-900 °C
Porosidad de la ceniza	Baja	Alta
PH de la ceniza	Ácida-neutra	Alcalina
Eficiencia Térmica, %	33-35	36-40
Emisiones: SO ₂ , lbs/mmBTU	1,2	0,1
Emisiones: NO _x , lbs/mmBTU	0,6	0,15
Origen de NO _x	Térmico-Combustible	Combustible
Costo de electricidad, (%)	100	90
Emisión CO ₂ , g°C/kW-h	238-221	201-210

2.1.1 Combustión en Lecho Fluidizado

Las cenizas objeto de esta investigación corresponden a las generadas por la planta termoeléctrica Petropower S.A., emplazada en las dependencias de la refinería Enap Bio-Bio, la cual debe ser capaz de sostener el consumo de la refinería hasta de 13.000 kW. Esta termoeléctrica cuenta con la tecnología de Combustión de Lecho Fluidizado o *Fluidized Bed Combustion (FBC)*, la cual se caracteriza por utilizar carbones de bajo grado con alto contenido de azufre y por las bajas emisiones de compuestos de este último liberadas al ambiente.

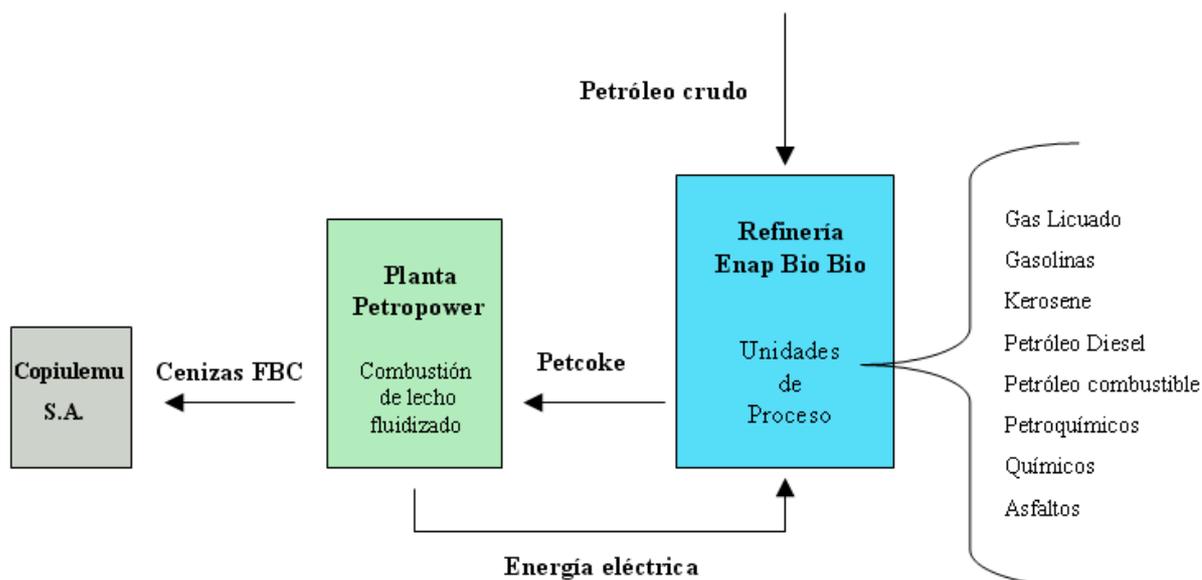


Figura N° 2: Relación Planta Petropower S.A. – Refinería Enap Bio Bio.

Las condiciones de operación, y las características del combustible y del absorbente influyen directamente sobre las propiedades del residuo obtenido en la planta Petropower.

La ceniza de fondo o *Bottom Ash*, corresponde al residuo que queda en el fondo de la cámara de combustión. Ésta es una mezcla de cenizas combustibles, residuos de carbón no calcinados y partículas de cal. Además, debido a que importantes cantidades de cal son agregadas con el objetivo de absorber el dióxido de azufre, existen residuos de CaO/MgO , CaSO_4 y CaCO_3 adicional. La ceniza volante o *Fly Ash* generada en este proceso, se diferencia de las cenizas volantes de las tecnologías convencionales principalmente por la ausencia de formas cristalinas y otros compuestos vítreos formados a altas temperaturas, puesto que una de las características de la tecnología FBC es su baja temperatura de combustión. En general las cenizas FBC están compuestas principalmente por yeso (CaSO_4), cal (CaO), y en menor cantidad de óxidos de hierro, magnesio y compuestos de arcillosos derivados de carbones combustibles.

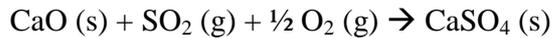
2.1.1.1 Origen de las cenizas de combustión

En la tecnología de combustión de lecho fluidizado la cal es agregada como sorbente para capturar el azufre durante el proceso de combustión de las partículas, y sobre el cual, numerosos estudios han confirmado que en condiciones atmosféricas el primer paso en el proceso de absorción del azufre es la calcinación de la calcita CaCO_3 .



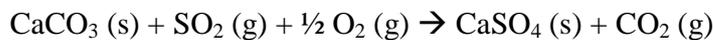
Calcinación del CaCO_3

Esta reacción de calcinación es significativamente más rápida que el próximo paso correspondiente a la absorción del azufre, reacción llamada sulfatación.

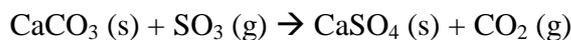


Sulfatación

Bajo las condiciones de combustión en lecho fluidizado, las altas presiones generadas en el reactor y por lo tanto sobre el CO_2 , previenen la descomposición del CaCO_3 , lo que permite que la reacción de desulfuración ocurra directamente con la sulfatación del CaCO_3 .



Sin embargo, en presencia de algunos catalizadores el $\text{SO}_2 (\text{g})$ eventualmente puede convertirse en $\text{SO}_3 (\text{g})$, donde puede hacerse posible la siguiente reacción:



La descomposición térmica del yeso (CaSO_4) ante una presión normal de combustión en lecho fluidizado no es posible debido a las bajas temperaturas de combustión imperantes. Cabe destacar que de igual forma es posible que se liberen cantidades significativas de CO_2 en la combustión si es que se llegaran a reducir las condiciones de presión en el reactor.

En resumen, de las condiciones del proceso FBC se destacan los siguientes puntos:

- La sulfatación de los absorbentes toman lugar por reacción directa entre CaCO_3 y SO_2 .
- La eficiencia del proceso se incrementa con la temperatura y presión en el reactor.
- La presión total en el reactor no limita la absorción del azufre [8a].

2.1.2 Reutilización de subproductos de combustión del carbón

En E.E.U.U. la producción de subproductos de la combustión del carbón es aproximadamente de 120 millones de toneladas, de los cuales es reciclada casi la totalidad de los residuos producidos en las cámaras de combustión. Sin embargo, el porcentaje de reciclaje con respecto al total de

subproductos es solamente de un 30%, mientras que en Europa se recicla más del 50% de estos desechos [12].

Los índices de reutilización de estos subproductos de la combustión del carbón deben servir de referencia para introducir a nuestro país dentro de aquellos que buscan menores tasas de contaminación y menores costos en producción de materiales de construcción. A continuación en la Tabla N° 2 se muestran los niveles de reutilización de productos de combustión del carbón en los E.E.U.U. [17].

Tabla N°2: Producción y reutilización de subproductos del carbón.

Tipo CCB (<i>Coal Combustión By-Products</i>)	Producción (ton)	Utilización (ton)	Porcentaje Utilizado (%)
Ceniza Volante (<i>Fly Ash</i>)	62.956.000	21.106.000	34
Ceniza de Fondo (<i>Bottom Ash</i>)	16.760.000	5.239.000	31
Escoria de caldera (<i>Boiler Slag</i>)	2.981.000	2.388.000	80
Subproductos de Sistema FGD (<i>FGD Byproducts</i>)	25.003.000	2.494.000	10
Total	107.700.000	31.227.000	29

En la Figura N°3 se muestra la distribución de estos residuos de combustión del carbón en cuanto a sus aplicaciones en los E.E.U.U.

USOS DE LAS CENIZAS DE LA COMBUSTIÓN DEL CARBÓN
EN E.E.U.U

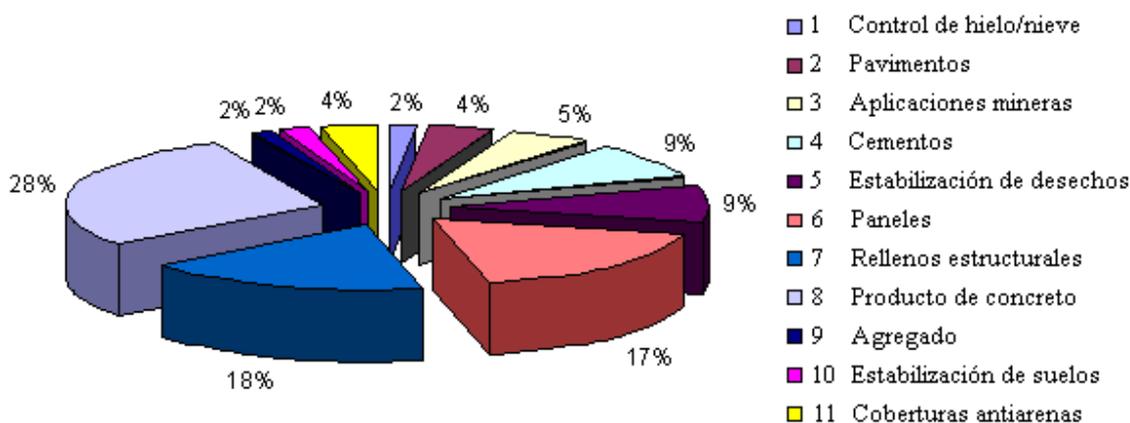


Figura N°3: Aplicaciones de las cenizas de combustión en los E.E.U.U.

El análisis químico realizado a las cenizas de combustión de lecho fluidizado de Petropower S.A. mostrado en la Tabla N°3 fue realizado en una investigación llevada a cabo por la Pontificia Universidad Católica [6], la cual determinó que la ceniza podía ser utilizada como estabilizador de suelos arcillosos. Este análisis permitió clasificar a la ceniza en un diagrama ternario, esquematizando el porcentaje relativo de sus óxidos componentes (Figura N°4).

Tabla N°3: Comparación entre cenizas tradicionales y de Petropower S.A.

Compuesto	Ceniza Volante (Fly Ash) (%)	Ceniza de Fondo (Bottom Ash) (%)	Ceniza Volante (FA) Tradicional (%)
SiO ₂	1,75	12,4	30-60
Al ₂ O ₃	0,3	0,38	15-25
CaO	43,8	47,31	3-155
C	10,63	0,15	-
SO ₃	36,36	35,41	0-3
Cal Libre	14,23	21,12	-

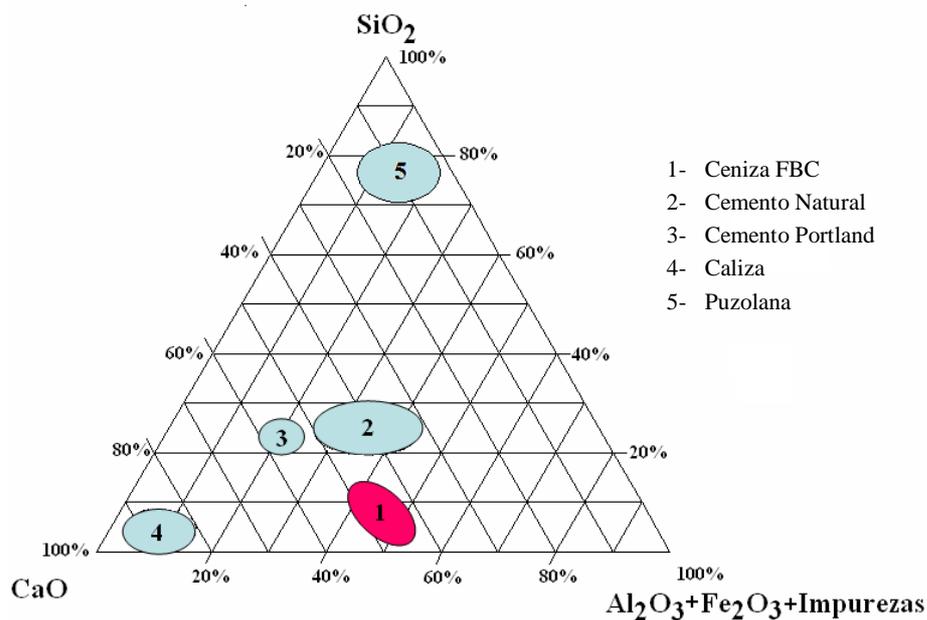


Figura N°4: Diagrama ternario de composición de óxidos de las cenizas de combustión de lecho fluidizado Petropower S.A.

2.1.3 Trazas de metales presentes en las cenizas

Debido a que en nuestro país ya existe una normativa que regula la presencia de metales pesados como níquel y vanadio (MINSAL, 2004)³, fue necesario determinar el contenido de estos metales en las cenizas, cuya presencia limitaría algunas potenciales aplicaciones.

El estudio realizado del contenido del óxido de vanadio en las cenizas, que corresponde al compuesto más tóxico de este elemento, resultó negativo [5].

En el caso del níquel, existen dos compuestos en el listado del Reglamento de Residuos Peligrosos [5], uno corresponde al níquel carbonilo ($\text{Ni}(\text{CO})_4$) que en condiciones normales de presión y temperatura es un gas y por lo tanto no sería un contaminante sólido en la cenizas, y la otra forma es el cianuro de Níquel, compuesto insoluble en agua, por lo tanto poco probable que lixivie.

De lo anterior se deduce que al menos para aquellos compuestos que están regulados por el Reglamento de Residuos Peligrosos, el uso de las cenizas en estudio no debiera constituir un riesgo significativo para el ambiente [5].

En la Tabla N°4 se observan los contenidos de estos metales en las cenizas de Petropower S.A., los cuales se encuentran dentro de los rangos admisibles establecidos por el Reglamento de Residuos Peligrosos.

Tabla N°4: Metales pesados presentes en las cenizas de Petropower S.A.

Componentes de las cenizas	Contenido Promedio (ppm)	Rango según Reglamento de Residuos Peligrosos (ppm)
Vanadio	<2000	500-2000
Níquel	336	250-450
Hierro	84	50-250
Material volátil (%)	10	8-160

³ Decreto Supremo N° 148. Reglamento que establece las condiciones necesarias y de seguridad mínimas en cuanto a residuos peligrosos. Publicado en el Diario Oficial el día 16 de junio de 2004.

2.2 Áridos sintéticos para hormigón liviano estructural

El uso de los agregados livianos en la construcción, particularmente en estructuras de hormigón genera menores costos totales. Mientras que un hormigón liviano puede costar más por metro cúbico que uno de peso normal, el costo de la estructura total podría costar menos como resultado de reducir las cargas muertas, el costo de las fundaciones, disminuyendo espesores en muchas secciones, y por lo tanto requiriendo menos acero de refuerzo [16].

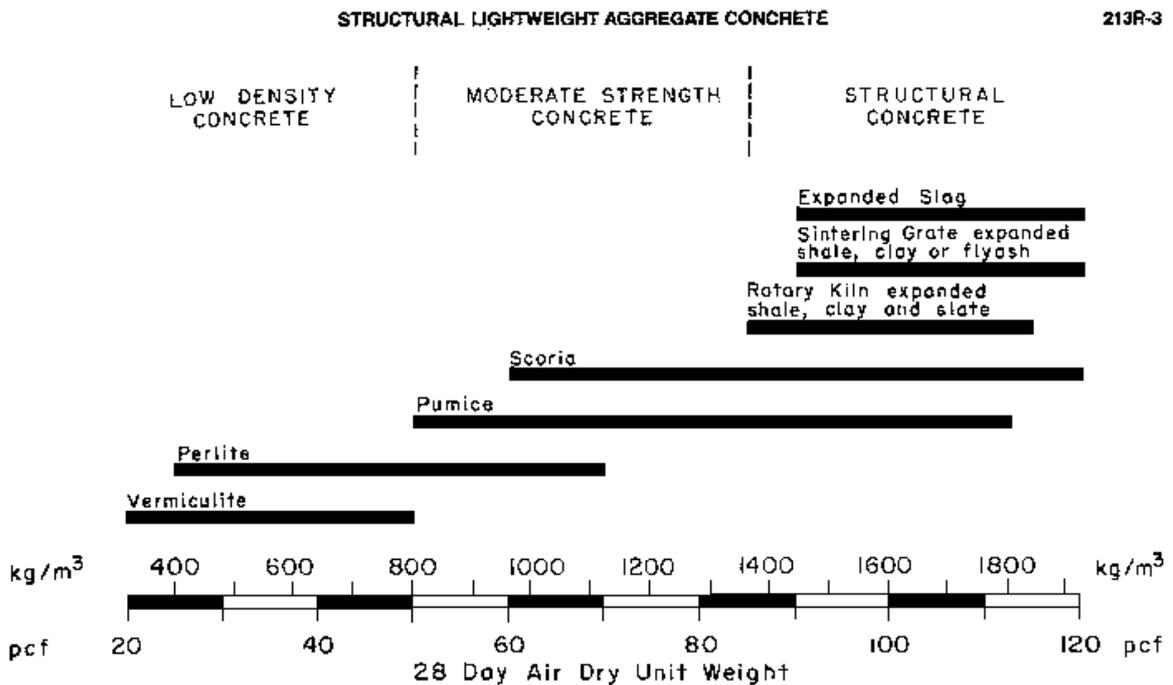


Figura N° 5: Esquema de clasificación del concreto liviano según densidad y material complementario [16].

Existen muchos tipos de áridos disponibles, los cuáles se clasifican como áridos livianos, y según sus propiedades, se clasifican dentro de ciertos rangos. En la Figura N°5 se muestran los tres tipos de hormigón que se pueden obtener con áridos livianos asociados a los materiales componentes de éstos.

Tipos de Hormigones livianos

- **Hormigones de baja densidad**

Estos hormigones de densidades menores a 800 kg/m^3 , no son estructurales y generalmente son utilizados con propósitos de aislamiento térmico. Poseen bajo peso unitario y rara vez exceden los 800 kg/m^3 (50 lb/ft^3). Los rangos de resistencia a la compresión característica de estos hormigones se encuentran por debajo de los 7,0 MPa.

- **Hormigones livianos estructurales**

En estos hormigones se utilizan áridos que caen al otro extremo de la escala y generalmente están hechos con arcillas expandidas y escorias. La mínima resistencia de compresión es del orden de 18,0 MPa. El peso unitario de un hormigón estructural con áridos livianos es considerablemente mayor que uno de baja densidad y la eficiencia de aislamiento es menor. Sin embargo, los valores de conductividad térmica de un hormigón liviano estructural son mucho mejores que los de un hormigón normal.

