



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

**UTILIZACIÓN DE CENIZA DE CENTRAL TERMOELÉCTRICA
VENTANAS COMO FUENTE DE ALUMINOSILICATOS PARA LA
FABRICACIÓN DE HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

NATALIA MARGARITA LOAYZA DÍAZ

PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DAVID CAMPUSANO BROWN
YURI TOMICIC CALVO

SANTIAGO DE CHILE
2017

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA
OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniera Civil
POR: Natalia Margarita Loayza Díaz
FECHA: Mayo 2017
PROFESOR GUÍA: Federico Delfin Ariztía

UTILIZACIÓN DE CENIZA DE CENTRAL TERMOELÉCTRICA VENTANAS COMO FUENTE DE ALUMINOSILICATOS PARA LA FABRICACIÓN DE HORMIGÓN GEOPOLIMÉRICO

La presente investigación estudia la factibilidad de producir hormigón geopolimérico a base de ceniza volante con bajo contenido de calcio proveniente de la central termoeléctrica Ventanas. Se intenta replicar y transferir la experiencia y desarrollo alcanzado para la producción de este material a nivel internacional, particularmente basándose en investigaciones australianas.

El trabajo preliminar desarrollado siguiendo las pautas de la práctica australianas dejó no obstante, en evidencia la existencia de incompatibilidades en las materias primas disponibles a nivel industrial en el país (fuente de aluminosilicatos, solución alcalina y agregados). Lo anterior obligó a ajustar la metodología del estudio a las condicionantes impuestas por los materiales, principalmente la ceniza volante, componente básico del geopolímero que presentaba un alto contenido de carbón residual, superior al 20%, determinado mediante el ensayo de pérdida por calcinación. Se debió partir por mejorar el comportamiento de la fuente de aluminosilicatos para lo que se recurrió por una parte a mejorar la ceniza volante disponible mediante tamizado y a recurrir a la incorporación de otras adiciones como escoria de alto horno y microsilice. Por otra parte, se procedió a ajustar experimentalmente las relaciones solución alcalina/fuente de aluminosilicatos, que originalmente era igual a 0,35 aumentándola a 0,65. También se modificó la proporción de áridos en la mezcla.

Para estudiar cómo afecta la variación de algunos parámetros en las propiedades de la pasta geopolimérica se fabricaron probetas a escala de laboratorio. Dentro de los parámetros en estudio, se analizó la variación de porcentaje de pérdida por calcinación de la ceniza, la granulometría de los áridos, el contenido de agua extra, entre otros. Resultando en resistencias a compresión de aproximadamente 20 MPa a los 7 días en morteros geopoliméricos a base de ceniza volante que aumentó a 30 MPa con adición de un 30% de escoria de alto horno.

Los resultados verifican la potencial utilización del hormigón geopolimérico como un nuevo material en el rubro de la construcción, ya que es una alternativa sustentable que presenta propiedades y resistencias mecánicas similares o mejores que el hormigón convencional. En la industria de los elementos prefabricados este material debido al desarrollo de resistencias tempranas que presenta, tendría significativas ventajas con relación al hormigón convencional, ya que puede ser desmoldado al término del curado térmico y además alcanza su resistencia final a los 7 días. Por otro lado, se propone seguir investigando sobre las tecnologías que se utilizan para mejorar la calidad de la ceniza volante, de modo de conseguir una mayor reducción del contenido de carbón residual y así obtener un significativo mejoramiento de las propiedades mecánicas del material.

Agradecimientos

En primer lugar quisiera agradecer a mis padres por entregarme tanto amor, por sus enseñanzas y apoyo incondicional. A mi viejita linda por acompañarme en cada momento, por incentivarme a soñar y por enseñarme a amar la vida.

Agradezco a mis hermanos y hermana por su compañía y preocupación. A mi familia en general y sra Lauri que cada día que llegaba cansada de Lampa me esperaba con una enorme sonrisa.

También agradezco a mi profesor guía Federico Delfín por acompañarme durante este proceso de la memoria, por orientarme y ayudarme a que resultara a pesar de las complicaciones. A los miembros de la comisión, Yuri y el profe David por facilitarme las instalaciones en Lampa para poder llevar a cabo la memoria y por sus comentarios e interés en este trabajo.

Además agradecer a Don Fernando Pérez por su ayuda en la confección de las probetas, por su paciencia y buena disposición. A la Tamara que desde el día uno me recibió con los brazos abiertos y me ayudó en todo el proceso de mi memoria. Muchas gracias por enseñarme tanto y por entregarme tanto cariño.

También doy gracias a esa familia que uno escoge, a Monsh por estar siempre a mi lado, por aconsejarme y por darme ánimo. A los amigos de la U que hicieron que la época universitaria fuera hermosa. A los civiles muchas gracias por la ayuda, por su apoyo, por enseñarme, por escucharme y por sobretodo por entregarme tanto amor. A los mecánicos que fueron super apañadores, les agradezco su linda compañía y esos ricos asados que tanto me gustan. A las niñas que me han acompañado todo este tiempo siempre apoyándome y animándome en todo momento. A mis amigos de la parroquia y a los de Shalom, que han sido fundamentales durante este proceso, agradecer sus lindas palabras, la oración y el cariño que me entregan. También a los amigos que han aparecido en el camino, que me han apoyado quizás sin darse cuenta, muchas gracias por las alegrías y por cada momento que me han regalado. Agradecer de manera especial a los chiquillos que se ensuciaron las manos por ayudarme en la memoria, al Damián, David, Pepito y Mirki, muchas gracias chicos, son lo máximo. Además agradecer a ese partner que apareció en mi vida sin ningún aviso, que me acompaña en todas, me llena de amor y de lindos momentos. Los quiero mucho a todos!

