



UNIVERSIDAD  
SAN SEBASTIAN

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

SEDE CONCEPCIÓN

**ANÁLISIS COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE  
MORTEROS EMPLEANDO DISTINTAS DOSIFICACIONES DE CENIZAS  
VOLANTES COMO MATERIAL DE REEMPLAZO AL CEMENTO.**

Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil

Profesor Guía: Rody Toro Picarte

Profesor Ayudante: Luis Novoa Lagos

Alumno: Pablo Nicolás Mendoza Recabal

Concepción, 24 enero de 2019

© (Pablo Nicolás Mendoza Recabal)

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.

## HOJA DE CALIFICACIÓN

En Concepción, el \_\_\_\_\_ los abajo firmantes dejan constancia que el alumno Pablo Nicolás Mendoza Recabal de la carrera Ingeniería Civil ha aprobado la memoria para optar al título de Ingeniero Civil con una nota de\_\_\_\_\_.

---

Profesor Rody Toro Picarte

---

Profesor MSc Patricio Uarac Pinto

## **DEDICATORIA**

Después de tantos años de sacrificios finalmente acaba esta etapa universitaria y fueron muchas las personas que estuvieron presente en este largo camino a las cuales quiero agradecer.

### **A Dios**

Por darme salud y vida; y la fortaleza cuando el ánimo decaía.

### **A mis padres Luis y Mirian**

Les agradezco por todo lo que me entregaron durante este proceso, por apoyarme en los momentos difíciles, por los valores inculcados; sus sabios consejos e infinita paciencia. Gracias a ustedes soy lo que soy, los amo.

### **A mis hermanos Javier, Contanza y Cristian**

Por el amor y la confianza que tuvieron siempre en mí, para que finalmente logrará conseguir este objetivo.

### **A Camila y Sofía**

A mi novia y a mi hija que durante este tiempo han vivido conmigo y sufrido en silencio, este arduo camino, les agradezco por su apoyo incondicional y sus palabras de aliento; las amo.

### **A mis familiares y amigos**

A mis abuelos Luis y Juan José que ya partieron, a mis abuelas Elba y Mercedes, a mis tíos, primos y suegros siempre sentí el cariño y el amor en sus palabras de apoyo.

A mis amigos les agradezco por creer en mí.

## RESUMEN

Se presenta un estudio comparativo de las propiedades mecánicas entre un mortero de grado M-15 (mortero patrón) y otros con variaciones del 20% y 30% de cenizas volantes como material de reemplazo al cemento. Las cenizas son clasificadas como clase C, de acuerdo con lo dispuesto en la norma americana ASTM C-618. De manera experimental los morteros son sometidos a ensayos de resistencia a compresión, flexo-tracción y docilidad, de acuerdo con lo estipulado en la norma NCh 158 y NCh 2257/1 o 2257/3 respectivamente.

Finalmente, los resultados experimentales obtenidos se comparan entre sí, para analizar la influencia que presentan los morteros fabricados con cenizas.

## **ABSTRACT**

A comparative study of the mechanical properties of a mortar of grade M-15 (standard mortar) and two others with variations of 20% and 30% of fly ash as a material of replacement to cement is presented. The ashes are classified as class C, in accordance with the provisions of the American standard ASTM C-618. Experimentally, the mortars are subjected to tests of compressive strength, flexo-traction and docility, in accordance with the stipulations of NCh 158 and NCh 2257/1 or 2257/3 respectively.

Finally, the experimental results obtained are compared to each other, to analyze the influence of mortars made with ashes.

## Contenido

	Pág.
LISTA DE TABLAS .....	11
LISTA DE IMÁGENES .....	14
LISTA DE GRÁFICAS.....	15
INTRODUCCIÓN .....	16
CAPÍTULO 1 OBJETIVOS.....	19
1.1 General .....	19
1.2 Específicos.....	19
CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO .....	20
2.1 Morteros.....	20
2.2 Tipos de morteros .....	20
2.2.1 Morteros calcáreos .....	21
2.2.2 Mortero de cemento.....	21
2.3 Usos del mortero.....	22
2.3.1 Mortero de pega .....	22
2.3.2 Mortero de relleno.....	22
2.3.3 Mortero de recubrimiento.....	22
2.4 Propiedades de morteros.....	23

2.4.1 Estado Plástico .....	23
2.4.2 Estado endurecido .....	24
2.5 Clasificación de morteros .....	25
2.6 Componentes de los morteros .....	26
2.6.1 Cemento .....	26
2.6.2 Arena .....	28
2.6.3 Agua .....	28
2.6.4 Aditivos .....	30
2.7 Cenizas volantes.....	30
2.8 Origen de las cenizas volantes .....	31
2.9 Influencia de los tipos de carbón.....	32
2.10 Proceso de captación de cenizas volantes .....	33
2.11 Definición general de las cenizas volantes .....	34
2.12 Características físicas .....	35
2.13 Características químicas.....	37
2.14 Clasificación de las cenizas volantes .....	37
2.14.1 Cenizas clase N .....	38
2.14.2 Cenizas clase F .....	38
2.14.3 Cenizas clase C .....	38
2.15 Producción de cenizas volante .....	40

CAPÍTULO 3	METODOLOGÍA	41
3.1	Programa experimental	41
3.2	Etapas del Estudio	42
3.2.1	Elaboración de probetas	42
3.2.2	Tamaño de la muestra	42
3.2.3	Dosificación de los morteros	44
3.2.4	Confección de probetas	46
3.3	Descripción de ensayos	47
3.3.1	Docilidad	47
3.4.2	Flexotracción	48
3.4.3	Compresión	49
3.5	Alcances	51
CAPÍTULO 4	RESULTADOS Y ANÁLISIS	52
4.1	Resultados de ensayo a flexión	52
4.1.1	Registro mortero patrón	52
4.1.2	Registro mortero +20% cenizas volantes	55
4.1.3	Registro mortero +30% cenizas volantes	58
4.2	Resumen de resultados de ensayos a flexión	61
4.3	Resultados de ensayos a compresión	62
4.3.1	Registros mortero patrón	62

4.3.2 Registros mortero +20% cenizas volantes.....	65
4.3.3 Registros mortero +30% cenizas volantes.....	68
4.4 Resumen de resultados de ensayos a compresión .....	71
CONCLUSIONES .....	72
Bibliografía.....	77

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1. Dosificación de morteros, según su uso .....	23
Tabla 2.2. Grados de morteros según resistencia a compresión a 28 días .....	26
Tabla 2.3. Requisitos de los áridos .....	28
Tabla 2.4. Clasificación de los carbones por rango .....	33
Tabla 2.5. Clasificación de cenizas volantes .....	39
Tabla 3.1. Tabla de distribución normal (z).....	43
Tabla 3.2. Dosificación partida 1 probeta patrón.....	45
Tabla 3.3. Dosificación partida 2 probeta +20% CV .....	45
Tabla 3.4. Dosificación partida 3 probeta +30% CV .....	45
Tabla 3.5. Partida 1 mortero patrón .....	46
Tabla 3.6. Partida 2 mortero +20% CV .....	46
Tabla 3.7. Partida 3 mortero +30% CV .....	47
Tabla 3.8. Registro de asentamiento de cono .....	49
Tabla 4.1. Registro de ensayo a flexión de mortero patrón, 7 días.....	52
Tabla 4.2. Registro de ensayo a flexión de mortero patrón, 10 días.....	53
Tabla 4.3. Registro de ensayo a flexión de mortero patrón, 14 días.....	53
Tabla 4.4. Registro ensayo a flexión de probeta patrón, 16 días .....	53
Tabla 4.5. Registro ensayo a flexión de probeta patrón a 28 días .....	54

Tabla 4.6. Media aritmética de las resistencias del mortero patrón a distintas edades .....	54
Tabla 4.7. Registro ensayo a flexión de probeta +20% cenizas volantes a 7 días. ....	55
Tabla 4.8. Registro ensayo a flexión de probeta +20% cenizas volantes a 10 días .....	56
Tabla 4.9. Registro ensayo a flexión de probeta +20% cenizas volantes a 14 días .....	56
Tabla 4.10. Registro a flexión de probeta +20% cenizas volantes a 16 días .....	56
Tabla 4.11. Registro a flexión de probeta +20% cenizas volantes a 28 días .....	57
Tabla 4.12. Media aritmética de las resistencias del mortero +20% C.V a distintas edades .....	57
Tabla 4.13. Registro ensayo a flexión de probeta +30% cenizas volantes a 7 días .....	58
Tabla 4.14 Registro ensayo a flexión de probeta +30% cenizas volantes a 10 días .....	59
Tabla 4.15 Registro ensayo a flexión de probeta +30% cenizas volantes a 14 días. ....	59
Tabla 4.16. Registro ensayo a flexión de probeta +30% cenizas volantes a 16 días. ....	59
Tabla 4.17. Registro ensayo a flexión de probeta +30% cenizas volantes a 28 días. ....	60
Tabla 4.18. Media aritmética de las resistencias del mortero +30% C.V a distintas edades. ....	60

Tabla 4.19. Registro ensayo a compresión mortero patrón a 7 días.....	62
Tabla 4.20. Registro ensayo a compresión mortero patrón 10 días.....	63
Tabla 4.21. Registro ensayo a compresión mortero patrón 14 días.....	63
Tabla 4.22. Registro ensayo a compresión mortero patrón 16 días.....	63
Tabla 4.23. Registro ensayo a compresión mortero patrón 28 días.....	64
Tabla 4.24. Media aritmética de las resistencias a compresión del mortero patrón a distintas edades .....	64
Tabla 4.25. Registro ensayo a compresión de probeta +20% cenizas volantes a 7 días .....	65
Tabla 4.26. Registro ensayo a compresión de probeta +20% cenizas volantes a 10 días .....	66
Tabla 4.27. Registro ensayo a compresión de probeta +20% cenizas volantes a 14 días .....	66
Tabla 4.29. Registro ensayo a compresión de probeta +20% cenizas volantes a 28 días .....	67
Tabla 4.30. Media aritmética de las resistencias a compresión del mortero +20%C.V a distintas edades.....	67
Tabla 4.31 Registro ensayo a compresión de probeta +30% cenizas volantes a 7 días .....	68
Tabla 4.32 Registro ensayo a compresión de probeta +30% cenizas volantes a 10 días .....	69
Tabla 4.33 Registro ensayo a compresión de probeta +30% cenizas volantes a 14 días .....	69

Tabla 4.34 Registro ensayo a compresión de probeta +30% cenizas volantes a 16 días .....	69
Tabla 4.35 Registro ensayo a compresión de probeta +30% cenizas volantes a 28 días .....	70
Tabla 4.36 Media aritmética de las resistencias a compresión del mortero + 30% C.V a distintas edades .....	70

## LISTA DE IMÁGENES

	Pág.
Imagen 2.1. Clasificación de los carbones.....	32
Imagen 2.2. Principio de funcionamiento de recolección de partículas ionizadas. .....	34
Imagen 2.3. Pleuroesfera.....	36
Imagen 2.4. Ceno esfera .....	36
Imagen 3.1. Cálculo de asentamiento mediante ensayo de cono de Abrams ...	48
Imagen 3.2 Ensayo de Flexión, gata hidráulica manual 25 kN; <b>Error! Marcador no definido.</b>	
Imagen 3.3. Ensayo de Compresión.....	51

## LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 4.1. Resistencia a Flexión mortero patrón a distintas edades. ....	55
Gráfica 4.2. Resistencia a Flexión a distintas edades de mortero +20% CV ....	58
Gráfica 4.3. Resistencia a Flexión mortero +30% CV a distintas edades .....	61
Gráfica 4.4. Curvas de resistencia a flexión para los tres tipos de morteros a distintas edades .....	61
Gráfica 4.5. Resistencia a compresión mortero patrón a distintas edades. ....	65
Gráfica 4.6 Resistencia a compresión mortero +20% CV a distintas edades ....	68
Gráfica 4.7 Resistencia a compresión mortero +30% CV a distintas edades ....	71
Gráfica 4.8 Curvas de resistencia a flexión para los tres tipos de morteros a distintas edades .....	71
Gráfica 4.9 Promedio de asentamientos de cono de Abrams .....	72
Gráfica 4.10 Resumen de resistencias a flexión a edades de 7 y 28 días .....	74
Gráfica 4.11 Resumen de resistencias a compresión de morteros con adición y sin adición de cenizas volantes.....	75

## INTRODUCCIÓN

En la realización de cualquier proyecto de ingeniería y/o construcción se evalúan siempre, cuáles serán las mejores alternativas al momento de establecer qué tipo de materiales se utilizarán, para cada una de las actividades asociadas a dicho proyecto, por lo general se seleccionan aquellos materiales que ya han sido probados y generan una confianza avalada a través de los años.

Uno de estos materiales corresponde a los morteros, que dentro del sector de la construcción se utiliza habitualmente y dependiendo de la actividad que se lleve a cabo, se utilizará un mortero u otro pudiendo emplearse tanto en el revestimiento de paredes, como en autonivelantes y reparadores.

Los morteros principalmente se componen por cemento (que mantiene unidas las partículas), arena (proporciona estabilidad a la mezcla) y agua, que al mezclarse se transforman en una pasta que en estado endurecido brindará propiedades de resistencia y adherencia a la mampostería, garantizando de esta manera la correcta estabilidad de la estructura durante toda su vida útil.

El cemento, principal componente de los morteros, proviene de una industria que después del agua, es de las de mayor consumo a nivel mundial (Brunatti, 2014). Cifras del año 2014 determinan que la producción mundial del cemento fue de 4180 millones de toneladas (Hendrick, 2015) y se debe esperar un aumento, sobre todo en países cuyas economías se encuentran en crecimiento, como es el caso de Chile.