- **Hormigones de resistencia moderada**

El uso de estos hormigones requiere de cierto grado de resistencia a la compresión, pues caen en la mitad de la escala entre los hormigones estructurales y de baja densidad. Las resistencias de compresión se encuentran en el rango de 7,0 a 18,0 MPa y sus características de aislamiento son intermedias aunque significativamente mayores que las del hormigón de peso normal [16].

2.2.1 Áridos fabricados a partir de subproductos de la combustión del carbón

La producción de áridos sintéticos representa una alternativa de utilización y una oportunidad para utilizar residuos. Los áridos, naturales pétreos, constituyen cerca del 80% del volumen del hormigón normalmente usado en construcción.

Diferentes métodos son usados para producir áridos estructurales livianos, dependiendo de su naturaleza y características de las materias primas o residuos que intervienen en su composición.

En el mundo, los agregados livianos sintéticos han sido producidos de cenizas volantes de la combustión de carbón pulverizado. Este proceso, generalmente, involucra la mezcla de cal y otros aditivos, y luego de un proceso de pelletización pasan por la etapa de hidratación.

En un estudio realizado para determinar los efectos en la durabilidad de hormigones confeccionados con áridos sintéticos hechos a partir de subproductos de la combustión del carbón [10], los áridos fueron confeccionados en tres pasos: el proceso de pelletización mediante plato granulador, hidratación y curado. Finalmente, los áridos fueron caracterizados y sus propiedades fueron comparadas con las especificaciones para áridos usados en construcción.

El subproducto fue tomado de un silo de cenizas perteneciente al sistema combustor de lecho fluidizado de flujo circulante, el cual es el encargado de suministrar energía eléctrica mediante vapor a la planta de Pittsburg.

Los componentes secos fueron mezclados en una mezcladora Littleford Brothers FM-50, modelo KM-300-D, para producir material consistente para la pelletización. Estos componentes fueron mezclados con una cantidad apropiada de agua. El material húmedo fue pelletizado con agua adicional en un plato granulador rotatorio Ferro-Tech de 36 pulg de diámetro interno a una tasa de aglomeración de 13,4 lb/min, durante un tiempo de 20-25 min. Los productos pelletizados fueron curados bajo condiciones de alta humedad (sobre el 90%). En algunos casos, la ceniza FBC fue mezclada con ceniza volante con el objeto de evaluar las propiedades del pellet obtenido.

A continuación se presenta una tabla comparativa (Tabla N°5) de áridos confeccionados con cenizas FBC con diferentes adiciones de ceniza volante y áridos naturales [9].

Tabla N°5: Características de los áridos confeccionados con cenizas FBC y diferentes adiciones de ceniza volante.

Parámetros	100% FBC	90% FBC	75% FBC	65% FBC	50% FBC	Grava	Piedra caliza	Especificaciones Clase A, AASHTO
Índice de abrasión de LA, %	27	23	25	19	22	28	21	40 (max)
Índice de huecos, %	7	0	6	12	28	8	8	12 (max)
Peso Unitario, lb/ft ³	71,8	71,4	77,4	-	-	96,3	103	70 (max)
Carga de rotura, lb	190	210	208	200	162	310	203	-
Índice de Absorción, %	3,9	4,2	3,8	3,7	3,6	1,7	0,5	-
Peso Específico	1,98	2,01	2,04	2	2,02	2,52	2,67	-

En la Tabla N°5 se resumen los resultados obtenidos para un conjunto de dosificaciones y las propiedades de áridos patrón confeccionados con 100% cenizas FBC y adiciones de ceniza volante, los agregados naturales (grava y piedra caliza chancada) y las especificaciones de la norma AASHTO para el árido grado A. Los áridos grado A son los de mayor calidad en cuanto a los utilizados en construcción vial. Como se indica en la Tabla, los áridos sintéticos y naturales tienen similar índice de desgaste de Los Ángeles y carga de rotura. Los áridos sintéticos tienen un menor índice de vacíos, un menor peso específico, y una mayor absorción de agua.

Además, se demuestra en los resultados que la combinación de una cantidad apropiada de ceniza volantes y agua aumenta la carga de rotura de los áridos hechos a partir de subproductos de la combustión de lecho fluidizado.

CAPÍTULO 3

3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

En el presente capítulo se describen las variables de composición de las mezclas de puzolana y ceniza a investigar; y sus rangos o intervalos de variación para la obtención de una mezcla óptima que permita la obtención de un árido liviano a partir de puzolanas naturales y cenizas combustión de lecho fluidizado.

Para la determinación de los parámetros de composición de las mezclas y la forma en que éstos inciden en las propiedades y comportamiento del producto (árido liviano) se realizó un análisis de las materias componentes, particularmente, de las cenizas de combustión de la Planta Petropower. Dentro de esta evaluación se encuentran: análisis de distribución de tamaño de partículas, superficie específica de partículas, peso específico y difracción de rayos X que, junto con los análisis químicos anteriormente realizados a estas cenizas, entregan una caracterización de su composición y potencial comportamiento en mezclas con materiales puzolánicos.

Por otra parte, el estudio contempla la obtención de pellets o partículas de árido liviano, para lo cual se considera evaluar las técnicas de obtención por vía de la extrusión de pastas o por pelletizado de polvo hidratado con vapor.

3.1 Variables a investigar

A partir del análisis químico realizado a las cenizas de combustión de lecho fluidizado mostrado en el capítulo anterior se puede apreciar que una fracción importante, aproximadamente el 50% en peso, corresponde a óxido cálcico.

Se sabe que el cemento romano es una mezcla de cal y puzolana natural, pues esta última corresponde a un material alúmino-silíceo que al encontrarse finamente dividido reacciona con el hidróxido de calcio en presencia de agua formando un material de características cementantes. Sobre esta base se plantea que este tipo de ceniza de combustión podría reaccionar con puzolana formando un material cementicio con propiedades hidráulicas. Es por esta razón que se decidió estudiar las propiedades del material resultante de la mezcla de ceniza FBC con cantidades variables de puzolana natural molida.

3.2 Programa de los ensayos

Para determinar la mezcla de dosificación óptima se confeccionaron pastas con diferentes proporciones de ceniza, puzolana y agua para obtener consistencia plástica.

Una vez determinada la mezcla óptima se procedió a confeccionar probetas, sobre las cuales se realizaron ensayos de resistencia mecánica; y posteriormente, por extrusión, se obtuvieron partículas de árido (pellets), a los cuales se les determinaron la densidad y capacidad de absorción de agua.

3.2.1 Composición y procesamiento

En primer lugar, se determinarán las características físicas y químicas de las cenizas FBC, partiendo por la determinación de su peso específico, granulometría y su composición mineral mediante ensayo de difracción de rayos X.

Por otro lado, previo a la puesta a punto de un proceso de confección de áridos a partir de mezcla de cenizas de combustión de lecho fluido y de puzolana natural, fue necesario determinar la dosificación óptima de puzolana que hiciera máxima la resistencia mecánica del material.

La confección de los áridos se realizó vía pasta (mezcla de cenizas de combustión, puzolana y agua en diferentes dosificaciones).

A continuación se detalla el procedimiento a seguir para el desarrollo del estudio.

En una primera etapa se procedió a confeccionar mezclas de ceniza de combustión pura con distintas dosificaciones de agua con el fin de determinar la resistencia que es capaz de obtener

por sí sola al fraguar y endurecerse. La ceniza, como ya se mencionó anteriormente, corresponde a una ceniza de *Petcoke* obtenida de un proceso de combustión de lecho fluidizado, cuyo análisis químico fue mostrado en el capítulo anterior.

La puzolana, por su alto contenido de sílice y alúmina, reacciona y se activa con la cal en mezcla con agua formando un material de características cementantes. Es por esta razón que se decidió confeccionar mezclas con diferentes dosificaciones de puzolana y ceniza de combustión.

La variación de la cantidad de agua, en la mezcla de cenizas de combustión y puzolana, cumple un rol fundamental en la búsqueda de la dosificación óptima con máxima resistencia, pues la curva obtenida puede ser potencialmente análoga a la de razón agua-cemento versus resistencia. El agua utilizada fue agua potable temperatura entre 20 ± 5 °C.

Una vez determinadas las variables explicativas o independientes, tales como: dosificación de agua y puzolana se procedió a determinar las variables que dependen directamente de estos parámetros. Estas variables corresponden a la determinación de ciertas características del árido confeccionado, obtenidas, evidentemente en función de las posibles aplicaciones que pueda tener el árido, tales como: densidades y absorción de agua.

CAPÍTULO 4

4. DESARROLLO DE LA ETAPA EXPERIMENTAL

En este capítulo se describen los pasos en los que se llevará a cabo el desarrollo de la etapa experimental de la investigación. Para ello, es necesario tener conocimiento de los materiales, equipos y metodología utilizados.

4.1 Materiales

Las pastas confeccionadas, en las que se evaluaron las resistencias, consistían en una mezcla de cenizas de combustión de lecho fluidizado de Petropower y puzolana de Coronel finamente dividida (6% de la fracción retenida en malla N°325), ambas en diversas dosificaciones.

Dentro de las características visuales de la ceniza, se pudo observar que ésta corresponde a un material finamente dividido, de un color grisáceo oscuro y sin olor que la caracterizara. En este material se puede observar que una fracción bastante menor corresponde a partículas blancas de un tamaño un poco mayor que el fino abundante, siempre menores a 1mm. A esta ceniza se le realizó un ensayo de peso específico, el que arrojó como resultado 2,67 (g/cm³).

La puzolana en cambio, como suele ser, se trató de un material claro y amarillento, en este caso finamente dividido y más homogéneo en cuanto al tamaño de sus partículas en comparación a las cenizas de combustión. La puzolana utilizada en este estudio corresponde a una puzolana de Coronel con un 6% de material retenido sobre tamiz N° 325. El ensayo de actividad puzolánica hecho a esta puzolana se muestra en el Anexo E.

4.2 Equipos

Los materiales utilizados para esta investigación fueron los siguientes:

- Mixer:

Mezcladora utilizada para homogeneizar adecuadamente los materiales, marca HOBART.



Figura N°6: Máquina homogeneizadora

- Moldes

Moldes para ensayo de retracción de dimensiones 11,0 pulg de longitud y 1,0 pulg² de sección transversal, utilizados para la obtención de las probetas de la mezcla de dosificación correspondiente.

- Prensa para ensayo a compresión



Figura N°7: Máquina de ensayo de resistencia a la compresión.

- Otros como: vidrios reloj, pie de metro, espátulas, brochas, poruñas, etc.

4.3 Metodología para la obtención de los áridos

En una primera etapa, se consideró necesario determinar el tipo de cal contenida en las cenizas de combustión, pues, de la forma en que ésta esté presente, dependerá el comportamiento y valor cementante de la ceniza. Para poder obtener una idea a grandes rasgos de la cantidad de compuestos hidráulicos o expansivos que la ceniza pudiese tener se realizó el ensayo de la “torta” o “galleta”. Este ensayo, definido por la norma española ENV-459 Parte 1 y 2, tiene como objetivo principal determinar la estabilidad volumétrica y capacidad de retracción y expansión de las mezclas mediante la inspección visual de las “galletas”. El ensayo consiste en confeccionar una probeta con forma de galleta de 5 a 7 cm de diámetro y 1 cm de espesor con la mezcla a analizar sobre una placa. El agua a agregar es tal que permita confeccionar la probeta por caída libre de la mezcla sobre la placa sin necesidad de amoldar con una espátula, además, debe estar a una temperatura de $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$. A continuación, las probetas se introducen a un horno por 4 horas

a una temperatura de (105 ± 5) °C. Finalmente, las “galletas” se retiran para el respectivo análisis⁴.

En el caso particular de este trabajo, se confeccionaron 14 probetas con distintas dosificaciones de material puzolánico, de las cuales la mitad (7) se introdujeron al horno por 4 horas como lo indica la norma española y la otra mitad en cámara húmeda de modo de observar cambios de volumen o fisuración bajo condiciones controladas.

A continuación se muestra la Tabla N°6 de dosificaciones utilizadas en forma preliminar con el objetivo de determinar reacciones expansivas o de retracción en las mezclas.

Tabla N°6: Dosificación de las galletas confeccionadas con ceniza.

Series Preliminares (Dosificación de puzolana)	Dosificaciones				
	Ceniza FBC (g)	Peso Puzolana (g)	Total mezcla (g)	Agua (g)	Agua (%)
G1 (0%)	200	0	200	97,7	48,9
G2 (5%)	190	10	200	101,8	50,9
G3 (10%)	180	20	200	97,1	48,6
G4 (20%)	160	40	200	92,4	46,2
G5 (30%)	140	60	200	89,4	44,7
G6 (40%)	120	80	200	80,4	40,2
G7 (50%)	100	100	200	75,4	37,7

4.3.1 Preparación de las mezclas

Una vez realizado el ensayo y determinadas las observaciones correspondientes indicadas más adelante en el Capítulo de Resultados, se definieron 10 series de muestras a ensayar con el objetivo de obtener las propiedades aglomerantes de las cenizas. Estas series se diferencian entre si en el porcentaje de adición de puzolana y cenizas propuesto. La primera serie, corresponde a ceniza FBC pura, de esta forma se obtendrán resultados propios de las cenizas FBC.

Debido a que la ceniza FBC Petropower posee bajas cantidades de sílice y alúmina, se consideró la adición de material puzolánico con el fin de obtener un material con mejor potencial aglomerante. Por lo que el resto de las series de muestras corresponde a diferentes adiciones de puzolana.

⁴ Metodología para prueba de expansión en condiciones de horno según norma española ENV-459 Parte 1 y 2.

Para determinar la mezcla óptima se decidió realizar ensayos sobre probetas de 1x1x1 pulg obtenidos para ser ensayados a 7 y 28 días. Cabe destacar que para cada dosificación de puzolana, se hizo variar también la cantidad de agua de la mezcla en 3 dosificaciones diferentes, tomando como dosificación inicial y mayor la obtenida en el ensayo de expansión volumétrica, la menor dosificación fue la mínima tal que permitiera que la mezcla fuese trabajable, y la tercera fue una dosificación intermedia de las dos anteriores tal como se muestra en la Tabla N°7. Este esquema se realizó de la misma manera para los ensayos a los 7 y 28 días de confección de las probetas.

Tabla N°7: Dosificación de agua para las distintas serie de adición puzolánica.

Serie	Dosificación en peso (%)	
	P/C ⁵ (%)	A/(P+C) ⁶ (%)
M0A	0	53,9
M0B	0	48,9
M0C	0	46,0
M10A	10	48,6
M10B	10	46,0
M10C	10	44,0
M20A	20	46,2
M20B	20	44,0
M20C	20	42,0
M30A	30	44,7
M30B	30	40,0
M30C	30	37,0
M40A	40	42,0
M40B	40	40,2
M40C	40	37,0
M50A	50	40,0
M50B	50	37,7
M50C	50	35,0
M60A	60	41,5
M60B	60	38,2
M60C	60	34,9
M70A	70	38,6
M70B	70	37,0
M70C	70	35,3
M80A	80	42,6
M80B	80	38,6
M80C	80	34,5
M90A	90	42,7
M90B	90	37,2
M90C	90	33,9

⁵ Relación puzolana (P)-cemento(C) [%].

⁶ Relación agua (A)-mezcla(P+C) [%].

La metodología de confección de las probetas se realizó según norma NCh 158 Of. 1967 “Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento”. Éstas se muestran desmoldadas en la Figura N°8.



Figura N°8: Probetas confeccionadas con la mezcla en distintas dosificaciones puzolánicas.

4.3.2 Ensayo de resistencia a la compresión

Una vez realizada la probeta con la dosificación correspondiente se sometió a un proceso de curado en cámara húmeda con una saturación sobre el 90%. La resistencia de estas probetas fue determinada 7 y 28 días posteriores a su confección. Para ello, una vez cumplida la edad deseada se dividió cada probeta en 11 prismas de 1x1x1 pulg mediante aserrado.

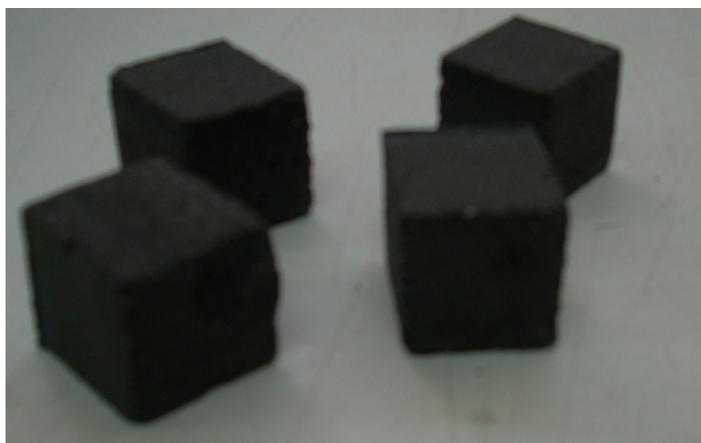


Figura N°9: Prismas para ensayo a compresión.

Debido a las pequeñas dimensiones de las probetas, se determinó que la velocidad de ensayo más adecuada fuese de 10 mm/min.

Una vez realizados los ensayos a compresión de los prismas (aproximadamente 60 ensayos a compresión por cada dosificación de puzolana) se obtuvo el promedio de la resistencia a los 7 y 28 días como se observa en la siguiente tabla:

Tabla N°8: Resultados resistencias a compresión.

Serie	Dosificación en peso (%)		Carga Rotura (kgf)		Tensión Rotura (kgf/cm ²)	
	P/C	A/(P+C)	7 d	28 d	7 d	28 d
M0A	0	53,9	77,0	195,6	11,9	30,3
M0B	0	48,9	85,5	252,2	13,3	39,1
M0C	0	46,0	87,7	346,0	13,6	53,6
M10A	10	48,6	50,7	355,3	7,9	55,1
M10B	10	46,0	71,0	390,9	11,0	60,6
M10C	10	44,0	101,1	529,5	15,7	82,1
M20A	20	46,2	45,4	329,0	7,0	51,0
M20B	20	44,0	46,1	343,0	7,2	53,2
M20C	20	42,0	53,3	403,9	8,3	62,6
M30A	30	44,7	87,0	409,2	13,5	63,4
M30B	30	40,0	129,9	512,1	20,1	79,4
M30C	30	37,0	182,5	716,7	28,3	111,1
M40A	40	42,0	106,7	629,5	16,5	97,6
M40B	40	40,2	172,7	767,1	26,8	118,9
M40C	40	37,0	217,9	820,0	33,8	127,1
M50A	50	40,0	198,1	737,0	30,7	114,2
M50B	50	37,7	263,5	927,6	40,8	143,8
M50C	50	35,0	414,5	1097,1	64,2	170,1
M60A	60	41,5	422,4	1050,0	65,5	162,8
M60B	60	38,2	513,6	1209,1	79,6	187,4
M60C	60	34,9	555,2	1490,9	86,1	231,1
M70A	70	38,6	288,7	1153,0	44,7	178,7
M70B	70	37,0	319,4	1336,4	49,5	207,1
M70C	70	35,3	331,0	1582,7	51,3	245,3
M80A	80	42,6	195,9	440,0	30,4	68,2
M80B	80	38,6	277,4	530,2	43,0	82,2
M80C	80	34,5	355,0	834,5	55,0	129,3
M90A	90	42,7	158,9	169,0	24,6	26,2
M90B	90	37,2	234,1	270,5	36,3	41,9
M90C	90	33,9	301,2	276,0	46,7	42,8

4.3.3 Proceso de pelletización

Una vez determinada la dosificación óptima ceniza/puzolana de la mezcla se procedió a confeccionar los pellets. Para la etapa de pelletización se eligió un proceso de extrusión y a partir de éste se obtuvieron los áridos sintéticos. Para realizar este proceso, a escala de laboratorio, se utilizó una pistola manual de extrusión y un cartucho (Figura N°10), dentro del cual se introdujo la mezcla de dosificación óptima.