Muchas gracias a las personas que me ayudaron en IDIEM, a Braulio y a todos los chicos de Unidad de Control de Cementos que se daban el tiempo para ayudarme a ensayar. Además a Don Jaime Bravo por su buena disposición y ayuda en planta piloto.

Es imposible nombrar a todos los que me ayudaron y acompañaron durante todo este proceso, ya que han sido muchas personas. Pero sinceramente les agradezco a todos cada momento, cada palabra y cada sonrisa que me han regalado. Muchísimas gracias!

Tabla de contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Introducción general.....	1
1.2	Impacto ambiental centrales termoeléctricas.....	2
1.2.1	Matriz energética mundial.....	2
1.2.2	Matriz energética en Chile.....	3
1.2.3	Problema ambiental asociado a centrales termoeléctricas carboneras.....	4
1.2.4	Producción de ceniza proveniente de plantas termoeléctricas.....	4
1.3	Impacto ambiental hormigón convencional.....	5
1.4	Objetivos.....	6
1.4.1	Objetivos generales.....	6
1.4.2	Objetivos específicos.....	6
2	Antecedentes.....	7
2.1	Geopolímeros.....	7
2.2	Componentes de los geopolímeros.....	7
2.2.1	Fuente de aluminosilicatos.....	7
2.2.1.1	Ceniza volante.....	8
2.2.1.2	Escoria de alto horno.....	9
2.2.1.3	Microsílice.....	10
2.2.2	Activador alcalino.....	10
2.3	Modelo Geopolimerización.....	11
2.3.1	Modelo conceptual de la geopolimerización.....	11
2.3.2	Modelo descriptivo geopolimerización ceniza volante.....	12
2.4	Hormigón geopolimérico.....	14
3	Planteamiento de la investigación.....	16
3.1	Introducción.....	16
3.2	Programa de ensayo.....	17
4	Materiales.....	20
4.1	Fuentes de aluminosilicatos.....	20
4.1.1	Ceniza Volante.....	20
4.1.2	Escoria de alto horno.....	22

4.1.3	Microsílice	24
4.2	Solución Alcalina	24
4.2.1	Hidróxido de Sodio	24
4.2.2	Silicato de Sodio	25
4.3	Áridos	26
4.4	Aditivo Reductor de Agua	26
5	Trabajo en laboratorio	27
5.1	Trabajo preliminar.....	27
5.2	Dosificación final mezcla.....	29
5.2.1	Ceniza volante (CV)	29
5.2.2	Solución alcalina (SA)	29
5.2.3	Agregados	29
5.2.4	Superplastificante.....	30
5.2.5	Agua extra.....	30
5.3	Dosificación teórica	30
5.4	Procedimiento en laboratorio.....	31
5.4.1	Preparación previa de materiales	31
5.4.2	Mezclado.....	31
5.4.3	Colocación y compactación	33
5.4.4	Curado.....	34
5.4.5	Ensayos	34
6	Presentación y análisis de resultados.....	35
6.1	Composición fuente de aluminosilicatos.....	35
6.1.1	Porcentaje de pérdida por calcinación (LOI) de ceniza volante	35
6.1.2	Ceniza con adición de escoria de alto horno.....	37
6.1.3	Ceniza con adición de microsílice	39
6.2	Composición solución alcalina	40
6.2.1	Concentración de la solución de hidróxido de sodio	40
6.2.2	Composición de silicato de sodio	42
6.3	Aditivos mezcla geopolimérica	43
6.3.1	Contenido de agua extra.....	43
6.3.2	Superplastificante.....	44
6.4	Condiciones de curado	46

6.4.1	Temperatura de curado	46
6.4.2	Periodo de descanso	47
6.5	Granulometría áridos.....	48
7	Discusión y conclusiones	49
8	Bibliografía	51
9	Anexo A.....	54

Índice de tablas

Tabla 1: Especificaciones para las cenizas según ASTM C618.....	9
Tabla 2: Especificaciones para Microsílice según ASTM C1240.....	10
Tabla 3: Detalle de mezclas 1 a 9.....	18
Tabla 4: Detalle de mezclas 10 a 19.....	19
Tabla 5: Composición de ceniza volante determinada por FRX (% masa).....	20
Tabla 6: Composición escoria determinada por FRX (% masa).....	22
Tabla 7: Datos técnicos de microsíllice.....	24
Tabla 8: Análisis físico químico Silicato de Sodio 2.0.....	25
Tabla 9: Análisis físico químico Silicato de Sodio 30 °Be.....	25
Tabla 10: Análisis físico químico Silicato de sodio 38-39 °Be.....	25
Tabla 11: Análisis físico químico Silicato de Sodio 50-52 °Be.....	26
Tabla 12: Granulometría arena fina.....	26
Tabla 13: Densidades y Resistencias mecánicas según LOI.....	36
Tabla 14: Densidades y Resistencias mecánicas según edad de ensayo.....	37
Tabla 15: Densidades y Resistencias mecánicas según edad de ensayo.....	38
Tabla 16: Densidades y resistencias mecánicas según temperatura de curado.....	39
Tabla 17: Comparación propiedades entre mezcla con ceniza y otra con microsíllice.....	39
Tabla 18: Densidades y resistencias mecánicas según molaridad NaOH.....	40
Tabla 19: Tipos de silicatos con su caracterización fisicoquímica.....	42
Tabla 20: Densidades y resistencias mecánicas según tipo de silicato.....	42
Tabla 21: Densidades y Resistencias mecánicas según contenido de agua extra.....	43
Tabla 22: Densidades y resistencias mecánicas según cantidad de superplastificante.....	45
Tabla 23: Densidades y resistencias mecánicas según temperatura de curado.....	46
Tabla 24: Densidades y Resistencias mecánicas según periodo de descanso.....	47
Tabla 25: Distribución granulométrica, continua y discontinua.....	48
Tabla 26: Densidades y resistencias mecánicas según granulometría de áridos.....	48
Tabla 27: Propiedades mezclas de 1 a 4.....	54
Tabla 28: Propiedades mezclas de 5 a 13.....	55
Tabla 29: Propiedades mezclas de 14 a 19.....	56