Lamentablemente la industria del cemento afecta de forma negativa al medio ambiente. Por un lado, por el gran volumen de materia prima no renovable necesario para producir el Clinker (la fabricación de cemento implica la extracción de 1,7 toneladas de roca para producir 1 tonelada de Clinker) y por otro lado por las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas durante la producción de cemento Portland (la producción de 1 tonelada de cemento para la industria del hormigón genera 0,94 toneladas de CO<sub>2</sub>) (Gartner, 2004).

Para mejorar esta situación desde hace unas décadas la normativa mundial contempla el uso de adiciones minerales activas, entre ellas: filler calcáreo, puzolanas (de origen natural o resultantes de un proceso de calcinación), humo de sílice, escorias granuladas de alto horno y cenizas volantes.

Las cenizas volantes derivan de una industria (termoeléctrica) que paradójicamente tiene como principal consumidor a las productoras de cemento y con consumos en incremento de cemento a nivel mundial (Hendrick, 2015) implica un aumento en la demanda de energía y por su parte, el aumento de los residuos que generan estas plantas térmicas.

El problema de la generación de grandes volúmenes de residuos (cenizas volantes, cenizas de fondo y escoria) está relacionado con la utilización de grandes áreas de terreno para depositar las cenizas volantes, lo que se está transformando en un serio problema ambiental. (Canales Álvarez, L., Estudio de la aplicabilidad de las cenizas volantes de la planta térmica de Mudunuru en materiales de construcción, 2007).

En cuanto a sus propiedades, se ha comprobado las virtudes que ofrecen las cenizas (principalmente por su actividad puzolánica) como materia prima en la fabricación de hormigones que en porcentajes que fluctúan entre el 10% a 30% de estas, la resistencia de los hormigones disminuye a edades tempranas, pero se ven aumentadas al superar los 28 días; los cambios de volumen no se ven afectados significativamente y se ve reducida la cantidad de agua necesaria para el mezclado por unidad de volumen. (Materiales de construcción Vol. 34. N°193)

En este informe se analiza el comportamiento mecánico que presentan 3 partidas de morteros (grado M-15). Una primera partida se fabricará sin aditivos, mientras que la segunda y tercera partida se utilizarán 20 y 30 por ciento de cenizas volantes como adición (en reemplazo del cemento).

Las pruebas mecánicas efectuadas corresponden a ensayos de docilidad (en estado fresco) y de compresión y flexión (en estado endurecido), de acuerdo a lo establecido en las normas NCh 2257/3 of 96 y NCh 158 of 67.

Todo esto, con el fin de crear conciencia y de contribuir a la preservación del medio ambiente (utilizando residuos de termoeléctricas), a la conservación de los recursos naturales no renovables (disminuyendo la cantidad de materias primas para la fabricación de cemento), a la utilización de materias primas no convencionales (utilizando cenizas volantes) y a un aprovechamiento racional de la energía.

## **CAPÍTULO 1 OBJETIVOS**

### **1.1 General**

Analizar comparativamente el comportamiento mecánico de un mortero de grado M15, empleando distintas dosificaciones de cenizas volantes como material de reemplazo al cemento.

### **1.2 Específicos**

- Definir mediante análisis estadístico la cantidad de probetas a ensayar para el estudio. (Distribución normal de Gauss)
- Determinar las propiedades mecánicas de un mortero grado M-15 (patrón) y otros dos con adiciones de 20% y 30% (en peso de cemento) de ceniza volante como material de reemplazo al cemento.
- Analizar comparativamente el comportamiento de los morteros elaborados y la incidencia del uso de cenizas volantes como aditivo.

## **CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Morteros**

El mortero es una mezcla homogénea de un material aglomerante (cemento), un material de relleno (agregado fino o arena), agua y en algunas ocasiones aditivos, con propiedades químicas, físicas y mecánicas similares a las del hormigón.

Son ampliamente utilizados en revestimientos, autonivelantes, reparadores y para pegar piezas de mampostería, ocupando (aproximadamente) entre el 10 y 20% del volumen de una pared de albañilería, sin embargo, su efecto en el comportamiento de esta es mucho mayor que lo que indica este porcentaje. (Sánchez de Guzmán, tecnología del mortero y del concreto, Colombia)

### **2.2 Tipos de morteros**

De acuerdo con su endurecimiento se pueden distinguir dos tipos de morteros: los aéreos, que endurecen al aire al perder agua por secado y fraguan lentamente por proceso de carbonatación, y los hidráulico que endurecen bajo el agua, debido a que su composición les permite desarrollar las resistencias iniciales relativamente altas.

Teniendo en cuenta los materiales cementantes que los constituyen, pueden ser:

### **2.2.1 Morteros calcáreos**

Los morteros calcáreos son aquellos en los cuales el aglutinante puede ser cal blanca o dolomita (cal gris). En este tipo de morteros, la función principal de la arena es evitar el agrietamiento y la contracción, debido al lento endurecimiento de la cal (lenta velocidad de fraguado). Debido a lo anterior se recomienda que la arena posea partículas de forma angulosa y debe estar libre de material orgánica, piedras grandes, polvo y arcillas; las características principales de esta clase de morteros son:

- Es el tipo de mortero más manejable de todos los conocidos, debido a que la cal es un excelente plastificante.
- No desarrolla altas resistencias tempranas, debido a la baja velocidad de endurecimiento

### **2.2.2 Mortero de cemento**

Fabricados cuando se busca gran trabajabilidad, buena retención de agua y altas resistencias. Con altos contenidos de cemento, el mortero será de alta resistencia y de poco tiempo de amasado y colocación; en cambio si el contenido de cal es alto tendrá menor resistencia, será mayor el tiempo de amasado y colocación, será más plástica y permeable, pero tendrá mayor retracción. Si el contenido de arena es alto, la resistencia disminuirá y será poco trabajable, pero tendrá poca retracción. Por todo lo anterior es que se debe buscar una combinación adecuada para la fabricación de las probetas. (Morteros, Universidad de Castilla, 2015).

## **2.3 Usos del mortero**

Los morteros pueden tener una función estructural, y pueden usarse en la construcción de elementos estructurales, o en la mampostería estructural en donde se puede utilizar de pega o de relleno en las celdas de los muros.

A su vez, existen otros morteros que no tienen una función estructural y se destinan a recubrimientos o estucos. (ver tabla 2.1)

### **2.3.1 Mortero de pega**

Debe tener cualidades especiales porque estará sometido a las condiciones especiales del sistema constructivo, y una resistencia adecuada ya que debe absorber esfuerzos de tensión y compresión.

### **2.3.2 Mortero de relleno**

Se utiliza para llenar celdas de los elementos en la mampostería estructural y al igual que el mortero de pega, debe tener una adecuada resistencia.

### **2.3.3 Mortero de recubrimiento**

No tiene una función estructural, sólo debe proporcionar una superficie uniforme para trabajar, no requiere de una resistencia determinada; la plasticidad de la amasada es fundamental para este tipo de morteros. (instituto chileno del hormigón, ICH 2013).

<b>Mortero</b>	<b>Usos</b>
1:1	Mortero para impermeabilizaciones. Rellenos
1:2	Impermeabilizaciones. Paños de tanques
1:3	Impermeabilizaciones menores. Pisos
1:4	Pega para ladrillos en muros
1:5	Paños exteriores. Pega de ladrillos y mampostería en general
1:6 y 1:7	Paños interiores. Pega de ladrillos y mampostería en general
1:8 y 1:9	Estabilización de taludes en cimentaciones

Tabla 2.1. Dosificación de morteros, según su uso. (Fuente: ICH 2013)

## **2.4 Propiedades de morteros**

Los morteros de albañilería poseen dos grupos de propiedades, unos para morteros en estado plástico y otros cuando el mortero está endurecido.

Las propiedades plásticas determinan la adaptabilidad de un mortero en la construcción (trabajabilidad y retención de agua) mientras que las propiedades del mortero endurecido ayudan a determinar el comportamiento de la mampostería terminada, e incluso características como la adherencia, durabilidad, elasticidad y resistencia a la compresión.

### **2.4.1 Estado Plástico**

La trabajabilidad es la propiedad más importante de los morteros en estado plástico. Un mortero trabajable podrá soportar las unidades de mampostería y

ser esparcido o extendido fácilmente con una cuchara, dentro de las separaciones o hendiduras de las unidades.

Otra propiedad de importancia en estado plástico es la retención de agua que se define como la capacidad del mortero para mantener su plasticidad cuando queda en contacto con la superficie sobre la que va a ser colocado. Una forma de mejorar esta propiedad se logra añadiendo cal, aumentando el contenido de finos en la arena o incorporando aire y aditivos plastificantes.

La retención de agua influirá en la velocidad de endurecimiento y en la resistencia final, es decir, que un mortero que no retenga agua no permitirá la hidratación del cemento. Así, los tiempos de fraguado final e inicial oscilarán entre 2 y 24 horas y dependerán de la composición de la mezcla, las condiciones climáticas y la humedad.

#### **2.4.2 Estado endurecido**

La propiedad de retracción se debe principalmente a la contracción de la pasta (mezcla) que se ve aumentada cuando el mortero tiene altos contenidos de cemento. Para evitar la retracción y evitar agrietamientos es conveniente utilizar arenas con granos de textura rugosa. Esta será proporcional al espesor de la capa, a la riqueza en cemento de la mezcla y a la mayor absorción de la pared sobre la que se vaya a aplicar.

La adherencia en cambio corresponde a la capacidad de absorber tensiones normales y tangenciales a la superficie que une el mortero y una estructura, es decir a la capacidad de respuesta ante solicitudes de carga.

En el caso de la mampostería, para obtener una buena adherencia es necesario que la superficie sobre la que se colocara el mortero sea tan rugosa como sea posible y tenga una absorción adecuada.

Una buena adherencia es importante para soportar los esfuerzos estructurales, sísmicos, de vientos, cambios de temperatura o contracción de los materiales, por el contrario, una pobre adherencia disminuye la capacidad de soporte de estos esfuerzos y favorece la penetración de humedad a través de las áreas de las uniones.

En estado endurecido, cuando el mortero va a ser utilizado para soportar grandes cargas, debe poseer una alta resistencia a la compresión. Esta resistencia que presenta el mortero ante agentes externos como; baja temperatura, penetración de agua, desgaste por abrasión y agentes corrosivos, se define como la durabilidad.

## **2.5 Clasificación de morteros**

Los morteros se clasifican con respecto a su resistencia especificada a compresión ( $f_p$ ), medida en los trozos resultantes del ensayo por flexión a la edad de 28 días.

En la tabla 2.2 se muestran los grados de morteros según la resistencia a compresión, como indica la NCh 2256/1 of 2013.

<b>Grado del mortero</b>	<b>MPa</b>
M 0,5	0,5
M 2,5	2,5
M 5,0	5,0
M 7,5	7,5
M 10,0	10,0
M12,5	12,5
M15,0	15,0
M 20,0	20,0
M 25,0	25,0
M 30,0	30,0

Tabla 2.2. Grados de morteros según resistencia a compresión a 28 días. (Fuente: NCh 2256/1)

## **2.6 Componentes de los morteros**

Los morteros se componen en su mayoría por cemento (que mantendrá unidas las partículas), arena (que proporciona estabilidad a la mezcla), agua y en algunos casos aditivos (de acuerdo con las necesidades que presente la obra).

### **2.6.1 Cemento**

El cemento se presenta en forma de un polvo muy fino, de color gris que al mezclarlo con agua forma una pasta que endurece, tanto bajo el agua como el aire, característica que lo define como un conglomerante hidráulico. Sus

propiedades se establecen en la norma NCh 148 of 1968, y clasifica al cemento como clase puzolánico de grado corriente.

Cuando el cemento contiene adiciones y su contenido de clínker es superior al 65%, reciben el nombre de cementos portland con adiciones.

Existen otros tipos de cemento que forman parte de la familia de los cementos de utilización más común:

- *Cementos de alto horno*: También conocidos como siderúrgicos, obtenidos mediante la molienda homogénea de escorias básicas granuladas de alto horno y sulfato de calcio en forma de anhidrita, pudiendo llevar además cal, clínker o cemento portland.
- *Cementos puzolánicos*: Son los cementos resultantes de moler conjuntamente clínker portland, puzolana en proporción no mayor del 55% y yeso deshidratado o anhidrita.
- *Cementos blancos*: Difiere del portland clásico sólo en las materias primas que emplea y en los cuidados en su fabricación. Deben poseer un contenido muy bajo en óxidos de hierro y manganeso, especialmente el primero, por su poder de coloración. (Calleja J., (1982). “Escoria y cementos siderúrgicos – Materiales de construcción”. Madrid. España).

### 2.6.2 Arena

Material pétreo compuesto de partículas duras, de forma y tamaño estable. Constituye un elemento importante en los morteros, ya sea desde el punto de vista volumétrico o en relación con el peso, ocupan gran parte del volumen final. Sean áridos finos o gruesos, deben cumplir con la norma NCh 163 of 1979, en cambio para determinar la densidad aparente compactada, densidad neta y absorción, se siguen los procedimientos establecidos por las normas chilenas NCh 1116, NCh 1117 y NCh 1239.