Figura N°10: Pistola extrusora utilizada en proceso de pelletización.

La boquilla empleada tenía un diámetro 20 mm, el cual correspondería al tamaño nominal del árido sintético confeccionado.



Figura N°11: Salida del material extraído (2 cm aprox.).

Cabe destacar que la mezcla poseía una consistencia fluida lo que permitía introducirla dentro del cartucho por gravedad, dando pequeños golpes a modo de eliminar los espacios de aire que pudiesen dar discontinuidad al material extraído. La extrusión se efectuó a velocidad constante de 10 mm/s.

El material compacto extraído fue depositado sobre una bandeja aceitada a modo de evitar algún tipo de adherencia entre la bandeja y el material.

Posteriormente, el material extraído fue dividido con una espátula, formando de esta manera los pellets. Las divisiones fueron hechas cada 2 cm aproximadamente obteniendo un pellet de forma cilíndrica y achatada por el propio asentamiento del material.

Para evitar el contacto entre uno y otro se deslizó cuidadosamente la espátula con el fin de separar uno de otro y así evitar que se aglomerasen (Figura N° 12).



Figura N°12: Formación del pellet mediante la división del material extruído.

Inmediatamente después de obtenidos los pellets, éstos fueron llevados a una cámara de curado con las mismas condiciones de humedad y temperatura a las que fueron sometidas las probetas. La caracterización de los pellets en cuanto a sus propiedades físicas y mecánicas se realizó después de un periodo de curado de 28 días.



Figura N°13: Aspecto de los pellets al regreso a cámara.

4.3.4 Caracterización de los áridos

Al término del periodo de curado los pellets son retirados de la cámara húmeda para someterlos a las distintas evaluaciones de caracterización.

Las partículas gruesas obtenidas (pellets) son de forma cilíndrica achatada, sin grietas y de una consistencia bastante firme que permite su manipulación sin desprendimiento de polvo.

La caracterización de este árido se basó principalmente en tres ensayos:

- Tamaño medio de partículas.
- Densidades y absorción según la norma NCh 1117. E 01.77.
- Densidad aparente según la norma NCh 1116 Of. 77.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en las distintas etapas del estudio, tanto de las observaciones realizadas durante los ensayos preliminares como de los de caracterización del árido obtenido.

5.1 Ensayo de estabilidad dimensional

El análisis del comportamiento de las mezclas de ceniza y puzolana se resume en los puntos realizados conforme a la norma española ENV-459 Parte 1 y 2 como sigue a continuación:

- Ninguna de las “galletas” presentó grietas de carácter expansivo, las cuales se caracterizan por su similitud con las escamas de un pez, fenómeno también denominado “craqueleo”. Según lo anterior la norma española considera que estas mezclas “pasan” la prueba de expansión en condiciones de horno.
- Solamente la mezcla correspondiente a 100% de cenizas FBC presentó grietas de retracción, lo cual corresponde a un comportamiento típico en procesos acelerados como secados al horno.
- Las mezclas, en general, no presentaron variaciones volumétricas. Esto quiere decir que gran parte del agua de amasado se combinó químicamente en el proceso de hidratación, el cual corresponde al comportamiento típico de mezclas cal/sílice.
- Mientras mayor era la adición de puzolana en la mezcla, mayor era la cantidad de agua necesaria para llegar a una consistencia tal que permitiera obtener una pasta trabajable. A su vez, el color iba aclarándose desde un gris acero (100% de ceniza

FBC) hasta uno gris claro (50% de ceniza FBC) tal como se observa en la Figura N°14.

- Frente a pruebas mecánicas de rayado y trituración se observó que existían diferencias en la dureza de las probetas con distintas dosificaciones de material puzolánico. En este último punto sólo se observó una pequeña diferencia en la galleta con 50% de adición de material puzolánico, la cual se consideró más dura que el resto. Con respecto a las demás las diferencias eran poco significativas.



Mezcla G0



Mezcla G5



Mezcla G10



Mezcla G20



Mezcla G30



Mezcla G40



Mezcla G50

Figura N°14: Comparación de comportamiento frente al ensayo de estabilidad volumétrica de secado al horno.

5.2 Determinación del tamaño de las partículas mediante método láser

La determinación del tamaño de las partículas de las cenizas de combustión de lecho fluidizado se realizó mediante un método láser. Además, se determinó el valor de superficie específica de estas cenizas mediante un método Blaine.

El Aparato *Blaine* se utiliza corrientemente para estimar la finura del cemento *Portland* de acuerdo con las normas ASTM y AASHTO. La finura de partículas se mide en términos de la superficie específica expresada como área total en centímetros cuadrados por gramo para una muestra representativa del material.

La distribución del tamaño de las partículas se observa en la Tabla N°9 y Figura N°15.

Tabla N°9: Distribución del tamaño de partículas de las cenizas.

Rango tamaño de partícula (μm)	Volumen (%)
0- 5	8,22
5 - 25	32,06
25 - 60	32,23
60 - 315	25,51

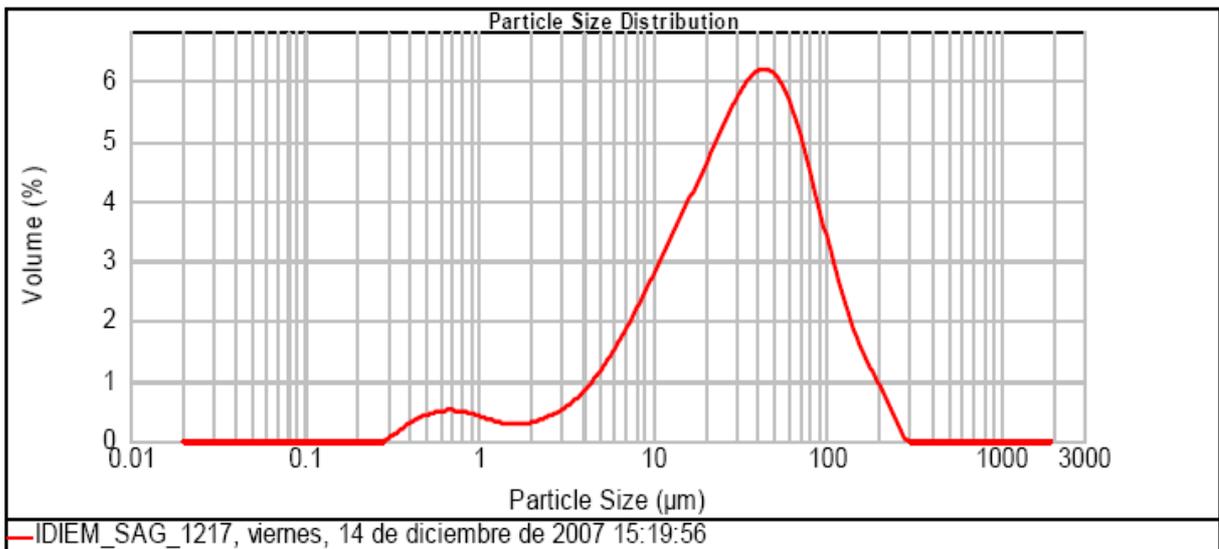


Figura N°15: Distribución del tamaño de las partículas de cenizas FBC mediante método láser.

Como puede observarse en el Anexo A, más del 50% del volumen de las partículas se encuentran en un rango de tamaño que va desde 20 μm a 70 μm .

5.3 Difracción de rayos X

El análisis por difracción de rayos X realizado a muestras de las cenizas de combustión de lecho fluidizado de la Planta Petropower S.A. se muestra en la siguiente tabla:

Tabla N°10: Identificación cualitativa de sustancias cristalinas en la muestra por análisis de difracción de rayos X.

Nombre del compuesto	Fórmula del compuesto
Sulfato de Calcio	CaSO ₄
Oxido de Cal	CaO
Carbonato de Calcio	CaCO ₃

5.4 Ensayo a compresión de las probetas

Como se mencionó anteriormente las probetas obtenidas a partir de las diferentes mezclas fueron ensayadas a compresión con una velocidad de ensayo de 10 mm/min.

Para obtener un valor representativo de las cargas de rotura y por lo tanto también de las tensiones, se adoptó el criterio de tomar el promedio de las tres resistencias obtenidas para las tres dosificaciones de agua y también el promedio de las tres dosificaciones de agua. Los valores de las resistencias obtenidos para cada probeta se encuentran en el Anexo C. Estos valores están representados como promedio para cada una de las tres dosificaciones de agua como se muestra en la Tabla N°8 del capítulo anterior. Los valores fueron ajustados por medio de un análisis estadístico desarrollado en el Capítulo 6.

En la Tabla N°11 se presentan los promedios de los valores de resistencia a compresión obtenidos para las distintas series de ensayos.

Tabla N°11: Resistencia a compresión.

Serie	P/C (%)	A/(P+C) (%)	Tensión de rotura (kgf/cm ²) 7 d	Tensión de rotura (kgf/cm ²) 28 d
M0	0	49,6	12,9	41,0
M10	10	46,2	11,5	65,9
M20	20	44,1	7,5	55,6
M30	30	39,7	20,6	84,6
M40	40	39,7	25,7	114,5
M50	50	37,6	45,3	142,7
M60	60	38,2	77,0	193,8
M70	70	37,0	48,5	210,4
M80	80	38,6	42,8	93,2
M90	90	37,9	35,9	37,0

Las cargas de rotura de los prismas obtenidas a las edades de 7 y 28 días se observan en los gráficos que siguen a continuación:

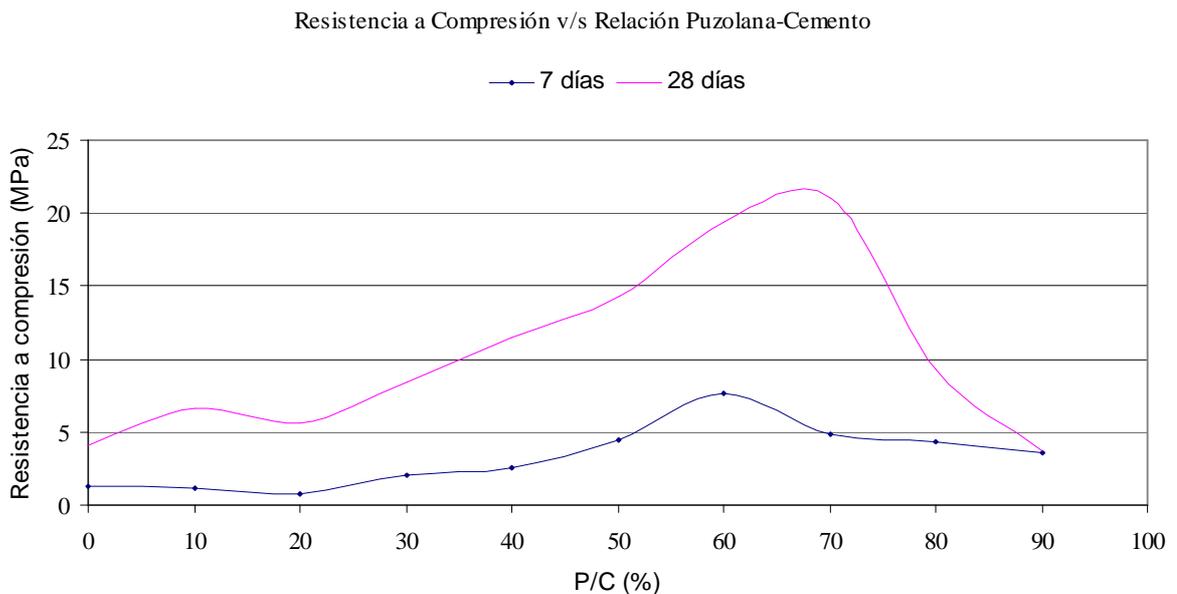


Figura N°16: Resistencia a compresión en función de la razón P/C a 7 y 28 días de curado.

En la Figura N°16 se puede apreciar claramente que existe una relación P/C óptima con la que se obtiene la máxima resistencia a la compresión en las probetas confeccionadas con la mezcla.

5.5 Densidades y absorción

Estos ensayos fueron realizados según norma NCh 1116 Of. 77. y NCh 1117. E 01.77.

Tabla N°12: Tabla de resultados de los ensayos de densidad y absorción.

Ensayo	Resultados
Densidad real sss, g/cm ³	1,81
Densidad real seco, g/cm ³	1,42
Densidad neta, g/cm ³	2,33
Absorción de agua, %	27,3
Densidad aparente suelta final	0,74
Densidad aparente compactada final	0,85

CAPÍTULO 6

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente Capítulo se muestra el análisis de los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación., proporcionando características e información fundamentales tanto del árido sintético confeccionado como de las materias primas que lo componen.

6.1 Generalidades

Con el resultado obtenido del ensayo de la “galleta” se pudo comprobar que este material, en distintas dosificaciones de puzolana, no tiene ningún tipo de reacción expansiva, reacciones que son muy desfavorables en materiales de construcción, pues las reacciones de este tipo suelen ser mayores que las resistencias de tracción del material, fracturándolo y haciendo más rápido su deterioro. Además, cabe destacar que tuvo un muy buen comportamiento en cuanto a la retracción, ya que a pesar de que estuvo expuesto a altas temperaturas dentro del horno mantuvo intacto su volumen.

Si tomamos este material (con y sin dosificación de puzolana) como árido del hormigón y tuviese reacción expansiva, ésta tendría lugar muy intensamente en pocos puntos del hormigón, heterogéneamente repartidos en la masa de éste, manifestándose los efectos con carácter anisotrópico; en tales condiciones el hormigón no resiste las fuertes tensiones internas que se crean localmente. En cambio, si tomamos esta mezcla como componente del cemento y a la finura de éste, el material puzolánico presenta una gran superficie de reacción, la cual se encuentra uniformemente repartida en toda la masa del hormigón y, por lo tanto, la reacción expansiva tiene lugar muy extensamente en muchísimos puntos, si bien con poquísima intensidad en cada uno de ellos, y además se manifiesta con carácter isotrópico; en tales condiciones el hormigón es capaz de resistir mejor los esfuerzos internos que se producen, y en todo caso los deterioros causados por la expansión son mínimos.

La superficie específica mediante método Blaine, correspondiente a la medida de la finura de materiales en polvo expresada usualmente como superficie por unidad de masa (m^2/kg), y determinada con el aparato de Blaine según norma chilena NCh159, arrojó como resultado que la finura de esta ceniza es de $0,669 \text{ m}^2/\text{g}$ y está por sobre la del cemento *Portland* ordinario ($0,250\text{-}0,300 \text{ m}^2/\text{g}$).

El grado de finura del cemento tiene efectos ambivalentes en el concreto. Al aumentar la finura el cemento se hidrata y adquiere resistencia con más rapidez, y también se manifiesta mayor disposición en sus partículas para mantenerse en suspensión en la pasta recién mezclada, lo cual es ventajoso para la cohesión, manejabilidad y capacidad de retención de agua en las mezclas de concreto. Como contrapartida, una finura más alta representa mayor velocidad en la generación de calor y mayor demanda de agua de mezclado en el concreto, cuyas consecuencias son indeseables porque se traducen en mayores cambios volumétricos en el concreto y posible agrietamiento en las estructuras.

En el difractograma que arrojó el ensayo de difracción de rayos X se pueden observar las sustancias típicas que se obtienen en cada una de las etapas o reacciones que ocurren en el proceso de combustión de lecho fluidizado con el *Petcoke* y la adición de cal.

El sulfato de calcio (CaSO_4), sustancia resultante del proceso de sulfatación, corresponde al compuesto más presente en las cenizas. Esto significa que la mayor parte de la calcita se calcinó absorbiendo el azufre presente en el *Petcoke*.

Por otra parte, el segundo compuesto más presente en las cenizas corresponde al óxido de calcio. Esta sustancia, si bien puede venir directamente de la roca calcárea, también es producida en el proceso de la calcinación de la calcita pero que no llegó a una reacción de sulfatación.

Finalmente, en menor proporción, se encuentra la propia calcita o carbonato de calcio (CaCO_3), la cual no se calcinó probablemente por las bajas temperaturas características de este proceso de combustión.

En los gráficos de resistencia versus dosificación puzolánica, obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión de las probetas, se puede observar claramente, tanto en el de 7 como

en el de 28 días de edad, que existe una dosificación óptima con la que se obtiene la resistencia máxima de la mezcla. La resistencia máxima a los 28 días ocurre para una dosificación puzolánica del 70%, mientras que, si lo que interesa es una mayor resistencia inicial, la resistencia máxima a los 7 días ocurre para una dosificación puzolánica del 60%. Luego, los pellets fueron confeccionados con una mezcla con una dosificación puzolánica del 70% y 30% de cenizas de combustión de lecho fluidizado.

Las probetas cúbicas confeccionadas con esta dosificación de cenizas y puzolana arrojaron una resistencia de 21,0 MPa con lo cual, según la clasificación de áridos livianos del ACI 213R-87 indicada en el Capítulo 2, estaríamos en presencia de un árido adecuado para hormigones livianos estructurales.

Debido a los resultados obtenidos en los ensayos de densidades y tomando en cuenta la definición de árido liviano para hormigón estructural que entrega la norma ACI 213R-87, se puede decir que este árido artificial es clasificado como árido liviano para hormigón estructural.

Finalmente, con respecto a la granulometría del árido confeccionado no fue necesario realizarla, pues los pellets confeccionados eran más bien de tamaño uniforme con un tamaño máximo nominal de $D_n = 1''$ (25 mm).

6.2 Análisis estadístico

Durante el desarrollo de esta investigación se realizó un análisis estadístico de los datos obtenidos en los ensayos de resistencia a compresión, con el fin de obtener conclusiones válidas basadas en dicho análisis. De esta manera, se posee una apreciación numérica como base a la explicación y comparación de los diferentes comportamientos de la mezcla según sea la relación P/C.

6.2.1 Valores dispersos

En forma previa a determinar los valores medios de las cargas de rotura de las muestras obtenidas de las series con dosificación de puzolana se identificaron los valores dispersos correspondientes a cada una de las series.

A continuación se muestran las tablas para la obtención de los valores dispersos de las series para las tres dosificaciones de agua a los 7 y 28 días posteriores a la confección de las probetas. Esto, con el objetivo de identificar los valores dispersos y anómalos para obtener las medias muestrales mediante un método estadístico.