Índice de figuras

Figura 1: Consumo energético mundial año 2015.....	2
Figura 2: Distribución y capacidad energética instalada del SING y SIC en el mes de Diciembre de 2016.....	3
Figura 3: Etapas de la Geopolimerización.....	12
Figura 4: Modelo descriptivo de la activación alcalina de ceniza volante.	13
Figura 5: Ceniza volante.....	20
Figura 6: Distribución de tamaño de partícula.	21
Figura 7: Distribución de tamaño de partículas bajo tamiz #100.	21
Figura 8: Molino de bolas, planta piloto IDIEM.	23
Figura 9: Escoria de alto horno. A la izquierda, escoria sin procesar y a la derecha, escoria luego de ser molida.	23
Figura 10: Influencia cantidad de áridos en resistencia a compresión de la mezcla con razón solución alcalina/ceniza volante de 0,65.	28
Figura 11: Influencia razón solución alcalina/ceniza volante en resistencia a compresión de la mezcla con 65% de áridos.	28
Figura 12: Materiales para fabricar hormigón geopolimérico.....	31
Figura 13: Mezcladora.....	32
Figura 14: Adición de componentes líquidos a la mezcla seca.	32
Figura 15: Pasta geopolimérica.	33
Figura 16: Compactación.....	33
Figura 17: Horno para curado térmico seco.	34
Figura 18: (a) Ensayo a flexotracción (b) Ensayo a compresión.....	34
Figura 19: Efecto de LOI sobre resistencia a compresión.....	36
Figura 20: Desarrollo de resistencia a compresión de mezclas con ceniza volante y con adición de escoria.	38
Figura 21: Resistencia a compresión con respecto a la concentración molar de NaOH.	41
Figura 22: Efecto tipo de silicato de sodio sobre resistencia a compresión.	43
Figura 23: Influencia cantidad de agua sobre resistencia a compresión.....	44
Figura 24: Influencia cantidad de aditivo sobre resistencia a compresión.	45
Figura 25: Influencia de temperatura de curado sobre resistencia a compresión.	46
Figura 26: Efecto del periodo de descanso sobre resistencia a compresión.	47

1 Introducción

1.1 Introducción general

Según las Naciones Unidas, se estima que la población a nivel mundial el año 2015 alcanzó cifras de 7.300 millones de personas y se proyecta que aumentará para el 2050 a los 9.700 millones de habitantes aproximadamente. Basándose en lo anterior se pueden comprender dos importantes problemáticas medio ambientales que surgen a partir del desarrollo de la industria. Por una parte, el aumento en la demanda del consumo de energía provoca la evidente necesidad de potenciar la producción de esta, lo que a nivel mundial se cubre principalmente mediante centrales termoeléctricas a base de combustibles fósiles, siendo uno de los más utilizados el carbón, lo que da origen a una problemática ambiental, ya que la combustión del carbón pulverizado deja como subproducto la ceniza volante, material contaminante que requiere de grandes vertederos para su disposición. Por otro lado, con el crecimiento de la población se genera un aumento en la demanda de la producción del hormigón convencional, puesto que este es el principal material utilizado en el rubro de la construcción, lo que conlleva al aumento de la producción de su componente principal, el cemento portland, el cual durante su fabricación libera dióxido de carbono, gas que contribuye al calentamiento global.

Basado en las problemáticas anteriores, hoy en día se hace necesario desarrollar soluciones alternativas más sustentables y con mayores niveles de desempeño que las del hormigón convencional, para ser utilizadas en el rubro de la construcción. El hormigón geopolimérico surge como una solución frente a estas necesidades. Esta tecnología fue impulsada por Joseph Davidovits a partir de 1978 cuando la propone para designar al producto generado por la reacción de una solución alcalina con una fuente de aluminosilicatos rica en sílice y alúmina. Esta fuente puede ser de origen natural, como lo son las puzolanas naturales y la ceniza volante o artificial, como la escoria de alto horno.

Diversos trabajos de investigación se han realizado con anterioridad con respecto al tema de la producción de hormigón geopolimérico en base a ceniza volante y escoria. En los cuales se han demostrado las cualidades de este material, como son la capacidad de desarrollar altas resistencias a edades tempranas, buen comportamiento frente a medios agresivos, baja retracción, entre otros.

En Chile, existen estudios donde se han analizado experimentalmente las propiedades del hormigón geopolimérico, logrando elevadas resistencias a edades tempranas ([1], [2]). El presente trabajo pretende continuar y actualizar los datos obtenidos en dichos estudios, aportando así con nueva información para determinar la factibilidad de producir un material geopolimérico a base de ceniza volante adecuado para ser utilizado como elemento prefabricado.

1.2 Impacto ambiental centrales termoeléctricas

1.2.1 Matriz energética mundial

Hoy en día más del 85% del suministro mundial de energía eléctrica es producida a partir de combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón). Como se puede observar en la Figura 1, el petróleo corresponde al principal combustible a nivel mundial representando el 32,9%. Por su parte, el carbón se asemeja con un 29,2% y el gas se encarga de un 23,8% de las necesidades energéticas [3].