En la tabla 2.3 se observa lo establecido en la norma chilena NCh 163 of 79 para la clasificación de los áridos de acuerdo con su granulometría:

<b>Granulometría de la arena</b>	
<b>Tamices (mm)</b>	<b>% Acumulado que pasa</b>
10	100
5	95 – 100
2,5	80 – 100
1,25	50 – 85
0,630	25 – 60
0,315	10 – 30
0,160	2 - 10

Tabla 2.1. Requisitos de los áridos. (Fuente: NCh 163 of 2009)

### 2.6.3 Agua

El agua desempeña dos roles importantes, ya que participa en el proceso de hidratación del cemento y otorga la trabajabilidad necesaria al mortero. De ella

depende el desarrollo de las propiedades del mortero en estado fresco como en estado endurecido.

Se puede diferenciar entre:

- *Agua de amasado*: es la que participa en las reacciones de hidratación del cemento y además le confiere al mortero la trabajabilidad necesaria para su correcta puesta en obra.
- *Agua de Curado*: se añade para compensar las pérdidas por evaporación y permite que se desarrollen nuevos productos de hidratación.

La cantidad debe limitarse a la estrictamente necesaria, ya que disminuye su resistencia si esta cantidad, es superior a la teóricamente necesaria para hidratar todo el cemento, ya que una parte se consume en mojar los áridos y otra parte es necesaria por razones de trabajabilidad.

Si se supera el mínimo real necesario, el agua de exceso se evapora y crea huecos en el mortero (capilares) que disminuye su resistencia y su durabilidad. (Cemento Melón. "Importancia del agua de amasado en la calidad de hormigones y morteros". Chile).

#### **2.6.4 Aditivos**

Un aditivo se puede definir como un material distinto del agua, áridos y cemento hidráulico, que se usa como ingrediente en hormigones o morteros y se añade a la mezcla inmediatamente antes o durante su mezclado. (American Concrete Institute, ACI-212).

#### **2.7 Cenizas volantes**

Son uno de los tipos de adiciones activas que se utilizan en la fabricación de cementos y hormigones, en ellas prevalecen los componentes sílice, óxido férrico y alúmina (caso de las cenizas silicoaluminosas) aunque en algunos casos la cal puede presentarse en importantes cantidades (caso de las cenizas sulfocálcidas). Tienen la capacidad de reaccionar con el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  del cemento portland, en presencia del agua y a temperatura ambiente, proporcionando compuestos conglomerantes que colaboran en el desarrollo de las resistencias del hormigón.

Las cenizas volantes son productos sólidos de granulometría fina que provienen de la combustión del carbón pulverizado en calderas que alcanzan temperaturas aproximadas a los 1500 °C donde los minerales inorgánicos (como el cuarzo, calcita, yeso, pirita, feldespato y arcilla) se funden en el horno y se fusionan. Tal fusión al ser transportada por los gases de combustión y enfriándose, forman partículas esféricas vítreas, de tamaños variables entre 1 y 200  $\mu\text{m}$  (micras), las que son captadas mediante precipitadores electrostáticos.

Las cenizas, al ser un subproducto de la combustión de carbones, sus propiedades físicas y químicas están condicionadas a la naturaleza de estos y al proceso de combustión, aun cuando estas cenizas se obtengan de una misma fuente de producción. (Argiz C.et al., 2015)

Si bien las cenizas de combustión pueden contener una amplia gama de compuestos químicos, generalmente no son considerados residuos peligrosos, de acuerdo con los análisis de peligrosidad efectuados en el marco del D.S. N°148/2003 del Ministerio de Salud.

## **2.8 Origen de las cenizas volantes**

En sus inicios, el desarrollo eléctrico en Chile se basó en la hidroelectricidad, aprovechando de esta manera un recurso barato y propio. La generación térmica solo se limitaba a servir como respaldo. A mediados de los años 40, el país contaba con un consumo anual no superior a los 200 kWh/cápita. Pero el contexto actual ha cambiado, ya en 2010 con una población cercana a los 17 millones de habitantes, el consumo anual superó los 3400 kWh/cápita y la capacidad instalada ronda los 16600 MW.

Para satisfacer el aumento de consumo en la zona centro-sur del país, a mediados de los '60, comenzó un fuerte desarrollo en base a Carbón y Diesel, pero es con la llegada de gas proveniente de Argentina a fines de los años '90, que la termoelectricidad dio el gran salto y pasó a predominar. (Eficiencia energética, la necesidad del siglo XXI, Colegio Ingenieros, Chile)

Cifras del 2006, indican que la generación eléctrica a carbón alcanzo el 40% a nivel mundial donde destacan países como Australia con un 84%, China con un 78% y Estados Unidos con 50%. En cambio, en nuestro país las centrales termoeléctricas representan el 62% de la potencia instalada, el 63% de los proyectos en construcción y el 55% de los proyectos en evaluación. (Fernández, R., inicio del fin de la era de los combustibles fósiles, 2006)

## 2.9 Influencia de los tipos de carbón

Dentro de los distintos combustibles fósiles en el mundo, el carbón representa el 70% de esas reservas con una relación de reservas/producción en torno a 126 años (Barrera et al., 2014).

En la generación de energía, las propiedades físicas y químicas del carbón permiten obtener un conocimiento del rendimiento de los procesos energéticos. La normativa ISO 11760-2005 emplea un sistema para clasificar los carbones de acuerdo con un rango que depende de su poder calorífico, porcentajes de carbono fijo y material volátil. Ver imagen 2.1

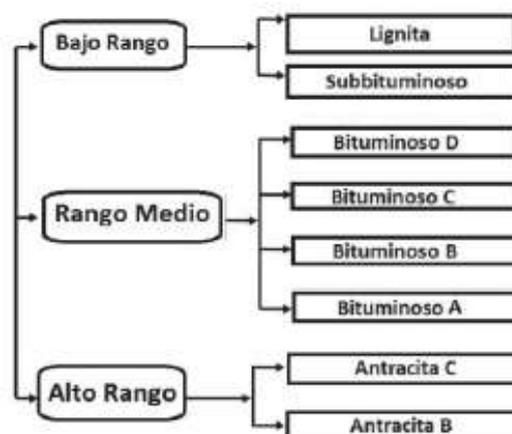


Imagen 2.1. Clasificación de los carbones. (Fuente: Norma ISO 11760-2005)

La norma ASTM D388 define a los carbones de alto rango como aquellos que tienen un poder calorífico mayor a 26,8 MJ/kg y de menor rango, a los que tienen un poder calorífico menor a 26,5 MJ/kg. Así, mientras mayor sea el rango, mayor es el poder calorífico y contenido de carbono fijo del carbón. Ver tabla 2.4

Tipo	Carbono Fijo (%)	Material Volátil (%)	Poder Calorífico (BTU/lb)	Poder Calorífico (MJ/kg)	Poder Calorífico (kcal/kg)
<b>Antracita</b>	86 - 98	2 - 14			
<b>Bituminoso</b>	69 - 78	14 - 31	10500 - 14000	24,5 - 32,6	5800 - 7780
<b>Sub-bituminoso</b>			9500 - 10500	22,1 - 24,5	5290 - 5860
<b>Lignito y turba</b>			6300 - 8300	14,7 - 19,3	3500 - 4600

Tabla 2.4. Clasificación de los carbones por rango. (Fuente: ASTM D-388)

## 2.10 Proceso de captación de cenizas volantes

Los gases producidos después de la calcinación son llevados a un precipitador electrostático, dispositivo de control de partículas que utiliza fuerza eléctrica para moverlas fuera de la corriente de gas y sobre las placas del colector. A las partículas se les da una carga eléctrica forzándolas a que pasen a través de una corona, región por la que fluyen iones gaseosos. El campo eléctrico que fuerza a las partículas cargadas hacia las paredes proviene de electrodos que se mantienen a un alto voltaje en el centro de la línea de flujo. Una vez recolectadas las partículas, se desprenden de las placas permitiendo que se desplacen hacia una tolva, donde son extraídas. (Becerra, 2010)

En la imagen 2.2 se observa el principio de funcionamiento del proceso de recolección. cabe destacar que este método es uno de los más utilizados en el control de material particulado.

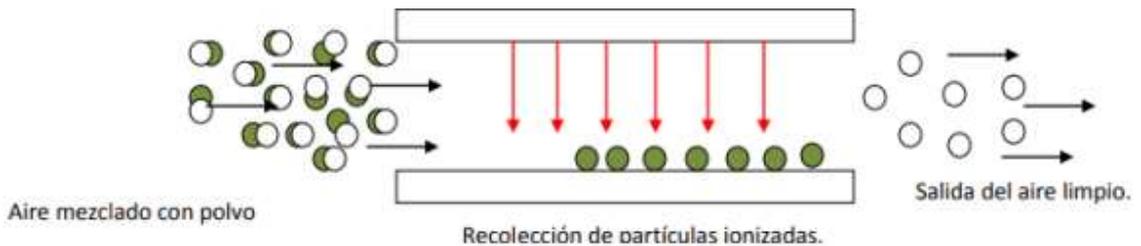


Imagen 2.2. Principio de funcionamiento de recolección de partículas ionizadas. (Fuente: Becerra, 2010)

### 2.11 Definición general de las cenizas volantes

Según la norma ASTM C618 (American Society for Testing and Materials) la ceniza volante es el producto sólido y en estado de fina división procedente de la combustión de carbón pulverizado en los hornos de centrales térmicas, que ha sido recuperado por los filtros a través del arrastre de los gases en el proceso de combustión. Las cenizas volantes constituyen la mayor parte de ceniza que generan este tipo de centrales, alrededor de un 80% del total de cenizas. (Superintendencia del medio ambiente, gobierno de Chile). Cabe mencionar que, para la citada norma, el término cenizas volantes no es aplicable a los productos separados o condensados de flujos de gases procedentes de otros procesos industriales.

## 2.12 Características físicas

Las cenizas volantes secas se suelen presentar como un polvo muy fino y suave al tacto, cuyo color depende del contenido en óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y de su riqueza en carbón. Estas características físicas de las cenizas son función del proceso y eficiencia de las centrales térmicas, es decir, que a altas temperaturas y un arrastre rápido de las partículas con los gases de chimenea, se propicia una condición favorable para el desarrollo de formas esféricas de las de las cenizas volantes. El tamaño varía entre  $1\ \mu\text{m}$  a  $200\ \mu\text{m}$  (micras) y son traslúcidas en su mayoría con pesos específicos que suelen estar comprendidas entre los valores  $1,9$  y  $2,8\ \text{g/cm}^3$ . (Cabrera, J.G., 1985).

Las formas de las cenizas dependen por un lado de la procedencia del carbón, como de las temperaturas que se obtienen en la combustión. Así, de acuerdo con la procedencia la hulla (carbón mineral con altos contenidos de carbono) genera partículas esféricas mientras que los lignitos forman partículas irregulares.

Por otra parte, si la temperatura alcanzada en la central térmica es baja, como sucede en las centrales de lecho fluidificado ( $900\ ^\circ\text{C}$ ), la materia mineral que constituye las cenizas no funde y la forma final es irregular. En cambio, cuando la temperatura es superior a los  $1500\ ^\circ\text{C}$  como ocurre en las centrales de fusión, las partículas serán esféricas y de superficie lisa. (Alonso Ramírez, J.L., "Orígenes, tipos y caracterización de las cenizas volantes.", Madrid, 1990)

En la imagen 2.3 y 2.4 se observa la forma esférica que poseen las cenizas volantes pleuroesferas (re llenas de otras esferas de menor tamaño) y cenoesfera (huecas y completamente vacías).

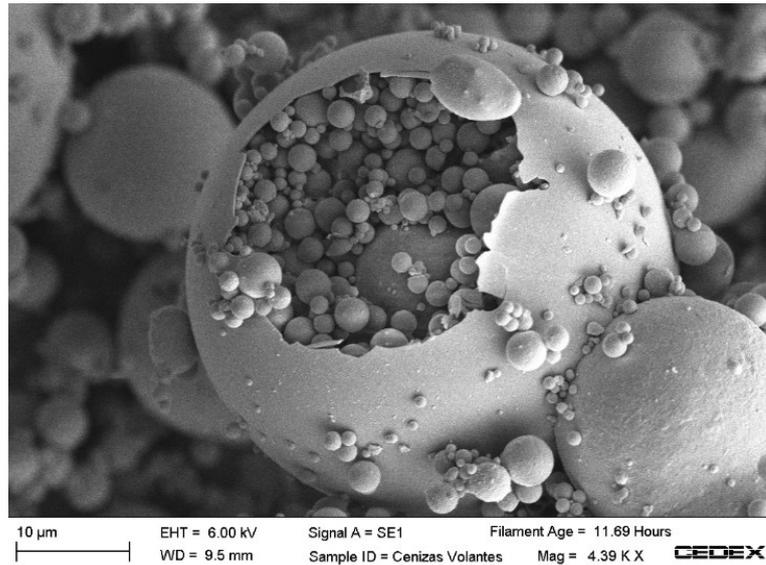


Imagen 2.3. Pleuroesfera. (Fuente: Control de estudios experimentales CEDEX)

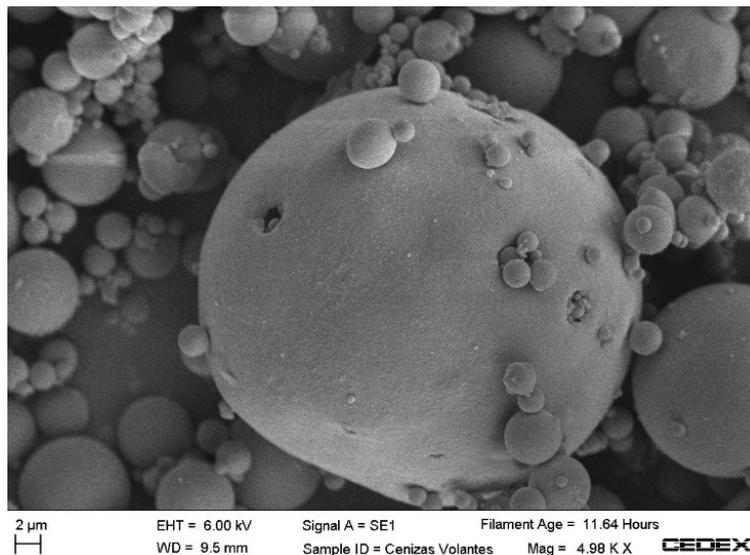


Imagen 2.4. Ceno esfera. (Fuente: Control estudios experimentales CEDEX)

La finura de las cenizas y su contenido en la mezcla es un factor determinante en la demanda de agua y, como consecuencia, en el desarrollo de las resistencias. También se ha comprobado que entre más fina es una ceniza volante, menor es su contenido en carbón, mayor es la actividad puzolánica y

más elevada la contribución a la resistencia mecánica de pastas y hormigones. (Ramírez A., J.L., 1990).