El método de discriminación de datos anómalos y dispersos consiste en determinar valores referenciales a partir de los cuartiles de las series con el fin de eliminar datos que se posicionen fuera de estas referencias.

Tabla N°13: Tabla del primer y tercer cuartil de los valores de carga de rotura a los 7 días.

Serie	Primer Cuartil Q1	Tercer Cuartil Q3	RI
M0A	72,4	82,7	10,4
M0B	81,3	90,8	9,5
M0C	82,0	91,0	9,0
M10A	48,0	56,9	8,9
M10B	65,0	77,6	12,6
M10C	97,0	107,0	10,0
M20A	38,0	54,2	16,2
M20B	36,2	53,2	17,0
M20C	50,4	55,7	5,3
M30A	84,3	89,9	5,6
M30B	124,9	136,6	11,8
M30C	175,4	188,4	13,0
M40A	101,5	110,5	8,9
M40B	161,0	182,1	21,1
M40C	208,1	224,9	16,8
M50A	191,5	207,2	15,7
M50B	245,7	286,2	40,5
M50C	398,8	438,5	39,7
M60A	414,5	431,5	17,0
M60B	499,5	522,5	23,0
M60C	544,0	566,5	22,5
M70A	284,0	290,0	6,0
M70B	312,0	328,0	16,0
M70C	329,0	339,5	10,5
M80A	193,0	198,0	5,0
M80B	264,0	285,5	21,5
M80C	352,5	358,0	5,5
M90A	151,0	165,0	14,0
M90B	226,5	241,0	14,5
M90C	296,5	309,5	13,0

Tabla N° 14: Tabla del primer y tercer cuartil de los valores de carga de rotura a los 28 días.

Serie	Primer cuartil	Tercer cuartil	RI
M0A	175,3	207,2	31,9
M0B	233,2	274,9	41,7
M0C	313,5	362,2	48,7
M10A	302,4	366,9	64,5
M10B	357,2	417,8	60,6
M10C	503,7	564,2	60,5
M20A	301,1	341,7	40,7
M20B	317,4	364,9	47,5
M20C	382,0	426,9	44,9
M30A	390,0	428,5	38,5
M30B	442,7	590,5	147,8
M30C	690,0	740,0	50,0
M40A	605,0	660,0	55,0
M40B	750,0	800,0	50,0
M40C	790,0	860,0	70,0
M50A	700,0	772,5	72,5
M50B	890,0	960,0	70,0
M50C	1060,0	1130,0	70,0
M60A	990,0	1120,0	130,0
M60B	1135,0	1290,0	155,0
M60C	1395,0	1560,0	165,0
M70A	1102,5	1217,5	115,0
M70B	1305,0	1375,0	70,0
M70C	1520,0	1645,0	125,0
M80A	410,0	480,0	70,0
M80B	510,0	561,0	51,0
M80C	777,0	895,0	118,0
M90A	151,5	180,3	28,8
M90B	259,5	287,5	28,0
M90C	270,5	287,0	16,5

Tabla N°15: Tabla de niveles de referencia para datos dispersos a los 7 días.

Serie	Ref 1	Ref 2	Ref 3	Ref 4
M0A	41,3	56,8	98,3	113,9
M0B	52,9	67,1	105,0	119,2
M0C	54,9	68,5	104,6	118,1
M10A	21,3	34,6	70,2	83,5
M10B	27,3	46,1	96,5	115,4
M10C	66,9	81,9	122,0	137,0
M20A	-10,6	13,7	78,4	102,7
M20B	-14,8	10,7	78,7	104,2
M20C	34,5	42,4	63,6	71,6
M30A	67,4	75,8	98,4	106,8
M30B	89,6	107,2	154,2	171,9
M30C	136,4	155,9	207,9	227,3
M40A	74,8	88,1	123,8	137,2
M40B	97,6	129,3	213,8	245,5
M40C	157,6	182,8	250,2	275,4
M50A	144,4	168,0	230,8	254,4
M50B	124,2	185,0	347,0	407,8
M50C	279,8	339,3	498,0	557,5
M60A	363,5	389,0	457,0	482,5
M60B	430,5	465,0	557,0	591,5
M60C	476,5	510,3	600,3	634,0
M70A	266,0	275,0	299,0	308,0
M70B	264,0	288,0	352,0	376,0
M70C	297,5	313,3	355,3	371,0
M80A	178,0	185,5	205,5	213,0
M80B	199,5	231,8	317,8	350,0
M80C	336,0	344,3	366,3	374,5
M90A	109,0	130,0	186,0	207,0
M90B	183,0	204,8	262,8	284,5
M90C	257,5	277,0	329,0	348,5

Tabla N°16: Tabla de niveles de referencia para datos dispersos a los 28 días.

Serie	Ref 1	Ref 2	Ref 3	Ref 4
M0A	79,6	127,4	255,0	302,8
M0B	107,9	170,5	337,5	400,2
M0C	167,3	240,4	435,4	508,5
M10A	108,8	205,6	463,7	560,5
M10B	175,3	266,2	508,8	599,7
M10C	322,3	413,0	654,9	745,7
M20A	179,1	240,1	402,7	463,7
M20B	174,7	246,0	436,2	507,5
M20C	247,2	314,6	494,2	561,6
M30A	274,6	332,3	486,2	543,8
M30B	-0,7	221,0	812,1	1033,8
M30C	540,0	615,0	815,0	890,0
M40A	440,0	522,5	742,5	825,0
M40B	600,0	675,0	875,0	950,0
M40C	580,0	685,0	965,0	1070,0
M50A	482,5	591,3	881,3	990,0
M50B	680,0	785,0	1065,0	1170,0
M50C	850,0	955,0	1235,0	1340,0
M60A	600,0	795,0	1315,0	1510,0
M60B	670,0	902,5	1522,5	1755,0
M60C	900,0	1147,5	1807,5	2055,0
M70A	757,5	930,0	1390,0	1562,5
M70B	1095,0	1200,0	1480,0	1585,0
M70C	1145,0	1332,5	1832,5	2020,0
M80A	200,0	305,0	585,0	690,0
M80B	357,0	433,5	637,5	714,0
M80C	423,0	600,0	1072,0	1249,0
M90A	65,3	108,4	223,4	266,5
M90B	175,5	217,5	329,5	371,5
M90C	221,0	245,8	311,8	336,5

6.2.2 Valores medios y desviaciones

Una vez definidas las referencias, se determinaron los valores dispersos y anómalos de las series. Luego, los valores máximos y mínimos fueron corregidos según correspondiera siendo reemplazados por los valores en negrita, datos inmediatamente mayores (menores) que las referencias determinadas. Los valores originales asociados a las lecturas se encuentran en la tabla del Anexo C.

Tabla N°17: Valores medios y desviaciones de las series a los 7 días.

Serie	Máximo	Mínimo	Media muestral	Desviación	Coefficiente de variación
M0A	93	59,9	77,0	8,3	0,107
M0B	99	67,4	85,5	7,6	0,089
M0C	98,5	72	87,7	8,0	0,092
M10A	68,6	36	50,7	10,1	0,200
M10B	86,0	58,5	71,0	7,9	0,111
M10C	116,0	84,4	101,1	8,7	0,086
M20A	64,8	25,2	45,4	10,8	0,237
M20B	63,5	24,4	46,1	10,6	0,231
M20C	61,7	45,2	53,3	4,6	0,087
M30A	95	80,7	87,0	4,1	0,048
M30B	149,2	107,5	129,9	9,7	0,074
M30C	199,8	160,9	182,5	10,0	0,055
M40A	121,0	90,0	106,7	7,1	0,067
M40B	196,0	145,7	172,6	13,1	0,076
M40C	241,1	197	217,9	10,9	0,050
M50A	227,5	172,7	198,1	11,7	0,059
M50B	308,3	222,0	263,5	27,0	0,102
M50C	471,4	363,7	414,5	28,0	0,068
M60A	435	404	422,4	10,4	0,025
M60B	541,0	495,0	513,6	15,2	0,030
M60C	575,0	520,0	555,2	18,6	0,033
M70A	293,0	282	288,7	3,4	0,012
M70B	346	295,0	319,4	13,8	0,043
M70C	341	315,0	331,0	9,0	0,027
M80A	203	192	195,9	3,7	0,019
M80B	317,0	255,0	277,4	17,4	0,063
M80C	361,0	347,0	355,0	4,3	0,012
M90A	176,0	145,0	158,9	9,3	0,059
M90B	246,0	224,0	234,1	7,9	0,034
M90C	320	277,0	301,2	11,7	0,039

Tabla N°18: Valores medios y desviaciones de las series a los 28 días.

Serie	Máximo	Mínimo	Media muestral	Desviación	Coefficiente de Variación
M0A	238	144	195,6	31,3	0,160
M0B	297	179	252,2	30,4	0,121
M0C	427	290	346,0	44,2	0,128
M10A	462	265	355,3	55,2	0,155
M10B	478	326	390,9	45,9	0,117
M10C	647	452	529,4	54,8	0,104
M20A	400	269	329,0	34,9	0,106
M20B	406	300	343,0	28,2	0,082
M20C	456	360	403,9	29,3	0,073
M30A	442	380	409,2	21,8	0,053
M30B	653	380	512,1	85,8	0,168
M30C	810	630	716,7	47,3	0,066
M40A	700	590	629,5	41,7	0,066
M40B	830	700	767,1	45,7	0,060
M40C	930	740	820,0	50,7	0,062
M50A	840	610	737,0	61,2	0,083
M50B	1020	790	927,6	73,3	0,079
M50C	1020	1020	1097,1	52,0	0,047
M60A	1210	950	1050,0	87,1	0,083
M60B	1350	1020	1209,1	105,2	0,087
M60C	1750	1240	1490,9	140,3	0,094
M70A	1240	1010	1153,0	82,7	0,072
M70B	1400	1250	1336,4	92,5	0,069
M70C	1700	1420	1582,7	93,9	0,059
M80A	493	337	440,0	52,2	0,119
M80B	578	461	530,2	39,0	0,074
M80C	959	600	834,5	102,2	0,122
M90A	210	137	169,0	25,0	0,148
M90B	309	229	270,5	25,4	0,094
M90C	294	262	276,0	15,7	0,057

6.2.3 Distribución T-Student

Se sabe que para pequeñas muestras ($N < 30$) la aproximación de la distribución normal no es buena y va siendo peor a medida que N disminuye. Es por esto que se utilizó la distribución de T-Student, puesto que a través de ella se pudo determinar adecuadamente, dentro de unos determinados límites de confianza, la media de la población.

Se determinó un nivel de confianza de un 95% para el intervalo de la media de los valores de resistencia a la compresión para 7 y 28 días. Los límites de tales intervalos se muestran en la Tabla N°19 y Tabla N° 20.

Tabla N°19: Valores para intervalo con un nivel de 95% de confianza de la media poblacional obtenidos con el estadístico t de la distribución de Student a los 7 días.

Serie	Grados de libertad	Estadístico t	Límite inferior	Límite superior
M0A	20	2,09	73,2	80,9
M0B	19	2,09	81,6	89,3
M0C	14	2,14	83,3	92,0
M10A	20	2,09	46,0	55,4
M10B	20	2,09	67,3	74,6
M10C	21	2,08	97,2	105,1
M20A	19	2,09	40,2	50,6
M20B	21	2,08	41,3	50,9
M20C	21	2,08	51,2	55,4
M30A	17	2,11	84,9	89,1
M30B	21	2,08	125,6	134,3
M30C	21	2,08	178,0	187,1
M40A	20	2,09	103,3	110,0
M40B	21	2,08	166,7	178,6
M40C	20	2,09	212,8	223,0
M50A	21	2,08	192,8	203,4
M50B	21	2,08	251,3	275,7
M50C	21	2,08	401,7	427,2
M60A	8	2,31	414,0	430,9
M60B	10	2,23	502,9	524,4
M60C	10	2,23	542,1	568,3
M70A	8	2,31	285,9	291,4
M70B	9	2,26	309,0	329,8
M70C	9	2,26	324,2	337,8
M80A	6	2,45	192,1	199,6
M80B	10	2,23	265,1	289,6
M80C	10	2,23	352,0	358,0
M90A	10	2,23	152,3	165,5
M90B	10	2,23	228,5	239,6
M90C	9	2,26	292,4	310,0

Tabla N°20: Valores para intervalo con un nivel de 95% de confianza de la media poblacional obtenidos con el estadístico t de la distribución de Student a los 28 días.

Serie	Grados de libertad	Estadístico t	Límite inferior	Límite superior
M0A	19	2,09	210,7	180,6
M0B	21	2,08	266,0	238,4
M0C	20	2,09	366,7	325,4
M10A	20	2,09	381,0	329,5
M10B	20	2,09	412,3	369,5
M10C	21	2,08	554,3	504,6
M20A	21	2,08	344,9	313,1
M20B	21	2,08	355,8	330,2
M20C	21	2,08	417,2	390,6
M30A	21	2,08	419,1	399,3
M30B	21	2,08	551,0	473,1
M30C	20	2,09	738,7	694,6
M40A	18	2,10	650,1	608,8
M40B	20	2,09	788,5	745,8
M40C	21	2,08	843,0	797,0
M50A	19	2,09	766,4	707,6
M50B	20	2,09	961,8	893,4
M50C	20	2,09	1121,4	1072,9
M60A	10	2,23	1111,3	988,7
M60B	10	2,23	1283,2	1135,0
M60C	10	2,23	1589,8	1392,0
M70A	9	2,26	1215,4	1090,6
M70B	10	2,23	1401,6	1271,2
M70C	10	2,23	1648,9	1516,5
M80A	12	2,18	472,8	407,2
M80B	10	2,23	557,7	502,7
M80C	10	2,23	906,5	762,4
M90A	7	2,36	191,3	146,7
M90B	10	2,23	288,3	252,6
M90C	10	2,23	287,1	264,9

A continuación en la Tabla N°21 y N°22 se muestra un resumen del análisis estadístico y valores límite corregidos.

Tabla N°21: Datos característicos corregidos para evaluación gráfica a los 7 días.

Serie	Porcentaje de Agua (%)	Media muestral	Límite inferior	Límite superior	Máximo	Mínimo
M0A	53,9	77,0	73,2	80,9	93	59,9
M0B	48,9	85,5	83,3	92,0	99	67,4
M0C	46,0	87,7	81,6	89,3	98,5	72
M10A	48,6	50,7	46,0	55,4	68,6	36
M10B	46,0	71,0	67,3	74,6	86,0	58,5
M10C	44,0	101,1	97,2	105,1	116,0	84,4
M20A	46,2	45,4	40,2	50,6	64,8	25,2
M20B	44,0	46,1	41,3	50,9	63,5	24,4
M20C	42,0	53,3	51,2	55,4	61,7	45,2
M30A	44,7	87,0	84,9	89,1	95	80,7
M30B	40,0	129,9	125,6	134,3	149,2	107,5
M30C	37,0	182,5	178,0	187,1	199,8	160,9
M40A	42,0	106,7	103,3	110,0	121,0	90,0
M40B	40,2	172,6	166,7	178,6	196,0	145,7
M40C	37,0	217,9	212,8	223,0	241,1	197
M50A	40,0	198,1	192,8	203,4	227,5	172,7
M50B	37,7	263,5	251,3	275,7	308,3	222,0
M50C	35,0	414,5	401,7	427,2	471,4	363,7
M60A	41,5	422,4	414,0	430,9	435	404
M60B	38,2	513,6	502,9	524,4	541,0	495,0
M60C	34,9	555,2	542,1	568,3	575,0	520,0
M70A	38,6	288,7	285,9	291,4	293,0	282
M70B	37,0	319,4	309,0	329,8	346	295,0
M70C	35,3	331,0	324,2	337,8	341	315,0
M80A	42,6	195,9	192,1	199,6	203	192
M80B	38,6	277,4	265,1	289,6	317,0	255,0
M80C	34,5	355,0	352,0	358,0	361,0	347,0
M90A	42,7	158,9	152,3	165,5	176,0	145,0
M90B	37,2	234,1	228,5	239,6	246,0	224,0
M90C	33,9	301,2	292,4	310,0	320	277,0

Tabla N°22: Datos característicos corregidos para evaluación gráfica a los 28 días.

Serie	Porcentaje de agua	Media muestral	Límite inferior	Límite superior	Máximo	Mínimo
M0A	53,9	195,6	210,7	180,6	238	144
M0B	48,9	252,2	266,0	238,4	297	179
M0C	46,0	346,0	366,7	325,4	427	290
M10A	48,6	355,3	381,0	329,5	462	265
M10B	46,0	390,9	412,3	369,5	478	326
M10C	44,0	529,4	554,3	504,6	647	452
M20A	46,2	329,0	344,9	313,1	400	269
M20B	44,0	343,0	355,8	330,2	406	300
M20C	42,0	403,9	417,2	390,6	456	360
M30A	44,7	409,2	419,1	399,3	442	380
M30B	40,0	512,1	551,0	473,1	653	380
M30C	37,0	716,7	738,7	694,6	810	630
M40A	42,0	629,5	650,1	608,8	700	590
M40B	40,2	767,1	788,5	745,8	830	700
M40C	37,0	820,0	843,0	797,0	930	740
M50A	40,0	737,0	766,4	707,6	840	610
M50B	37,7	927,6	961,8	893,4	1020	790
M50C	35,0	1097,1	1121,4	1072,9	1020	1020
M60A	41,5	1050,0	1111,3	988,7	1210	950
M60B	38,2	1209,1	1283,2	1135,0	1350	1020
M60C	34,9	1490,9	1589,8	1392,0	1750	1240
M70A	38,6	1153,0	1215,4	1090,6	1240	1010
M70B	37,0	1336,4	1401,6	1271,2	1400	1250
M70C	35,3	1582,7	1648,9	1516,5	1700	1420
M80A	42,6	440,0	472,8	407,2	493	337
M80B	38,6	530,2	557,7	502,7	578	461
M80C	34,5	834,5	906,5	762,4	959	600
M90A	42,7	169,0	191,3	146,7	210	137
M90B	37,2	270,5	288,3	252,6	309	229
M90C	33,9	276,0	287,1	264,9	294	262

Posteriormente se procedió a realizar la evaluación gráfica de los datos obtenidos.