El mercado energético se enfrenta a un gran reto debido a la población que va en ascenso, que se traduce en una mayor demanda energética y por otro lado, al cambio que se está dando respecto a la matriz energética como resultado del agotamiento de los recursos y a políticas medio ambientales. Lo anterior se basa en que desde los años 80 se consume más petróleo del que se descubre, por lo que hoy se está explotando los macro yacimientos encontrados en el pasado, lo que explica la existencia de un techo del petróleo, que se alcanzaría una vez que se haya extraído mas o menos la mitad de las reservas del crudo mundial. Esta situación según la IEA (Agencia Internacional de Energía, por sus siglas en inglés) no ocurrirá antes del año 2030. De igual forma existiría un techo del gas, unos 20 años después del petróleo. Sin embargo, el desabastecimiento del carbón ocurriría más tarde, unos 200 años después si es que se mantiene el consumo actual [4]

Considerando el futuro desabastecimiento del petróleo y las fluctuaciones de los costos del gas como combustible fósil, existe la necesidad de recurrir a otras fuentes energéticas. El carbón surge como respuesta frente a estas problemáticas, posicionándose nuevamente en el mercado energético a nivel mundial para ser utilizado principalmente como combustible de centrales termoeléctricas.

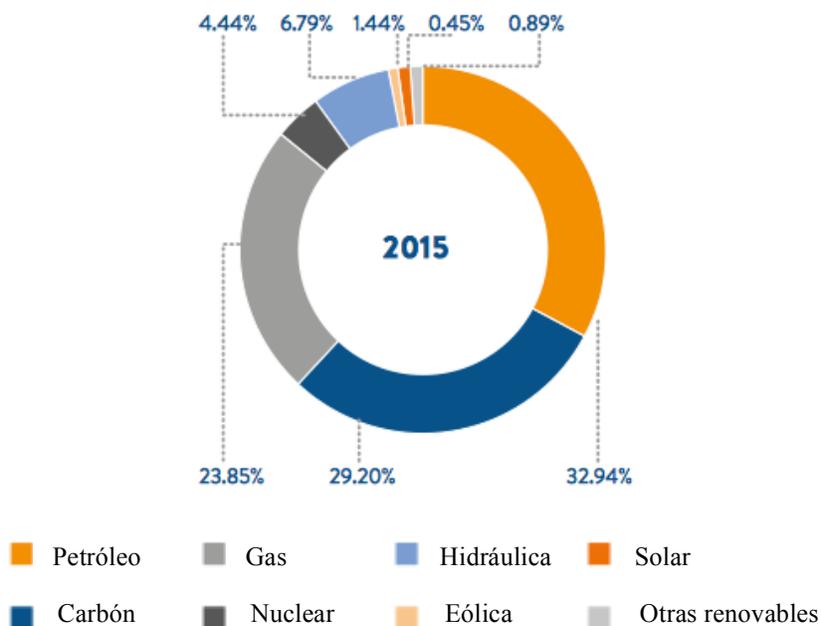


Figura 1: Consumo energético mundial año 2015. Fuente: Adaptado de [3].

1.2.2 Matriz energética en Chile

En Chile, al mes de diciembre de 2016, el SING (Sistema Interconectado del Norte Grande) posee una capacidad instalada de generación de 5.226,5 MW. Por su parte, el SIC (Sistema Interconectado Central) posee 16.742,3 MW, la cual es en un 96% de origen térmico a base de combustibles fósiles, como carbón, gas y petróleo. En conjunto se encuentran instalados 21.968,8 MW de potencia, correspondientes a un 58,1% de origen térmico, un 30,2% de origen hídrico, un 4,7% de origen eólico y un 4,8% de origen solar. (Figura 2). Lo que representa más del 99% de la capacidad instalada nacional (sistemas medianos como Aysén y Magallanes y sistemas aislados son menos del 1%) [5].

Por lo tanto, actualmente las centrales termoeléctricas predominan en la matriz energética chilena. En comparación con otras tecnologías las centrales termoeléctricas requieren un menor costo de operación y de inversión inicial. Además, tienen como ventajas que pueden emplazarse en lugares convenientes de manera de encontrarse cerca de sus materias de consumo, dependen solamente de su combustible, por lo que no presenta la dificultad de las variaciones hidrológicas, entre otras. Ahora bien considerando que los recursos energéticos son limitados producto de las fluctuaciones en los precios del petróleo y el gas y de la dependencia climática, las termoeléctricas a base de carbón corresponden a una solución económica y estable. Cabe destacar que aproximadamente un 24% de la capacidad instalada de matriz energética en Chile se basa en centrales carboneras.

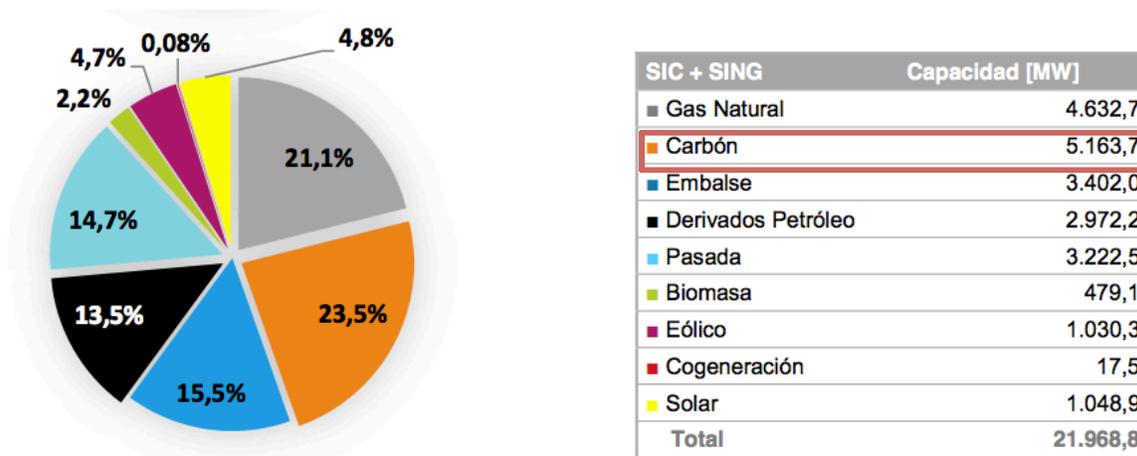


Figura 2: Distribución y capacidad energética instalada del SING y SIC en el mes de Diciembre de 2016. Fuente: Coordinador del Sistema Eléctrico Nacional.