### **2.13 Características químicas**

La composición química de las cenizas volantes es muy variable dependiendo de la composición química de los constituyentes del carbón.

Los porcentajes en los que se presentan los distintos componentes de las cenizas varían sustancialmente de unas a otras. En general, en mayor proporción poseen elementos como sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), cal ( $\text{CaO}$ ) y carbón sin quemar; en menor proporción, menor al 5% en peso contiene magnesia ( $\text{MgO}$ ), óxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ), y otros constituyentes en cantidades aún más reducidas, como compuestos de titanio, vanadio, manganeso, fósforo, germanio, galio. (Cenizas de carbón y cenizas de hogar, CEDEX, 2011).

### **2.14 Clasificación de las cenizas volantes**

Las cenizas volantes se clasifican en diferentes tipos, atendiendo principalmente a su contenido en cal y según la norma ASTM C618-08a, se definen:

### **2.14.1 Cenizas clase N**

Puzolanas naturales calcinadas o sin calcinar, como algunas tierras diatomáceas; horstenos opalinos y pizarra; tobas y cenizas volcánicas o pumíticas, calcinadas o sin calcinar; materiales varios que requieren de calcinación para inducir propiedades satisfactorias, como algunas arcillas y pizarra.

### **2.14.2 Cenizas clase F**

Ceniza volante normalmente producida de la calcinación del carbón antracítico o bituminoso. Esta clase de ceniza volante tiene propiedades puzolánicas. Reaccionan lentamente con la cal y los álcalis y la suma de sus óxidos ácidos es mayor del 70%.

### **2.14.3 Cenizas clase C**

Ceniza volante producida normalmente a partir de la combustión de lignitos o carbones sub-bituminosos. Esta clase de cenizas además de tener propiedades puzolánicas tiene propiedades cementicias, reaccionan formando rápidamente aluminato cálcico hidratado y etringita. La suma de sus óxidos ácidos es mayor del 50%.

En la tabla 2.5 se muestra la clasificación de las cenizas volantes utilizadas en el estudio de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM C618/05.

Descripción compuestos químicos	Clase		
	N	F	C
Dióxido de silicio (SiO <sub>2</sub> ) + óxido de aluminio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) + óxido de hierro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ). min. %	70.0	70.0	50.0
Trióxido de azufre (SO <sub>3</sub> ) máx. %	4.0	5.0	5.0
Contenido de humedad máx. %	3.0	3.0	3.0
Perdida por calcinación máx. %	10.0	6.0	6.0

Tabla 2.5. Clasificación de cenizas volantes (Fuente: ASTM C618/05)

Según su composición química y atendiendo a la procedencia del carbón de origen, las cenizas volantes pueden clasificarse en.

Ceniza silicoaluminosa: denominadas también puzolánicas o no activas, tienen un contenido de CaO inferiores al 10%. Son las más importantes en cuanto a cantidades producidas y aprovechamiento. Tienen propiedades ligantes en presencia de activadores de su puzolanicidad (cal o cemento). El contenido en cal libre es importante para saber si una vez compactadas, sin aditivos, experimentan endurecimiento semejante a los que tiene lugar en los cementos.

Cenizas sulfocálcicas: tienen altos contenidos de CaO, por encima del 10 %. Se denominan cenizas hidráulicas o activas, y suelen presentar un comportamiento diferente al de las silicoaluminosas, comportándose como aglomerante hidráulico, es decir, cuando son amasadas con agua sufren reacciones de hidratación, fraguado y endurecimiento semejante a los que tiene lugar en los cementos.

En cuanto a la solubilidad, el porcentaje de materia soluble es pequeño, de un 2 a 4% como máximo, dependiendo de la composición química, principalmente del contenido de CaO libre y de sulfatos. (Pardo de Santayana, Carrillo, F., 2003).

## **2.15 Producción de cenizas volante**

En el mundo se producen aproximadamente 600 millones de toneladas al año de cenizas de carbón, 500 millones de esas son cenizas volantes. De esta cantidad sólo entre un 10% y un 20% es reutilizado. (Ahmaruzzaman, M., A review on the utilization of fly ash, Progress in energy and Combustión Science, 2010).

Según antecedentes recopilados a través del sistema de evaluación de impacto ambiental (SEIA) y la comisión nacional de energía (CNE), existen 19 proyectos térmicos a carbón aprobados, de los cuales 9 se encuentran en funcionamiento y otros 8 se encuentran en calificación ambiental.

Por lo tanto, considerando el funcionamiento simultáneo de los proyectos ingresado al SEIA y los proyectos actualmente en funcionamiento, se estima que en nuestro país para el año 2020 se generarán más de 3 millones de toneladas anuales de cenizas volantes. (Sistema evaluación impacto ambiental, 2015)

Estas grandes cantidades de residuos generan un aumento de las áreas donde depositar las cenizas volantes, lo que se está transformando en un serio problema ambiental. El banco mundial advirtió que para el 2015 en la India, por ejemplo, se necesitarían 1000 km<sup>2</sup> para almacenar todas las cenizas volantes que se habrán producido, esto equivale a necesitar 1 m<sup>2</sup> de terreno por persona

para almacenar cenizas. (Canales Álvarez, L., Estudio de la aplicabilidad de las cenizas volantes de la planta térmica de Mudunuru en materiales de construcción, 2007).

## **CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA**

### **3.1 Programa experimental**

Para desarrollar el programa experimental, se propone elaborar un mortero calidad M-15 y otros con variaciones en su dosificación, adicionando distintos porcentajes de cenizas volantes como sustitución al cemento. La primera serie de probetas será el mortero patrón que se confecciona con una relación 1: 3 de cemento y arena de acuerdo con lo especificado en el punto cinco de la norma NCh 158 of 67. La segunda y tercera serie de probetas se confeccionan con la misma relación cemento: arena, pero con reemplazo del 20 % y 30% (del peso de cemento) de cenizas volantes, respectivamente.

Se utilizarán moldes prismáticos de tipo rilem con medidas de 40 mm por 40 mm y largo de 160 mm. El estudio contempla la realización de ensayos de docilidad del mortero en estado fresco, de flexión y compresión a distintas edades, en estado endurecido.

Una vez fabricadas las probetas en laboratorio se sumergirán en una solución de agua y cal para el proceso de curado, esta solución está dada por una proporción de 3 gr por litro de agua de acuerdo con lo especificado en la norma NCh 2261-2010.

### **3.2 Etapas del Estudio**

#### **3.2.1 Elaboración de probetas**

El proceso de confección de las probetas se realizó siguiendo los criterios citados en la norma chilena NCh 158 y NCh 2261/2010.

#### **3.2.2 Tamaño de la muestra**

Para este estudio de investigación se desconoce el tamaño de la población por lo cual, el tamaño muestral se determinará mediante análisis estadístico, de acuerdo con una distribución normal de Gauss. (ver ecuación 3.1)

$$n = \frac{z^2 * p(1 - p)}{e^2}$$

Ecuación 3.1. Calculo del tamaño de la muestra desconociendo tamaño de la población.

Margen de error ( $e$ ): intervalo en el cual se espera encontrar el dato que se desea medir dentro de un universo.

Nivel de confianza ( $z$ ): Es la desviación del valor medio que se acepta para lograr el nivel de confianza deseado. En función del nivel de confianza, se utilizará un valor determinado que viene dado por la forma que tiene la distribución de Gauss. (Ver tabla 3.1)

( $p$ ): Es la probabilidad de éxito o proporción esperada del estudio, en caso de no existir información sobre el valor que se espera encontrar, como regla general se utilizará un valor  $p$  igual al 50% (expresado en decimales).

( $n$ ): Tamaño de la muestra.

<b>Nivel de Confianza</b>	<b>Puntuación Z</b>
80%	1.28
85%	1.44
90%	1.65
95%	1.96
99%	2.58

Tabla 3.1. Tabla de distribución normal ( $z$ )

Finalmente, para un nivel de confianza ( $z$ ) del 90% y un margen de error ( $e$ ) del 14%, el tamaño de la muestra ( $n$ ) es:

$$n = \frac{z^2 * p (1 - p)}{e^2}$$

$$n = \frac{1.65^2 * 0.5 (1 - 0.5)}{0.14^2}$$

$$n = \frac{1.65^2 * 0.5 * 0.5}{0.14^2} = \frac{0.6806}{0.0196} = 34.7 \cong 35 \text{ probetas/partida}$$

### 3.2.3 Dosificación de los morteros

Para efectuar un análisis comparativo, será necesario elaborar un mortero con distintas dosificaciones: mortero patrón, mortero +20% de cenizas volantes y mortero +30% de ceniza volante del porcentaje en peso del cemento, como sustitución.

Los áridos utilizados serán de las mismas propiedades en todas las mezclas realizadas.

Con lo establecido en la NCh 2256/1, se busca obtener un mortero de calidad M-15 y su dosificación estará dada por la proporción 1: 3 partes calculada en gramos (g), de acuerdo con la NCh 158 of 67.

En las tablas presentadas a continuación se muestra en detalle, cada una de las dosificaciones utilizadas en las partidas.

	Material	Masa
Partida N°1 Probeta Patrón	Cemento (1)	4000 g
	Arena (3)	12000 g
	Agua (1)	2,4 L*

Tabla 3.2. Dosificación partida 1 probeta patrón. (Fuente: NCh 158 of 67)

	Material	Masa
Partida N°2 Probeta +20% de Cenizas volantes	Cemento (1)	3200 g
	Arena (3)	12000 g
	Ceniza Volante (1)	800 g
	Agua (1)	2,0 L*

Tabla 3.3. Dosificación partida 2 probeta +20% CV. (Fuente: Elaboración propia)

	Material	Masa
Partida N°3 Probeta +30% de Cenizas volantes	Cemento (1)	2800 g
	Arena (3)	12000 g
	Ceniza Volante (1)	1200 g
	Agua (1)	1,8 L*

Tabla 3.4. Dosificación partida 3 probeta +30% CV. (Fuente: Elaboración propia)

\* Nota: se redujo la cantidad de agua para mantener una consistencia estable de la mezcla.

### 3.2.4 Confección de probetas

Se confeccionaron 108 probetas de tipo rilem, con una relación arena cemento (A/C) 1: 3 y un tamaño máximo de árido para arena gruesa de 5 mm. Las muestras se dividen en tres partidas de 36 probetas cada una (patrón, +20% CV, +30% CV), se subdividen en tres subgrupos de 12 probetas separadas en 2 grupos de 6 probetas para el ensayo de flexión, del cual se obtienen otras 12 muestras para el ensayo de compresión, efectuadas en las edades de 7, 10, 14, 16, 28 días.

En las tablas presentadas a continuación se detalla el registro de los días de elaboración de cada partida de muestras.

Elaboración	Cantidad	E. Flexión	E. Compresión	Fecha	Días
08-oct	12	6	12	22-oct	14
		6	12	24-oct	16
10-oct	12	6	12	07-nov	28
		6	12	09-nov	30
12-oct	12	6	12	19-oct	7
		6	12	22-oct	11
Total de Ensayos		36	72		

Tabla 3.5. Partida 1 mortero patrón. (Fuente: Elaboración propia)

Elaboración	Cantidad	E. Flexión	E. Compresión	Ensayo	Días
17-oct	12	6	12	24-oct	7
		6	12	26-oct	9
22-oct	12	6	12	05-nov	14
		6	12	07-nov	16
24-oct	12	6	12	21-nov	28
		6	12	23-nov	30
Total de Ensayos		36	72		

Tabla 3.6. Partida 2 mortero +20% CV. (Fuente: Elaboración propia)

Elaboración	Cantidad	E. Flexión	E. Compresión	Ensayo	Días
26-oct	12	6	12	09-nov	14
		6	12	12-nov	17
29-oct	12	6	12	07-nov	7
		6	12	09-nov	9
31-oct	12	6	12	28-nov	28
		6	12	30-nov	30
Total de Ensayos		36	72		

Tabla 3.7. Partida 3 mortero +30% CV. (Fuente: Elaboración propia)

### 3.3 Descripción de ensayos

#### 3.3.1 Docilidad

La determinación de la consistencia de los morteros, en estado fresco, está dada por lo establecido en la norma NCh 2257/3 mediante el método del asentamiento del cono de Abrams.