6.3 Resultados de ensayos a compresión

A continuación se presentan las curvas y gráficos correspondientes a los valores medios corregidos de las cargas de rotura obtenidos en los ensayos a compresión de las probetas. Además, se indican los mínimos y máximos de cada serie, y el intervalo de 95% de confianza determinado mediante la distribución estadística T-Student; indicando para ello el límite superior e inferior de cada intervalo.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
0% Puzolana

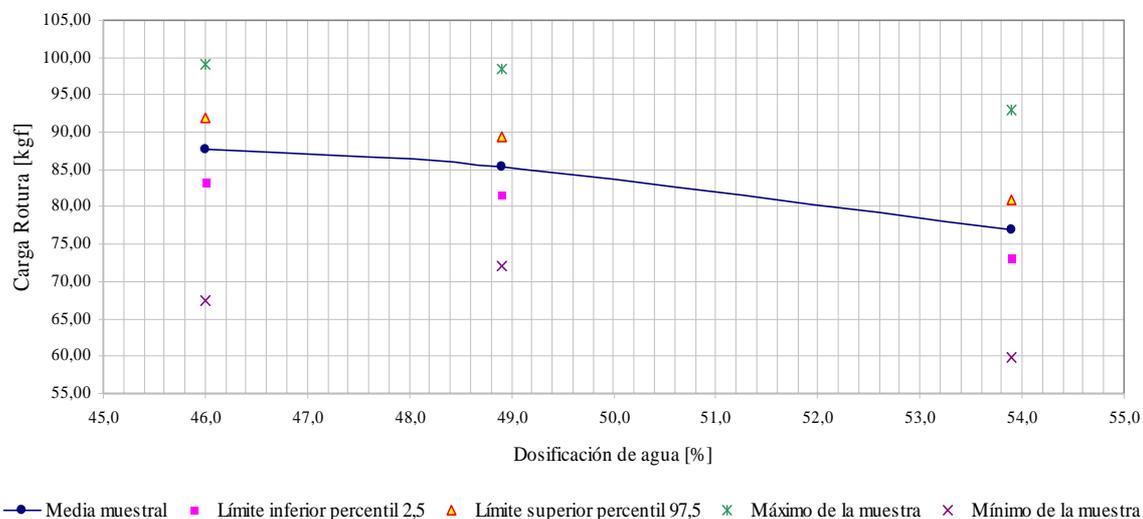


Gráfico N°1: Carga de rotura versus dosificación de agua para 0% de adición puzolánica a 7 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
10% Puzolana

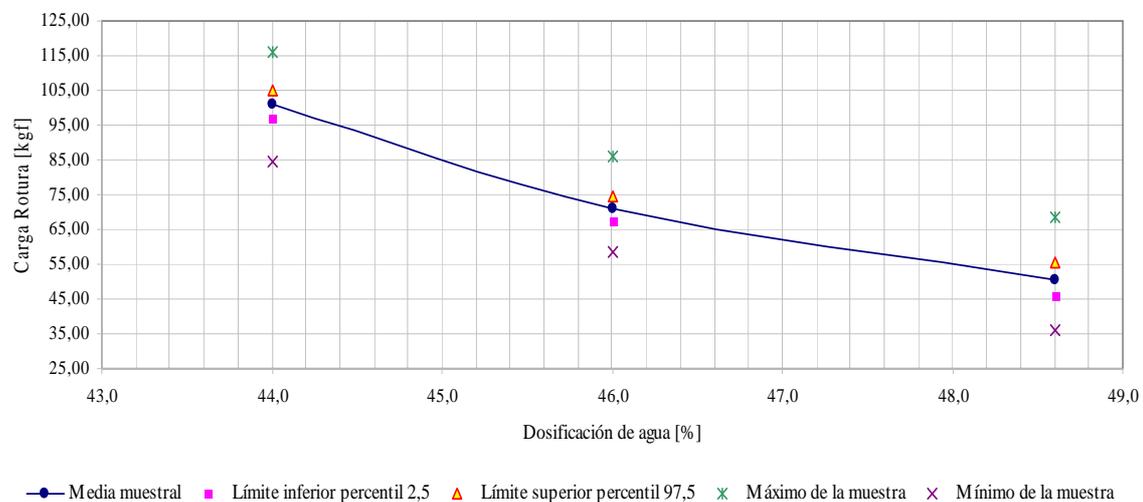
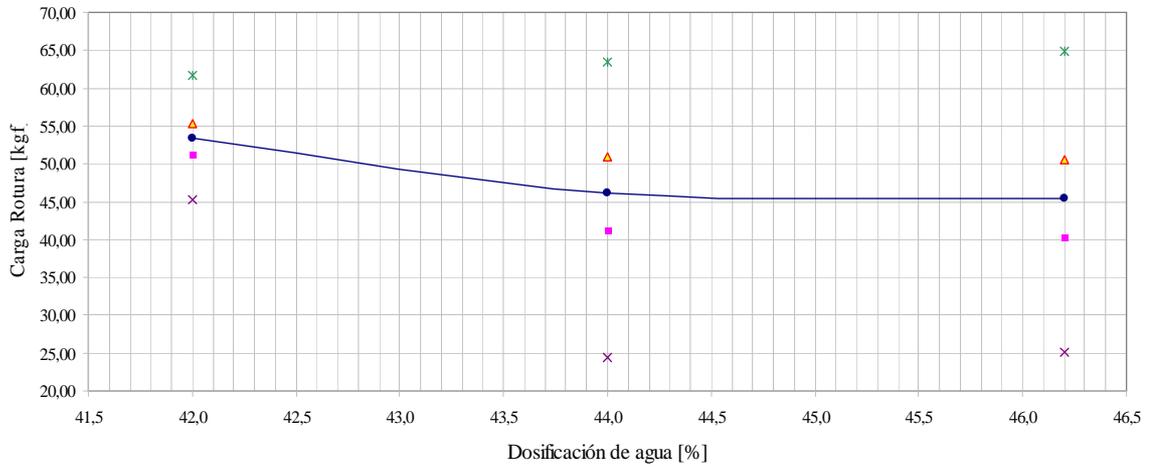


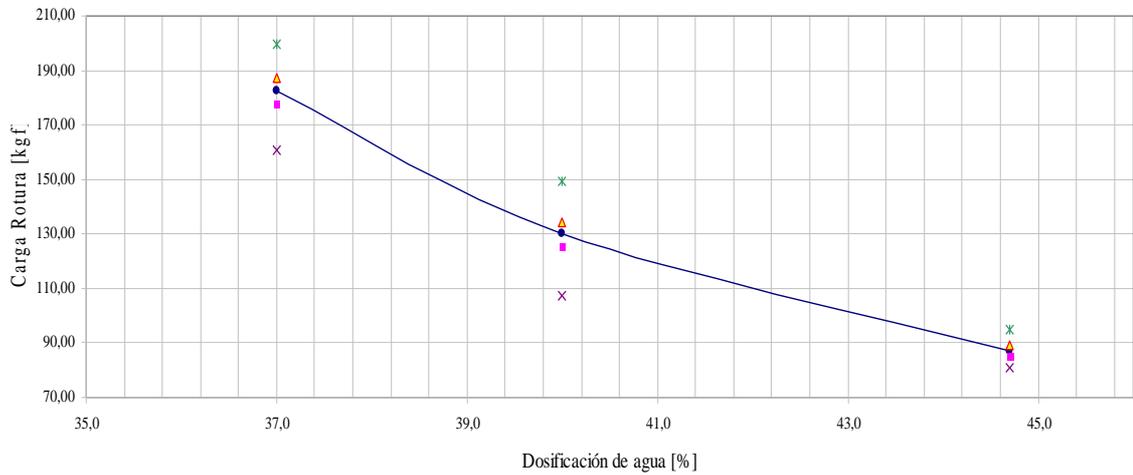
Gráfico N°2: Carga de rotura versus dosificación de agua para 10% de adición puzolánica a 7 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
20% Puzolana



● Media muestral ■ Límite inferior percentil 2,5 ▲ Límite superior percentil 97,5 ✖ Máximo de la muestra ✖ Mínimo de la muestra
Gráfico N°3: Carga de rotura versus dosificación de agua para 20% de adición puzolánica a 7 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
30% Puzolana



● Media muestral ■ Límite inferior percentil 2,5 ▲ Límite superior percentil 97,5 ✖ Máximo de la muestra ✖ Mínimo de la muestra
Gráfico N°4: Carga de rotura versus dosificación de agua para 30% de adición puzolánica a 7 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
40% Puzolana

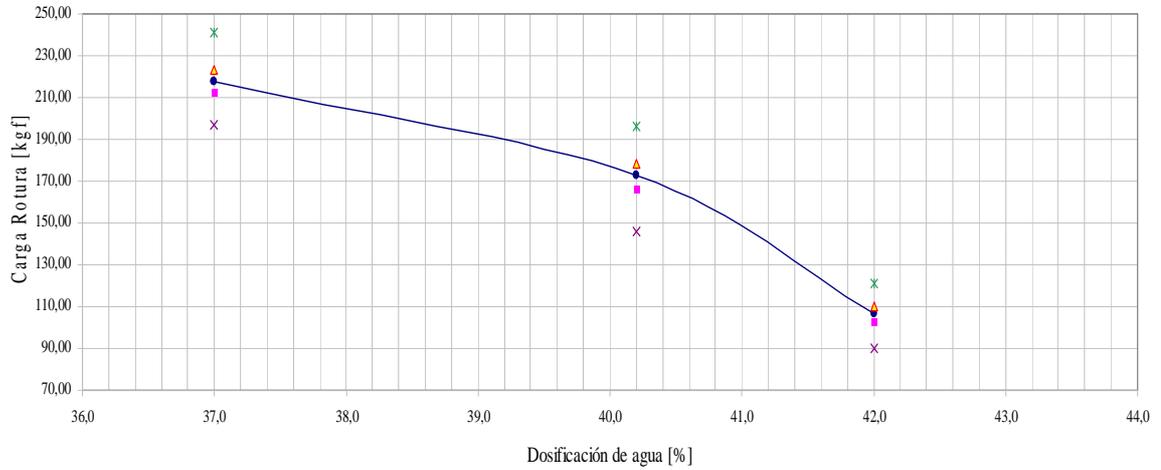


Gráfico N°5: Carga de rotura versus dosificación de agua para 40% de adición puzolánica a 7 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
50% Puzolana

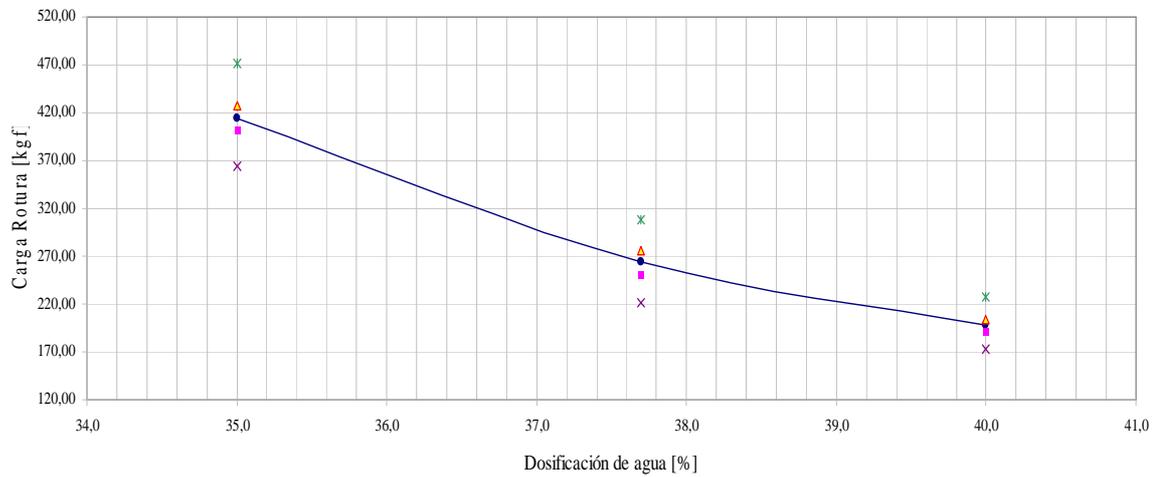


Gráfico N°6: Carga de rotura versus dosificación de agua para 50% de adición puzolánica a 7 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
60% Puzolana

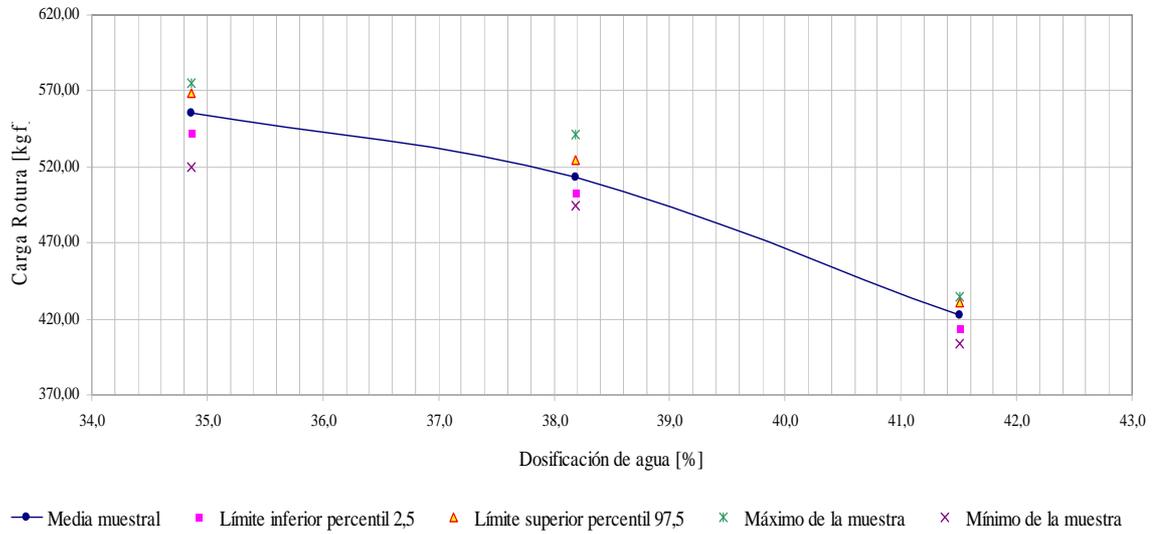


Gráfico N°7: Carga de rotura versus dosificación de agua para 60% de adición puzolánica a 7 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
70% Puzolana

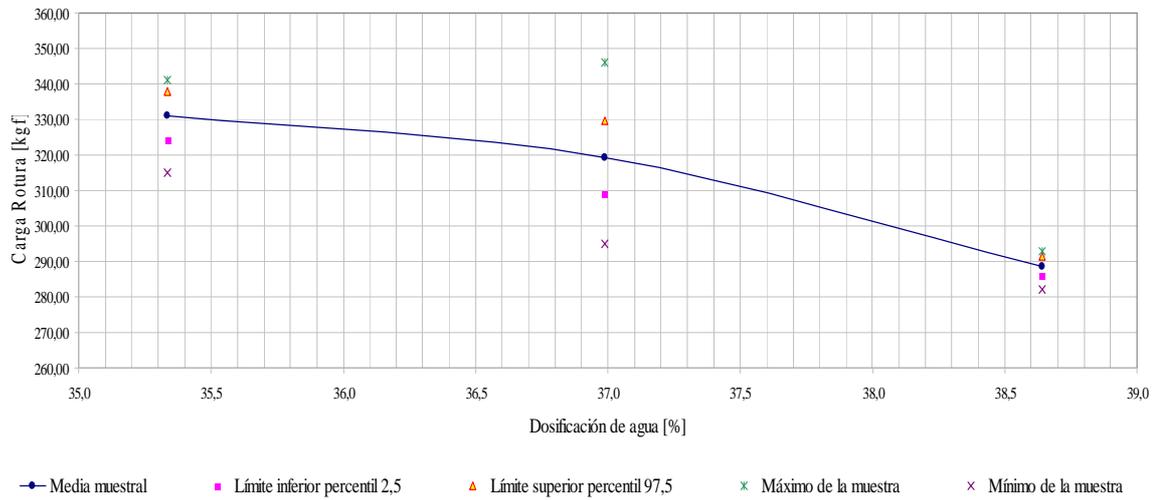


Gráfico N°8: Carga de rotura versus dosificación de agua para 70% de adición puzolánica a 7 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
80% Puzolana

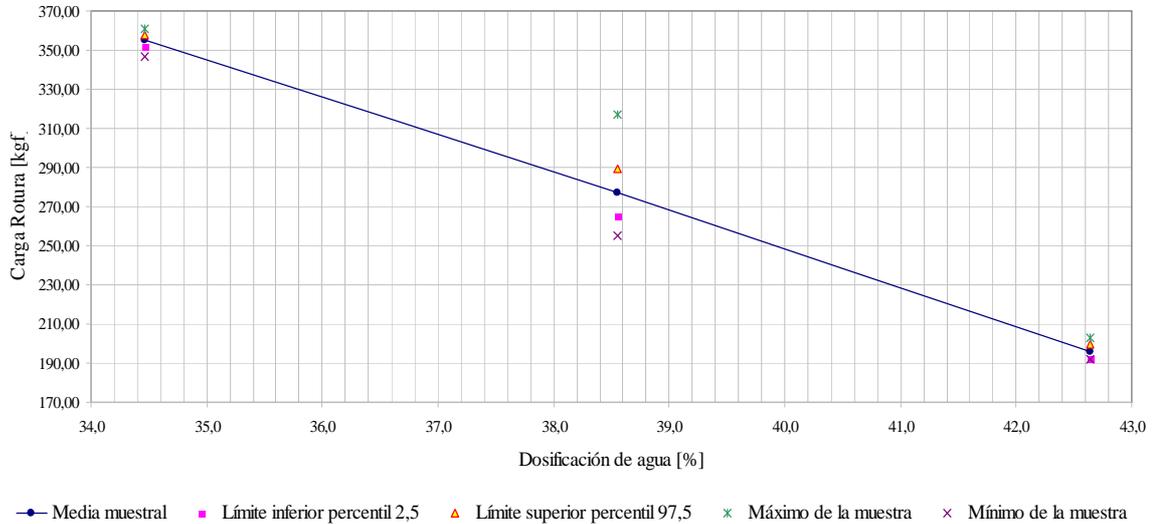


Gráfico N°9: Carga de rotura versus dosificación de agua para 80% de adición puzolánica a 7 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
90% Puzolana

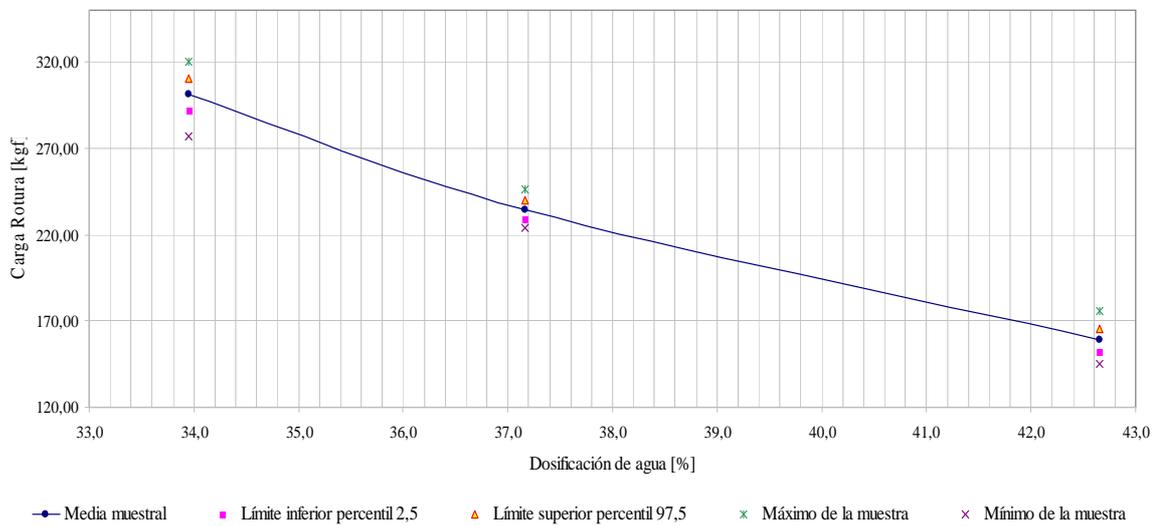


Gráfico N°10: Carga de rotura versus dosificación de agua para 90% de adición puzolánica a 7 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
0% Puzolana