De acuerdo a antecedentes de la Comisión Nacional de Energía (CNE), el carbón utilizado como combustible en las centrales es obtenido en un 10% desde fuentes chilenas y un 90% mediante importaciones. En su mayoría procedente de Australia, Canadá, Indonesia, Estados Unidos, Colombia y Nueva Zelanda [6]. La existencia de esta multiplicidad de productores de carbón a nivel mundial hace que Chile pueda disponer de este recurso sin mayores limitaciones. En Chile, el 100% de la producción de carbón se genera en las regiones del Biobío y de Magallanes, el cual en comparación con el importado presenta un bajo poder calorífico.

1.2.3 Problema ambiental asociado a centrales termoeléctricas carboneras

Las centrales termoeléctricas que utilizan carbón como combustible traen consigo los siguientes problemas ambientales. Según la EIA (U.S. Energy Information Administration) la quema de 1kg de carbón genera aproximadamente 1,83 kg de CO₂, lo que equivale a 0,89 [tCO₂/MWh]. Si se compara con los 0,75 [tCO₂/MWh] de las centrales a petróleo y los 0,45 [tCO₂/MWh] de las centrales a gas natural, el carbón corresponde a la fuente energética más contaminante. En segundo lugar, la quema de este combustible genera una serie de subproductos, dentro de los cuales se encuentran las cenizas volantes. Este residuo no se considera peligroso, sin embargo requiere de grandes extensiones de terreno para su almacenamiento. Estos depósitos de cenizas alteran el medio ambiente ya que ocupan importantes superficies lo que se traduce en la inutilización de estos terrenos, provocando pasivos ambientales que deben ser monitoreados.

La construcción de los depósitos de cenizas y el traslado de los desechos desde la central hasta dichos depósitos generan diversos impactos ambientales. Dentro de estos, se destacan las emisiones atmosféricas producto de los movimientos de tierra, el tránsito de maquinarias y la descarga de las cenizas en los sitios de almacenamiento.

La ubicación de estos depósitos debe contar con un estudio de la topografía, hidrología y geología del lugar, caminos de acceso, entre otros. Además se deben evitar lugares donde exista vegetación protegida o en zonas donde haya sitios arqueológicos, lo que acota los terrenos y aumentan los costos para las centrales debido a que el transporte de sus desechos se encarece. [7]

El problema de la disposición y almacenamiento de cenizas volantes cada día es más preocupante. El Banco Mundial visualizó que para el año 2015 la India necesitaría 1000 km² para el almacenamiento de cenizas, que equivale a un metro cuadrado por habitante de dicho país. Se observa entonces, la necesidad de encontrar usos para este desecho se ha vuelto fundamental [8].

1.2.4 Producción de ceniza proveniente de plantas termoeléctricas

Según la ACAA (American Coal Ash Association) la ceniza volante en Estados Unidos constituye uno de los mayores desechos generados en este país, alcanzando más de 44 millones de toneladas anuales en 2015, de las cuales solo el 54% se reutiliza. Este desecho se ocupa principalmente como adición puzolánica para reducir el contenido de clínker del cemento, como relleno estructural (hormigón con alto volumen de ceniza volante, HVFA), en aplicaciones de la minería, entre otros. En el caso de Europa, la ceniza volante alcanzaba un total de 124 millones de toneladas al año en 2010 aproximadamente (ECOBA, 2011).

En el caso de Chile, durante el 2007 se generó un total de 550.000 toneladas de ceniza al año aproximadamente [7]. Albornoz [9] estimó que en el año 2013 se produjo al menos 1.113.875 toneladas de ceniza volante en el país, donde el 91% pueden ser aprovechadas para ser utilizadas como adiciones puzolánicas en el cemento, como fuente de aluminosilicatos en la fabricación del hormigón geopolimérico, entre otros.

1.3 Impacto ambiental hormigón convencional

El hormigón es uno de los materiales de construcción más utilizados en el mundo y su demanda va en permanente aumento, lo que implica una alta producción de sus componentes (cemento, áridos, agua y aditivos). La producción de cemento portland, principal material constituyente en la fabricación del hormigón, ha ido en aumento con el ritmo del desarrollo económico, alcanzando en 2012 un total de 3,8 billones de toneladas a nivel mundial y en Chile, dicho año se produjeron aproximadamente 5 millones de toneladas [10].

El cemento portland se obtiene a partir de la molienda de mezcla de clínker con yeso. El primero consiste en un producto obtenido mediante la calcinación en horno de las materias primas, típicamente piedra caliza y arcilla a temperaturas entre 1.400°C a 1.500°C. La piedra caliza, rica en carbonato de calcio, en este proceso se descompone en cal y dióxido de carbono (CO₂). Por su parte, el yeso corresponde a un aditivo que se incorpora en pequeñas cantidades para regular el fraguado.

Actualmente, el cambio climático debido al calentamiento global corresponde a uno de los mayores problemas ambientales y se ha convertido en una preocupación importante en concordancia con la mayor conciencia del daño asociado a este fenómeno. El calentamiento global es causado por la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, como el CO₂, debido a las actividades humanas, dentro de las cuales se encuentra la producción de cemento portland.

La industria del cemento es una de las principales contribuyentes a las emisiones mundiales del CO₂. En el 2005, sus emisiones globales directas alcanzaron los 1.660 millones de toneladas de CO₂, lo que equivale a alrededor del 6% del total de las emisiones de este gas [11]. Durante el 2006, por cada tonelada de clínker se emitieron 866 kg de CO₂, lo que para el caso de Chile significaría una emisión considerable [12].