La muestra de mortero se coloca y compacta en un molde con forma de tronco cónico de diámetro superior 100 mm, diámetro base 200 mm y altura 300 mm. El molde se levanta dejando que el mortero se asiente. Se mide y registra el asentamiento, como la distancia vertical entre la altura original y la posición final del centro de la superficie superior de la mezcla.

En la imagen 3.1 se muestra la forma de medir el asentamiento en el ensayo de docilidad.

De acuerdo con el punto 1.3 de la NCh 1019 este método no será aplicable a hormigones o morteros cuyo asentamiento sea menor que 1,5 cm o mayor a 21 cm, ampliable a 23 cm.



Imagen 3.1. Cálculo de asentamiento mediante ensayo de cono de Abrams. (Fuente: Elaboración propia)

En la tabla 3.8 se observa el registro de los asentamientos (cm), para cada una de las partidas elaboradas. El registro fotográfico se detalla en el anexo A.

### 3.4.2 Flexotracción

El ensayo de flexotracción se realiza con lo propuesto en la norma chilena NCh 158 of 67. Las probetas se afirman en una de las caras laterales, sobre los rodillos de apoyo de la máquina de flexión. Se aplica una carga a través del rodillo superior con una velocidad de carga de 5 Kg/s. de este ensayo se obtienen 2

muestras, las cuales deben permanecer húmedas hasta realizar el ensayo de compresión.

<b>Probeta</b>	<b>Fecha Elaboración</b>	<b>Descenso de Cono (cm)</b>
<b>Partida N°1 Patrón</b>	08/10	19
<b>Partida N°2 Patrón</b>	10/10	17
<b>Partida N°3 Patrón</b>	12/10	17
<b>Partida N°1 +20% CV</b>	17/10	16
<b>Partida N°2 +20% CV</b>	22/10	16
<b>Partida N°3 +20% CV</b>	24/10	17,5
<b>Partida N°1 +30% CV</b>	26/10	18
<b>Partida N°2 +30% CV</b>	29/10	17
<b>Partida N°3 +30% CV</b>	31/10	19

Tabla 3.8. Registro de asentamiento de cono. (Fuente: Elaboración propia)

En la imagen 3.2 se observa la probeta sometida al ensayo de flexión mediante gata hidráulica manual.

### 3.4.3 Compresión

Una propiedad importante del mortero es su resistencia a la compresión, definida como la máxima resistencia medida de un espécimen de mortero a carga axial. Se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{Kg/cm}^2$ ) y se designa como  $f_c$ .

Cada trozo obtenido del ensayo a flexión se ensayará a la compresión en una sección de 40x40 mm, aplicándose la carga a las dos caras provenientes de las laterales del moldaje. Se llevará a cabo a través de un sistema de placas, que se colocará entre los platillos de la máquina de ensayos. Este sistema consta de placas de presión, rectangulares, con espesor superior o igual a 100 mm; ancho de 40 mm y longitud superior a 40 mm.

En la imagen 3.3 se muestra la probeta sometida a carga directa, a través de sección cuadrada de presión.



Imagen 1.2 Ensayo de Flexión, gata hidráulica manual 25 kN. (Fuente: Elaboración Propia)



Imagen 3.3. Ensayo de Compresión. (Fuente: Elaboración propia)

### **3.5 Alcances**

El proceso experimental, se llevó a cabo en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería de la Universidad San Sebastián.

Para la amasada de mortero, se utilizó agua potable (cumple con NCh 409/1) de la red local de suministro para uso doméstico de la ciudad de Concepción.

El cemento utilizado corresponde a uno Especial Puzolánico Biobío, el cual se fabrica mediante la molienda conjunta de clínker, yeso y puzolana volcánica.

Las cenizas están clasificadas como clase C y provienen de la termoeléctrica planta Santa María de la empresa Colbún.

Propiedades como la temperatura o humedad relativa del ambiente, no fueron consideradas para este estudio.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1 Resultados de ensayo a flexión

#### 4.1.1 Registro mortero patrón

Se presentan los resultados obtenidos en el ensayo a flexión, a distintas edades, para cada una de las partidas del mortero patrón.

Las probetas son clasificadas siguiendo la forma :( N° partida – N° probeta).

Flexión	Patrón	7 días		
	Descripción	masa (g)	Carga (Kg)	Newton (N)
Seco	P3-1	564,1		Calibración
	P3-2	575,8	132	1294,92
	P3-3	568	110,8	1086,948
	P3-4	588,7	118	1157,58
Húmedo	P3-5	577,7	114	1118,34
	P3-6	569,1	132	1294,92

Tabla 4.1. Registro de ensayo a flexión de mortero patrón, 7 días. (Fuente: Elaboración propia)

Flexión	Patrón	10 días		
	Descripción	masa (g)	Carga (Kg)	Newton (N)
Seco	P3-7	577,7	108	1059,48
	P3-8	570,2	110,8	1086,948
	P3-9	567,4	110,8	1086,948
Húmedo	P3-10	560,6	136	1334,16
	P3-11	557,1	93,6	918,216
	P3-12	566,8	96	941,76

Tabla 4.2. Registro de ensayo a flexión de mortero patrón, 10 días. (Fuente: Elaboración propia)

Flexión	Patrón	14 días		
	Descripción	masa (g)	Carga (Kg)	Newton
Seco	P1-1	566	90	882,9
	P1-2	555,5	96	941,76
	P1-3	567,1	96	941,76
	P1-4	576,2	104	1020,24
Húmedo	P1-5	574,9	100	981
	P1-6	563,7	93,6	918,216

Tabla 4.3. Registro de ensayo a flexión de mortero patrón, 14 días. (Fuente: Elaboración propia)

Flexión	Patrón	16 días		
	Descripción	masa (g)	Carga (Kg)	Newton
Seco	P1-7	552,9	104	1020,24
	P1-8	562,6	122	1196,82
	P1-9	554,4	122	1196,82
	P1-10	554	110,8	1086,948
Húmedo	P1-11	553,1	104	1020,24
	P1-12	545,7	118	1157,58

Tabla 4.4. Registro ensayo a flexión de probeta patrón, 16 días. (Fuente: Elaboración propia)

Flexión	Patrón	28 días		
	Descripción	masa (g)	Carga (Kg)	Newton
Seco	P2-1	568,1	192	1883,52
	P2-2	579,4	156,8	1538,208
	P2-3	570,3	181,6	1781,496
	P2-4	570,2	177,6	1742,256
Húmedo	P2-5	584,1	192	1883,52
	P2-6	578,4	181,6	1781,496

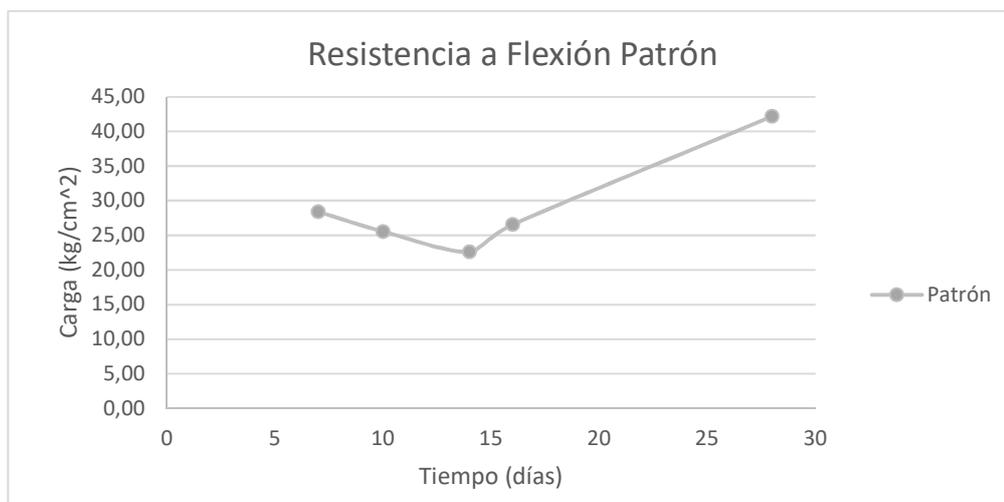
Tabla 4.5. Registro ensayo a flexión de probeta patrón a 28 días. (Fuente: Elaboración propia)

Las resistencias se expresarán en  $\text{kg/cm}^2$  y calculados para la flexión como  $0,234 P$ , según la distancia entre los apoyos (100 mm para este caso), siendo P la ruptura expresada en kg. A su vez, la resistencia a flexión y a compresión del mortero será la media aritmética de los resultados de todos los ensayos realizados en cada fecha, de acuerdo con lo establecido en el punto 9.1 y 9.3 de la norma NCh 158/67. Lo anterior se presenta en la tabla 4.6.

días	Media Aritmética P (kg)	$0,234 * P$ ( $\text{kg/cm}^2$ )
7	121,36	28,40
10	109,20	25,55
14	96,60	22,60
16	113,47	26,55
28	180,27	42,18

Tabla 4.6. Media aritmética de las resistencias del mortero patrón a distintas edades. (Fuente: Elaboración propia)

En la siguiente grafica se representan el historial de resistencias del mortero patrón a distintas edades.



Gráfica 4.1. Resistencia a Flexión mortero patrón a distintas edades. (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.1.2 Registro mortero +20% cenizas volantes

A continuación, se presentan los registros del ensayo de flexión para la partida del mortero con un remplazo del 20% de ceniza volante a edades desde los 7 hasta los 28 días.

Flexión	20%		7 días	
	Descripción	Masa (g)	Carga (Kg)	Newton (N)
Seco	P1-1	560,70	100,00	981,00
	P1-2	566,00	104,00	1020,24
	P1-3	568,50	104,00	1020,24
Húmedo	P1-4	571,50	114,00	1118,34
	P1-5	579,10	96,00	941,76
	P1-6	579,30	104,00	1020,24

Tabla 4.7. Registro ensayo a flexión de probeta +20% cenizas volantes a 7 días. (Fuente: Elaboración propia)

Flexión	20%		10 días	
	Descripción	Masa (g)	Carga (Kg)	Newton (N)
Seco	P1-7	557,60	139,60	1369,48
	P1-8	546,00	122,00	1196,82
	P1-9	549,50	139,60	1369,48
Húmedo	P1-10	560,00	136,00	1334,16
	P1-11	578,50	118,00	1157,58
	P1-12	577,20	110,80	1086,95

Tabla 4.8. Registro ensayo a flexión de probeta +20% cenizas volantes a 10 días (Fuente: Elaboración propia)

Flexión	20%		14 días	
	Descripción	Masa (g)	Carga (Kg)	Newton (N)
Seco	P2-1	572,70	118,00	1157,58
	P2-2	570,80	114,00	1118,34
	P2-3	586,10	114,00	1118,34
	P2-4	575,10	124,80	1224,29
Húmedo	P2-5	570,70	114,00	1118,34
	P2-6	557,30	139,60	1369,48

Tabla 4.9. Registro a flexión de probeta +20% cenizas volantes a 14 días (Fuente: Elaboración propia)

Flexión	20%		16 días	
	Descripción	Masa (g)	Carga (Kg)	Newton (N)
Seco	P2-7	569,00	142,00	1393,02
	P2-8	560,00	139,60	1369,48
	P2-9	549,30	110,80	1086,95
	P2-10	570,00	128,00	1255,68
Húmedo	P2-11	564,00	122,00	1196,82
	P2-12	576,30	110,80	1086,95

Tabla 4.10. Registro a flexión de probeta +20% cenizas volantes a 16 días. (Fuente: Elaboración propia)

Flexión	20%	28 días		
	Descripción	Masa (g)	Carga (Kg)	Newton (N)
Seco	P3-1	551,10	132,0	1294,92
	P3-2	555,20	132,0	1294,92
	P3-3	560,10	136,0	1334,16
Húmedo	P3-4	555,10	142,0	1393,02
	P3-5	545,10	139,6	1369,47
	P3-6	560,00	150,0	1471,50

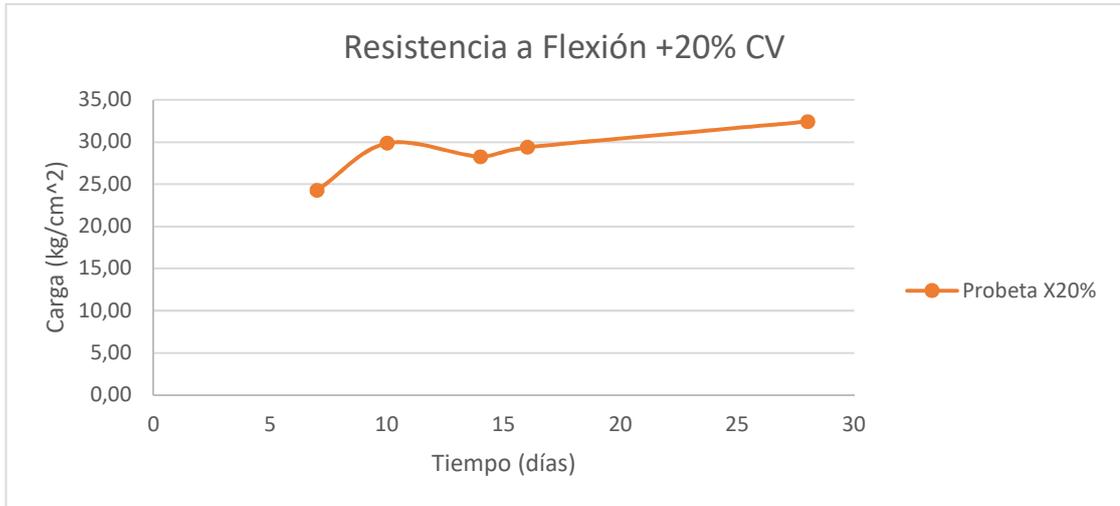
Tabla 4.11. Registro a flexión de probeta +20% cenizas volantes a 28 días. (Fuente: Elaboración propia)

La media aritmética de los resultados obtenidos en el ensayo a flexión para la partida de mortero con adición del 20% de cenizas volantes, se presenta en la siguiente tabla.

días	Media Aritmética P (kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )
7	103,67	24,26
10	127,67	29,87
14	120,73	28,25
16	125,53	29,37
28	138,60	32,43

Tabla 4.12. Media aritmética de las resistencias del mortero +20% C.V a distintas edades (Fuente: Elaboración propia)

En el grafico 4.2 se muestra la evolución que presentan las resistencias a distintas edades.