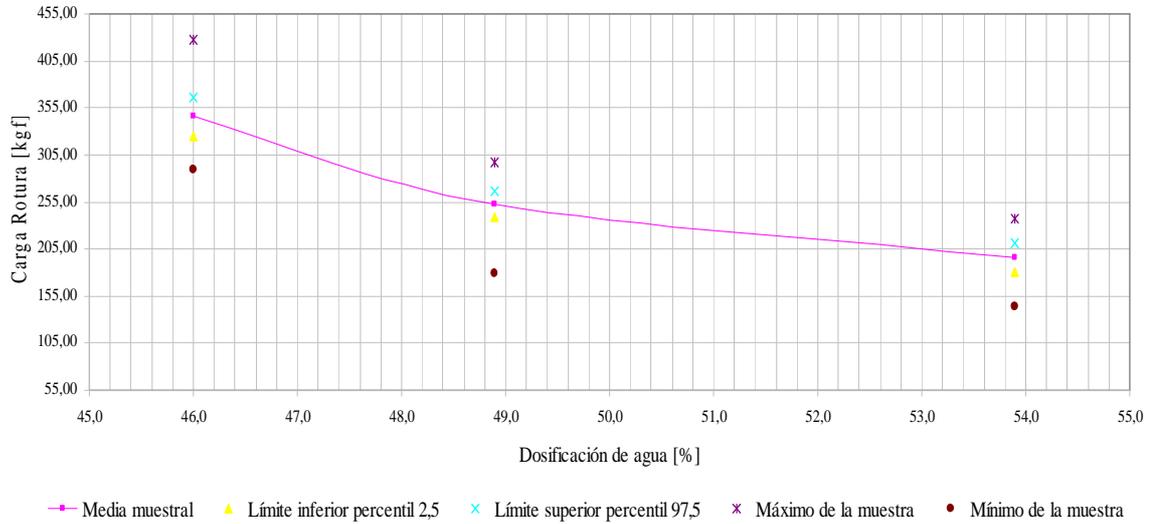


Gráfico N°11: Carga de rotura versus dosificación de agua para 0% de adición puzolánica a 28 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
10% Puzolana

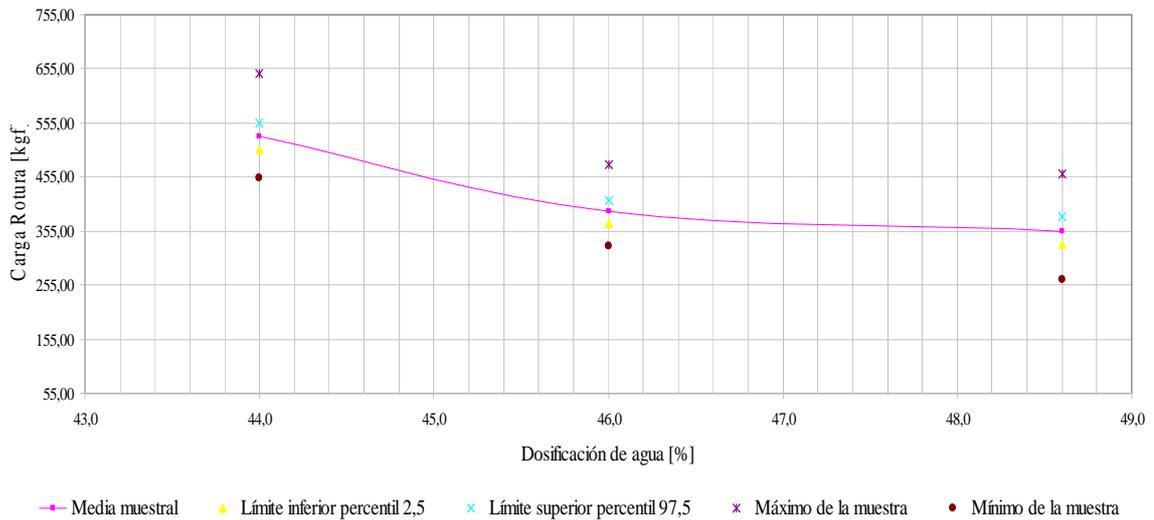


Gráfico N°12: Carga de rotura versus dosificación de agua para 10% de adición puzolánica a 28 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
20% Puzolana

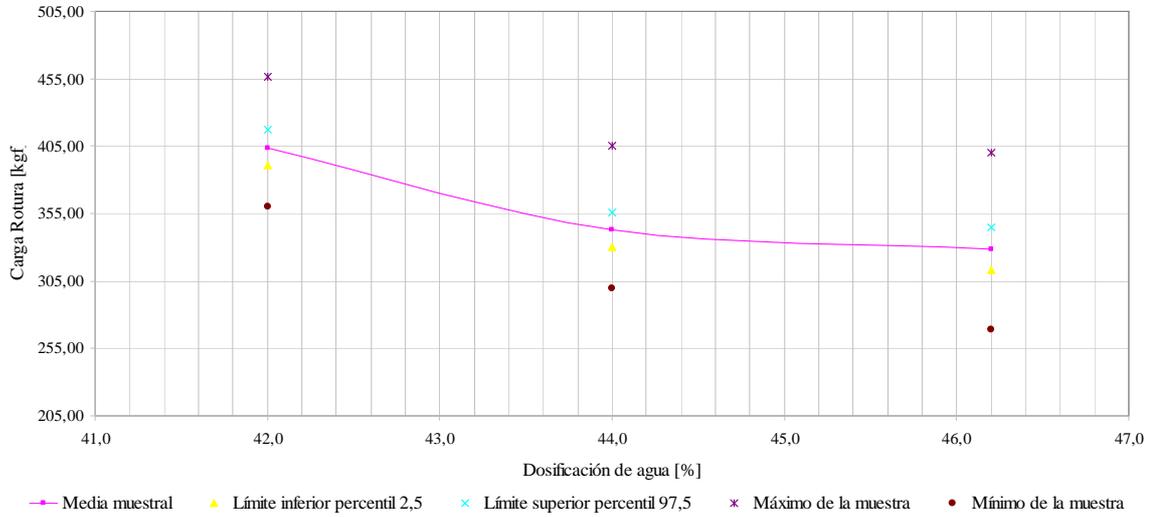


Gráfico N°13: Carga de rotura versus dosificación de agua para 20% de adición puzolánica a 28 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
30% Puzolana

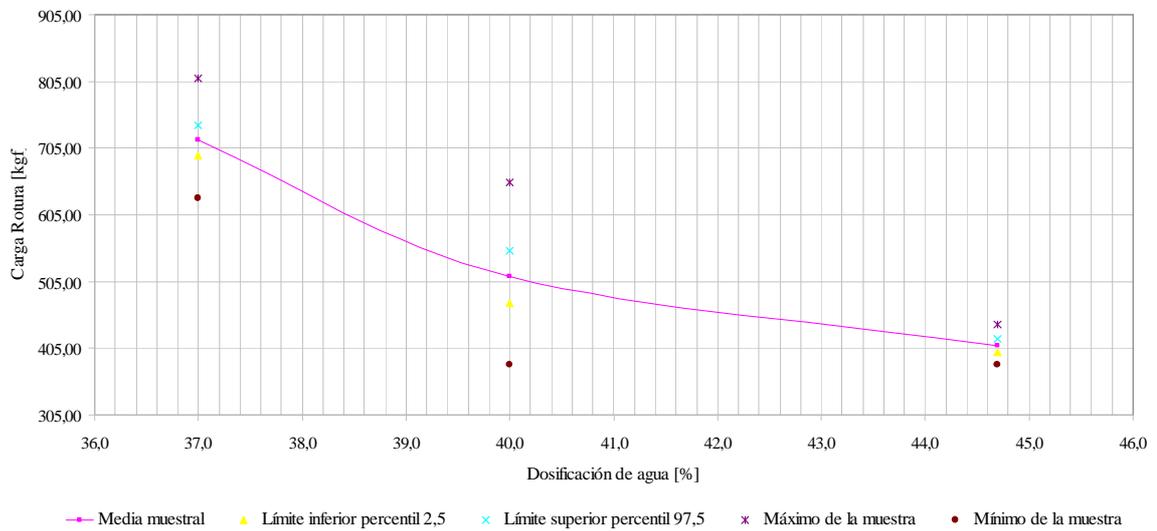


Gráfico N°14: Carga de rotura versus dosificación de agua para 30% de adición puzolánica a 28 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
40% Puzolana

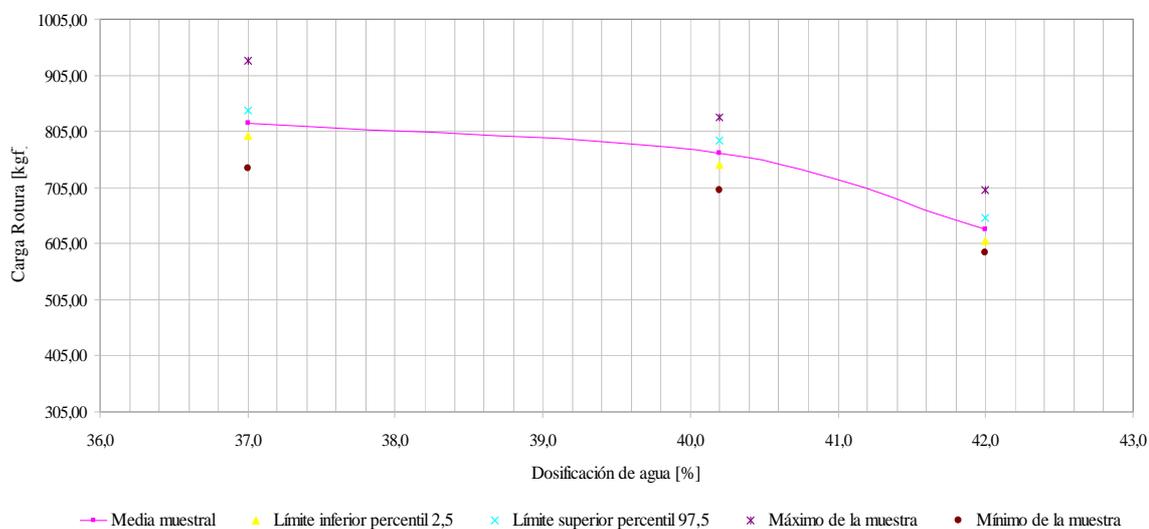


Gráfico N°15: Carga de rotura versus dosificación de agua para 40% de adición puzolánica a 28 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
50% Puzolana

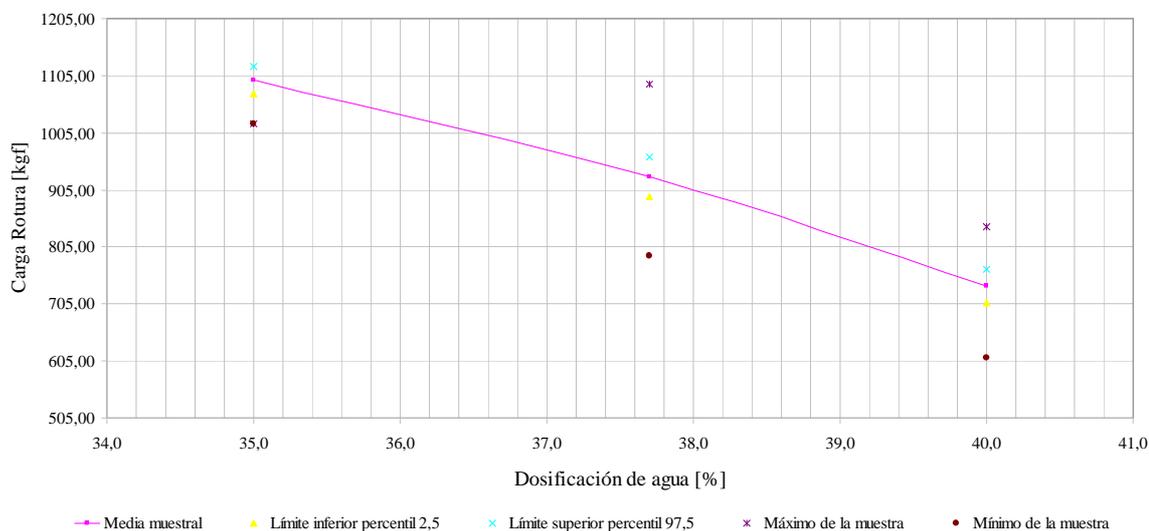


Gráfico N°16: Carga de rotura versus dosificación de agua para 50% de adición puzolánica a 28 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
60% Puzolana

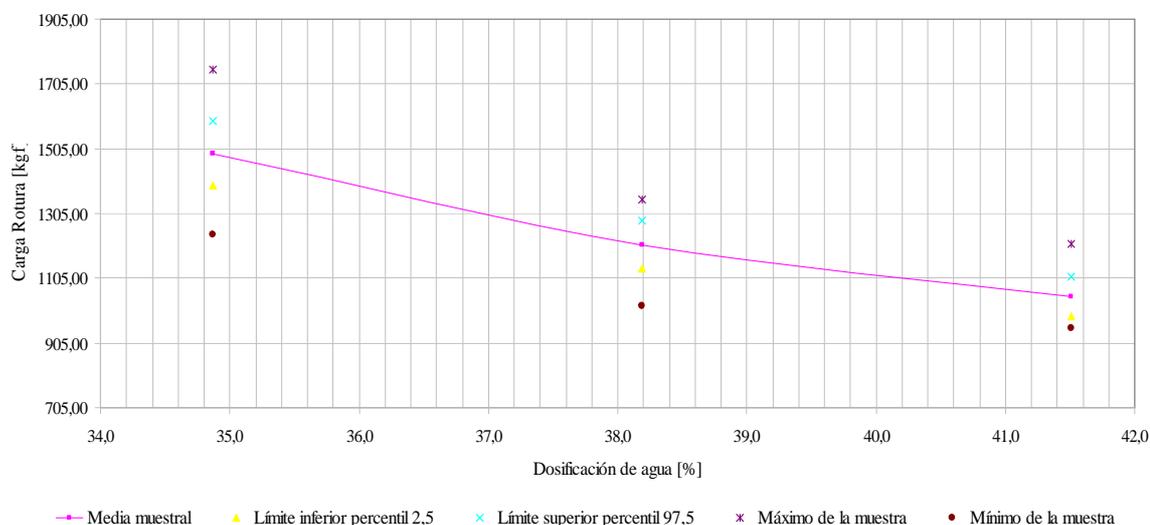


Gráfico N°17: Carga de rotura versus dosificación de agua para 60% de adición puzolánica a 28 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
70% Puzolana

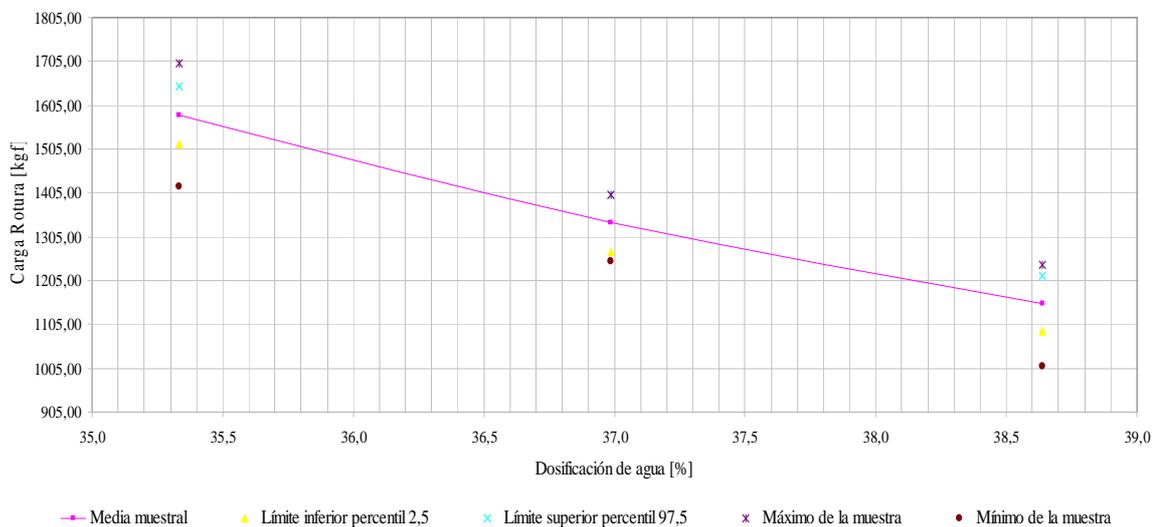


Gráfico N°18: Carga de rotura versus dosificación de agua para 70% de adición puzolánica a 28 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
80% Puzolana

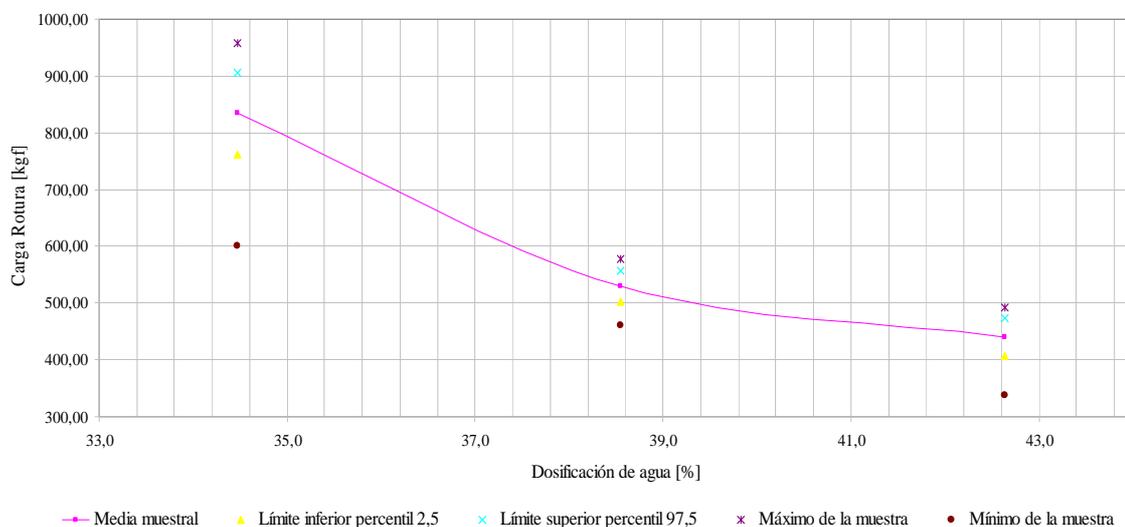


Gráfico N°19: Carga de rotura versus dosificación de agua para 80% de adición puzolánica a 28 días.