Cabe destacar, por otra parte, que la construcción con hormigón requiere un volumen de recursos importantes, especialmente de áridos, lo que ha llevado a la explotación masiva de canteras y lechos de ríos, lugares donde se puede encontrar material de buena calidad. Por lo tanto, los agregados para hormigón se han ido transformando en un material escaso. Esto a la vez genera un problema ambiental que ha obligado a buscar alternativas, como el uso de hormigón reciclado como fuente de reemplazo para la producción de agregados pétreos.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivos generales

Estudiar la factibilidad de producir hormigón geopolimérico adecuado para la fabricación de elementos prefabricados, utilizando como material base ceniza volante de desecho producida en centrales de generación eléctrica. La industria de los prefabricados ofrece mayores posibilidades que la del hormigón convencional para desarrollar productos de calidad controlada. Por lo tanto, responde a las exigencias de este nuevo material en cuanto a su método de elaboración, permitiendo un curado en condiciones de temperatura controlada.

1.4.2 Objetivos específicos

- i. Obtener una dosificación para la mezcla geopolimérica a partir de la caracterización de los materiales disponibles en Chile teniendo como referencias experiencias internacionales. Se contempla utilizar como fuente de aluminosilicatos la ceniza volante proveniente de la central termoeléctrica Ventanas, la cual produce este desecho en forma permanente y con calidad uniforme. Además, esta central es muy accesible a la zona central, posible ubicación de una planta de geopolímeros.
- ii. Ajustar mezcla geopolimérica a partir de las condicionantes impuestas por los materiales, principalmente la ceniza volante proveniente de Ventanas que presenta elevado contenido de carbón sin combustionar (20%), valor fuera de norma ASTM C618. Para ello se pretende mejorar la fuente de aluminosilicatos disponibles mediante la incorporación de adiciones ternarias (escoria de alto horno y microsílíce) y ajustar las relación solución alcalina/fuente de aluminosilicatos para conseguir ciertas propiedades y niveles de resistencia a compresión aceptables para la producción de elementos prefabricados de hormigón.
- iii. Determinar cómo la variación de parámetros, tales como la granulometría de los áridos, el contenido de agua, la temperatura de curado y el contenido de carbón sin combustionar presente en la ceniza volante, influyen en las propiedades del hormigón geopolimérico mediante la realización de un programa de ensayos mecánicos a escala de laboratorio.

2 Antecedentes

En este capítulo se presenta la información que se recopila respecto a los geopolímeros y a las investigaciones que se han realizado para demostrar la factibilidad de utilizar el hormigón geopolimérico en reemplazo del hormigón convencional.

2.1 Geopolímeros

En 1979 el ingeniero químico Joseph Davidovits propone el término “geopolímero” como resultado de sus trabajos de investigación con respecto a la síntesis de polímeros de origen inorgánico utilizando materiales constituidos fundamentalmente por aluminosilicatos. El geopolímero consiste en un material aglomerante que se forma a partir de la reacción entre una solución alcalina y una fuente de aluminosilicatos de origen natural, como la ceniza volcánica o algún subproducto artificial como la ceniza volante, escoria de alto horno, ceniza de cáscara de arroz, entre otros. En general, los geopolímeros están constituidos por una red de silicatos compuestos por tetraedros de SiO_4 y AlO_4 , enlazados alternativamente con átomos de oxígeno.

Dentro de las fuentes de materiales geopolimerizables se encuentran dos grupos, aquellas ricas en silicio y aluminio, como la ceniza y el metacaolín y por otro lado, las que además de ser abundantes en estos componentes son también ricas en calcio, como la escoria de alto horno. Estas últimas, debido a su gran contenido de calcio, tienden a formar silicato de calcio hidratado (CSH) como producto principal de la reacción, mientras que las otras, formarán polímeros con composición química similar a los materiales zeolíticos con microestructura amorfa a semicristalina tridimensional.

2.2 Componentes de los geopolímeros

2.2.1 Fuente de aluminosilicatos

Corresponde a aquellos materiales de composición tipo aluminosilicato donde predominen la sílice y alúmina en forma vítrea. Estos pueden ser de origen natural como la ceniza volcánica, el caolín, entre otros, o en base a subproductos industriales, como la ceniza volante, escoria de alto horno, humo de sílice, etc. Alternativamente, se han estudiado como fuente de aluminosilicatos combinaciones de los materiales mencionados, como por ejemplo, la combinación de ceniza volante con metacaolín o la de escoria de alto horno con metacaolín.

La naturaleza de la fuente de aluminosilicatos influye en el comportamiento a la hora de la fabricación del geopolímero. Los materiales derivados de procesos de calcinación, tales como cenizas volantes, escoria de alto horno, metacaolín, han demostrado dar origen a geopolímeros con una mayor resistencia a la compresión final en comparación con los obtenidos utilizando aluminosilicatos no calcinados, por ejemplo caolín y minerales naturales [13]. Sin embargo, existen estudios donde la combinación de materiales resultantes de procesos de calcinación (por ejemplo, ceniza volante) con aquellos que no derivan de estos procesos (por ejemplo, caolinita) han dado como resultado una mejora significativa en la resistencia a la compresión y reducción del tiempo de reacción para alcanzar la geopolimerización [14].

Al considerar como fuente de aluminosilicatos la ceniza volante se ha visto como preferible la utilización de una de clase F (que presenta bajo contenido de calcio) por sobre una de clase C (alto contenido de calcio), ya que la presencia de calcio en porcentajes mayores a 10% puede interferir con el proceso de polimerización y alterar su microestructura. Sin embargo, el estudio de Van Deventer et al. [15] demostró que con ceniza volante clase C también se puede alcanzar altas resistencias a la compresión especialmente a edades tempranas debido a que presenta propiedades cementantes por sí sola.