Gráfica 4.2. Resistencia a Flexión a distintas edades de mortero +20% CV. (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.1.3 Registro mortero +30% cenizas volantes

Las tablas que se presentan a continuación muestran los registros obtenidos del ensayo a flexión para morteros con adición del 30% de cenizas volantes como reemplazo al cemento a edades de 7, 10, 14, 16 y 28 días.

Flexión	30%		7 días	
	Descripción	Masa (g)	Carga (Kg)	Newton (N)
Seco	P1-1	537,50	68,00	667,08
	P1-2	539,00	68,00	667,08
	P1-3	528,30	61,60	604,30
	P1-4	552,80	72,00	706,32
Húmedo	P1-5	542,50	64,00	627,84
	P1-6	556,70	64,00	627,84

Tabla 4.13. Registro ensayo a flexión de probeta +30% cenizas volantes a 7 días (Fuente: Elaboración propia)

Flexión	30%		10 días	
	Descripción	Masa (g)	Carga (Kg)	Newton (N)
Seco	P1-7	513,30	68,00	667,08
	P1-8	516,50	76,00	745,56
	P1-9	517,90	78,80	773,03
Húmedo	P1-10	548,00	68,00	667,08
	P1-11	550,10	72,00	706,32
	P1-12	553,00	76,00	745,56

Tabla 4.14 Registro ensayo a flexión de probeta +30% cenizas volantes a 10 días. (Fuente: Elaboración propia)

Flexión	30%		14 días	
	Descripción	Masa (g)	Carga (Kg)	Newton (N)
Seco	P2-1	554,30	104,00	1020,24
	P2-2	543,60	104,00	1020,24
	P2-3	549,30	108,00	1059,48
Húmedo	P2-4	566,60	86,00	843,66
	P2-5	578,40	96,00	941,76
	P2-6	560,90	86,00	843,66

Tabla 4.15 Registro ensayo a flexión de probeta +30% cenizas volantes a 14 días. (Fuente: Elaboración propia)

Flexión	30%		16 días	
	Descripción	Masa (g)	Carga (Kg)	Newton (N)
Seco	P2-7	541,60	108,00	1059,48
	P2-8	560,90	104,00	1020,24
	P2-9	540,00	110,80	1086,95
Húmedo	P2-10	550,00	100,00	981,00
	P2-11	556,50	86,00	843,66
	P2-12	556,60	108,00	1059,48

Tabla 4.16. Registro ensayo a flexión de probeta +30% cenizas volantes a 16 días. (Fuente: Elaboración propia)

Flexión	30%	28 días		
	Descripción	Masa (g)	Carga (Kg)	Newton (N)
Seco	P3-1	557,00	114,00	1118,34
	P3-2	559,50	122,00	1196,82
	P3-3	543,10	118,00	1157,58
	P3-4	554,30	114,00	1118,34
Húmedo	P3-5	527,70	110,80	1086,95
	P3-6	525,00	124,80	1224,29

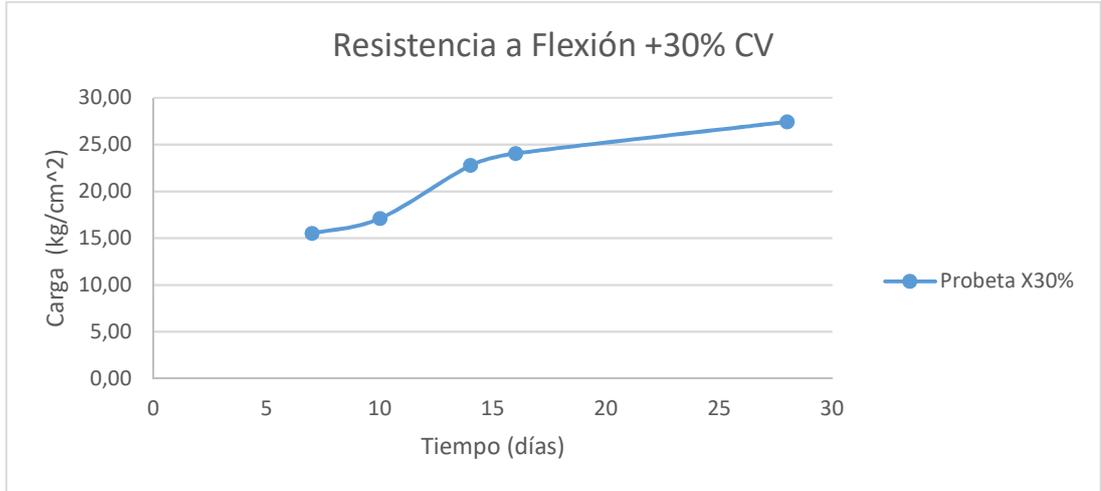
Tabla 4.17. Registro ensayo a flexión de probeta +30% cenizas volantes a 28 días. (Fuente: Elaboración propia)

La tabla 4.18 presenta la media aritmética de las cargas (P) y las resistencias promedio de todos los registros del ensayo a flexión con adición del 30% de cenizas volantes.

días	Media Aritmética P (kg)	(kg/cm <sup>2</sup> )
7	66,27	15,51
10	73,13	17,11
14	97,33	22,78
16	102,80	24,06
28	117,27	27,44

Tabla 4.18. Media aritmética de las resistencias del mortero +30% C.V a distintas edades (Fuente: Elaboración propia).

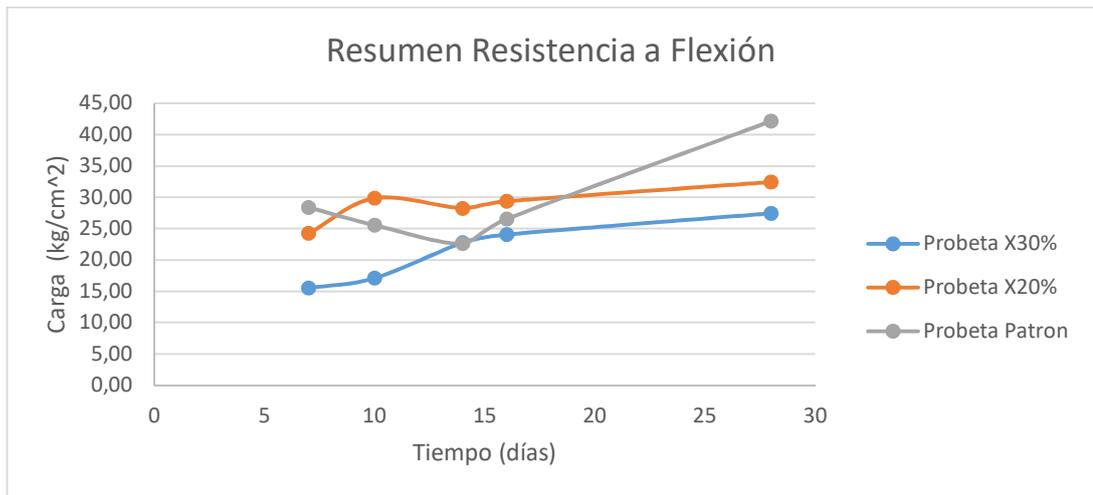
Los resultados de la tabla 4.18 se presentan en la siguiente gráfica.



Gráfica 4.3. Resistencia a Flexión mortero +30% CV a distintas edades. (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.2 Resumen de resultados de ensayos a flexión

En la gráfica 4.4 se muestra la evolución que presentan las resistencias en cada una de las partidas ensayadas para la flexión.



Gráfica 4.4. Curvas de resistencia a flexión para los tres tipos de morteros a distintas edades. (Fuente: Elaboración propia)

### 4.3 Resultados de ensayos a compresión

Luego de realizado el ensayo a flexión, se obtienen dos muestras por cada probeta ensayada, lo que duplica la cantidad de ensayos de compresión. Las muestras se clasificaron con las letras A y B.

#### 4.3.1 Registros mortero patrón

En las tablas que se presentan a continuación se muestran los registros obtenidos para edades de 7, 10, 14,16 y 28 días del ensayo a compresión, de acuerdo con lo establecido en la NCh 158 of 69.

Compresión		Patrón		7 días	
A		B			
Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)		
<b>Calibración</b>		<b>Calibración</b>			
20.969	11.462	20.458	11.097		
19.873	12.056	20.531	11.142		
20.019	11.645	22.431	11.964		
20.604	12.056	19.654	12.558		
20.896	13.334	22.577	12.056		

Tabla 4.19. Registro ensayo a compresión mortero patrón a 7 días. (Fuente: Elaboración propia)

Compresión		Patrón		10 días	
		A		B	
Desc.	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	
p3-7	31.344	12.330	30.833	13.560	
p3-8	31.125	13.106	28.933	12.786	
p3-9	18.704	12.421	25.207	12.832	
p3-10	30.395	12.512	28.422	14.019	
p3-11	27.618	12.877	29.372	12.284	
p3-12	30.614	13.060	27.618	14.110	

Tabla 4.20. Registro ensayo a compresión mortero patrón 10 días. (Fuente: Elaboración propia)

Compresión		Patrón		14 días	
		A		B	
Desc.	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	
p1-1	18.339	14.019	17.755	16.531	
p1-2	19.289	14.521	17.828	15.024	
p1-3	18.631	11.782	19.143	12.375	
p1-4	19.289	13.517	20.093	13.151	
p1-5	21.335	11.782	19.289	14.887	
p1-6	16.951	14.293	18.558	13.882	

Tabla 4.21. Registro ensayo a compresión mortero patrón 14 días. (Fuente: Elaboración propia)

Compresión		Patrón		16 días	
		A		B	
Desc.	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	
p1-7	22.431	19.590	26.449	19.271	
p1-8	23.234	19.453	24.038	18.083	
p1-9	18.850	11.690	19.800	15.754	
p1-10	21.627	18.997	21.042	17.764	
p1-11	18.850	17.261	23.819	18.357	
p1-12	22.869	19.134	22.211	17.261	

Tabla 4.22. Registro ensayo a compresión mortero patrón 16 días. (Fuente: Elaboración propia)

Compresión		Patrón		28 días	
Desc	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	
p2-1	41.208	25.892	42.596	29.910	
p2-2	34.998	25.983	40.112	23.700	
p2-3	41.573	21.234	43.327	23.791	
p2-4	42.962	12.741	54.506	25.390	
p2-5	49.026	23.426	49.099	17.307	
p2-6	49.026	24.568	49.012	24.613	

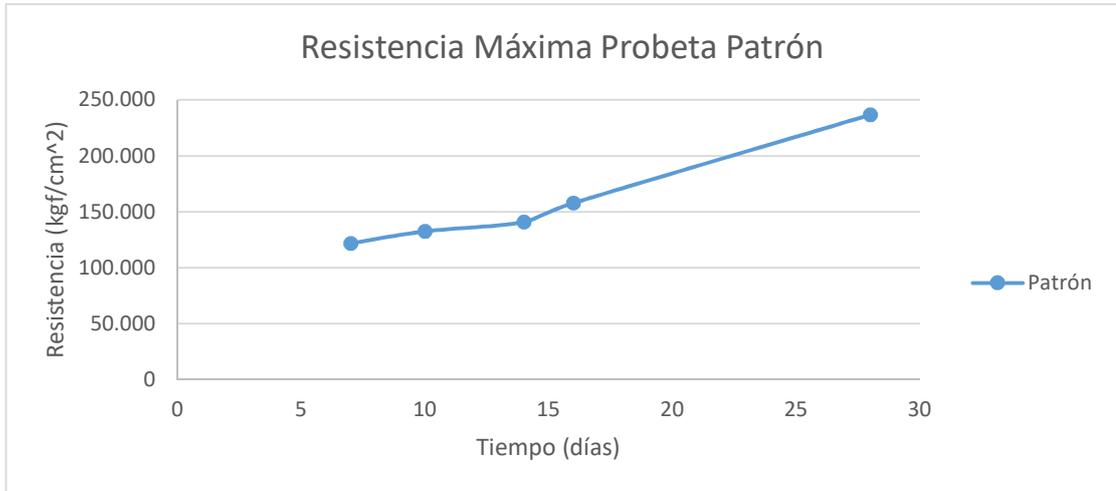
Tabla 4.23. Registro ensayo a compresión mortero patrón 28 días. (Fuente: Elaboración propia)

La media aritmética de todos los resultados del ensayo a compresión del mortero patrón a distintas edades, se presenta en la tabla 4.24.

Promedio Resistencia (MPa)	(kgf/cm <sup>2</sup> )	días
11.937	121.722	7
12.991	132.473	10
13.814	140.858	14
15.476	157.812	16
23.213	236.702	28

Tabla 4.24. Media aritmética de las resistencias a compresión del mortero patrón a distintas edades. (Fuente: Elaboración propia)

Los resultados presentados anteriormente se muestran en la siguiente gráfica.