Carga Rotura v/s Dosificación de Agua
90% Puzolana

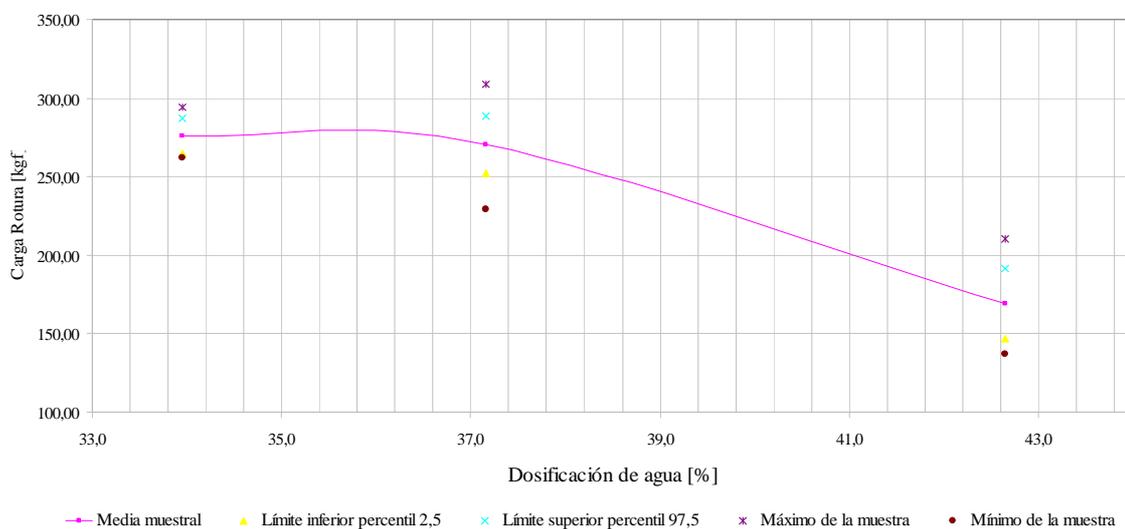


Gráfico N°20: Carga de rotura versus dosificación de agua para 90% de adición puzolánica a 28 días.

Como se puede apreciar en los gráficos anteriores, tanto para 7 y 28 días de edad de las probetas, las pendientes son siempre negativas, vale decir, mientras menor sea el contenido de agua mayor es la resistencia a compresión obtenida.

Tabla N° 23: Pendientes de la línea de tendencia Carga Rotura v/s Dosificación para 7 y 28 días.

Serie	Pendiente 7d	Pendiente 28d
M0	-1,2	-18,2
M10	-10,8	-36,7
M20	-1,9	-17,6
M30	-12,1	-38,3
M40	-21,3	-35,6
M50	-43,6	-71,8
M60	-20,0	-66,3
M70	-12,8	-130,0
M80	-19,5	-48,3
M90	-16,1	-13,0

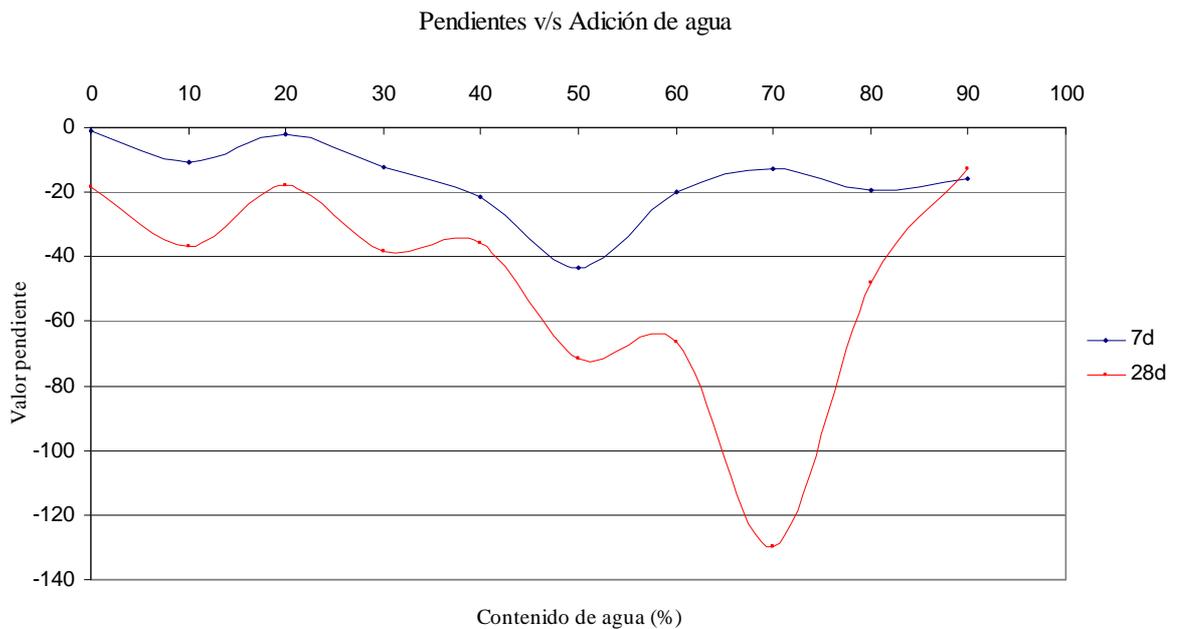


Gráfico N°21: Valores de la pendiente v/s contenido de agua.

La resistencia a compresión máxima a 28 días se aprecia en la Figura N°16 para la mezcla óptima con una relación P/C del 70%. La pendiente en este caso corresponde a la mínima de la serie a 28 días (Gráfico N°21), lo que implica la gran incidencia del contenido de agua en la mezcla. En efecto, la resistencia aumenta un 18.4% con respecto a la dosificación intermedia para esta relación P/C. Por esta razón se concluye que se podría llegar a resistencias mayores con menor demanda de agua.

CAPÍTULO 7

7. DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

Chile es un país en vías de desarrollo que ha logrado un exitoso desempeño económico en las últimas décadas. Este desarrollo, tal como ha sucedido en otros países, ha venido acompañado de fuertes impactos al medioambiente. Un claro ejemplo de este desarrollo corresponde a esta tecnología que utiliza el proceso de combustión de lecho fluidizado. Por lo que, si bien los costos de confección de este pellet pueden ser mayores que en los que incurre la planta cogeneradora para su disposición y tratamiento es inminente que el mejoramiento de la calidad del medioambiente y el bienestar social que trae este proyecto contrarrestan estos costos, además de incentivar el reciclaje y desarrollo sustentable del país.

7.1 Valores obtenidos

7.1.1 Resistencias mecánicas

La resistencia a compresión de la mezcla óptima (21,0 MPa) está por sobre la resistencia mínima exigida a los hormigones livianos estructurales (18,0 MPa). Con este ensayo queda demostrado que la resistencia mecánica de este árido sintético, confeccionado con una mezcla con relación P/C adecuada, es suficiente para cumplir con el requisito de resistencia a la compresión en un hormigón liviano estructural.

7.1.2 Absorción

La absorción de agua determinada en el ensayo indica que el árido confeccionado es capaz de absorber un 27,31% de su peso en agua. Este árido, debido a su alta porosidad, tiene la ventaja de aportar al hormigón liviano estructural aislamiento térmico. En cuanto a la confección del hormigón, es posible que esta característica del árido ayude al curado soltando en forma paulatina la humedad contenida evitando la retracción.

7.1.3 Densidades

Este árido liviano confeccionado en base a cenizas de combustión de lecho fluidizado, con peso específico de 1424,5, cae dentro de la categoría de árido liviano para hormigones estructurales pues, el peso unitario de un hormigón confeccionado con estos agregados es mayor que 800 kg/m³, el cual corresponde al límite entre los hormigones estructurales y los concretos de resistencia moderada.

7.2 Factibilidad

Para determinar de una manera más estricta la factibilidad de utilizar este árido en hormigones livianos estructurales, es necesario determinar la resistencia de los pellets dentro de la matriz del hormigón, ya que la forma, la textura y la estructura interna del pellet hará variar el comportamiento de éste frente a un estado de cargas de compresión.

Si bien el estudio permitió, a grandes rasgos, obtener las características del árido, tales como: composición, absorción, densidades, etc. es necesario evaluar su comportamiento como árido en un hormigón, pues tanto la forma como la textura influyen en la adherencia con el mortero y por lo tanto en la resistencia del hormigón.

En caso de realizar los estudios necesarios y verificar que la composición del pellet se mantiene dentro de ciertos rangos que lo hacen pertenecer a una categoría, es posible ejecutar el mismo proceso de confección del árido pero llevado a escala industrial. Para ello es necesario también realizar un estudio técnico-económico del proceso tomando siempre en cuenta el bienestar que trae consigo la reutilización de este desecho.

CAPÍTULO 8

8. RECOMENDACIONES

Como se mencionó anteriormente, es muy probable que los pellets confeccionados con estas cenizas presenten una resistencia a la compresión significativamente menor que la obtenida en los ensayos a compresión realizados en las probetas cúbicas confeccionadas con la mezcla. Por esta razón, se recomienda realizar algún tipo de ensayo, a modo de obtener la resistencia de este árido y así poder clasificarlo en forma más precisa. El ensayo de trituración no fue realizado pues, las características del pellet indicaban que su resistencia estaba bajo la mínima necesaria para ejecutarlo.

Debido a la importante oxidación que se detectó en los moldes a la edad de 28 días posteriores a la confección de la mezcla, se recomienda realizar un estudio sobre la corrosión que eventualmente pudiesen tener los refuerzos al estar en contacto o cerca de este árido en el hormigón. Aunque la mezcla con 70% de dosificación puzolánica no provocó corrosión significativa de los moldes es necesario evaluar este efecto en los refuerzos.

Una de las preocupaciones que incentivan el estudio de las cenizas, es que la ceniza generada de la combustión de *Petcoke* tiende a ser categorizada como un residuo peligroso debido a su contenido de metales pesados como níquel y el vanadio y. a pesar de que en Chile ya existe una normativa que regula la presencia de estos compuestos en materiales residuales, no existen mayores antecedentes acerca del contenido de éstos en las cenizas de *Petcoke*. Por esta razón se hará necesario continuar con la investigación realizando lixiviación a largo plazo de metales pesados.

Finalmente, además de realizar ensayos que permitan determinar la resistencia a compresión de estos áridos es necesario probarlos como agregados en hormigones, determinando así la durabilidad y otras características de los hormigones que contengan a este árido.

CAPÍTULO 9

9. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

1. Anil Misra. "Crushed Aggregates from Class C Fly Ash", University of Missouri, Kansas City. (2005)
2. Christina B. Behr-Andres, Neil J. Hutzler. "Characterization and Use of Fluidized Bed Combustion Coal Ash", ASCE Members, Tennessee. (1994)
3. E. J. Anthony, L. Jia, S. M. Burwell, J. Najman, E. M. Bulewicz. "Understanding the Behavior of Calcium Compounds in Petroleum Coke Fluidized Bed Combustion (FBC) Ash", ASME International, New York. (2006)
4. Francois Botha. "Overview of the Fluidized Bed Combustion Process and Material", Illinois Clean Coal Institute, Illinois. [200-]
5. Gladys Vidal. "Gestión Integral de las Cenizas Generadas por la Utilización del Coke de Petróleo", Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile, Universidad de Concepción, Concepción, Chile. (2006)
6. Guillermo Thenoux Z., Felipe Halles, Ángeles Vargas, Juan Pablo Bellolio, Héctor Carrillo O. "Evaluación del Uso de las Cenizas FBC (Combustión de Lecho Fluido) Como Estabilizador de Materiales Granulares", Escuela de Ingeniería Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. (2005)
7. Guillermo Thenoux Z., Héctor Carrillo O. "Estudio para la Utilización de Cenizas Provenientes de la Caldera Cogeneradora Petropower en la Estabilización de Suelos", CIIV Centro de Ingeniería e Investigación Vial, DICTUC S.A., Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. (2005)
8. K. M. Sellakumar, R. Conn, A. Bland. "A Comparison Study of ACFB and PCFB Ash Characteristics", 6th International Conference on Circulating Fluidized Beds, Wurzburg, Germany. (1999a). "Utilization of FBC Fly Ash for Construction Applications", Proceeding of the 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion, Savannah, Georgia. (1999b)

9. M. M. Wu, R. A. Winschel, G. E. Wasson. "Composition Effects on Durability of Aggregates Made From Coal Combustion By-Products", Consol Energy, Atlanta. M. M. Wu. "Durability Evaluation and Production of Manufactured Aggregates From Coal Combustion By-Products", Consol Energy, Atlanta. [200-]
10. M. M. Wu. "Durability Evaluation and Production of Manufactured Aggregates From Coal Combustion By-Products", Consol Energy, Final Report, Atlanta. (2005)
11. Tarun R. Naik, Suneel Vaniker, Rafat Siddique. "Role of Coal Combustion Products in Sustainable Construction Materials", Department of Civil Engineering and Mechanics, College of Engineering and Applied Science, University of Wisconsin, Milwaukee. (2002)
12. Tarun R. Naik, Giacomo Moriconi. "Environmental-Friendly Durable Concrete made with Recycled Materials for Sustainable Concrete Construction", Center for By-Products Utilization, Wisconsin, Milwaukee, USA. (2005)
13. Vas Choudhry, Stephen Kwan, Stephen R. Hadley. "Utilization of Lightweight Materials Made from Coal Gasification Slag", Praxis Engineers, Inc., Milpitas, California. (2001)
14. W.vom Berg, H. J. Feuerborn. "CCPs in Europe", ECOBA European Coal Combustion Products Association, Essen, Germany. (1999)
15. Y. Bai, P. A. M. Basheer. "Influence of Furnace Bottom Ash on Properties of Concrete", Institution of Civil Engineers, London. (2003)
16. ACI 213R-87 (Reapproved 1999), "ACI Manual of Concrete Practice 2000 Part I, Materials and General Properties of Concrete", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan. (2000)
17. "Commercial Use of Coal Utilization By-products and Technology Trends", National Energy Technological Laboratory. [200-]

ANEXOS

Anexo A

Ensayo determinación de distribución de partículas y superficie específica



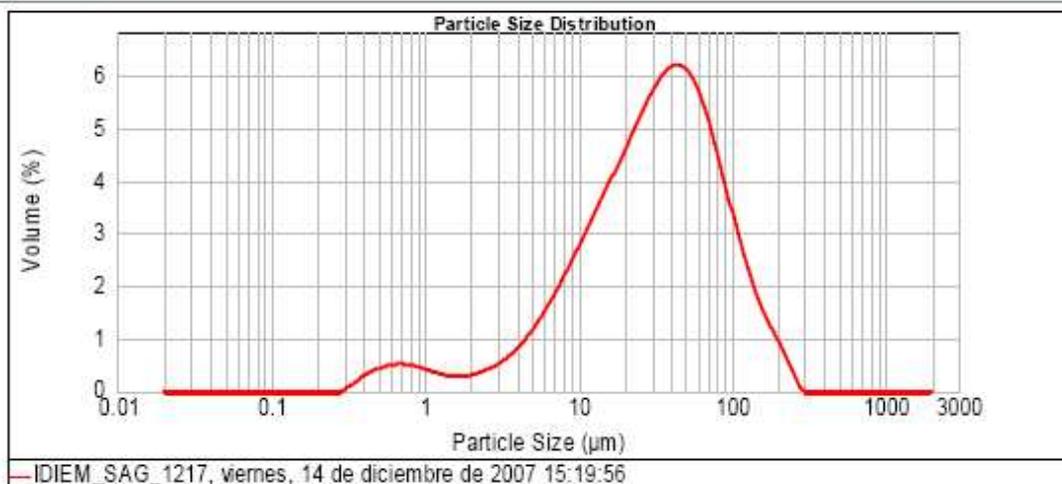
Result Analysis Report

Sample Name: IDIEM_SAG_1217	SOP Name:	Measured: viernes, 14 de diciembre de 2007 15:19:56
Sample Source & type:	Measured by: Christian	Analysed: viernes, 14 de diciembre de 2007 15:19:57
Sample bulk lot ref:	Result Source: Measurement	

Particle Name: Default	Accessory Name: Hydro 2000G (A)	Analysis model: General purpose	Sensitivity: Normal
Particle RI: 1.520	Absorption: 0.1	Size range: 0.020 to 2000.000 um	Obscuration: 16.21 %
Dispersant Name: Alcohol Isopropilico (CH3)2CHOH	Dispersant RI: 1.378	Weighted Residual: 1.809 %	Result Emulation: Off

Concentration: 0.0296 %Vol	Span : 2.997	Uniformity: 0.917	Result units: Volume
Specific Surface Area: 0.689 m ² /g	Surface Weighted Mean D[3,2]: 8.963 um	Vol. Weighted Mean D[4,3]: 45.008 um	

d(0.1): 6.136 um d(0.5): 32.491 um d(0.9): 100.252 um



Size (µm)	Volume In %										
0.010	0.00	0.105	0.00	1.096	0.32	11.482	2.95	120.226	2.01	1258.925	0.00
0.011	0.00	0.120	0.00	1.259	0.28	13.183	3.28	138.038	1.58	1445.440	0.00
0.013	0.00	0.138	0.00	1.445	0.25	15.138	3.62	158.489	1.21	1659.587	0.00
0.015	0.00	0.158	0.00	1.660	0.26	17.378	3.97	181.970	0.90	1905.461	0.00
0.017	0.00	0.182	0.00	1.905	0.28	19.953	4.32	208.930	0.80	2187.762	0.00
0.020	0.00	0.209	0.00	2.188	0.33	22.909	4.67	239.883	0.24	2511.886	0.00
0.023	0.00	0.240	0.00	2.512	0.40	26.303	5.00	275.423	0.01	2894.032	0.00
0.026	0.00	0.275	0.01	2.884	0.49	30.200	5.29	318.228	0.00	3311.311	0.00
0.030	0.00	0.316	0.12	3.311	0.62	34.674	5.60	363.078	0.00	3601.994	0.00
0.035	0.00	0.363	0.24	3.802	0.77	39.811	5.90	418.889	0.00	4385.158	0.00
0.040	0.00	0.417	0.33	4.365	0.98	45.708	5.55	478.630	0.00	5011.972	0.00
0.046	0.00	0.479	0.40	5.012	1.17	52.481	4.97	549.541	0.00	5754.399	0.00
0.052	0.00	0.550	0.45	5.754	1.42	60.256	4.45	630.957	0.00	6606.934	0.00
0.060	0.00	0.631	0.47	6.607	1.70	69.183	3.83	724.436	0.00	7585.776	0.00
0.069	0.00	0.724	0.45	7.586	1.99	79.433	3.18	831.764	0.00	8709.838	0.00
0.079	0.00	0.832	0.42	8.710	2.30	91.201	2.55	954.993	0.00	10000.000	0.00
0.091	0.00	0.955	0.37	10.000	2.83	104.713		1096.478	0.00		
0.105	0.00	1.096		11.482		120.226		1258.925	0.00		

Operator notes: J.Gomez

Anexo B

Ensayo de difracción de Rayos X



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Departamento de Física
LABORATORIO DE CRISTALOGRAFÍA

Av. Blanco Encalada 2008
Casilla 487-3
Santiago - Chile
Tel:(56-2) 978 43 44
Fax:(56-2) 996 73 59
aibanez@dfi.uchile.cl

Informe de Análisis por Difracción de Rayos X.