Fernández-Jiménez et al. [16] estudiaron las principales características de la ceniza volante para su utilización como fuente de aluminosilicatos geopolimerizable, dentro de las que se mencionan las siguientes:

- El porcentaje de pérdida por calcinación (LOI) debe ser inferior al 5%.
- El contenido de Fe_2O_3 no debe superar el 10%.
- El CaO debe encontrarse en bajas proporciones.
- El contenido de sílice reactiva debe encontrarse entre 40-50%.
- El porcentaje de partículas de tamaño inferior a $45\ \mu\text{m}$ debe encontrarse entre un 80-90%, además estas deben ser en su mayoría amorfas.

2.2.1.1 Ceniza volante

La ceniza volante corresponde al residuo sólido que se obtiene como subproducto de la combustión del carbón para la generación de energía eléctrica. En las plantas termoeléctricas el combustible fósil, en este caso carbón, es triturado y pulverizado para luego ser quemado y así utilizar el calor emitido para calentar agua, evaporarla y mover una turbina conectada a un generador que produce electricidad. Los residuos de la combustión que son recolectados mediante procesos de precipitación electrostática o por captación mecánica de los polvos presentes en los gases de combustión corresponden a la ceniza volante.

La norma europea EN450 define las cenizas volantes como “granos de polvo que se componen principalmente de partículas vítreas esféricas, producidas durante la combustión del carbón”.

Las cenizas volantes están compuestas principalmente por un conjunto de microesferas que pueden ser sólidas o huecas (cenoesferas), las cuales pueden contener otras partículas esféricas de menor tamaño en su interior (pleuroesferas). Además poseen una granulometría muy fina, con un tamaño de partícula entre $1\ \mu\text{m}$ y $150\ \mu\text{m}$ con componentes similares a la materia mineral del carbón de la que procede. Su composición química se basa principalmente en los óxidos de silicio (SiO_2), aluminio (Al_2O_3), hierro (Fe_2O_3) y calcio (CaO).

La composición química de las cenizas se ve altamente influenciada por el tipo de carbón que se combustiona. Acorde a la norma ASTM C618, las cenizas volantes se clasifican en dos clases, C y F. Las cenizas clase C son producto de la quema de carbón sub-bituminoso o lignito y tienen un alto contenido de CaO, que puede ser mayor al 20%. Por otro lado, las cenizas clase F, son aquellas producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso que presenta menos de un 10% de contenido de CaO. La diferencia en el contenido de óxido de calcio se ve reflejada en que la ceniza clase C

presenta propiedades cementicias por sí sola, mientras que la clase F es de naturaleza puzolánica, es decir, para endurecer requiere una adición de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y agua. A continuación, se presenta las especificaciones de cada tipo de ceniza volante para ser utilizadas junto con el cemento según la norma ASTM C618.

Tabla 1: Especificaciones para las cenizas según ASTM C618.

Composición	Clase F	Clase C
$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$, mín. %	70	50
SO_3 , máx. %	5	5
Contenido de humedad, máx. %	3	3
Pérdida por calcinación (LOI), máx. %	6	6

Otras características de las cenizas volantes que generalmente se consideran, son la pérdida por calcinación (LOI) y la finura. La primera mide el porcentaje de carbón sin combustionar que permanece en la ceniza, por lo que depende de la eficiencia de la caldera. Cabe destacar, que usualmente mientras más elevado es el contenido de carbón, más oscura es la ceniza [17]. La finura, por otra parte, se relaciona principalmente con el proceso de molienda del carbón.

2.2.1.2 Escoria de alto horno

La escoria de alto horno es un residuo del proceso de producción del acero siderúrgico, aleación metálica formada por hierro y carbono. El procedimiento consiste en introducir coque y piedra caliza por la parte superior de un alto horno que descenden por este reaccionando químicamente hasta que el material llega a la base y se separa por la diferencia de densidades. En la parte inferior se tiene hierro fundido denominado arrabio y sobre este una capa de un material conocido como escoria. Luego, se extrae la capa de escoria y la de arrabio, esta última es tratada para reducir el contenido de carbono y eliminar las impurezas residuales que pudieron haber quedado de la etapa anterior.

La capa de escoria que se encuentra a elevadas temperaturas (1500°C) puede ser enfriada lentamente produciendo un material cristalino o rápidamente mediante agua a presión consiguiendo un material con estructura vítrea, esta última se conoce como escoria granulada de alto horno.

Este subproducto está compuesto principalmente por óxidos de silicio (SiO_2), calcio (CaO), aluminio (Al_2O_3) y magnesio (MgO).

La norma chilena NCh Of. 68, define la escoria granulada de alto horno como “el producto que se obtiene por enfriamiento brusco de la masa fundida no metálica que resulta en el tratamiento de mineral de hierro de alto horno”.

La escoria granulada de alto horno debe cumplir con el siguiente requisito:

$$\frac{\text{CaO} + \text{MgO} + \text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2} > 1$$

Esta escoria presenta un comportamiento hidráulico favorable, es decir tiene propiedades conglomerantes por sí sola. Finamente molida reacciona como un verdadero cemento.

2.2.1.3 Microsílice

La norma ASTM C1240 define la microsíllice o humo de sílice como “un material puzolánico muy fino, compuesto mayormente de sílice amorfa producida por hornos de arco eléctrico como un subproducto de la producción de silicio metálico o aleaciones de ferrosilicio”. Cuando el humo de sílice es utilizado junto con el cemento se debe ajustar a los requisitos de composición química presentados en la Tabla 2.

Tabla 2: Especificaciones para Microsílice según ASTM C1240.