Gráfica 4.5. Resistencia a compresión mortero patrón a distintas edades. (Fuente: Elaboración Propia)

#### 4.3.2 Registros mortero +20% cenizas volantes

Las tablas que se presentan a continuación muestran los registros de cargas y resistencias máximas del ensayo a compresión para morteros con adición del 20% de cenizas volantes como reemplazo al cemento.

Compresión	+20% CV		7 días	
	A		B	
Desc	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)
P1-1	17.901	11.188	14.905	9.316
P1-2	14.686	9.179	14.759	9.224
P1-3	15.416	9.635	15.197	9.498
P1-4	16.439	10.275	16.293	10.183
P1-5	16.074	10.046	17.024	10.640
P1-6	16.147	10.092	15.636	9.772

Tabla 4.25. Registro ensayo a compresión de probeta +20% cenizas volantes a 7 días. (Fuente: Elaboración propia)

Compresión		+20% CV		10 días	
A			B		
Desc.	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	
P1-7	19.654	12.284	21.919	13.699	
P1-8	22.138	13.836	21.335	13.334	
P1-9	15.709	9.818	19.362	12.101	
P1-10	19.508	12.193	19.654	12.284	
P1-11	18.631	11.645	19.654	12.284	
P1-12	19.727	12.330	19.508	12.193	

Tabla 4.26. Registro ensayo a compresión de probeta +20% cenizas volantes a 10 días. (Fuente: Elaboración propia)

Compresión		+20% CV		14 días	
A			B		
Desc.	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	
P2-1	17.024	10.640	17.389	10.868	
P2-2	19.800	12.375	20.677	12.923	
P2-3	19.508	12.193	23.161	14.476	
P2-4	15.928	9.955	17.535	10.960	
P2-5	23.600	14.750	20.677	12.923	
P2-6	24.111	15.069	24.476	15.298	

Tabla 4.27. Registro ensayo a compresión de probeta +20% cenizas volantes a 14 días. (Fuente: Elaboración propia)

Compresión		+20% CV		16 días	
A			B		
Desc.	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	
P2-7	28.641	17.901	28.279	17.672	
P2-8	27.910	17.444	28.130	17.581	
P2-9	28.130	17.581	26.741	16.713	
P2-10	18.631	11.645	17.974	11.234	
P2-11	20.531	12.832	22.065	13.791	
P2-12	25.499	15.937	24.842	15.526	

Tabla 4.28. Registro ensayo a compresión de probeta +20% cenizas volantes a 16 días. (Fuente: Elaboración propia)

Compresión		+20% CV		28 días	
		A		B	
Desc	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	
P3-1	22.942	14.339	28.130	17.581	
P3-2	31.052	19.408	32.221	20.138	
P3-3	29.737	18.586	31.125	19.453	
P3-4	22.650	14.156	27.691	17.307	
P3-5	31.121	21.325	33.609	21.006	
P3-6	32.294	20.184	31.564	19.727	

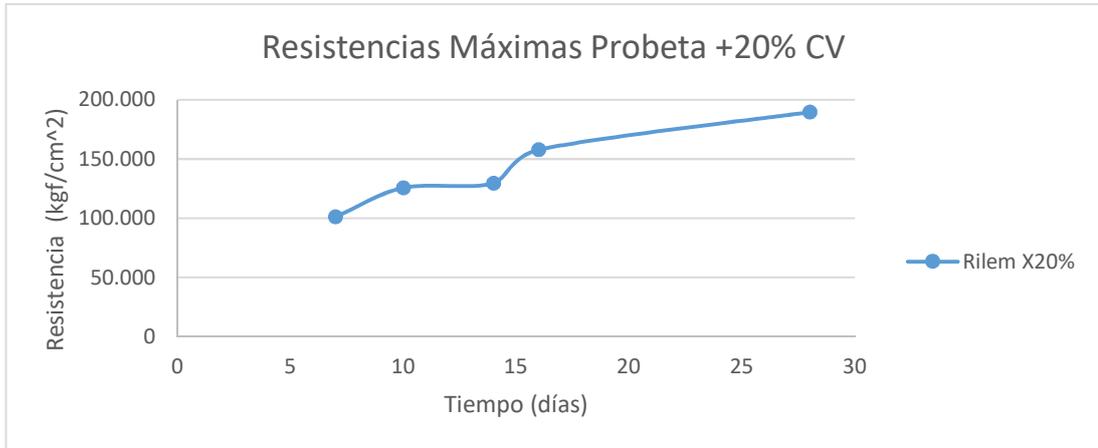
Tabla 4.29. Registro ensayo a compresión de probeta +20% cenizas volantes a 28 días. (Fuente: Elaboración propia)

La media aritmética de los resultados obtenidos de resistencias máximas de las probetas A y B ensayadas, se presenta en la siguiente tabla.

Promedio Resistencia (MPa)	(kgf/cm <sup>2</sup> )	días
9.921	101.161	7
12.333	125.764	10
12.703	129.527	14
15.488	157.932	16
18.601	189.673	28

Tabla 4.30. Media aritmética de las resistencias a compresión del mortero +20%C. V a distintas edades. (Fuente: Elaboración propia)

Los resultados presentados anteriormente se muestran en la gráfica 4.6.



Gráfica 4.6 Resistencia a compresión mortero +20% CV a distintas edades. (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.3.3 Registros mortero +30% cenizas volantes

Las tablas que se presentan a continuación muestran los registros de cargas y resistencias máximas del ensayo a compresión para morteros con adición del 30% de cenizas volantes como reemplazo al cemento.

Descripción	Compresión +30% CV		7 días	
	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)
P1-1	10.960	6.850	11.398	7.124
P1-2	10.740	6.713	10.010	6.256
P1-3	11.179	6.987	11.325	7.078
P1-4	7.306	4.566	7.465	4.789
P1-5	9.206	5.754	10.156	6.347
P1-6	9.644	6.028	10.375	6.484

Tabla 4.31 Registro ensayo a compresión de probeta +30% cenizas volantes a 7 días. (Fuente: Elaboración propia)

Compresión		+30% CV		10 días	
A			B		
Descripción	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	
P1-7	11.544	7.215	9.937	6.210	
P1-8	11.033	6.895	11.617	7.261	
P1-9	12.494	7.809	9.425	5.891	
P1-10	11.909	7.443	11.179	6.987	
P1-11	12.421	7.763	11.763	7.352	
P1-12	12.713	7.946	12.129	7.580	

Tabla 4.32 Registro ensayo a compresión de probeta +30% cenizas volantes a 10 días. (Fuente: Elaboración propia)

Compresión		+30% CV		14 días	
A			B		
Desc.	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	
P2-1	16.366	10.299	16.074	10.046	
P2-2	16.732	10.457	14.415	9.635	
P2-3	16.878	10.549	16.951	10.594	
P2-4	12.932	8.083	14.321	8.950	
P2-5	18.193	11.371	16.512	10.320	
P2-6	19.811	11.465	17.698	11.138	

Tabla 4.33 Registro ensayo a compresión de probeta +30% cenizas volantes a 14 días. (Fuente: Elaboración propia)

Compresión		+30% CV		16 días	
A			B		
Des.	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	
P2-7	29.372	18.357	26.522	16.576	
P2-8	27.253	17.033	27.910	17.444	
P2-9	27.764	17.353	29.664	18.540	
P2-10	13444	8.402	17.608	11.005	
P2-11	19.435	12.147	23.234	14.521	
P2-12	16.805	10.503	19.654	12.284	

Tabla 4.34 Registro ensayo a compresión de probeta +30% cenizas volantes a 16 días. (Fuente: Elaboración propia)

Compresión		+30% CV		28 días	
Des	A		B		
	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	Carga Máxima (kN)	Resistencia Máxima (MPa)	
P3-1	20.312	12.695	20.531	12.832	
P3-2	17.608	11.005	21.554	13.471	
P3-3	19.581	12.238	19.654	12.284	
P3-4	19.800	12.357	22.358	13.973	
P3-5	24.769	15.480	26.814	16.759	
P3-6	22.358	13.973	23.819	14.887	

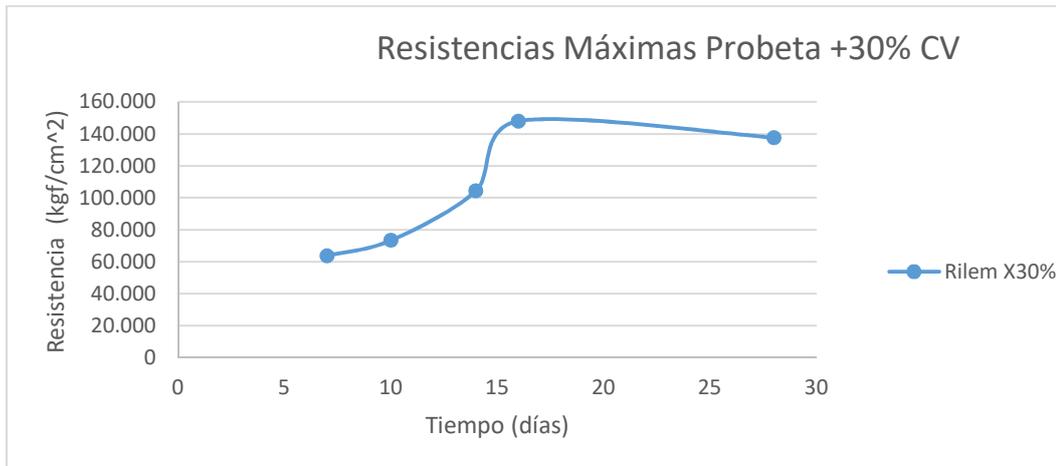
Tabla 4.35 Registro ensayo a compresión de probeta +30% cenizas volantes a 28 días. (Fuente: Elaboración propia)

La media aritmética de los resultados obtenidos de resistencias máximas de las probetas A y B ensayadas, se presentan en la siguiente tabla.

Promedio Resistencias (MPa)	(kgf/cm <sup>2</sup> )	días
6.248	63.711	7
7.196	73.378	10
10.242	104.440	14
14.514	147.997	16
13.496	137.620	28

Tabla 4.36 Media aritmética de las resistencias a compresión del mortero + 30% C.V a distintas edades. (Fuente: Elaboración propia)

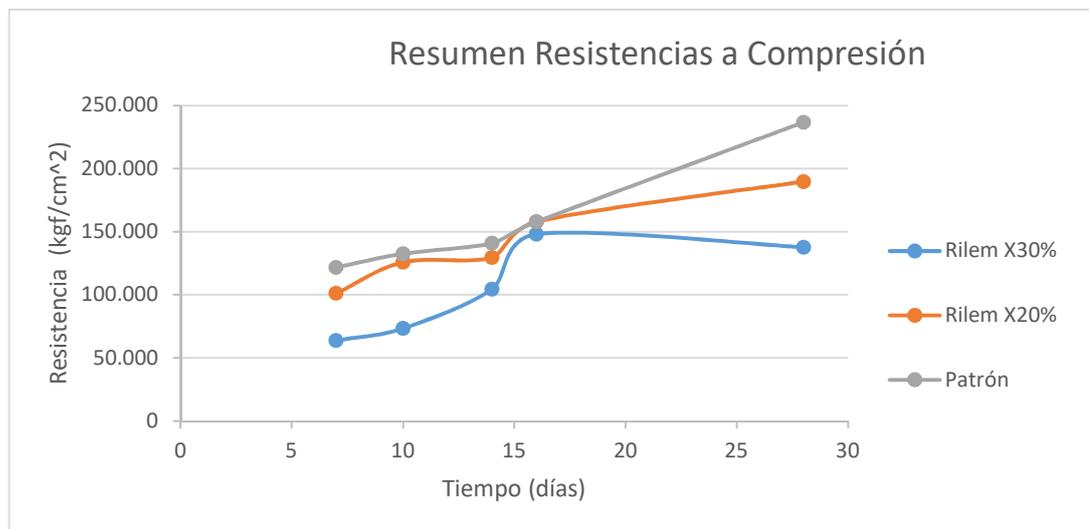
A continuación, se presentan los resultados de las resistencias máximas a través del tiempo. Ver grafica 4.7



Gráfica 4.7 Resistencia a compresión mortero +30% CV a distintas edades. (Fuente: Elaboración propia)

#### 4.4 Resumen de resultados de ensayos a compresión

En la gráfica 4.4 se muestra la evolución que presentan cada una de las partidas ensayadas para la flexión.