Srs. IDIEM, Sección Aglomerantes
Atención Sr. Reinaldo Zepeda C.
PRESENTE.

Santiago, 26 de Diciembre de 2007

Conforme a lo solicitado, se ha realizado el análisis de pureza cristalina, mediante la técnica de difracción de rayos-X de polvo, de la muestra rotulada como **SAG 1217**.

Especificaciones de la medida y tratamiento de datos.

- Instrumento: Difractómetro Siemens D5000, para muestras policristalinas.
- Longitud de onda utilizada: $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$, correspondiente a un ánodo de Cu.
- Potencia utilizada: 40 KV / 30mA.
- Rango de medida: $2^\circ - 80^\circ$ en 2θ .
- Paso: 0.02° por cada 5 segundos.
- Software para análisis de datos: Diffract Plus Ver. 2005 Bruker AXS.
- Base de Datos de Polvo Cristalino: PDF-2 Ver. 2001.

Se adjunta copia del difractograma obtenido, 2θ vs CPS (cuentas por segundo), realizada la identificación comparando con la base de datos PDF-2 y la tabla con el resumen de las sustancias identificadas.

SAG 1217

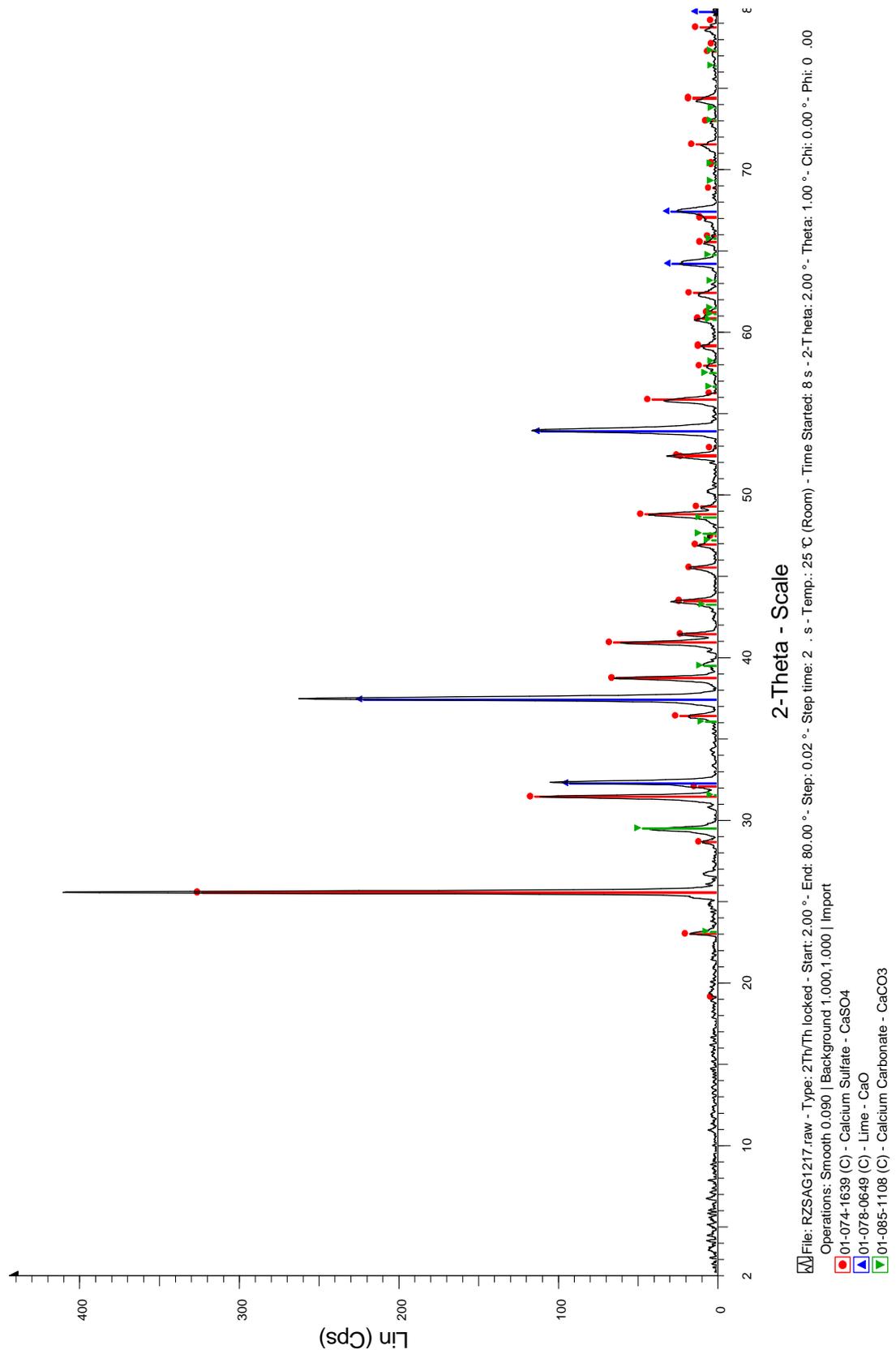


Tabla N° 1.- resumen de la identificación cualitativa de sustancias cristalinas en la muestra rotulada como SAG 1217.

N° PDF	Nombre Compuesto	Formula
74-1639	Calcium Sulfate	CaSO ₄
78-0649	Lime	CaO
85-1108	Calcium Carbonate	CaCO ₃

Quedamos a su disposición para cualquier consulta o discusión respecto de este informe.

Le saluda muy atentamente,

Andrés Alejandro Ibáñez Muñoz
Ingeniero Químico, Responsable de la Difractometría de Polvo.
Laboratorio de Cristalografía, Departamento de Física.
UNIVERSIDAD DE CHILE

Anexo C

Tabla de valores de resistencia a la compresión

Tabla de valores de resistencia a la compresión de los prismas con distinta dosificación de puzolana y agua a los 7 y 28 días posteriores a su confección.

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
0	53,9	65	77,02	196	195,60
		72		238	
		81		193	
		93		158	
		72		178	
		80		201	
		73		203	
		74		205	
		83		228	
		76		220	
		86		172	
		83		155	
		83		198	
		81		276 (*)	
		80		144	
		115 (**)		161	
		76		176	
		69		191	
		63		212	
		87		206	
60	-				
83	-				

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
0	46	72	87,65	230	252,22
		88		237	
		89		205	
		93		225	
		67 (*)		179	
		85		256	
		88		215	
		98		261	
		91		237	
		82		287	
		73		264	
		90		286	
		67 (*)		273	
		84		257	
		88		294	
		94		297	
		98		276	
		-		232	
		-		243	
		-		248	
-	279				
-	268				
0	48,9	91	85,46	363	346,03
		82		362	
		80		443 (*)	
		73		427	
		84		349	
		89		290	
		97		353	
		88		322	
		78		347	
		89		326	
		90		349	
		84		400	
		81		296	
		86		349	
		88		294	
		112		311	
		86		313	
		67		319	
99	293				
78	350				
108	412				
97	-				

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
10	48,6	59	50,70	441	355,27
		53			
		50			
		62			
		57			
		49			
		51			
		50			
		48			
		69			
		61			
		50			
		53			
		57			
		63			
		56			
		31			
		35			
		36			
41					
34					
10	46	86	70,96	478	390,87
		63			
		66			
		82			
		64			
		78			
		74			
		68			
		71			
		78			
		73			
		65			
		85			
		69			
		78			
		69			
		63			
		58			
		62			
73					
65					

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
10	44	112	101,12	543	529,45
		88			
		102			
		106			
		87			
		101			
		101			
		98			
		97			
		98			
		84			
		99			
		94			
		116			
		107			
		94			
		110			
		101			
		107			
		99			
116					
107					
20	46,2	50	45,40	338	329,00
		47			
		33			
		40			
		41			
		25			
		43			
		37			
		43			
		39			
		36			
		38			
		34			
		56			
		51			
		59			
		65			
		63			
		54			
		54			
-					
-					

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
20	44	51	46,12	370	343,03
		59			
		63			
		57			
		50			
		45			
		32			
		32			
		55			
		53			
		33			
		34			
		24			
		30			
		49			
		53			
		43			
		52			
		48			
		48			
53					
49					
20	42	52	53,31	387	403,92
		53			
		56			
		54			
		52			
		49			
		55			
		60			
		50			
		48			
		57			
		53			
		62			
		53			
		45			
		45			
		53			
		49			
		53			
		61			
55					
60					

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
30	44,7	95	87,02	390	409,20
		87			
		94			
		86			
		99			
		82			
		88			
		91			
		93			
		87			
		81			
		84			
		82			
		87			
		86			
		85			
		84			
		84			
		89			
		-			
-					
-					
30	40	111	129,94	462	512,08
		139			
		129			
		129			
		119			
		141			
		121			
		149			
		124			
		137			
		138			
		137			
		108			
		124			
		128			
		132			
		132			
		134			
		138			
		133			
128					
128					

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
30	37	196	182,54	640	716,67
		185		630	
		175		780	
		193		690	
		185		720	
		180		690	
		161		700	
		188		700	
		190		730	
		200		690	
		188		710	
		175		790	
		197		720	
		184		780	
		187		720	
		176		740	
		183		680	
		185		670	
		167		700	
		173		760	
		175		810	
		171		-	
40	42	112	106,67	640	629,47
		101		520 (*)	
		103		590	
		100		600	
		106		670	
		107		650	
		121		610	
		110		590	
		110		670	
		100		610	
		101		700	
		90		620	
		105		640	
		102		670	
		107		660	
		113		620	
		111		660	
		106		590	
		110		650	
		121		-	
104	-				

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
40	40,2	185	172,65	790	767,14
		173			
		179			
		183			
		159			
		177			
		180			
		172			
		158			
		196			
		186			
		188			
		155			
		167			
		155			
		183			
		173			
		179			
		155			
		146			
173					
179					
-					
40	37	172 (*)	217,90	900	820,00
		216			
		241			
		207			
		222			
		213			
		211			
		206			
		226			
		233			
		233			
		227			
		228			
		217			
		214			
		219			
		215			
		220			
		206			
		205			
197					
219					

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
50	40	208	198,08	750	737,00
		190			
		197			
		206			
		194			
		211			
		208			
		203			
		196			
		209			
		227			
		196			
		199			
		191			
		191			
		210			
		173			
		190			
		180			
		193			
192					
192					
50	37,7	308	263,50	1010	927,62
		285			
		271			
		290			
		282			
		288			
		283			
		230			
		291			
		287			
		306			
		263			
		246			
		253			
		247			
		222			
		222			
		257			
		246			
		233			
234					
253					
				1090 (*)	
				940	
				-	

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
50	35	375	414,45	1150	1097,14
		427			
		376			
		386			
		364			
		471			
		428			
		424			
		404			
		404			
		453			
		389			
		442			
		442			
		415			
		405			
		413			
		446			
		446			
		397			
407					
403					
60	41,5	461 (*)	422,44	1020	1050,00
		418			
		435			
		431			
		411			
		420			
		432			
		422			
		429			
		404			
		387 (*)			
60	38,2	541	513,64	1230	1209,09
		499			
		495			
		528			
		500			
		498			
		503			
		523			
		520			
		521			
		522			

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
60	34,9	528	555,18	1750	1490,91
		575		1340	
		542		1240	
		546		1350	
		563		1530	
		562		1570	
		569		1550	
		563		1440	
		564		1580	
		575		1520	
		520		1530	
70	38,6	293	288,67	1040	1153,00
		282		1100	
		272 (*)		1170	
		289		1220	
		292		1200	
		286		1230	
		289		1240	
		289		1110	
		287		1210	
		270 (*)		1010	
		291		-	
70	37	313	319,40	1310	1336,36
		324		1400	
		295		1520 (*)	
		311		1380	
		325		1370	
		321		1330	
		346		1360	
		331		1330	
		359 (*)		1300	
		319		1150 (*)	
		309		1250	
70	35,3	315	331,00	1480	1582,73
		332		1600	
		331		1670	
		333		1420	
		317		1460	
		361 (*)		1620	
		340		1600	
		327		1560	
		335		1700	
		339		1610	
		341		1690	

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
80	42,6	207 (*)	195,86	410	440,00
		195		370	
		198		370	
		196		480	
		203		463	
		185 (*)		484	
		192		482	
		194		493	
		193		432	
		-		447	
		-		477	
		-		475	
		-		337	
		80		38,6	
291	578				
284	490				
279	540				
287	540				
275	531				
266	461				
262	561				
262	530				
255	561				
273	474				
80	34,5		347		355,00
		353	801		
		356	890		
		355	780		
		350	882		
		357	887		
		360	772		
		359	900		
		361	934		
		352	959		
		355	600		
		90	42,7	176	
164	210				
150	171				
168	173				
162	137				
152	177				
159	138				
166	156				
156	-				
150	-				
145	-				

Contenido de Puzolana (%)	Dosificación de agua (%)	7 días		28 días	
		Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)	Carga Rotura (kgf)	Carga Rotura Promedio (kgf)
90	37,2	225	234,09	230	270,45
		226		297	
		240		274	
		233		283	
		227		229	
		242		270	
		235		257	
		243		262	
		224		272	
		234		309	
		246		292	
90	33,9	320	301,20	241 (*)	276,00
		298		272	
		305		269	
		330 (**)		262	
		295		294	
		301		294	
		314		282	
		304		272	
		277		281	
		294		277	
		304		292	

(*) Valores dispersos

(**) Valores anómalos

Nota: Los valores con asteriscos fueron eliminados, y según correspondiera remplazados por los valores máximos y mínimos determinados en el capítulo de valores dispersos. Para efectos de la determinación de los valores medios de la muestra, los valores con asteriscos fueron descartados.

Anexo D

Ensayo de densidad aparente de los áridos

	FORMULARIO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE DE LOS ÁRIDOS (NCh 1116)
---	--

ID Muestra	
Fecha inicio	
Fecha término	08-07-08

Balanza Utilizada	
-------------------	--

Densidad aparente compactada

Dn, Tamaño máximo nominal, mm		Dn < 50	-50 < Dn < 400
Procedimiento de compactación		<input type="checkbox"/> apisonado	<input checked="" type="checkbox"/> percusión

		G1	G2	Unidad
Capacidad volumétrica de la medida	v	1968		[cm ³]
Masa del árido compactado	mc	1688	1673	[g]
Densidad aparente compactada	Dac	858	850	[kg/m ³]
Densidad aparente compactada final	Dac final	854		[kg/m ³]

Fórmula	$Dac = mc / v * 1000$
---------	-----------------------

Dac (G1-G2)	8	< 30 kg/m ³
-------------	---	------------------------

Densidad aparente suelta

		G1	G2	Unidad
Capacidad volumétrica de la medida	v	1968		[cm ³]
Masa del árido suelto	ms	1472	1442	[g]
Densidad aparente suelta	Das	748	733	[kg/m ³]
Densidad aparente suelta final	Das final	740		[kg/m ³]

Fórmula	$Das = ms / v * 1000$
---------	-----------------------

Das (G1-G2)	15	< 30 kg/m ³
-------------	----	------------------------

Ensayado por : Romero Jorjano

Revisado por : _____

Observaciones : _____

Anexo E

Ensayo de actividad puzolánica

FORMULARIO DE REGISTRO DE DATOS DEL ENSAYO ACTIVIDAD DE LA PUZOLANA

fecha	N° de SAG	N° de código	retenido en tamiz (%)	a (%)	agua de la mezcla		molde N°	ensayo a 7 días (fecha/hora)	23 ± 2 °C		55 ± 2 °C		carga de rotura (kN)	R (kgf/cm²)
					(%)	(ml)			inicio (fecha/hora)	fin (fecha/hora)	inicio (fecha/hora)	fin (fecha/hora)		
27/7 2007	751	193	6 part. 50.66 54.95 325	14.94	269	1	03-08 15:00	27-7 15:00	28-7 15:00	03-08 11:00	2026	105		
Ensayado por: <u>Diego Zouente</u> / Confeccionado por: <u>José Carrón</u>														
PROMEDIO														
Ensayado por:														
Confeccionado por:														
PROMEDIO														
Ensayado por:														
Confeccionado por:														
PROMEDIO														
Ensayado por:														
Observaciones														
PROMEDIO														

REVISADO POR:  FECHA DE REVISION: 07/8/07

Versión: 4 AAH-FOR-016

Página: 1/1

Anexo F

Ensayo de densidades y absorción de los áridos sintéticos

	FORMULARIO DE ENSAYO PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS DENSIDADES REAL Y NETA, Y LA ABSORCIÓN DE LAS GRAVAS (NCh 1117)
---	--

ID Muestra	
Fecha inicio	25.03.2008
Fecha término	31.03.2008

Balanza Utilizada	V/A 32711/10006
-------------------	-----------------

		G1	G2	Unidad	Aprox. a
Masa de la muestra de árido sss menos la masa del agua desplazada (Pesada sumergida)	A	603	601	[g]	1 g
Masa del árido saturado superficialmente seco (Pesada al aire ambiente SSS)	B	1348	1342	[g]	1 g
Masa del árido seco (Pesada al aire ambiente árido seco)	C	1054	1059	[g]	1 g
Fórmulas	Dr sss = $B * 1000 / (B - A)$	Dr seco = $C * 1000 / (B - A)$	Dneta = $C * 1000 / (C - A)$	Abs = $(B - C) / C * 100$	

		G1	G2	Unidad	Aprox. a
Densidad real árido SSS	Dr sss	1808	1811	[kg/m³]	1 g
Densidad real árido Seco	Dr seco	1415	1428	[kg/m³]	1 g
Densidad Neta	Dneta	2337	2312	[kg/m³]	1 g
Absorción de agua	Abs	27.35	26.72	[%]	1 g

Se aceptan los resultados de los ensayos, si la diferencia de las muestras gemelas (G1 - G2), realizadas por el mismo operador es:	< 30 kg/m³ en Densidades	< 0,30 % en Absorción
--	--------------------------	-----------------------

		Resultados Finales Promedio		Unidad	Aprox a lo más a
Densidad real árido SSS	Dr sss	1810		[kg/m³]	10
Densidad real árido Seco	Dr seco	1422		[kg/m³]	10
Densidad Neta	Dneta	2325		[kg/m³]	10
Absorción de agua	Abs	27.31		[%]	0,01

Temperatura del agua en la pesada sumergida, °C	21
---	----

Ensayado por: Luis Pulgar

Revisado por: _____

Observaciones: _____