Gráfica 4.8 Curvas de resistencia a flexión para los tres tipos de morteros a distintas edades. (Fuente: Elaboración propia)

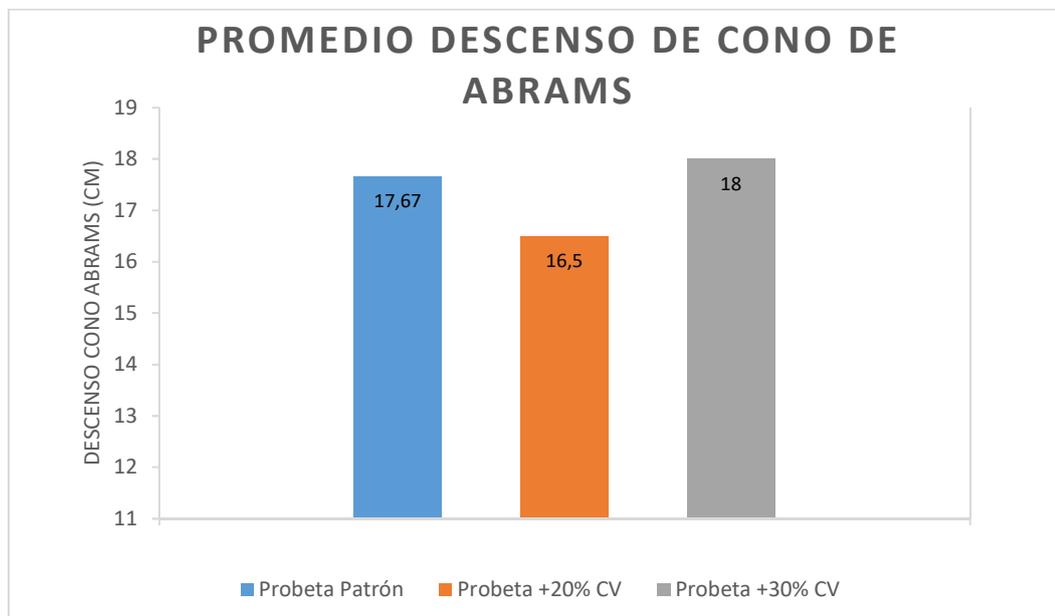
## CONCLUSIONES

Los ensayos realizados a las probetas de morteros con adiciones de cenizas volantes y sin ellas han permitido demostrar el comportamiento y las diferencias que presentan, tanto en su estado fresco como en su estado endurecido.

En primer lugar, durante el proceso de fabricación de las probetas con adición de cenizas se comprobó que estas deben ser introducidas en la amasada al mismo tiempo que el cemento (homogeneizar previamente) y luego los otros componentes del mortero, pues si se introducen primero, tienen tendencia a apelmazarse en las paredes y paletas de la amasadora. De igual forma, tampoco deben introducirse en el agua de amasado, ya que tiende a formar grumos.

De los datos obtenidos podemos concluir lo siguiente:

- Propiedades en estado fresco



Gráfica 4.9 Promedio de asentamientos de cono de Abrams. (Fuente: Elaboración propia)

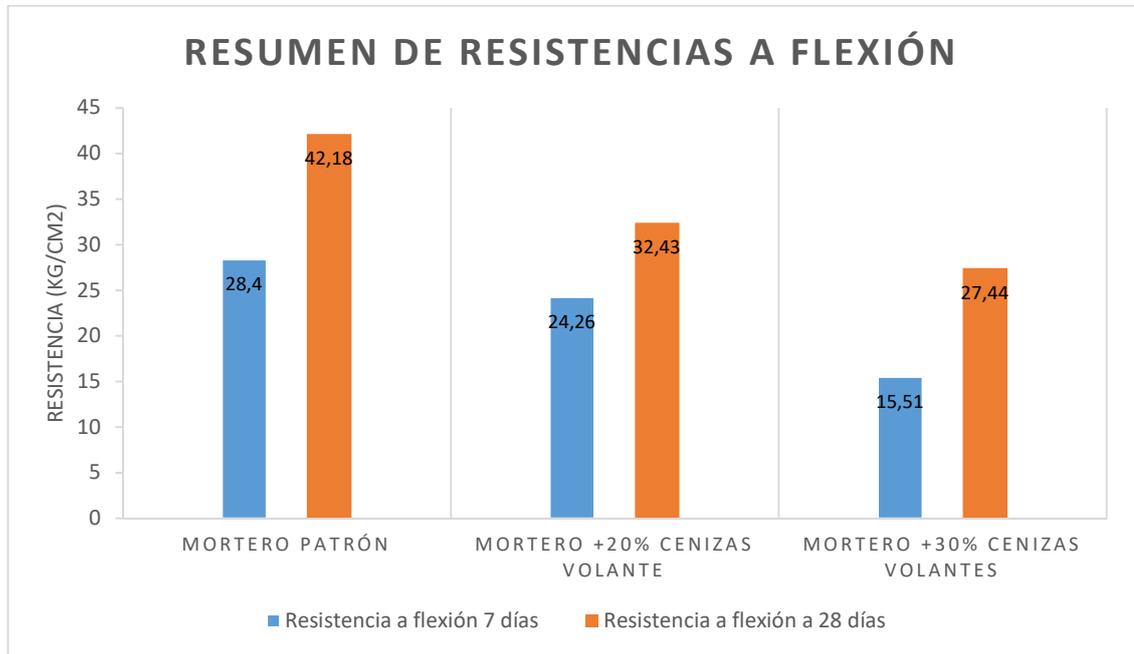
En la gráfica se observa que el mortero con adición del 20% de cenizas tiene un descenso de cono, equivalente a un 6,25% comparado con el mortero sin aditivo. Mientras que al adicionar un 30% de cenizas volantes la mezcla presentó un incremento del 2,27% en comparación al mortero patrón.

Los ensayos experimentales demostraron que, al fabricar morteros con adiciones de cenizas, se redujo la cantidad de agua para alcanzar una mezcla estable en cada partida. Esto debido a que la granulometría y la forma esférica de las partículas que componen muchas de las cenizas volantes influyen en las propiedades reológicas (relación esfuerzo-deformación) del mortero, reduciendo la cantidad de agua necesaria para obtener una docilidad equivalente a la de un mortero sin cenizas. (Ver tabla 3.2, 3.3, 3.4)

- Propiedades en estado endurecido

Las resistencias mecánicas de los morteros fabricados con cenizas volantes y su evolución con el tiempo dependen de la calidad de las cenizas, de su correcta dosificación, amasado y de un sistema de curado apropiado.

## Ensayo a Flexión



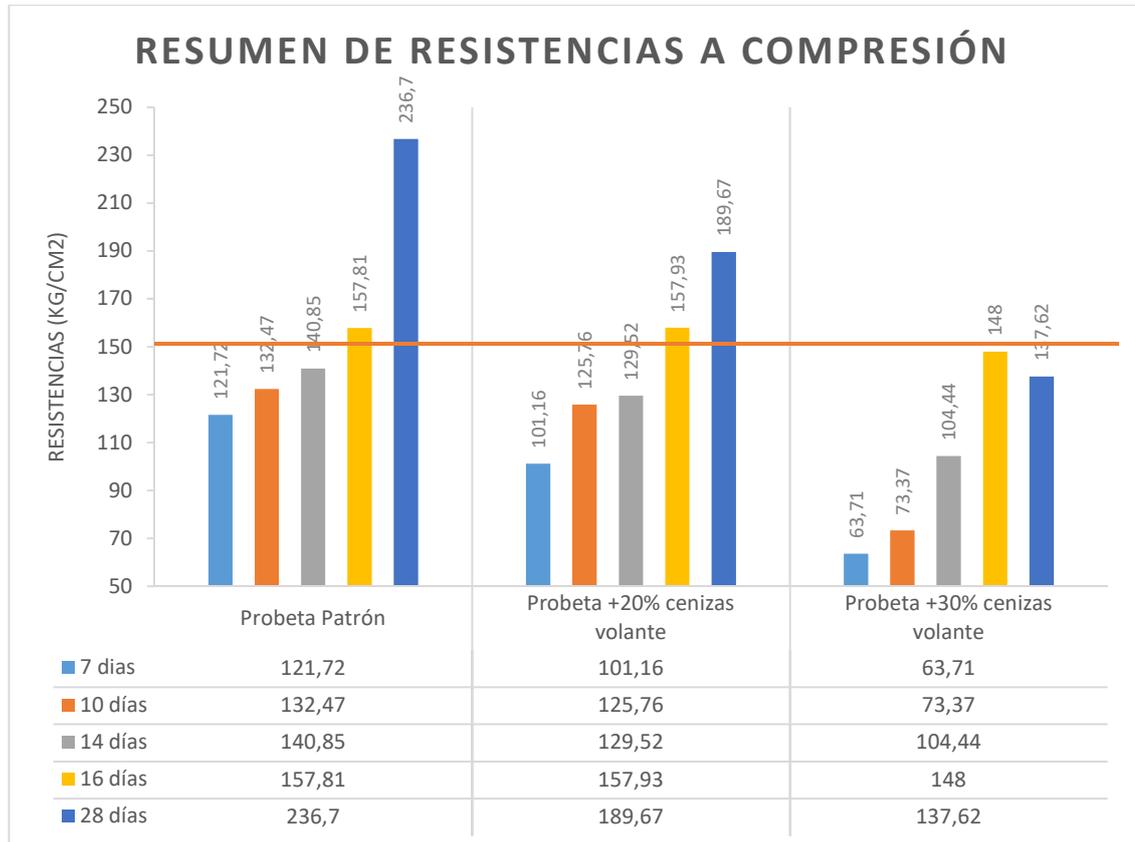
Gráfica 4.10 Resumen de resistencias a flexión a edades de 7 y 28 días. (Fuente: Elaboración propia)

La colaboración de las cenizas en las resistencias a flexión muestra que en porcentajes del 20 y 30 por ciento de adición, presenta resistencias menores a edades tempranas (7 días) y a pesar de no alcanzar las resistencias comparadas con el mortero patrón a los 28 días, las dos variaciones de cenizas cumplen con lo exigido en la NCh 158/67.

## Ensayo a Compresión

En la tabla que se presenta a continuación se demuestra que la sustitución parcial de cemento Portland por cenizas volantes proporciona morteros con resistencias menores a edades tempranas (en algunos casos hasta los 28 días), sin embargo

a largo plazo estas pueden superar a las del mortero fabricado sin cenizas. (ver gráfico 4.11)



Gráfica 4.11 Resumen de resistencias a compresión de morteros con adición y sin adición de cenizas volantes. (Fuente: Elaboración propia)

En la gráfica se observa el comportamiento que presentan los morteros (patrón, +20% CV, +30% CV) comparados con la resistencia teórica de un mortero calidad M-15 (150 kg/cm<sup>2</sup>).

El mortero patrón a los 7 días alcanzó el 80% de la resistencia teórica y a las edades de 16 días ya superaba en un 5,2% comparadas con un mortero calidad M-15.

Para el mortero con adiciones del 20% se alcanza un 67,4% de la resistencia a los 7 días. De igual forma para la adición de 30% de cenizas la resistencia alcanza sólo al 42,4% a la misma edad.

Por otra parte, el comportamiento de los morteros con adiciones presentó resistencias mayores a los 28 días, alcanzando para el mortero con adición del 20% un aumento sobre el 26,4% comparado con la resistencia teórica. En cambio, para mortero con adición del 30% de cenizas volante, se alcanzó el 91,7% comparado con el de calidad M-15 para la misma edad.

Lo anterior comprueba que la utilización de cenizas como materia prima en la fabricación de morteros es viable, ya que presenta resistencias menores a edades tempranas pero que se ven aumentadas conforme pasa el tiempo.

## Bibliografía

- ACI-212. American Concrete Institute.
- Alonso Ramírez, J.L, (1990). “Orígenes, tipos y caracterización de las cenizas volantes”. CEDEX, Madrid.
- ASTM/ C618-05 Standart Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.
- ASTM/ D388-18a Standart Classification of Coals by Rank.
- Barrera, R., Pérez, J., Salazar, C. (2014). “Carbones Colombianos: clasificación y caracterización termoquímica para aplicaciones energéticas”. Bucaramanga. Colombia.
- Becerra, J. 2010. “Diseño de un precipitador electroestático”. Trabajo de graduación en el cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Físico. Universidad de Santiago de Chile.
- Brunatti, C. (2014). “La industria del cemento y la sostenibilidad”. Asociación de fabricantes del Cemento Portland, Buenos Aires. Argentina.
- Canales Alvarez, L., “Estudio de la aplicabilidad de las cenizas volantes de la planta térmica de Mudunuru (India) en materiales de construcción”, 2007.
- Calleja J., (1982). “Escoria y cementos siderúrgicos – Materiales de construcción”. Madrid. España.
- Cemento Melón, Importancia del agua de amasado en la calidad de hormigones y morteros.

- Decreto Supremo N°148. (2003). “Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos”, División rectoría y regulación sanitaria departamento de salud ambiental. Gobierno de Chile, Ministerio de Salud.
- Eficiencia energética, la necesidad del siglo XXI, Colegio ingenieros, Chile.
- Fernández, R., inicio del fin de la era de los combustibles fósiles, 2006.
- Gartner E. (2004). “Industrially Interesting approaches to low-CO2 cements”. Cem. Conr. Res. 34.
- Hendrick G. van Oss (2015). Cement. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, 38-39.
- Instituto Chileno del Hormigón. ICH, 2013.
- Muñoz Adams M., R. King St-Onge., “Caracterización geotécnica de cenizas volantes generadas a partir de la combustión del carbón en central termoeléctrica”, Universidad Católica de la Santísima Concepción.
- NCh 1498.Of.2012. “Hormigón y mortero – Aguas de amasado – Clasificación y requisitos”. Instituto nacional de normalización, INN Chile.
- NCh 2256/1.Of.2001. “Morteros – Parte 1: “requisitos generales”. Instituto nacional de normalización, INN Chile.
- NCh 2257/3.Of.1996. “Morteros – Determinación de la consistencia – Parte 3: Método del asentamiento del cono”. Instituto nacional de normalización, INN Chile.
- Rodríguez Santiago J., (1988). “El empleo de las cenizas volantes en la fabricación de hormigones”.

- Santaella Valencia L. E., "Caracterización físicas, química y mineralógica de las cenizas volantes". Revista Ciencia e Ingeniería. Universidad Militar "Nueva Granada".
- Sánchez de Guzmán, D. (2001), "Tecnología del concreto y del mortero".
- Universidad de Castilla, La Mancha "Los Morteros". Ingeniería agroforestal, (2014).