Composición	Clase F
SiO ₂ , mín.%	85
Contenido de humedad, máx. %	3
Pérdida por calcinación (LOI), máx. %	6

Este material es un desperdicio que se genera al reducir el cuarzo de pureza elevada con carbón durante los procesos de obtención de silicio metálico y ferrosilicio en hornos eléctricos de arco a temperaturas por sobre los 2000°C. Los vapores de SiO producidos se oxidan y condensan formando pequeñas esferas, humo de sílice, con diámetro de 0,1 µm y superficie específica entre 2,000 y 2,500 m²/kg. Su tamaño considerablemente menor que el de los granos del cemento le confiere una reactividad altamente puzolánica, ya que las partículas finas ocupan los espacios entre los granos del cemento, mejorando la interfaz matriz agregado y creando un producto con mejor resistencia y durabilidad.

El uso de microsíllice como adición en el cemento presenta como ventajas que disminuye la exudación de segregación en estado fresco, aumenta la resistencia mecánica, la impermeabilidad al agua y también mejora la durabilidad frente a agentes químicos y abrasivos.

2.2.2 Activador alcalino

Palomo et al. [18] concluyeron que el tipo de anión y catión presentes en la solución alcalina influyen tanto en el desarrollo microestructural como en la relación Si/Al del gel prezeolítico. La concentración de los iones OH⁻ actúan como catalizadores de la reacción, encargándose del proceso de disolución mediante la ruptura de los enlaces covalentes de la sílice y alúmina presentes en la fase vítrea de la fuente de aluminosilicatos (Si-O-Si, Si-O-Al y Al-O-Al). Mientras que los metales alcalinos ejercen un papel regulador de la cinética de las reacciones, donde actúan compensando y equilibrando el balance de carga eléctrica que descompensa la estructura debido a la ruptura de enlaces.

Las soluciones más utilizadas son combinaciones de hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) con silicato de sodio (Na₂SiO₃) o silicato de potasio (K₂SiO₃).

Mediante estudios se ha concluido que el tipo de activador alcalino desarrolla un papel fundamental en el proceso de geopolimerización. Cuando la solución contiene silicato soluble, ya sea de sodio o de potasio, las reacciones ocurren a una mayor velocidad en comparación a cuando se utiliza solamente hidróxidos alcalinos. El efecto que se produce en el primer caso es tan intenso que las etapas de reacción se superponen entre sí, la disolución de la fuente de aluminosilicatos, la acumulación de productos de reacción y la policondensación se producen casi simultáneamente, lo que genera que el desarrollo de la resistencia mecánica sea más rápido [19].

Van Deventer et al. [20] confirmaron que la adición de solución de silicato de sodio a la de hidróxido de sodio como líquido alcalino aumenta la reacción entre éste y la fuente de aluminosilicatos. Además, luego de realizar un estudio de la geopolimerización de dieciséis minerales naturales de Al-Si, encontraron que generalmente la solución de NaOH causaba un mayor grado de disolución de los minerales que la solución de KOH. Y por otro lado, los minerales tienen un mayor grado de disolución al elevar las concentraciones del activador. Otros autores también comparan el NaOH con el KOH y observan que la segunda presenta una velocidad de reacción menor, lo que explican ya que el K^+ tiene un tamaño superior respecto al sodio, lo que explica que la activación de cenizas con compuestos de potasio generen matrices cementantes con estructuras más porosas y menos resistentes desde el punto mecánico [18].

Se ha comprobado que la microestructura del material geopolimérico varía dependiendo del tipo de activador utilizado. Cuando el activador es una solución de hidróxido de sodio se observaron un número de poros relativamente alto. Sin embargo cuando se incorpora una pequeña cantidad de silicato de sodio (15%) se obtiene una microestructura densa y compacta. Si se incrementa aún más el contenido de silicato de sodio (85%), el geopolímero formado parece un vidrio, ausencia casi total de poros y microestructura uniforme [21].

2.3 Modelo de la geopolimerización

2.3.1 Modelo conceptual de la geopolimerización

La activación alcalina de los materiales con alto contenido de aluminosilicatos aún no posee una explicación completa debido a su complejidad, sin embargo, se han planteado distintos modelos para describirla. Uno de ellos fue propuesto por Glukhovsky en el año 1967. Este modelo comprende tres etapas: (1) destrucción-coagulación, (2) coagulación-condensación y (3) condensación-cristalización.

Recientemente, otros autores han retomado el modelo de Glukhovsky desarrollando y ampliando sus teorías e incluyendo los conocimientos existentes de la síntesis de la zeolita para explicar la formación de geopolímeros en mayor detalle.

En 2005, por ejemplo, Fernández-Jiménez et al. [22] y Palomo et al. [23] entregaron una descripción gráfica del mecanismo de activación alcalina de los aluminosilicatos. Posteriormente, el modelo fue cambiando ligeramente con la ayuda de otros autores, Duxson, Provis y van Deventer. En el modelo se consideran los supuestos de la síntesis de zeolita como válidos para la activación alcalina de la ceniza volante, entonces incorporan (i) una primera etapa de nucleación, donde el componente de aluminosilicatos vítreo de las cenizas volantes se disuelve en la solución alcalina favoreciendo la formación de gel de aluminosilicatos a partir de las especies disueltas (esta etapa engloba las dos primeras etapas de Glukhovsky) y (ii) una segunda etapa en las que varios núcleos dentro del gel alcanzan un tamaño crítico y comienzan a desarrollar cristales.

La Figura 3 muestra las etapas que comprenden la transformación de una fuente de aluminosilicatos en un polímero inorgánico alcalino. Cabe destacar que aunque las etapas de este modelo se muestran linealmente se pueden dar de manera simultánea. La etapa inicial se basa en el contacto entre la fuente de aluminosilicatos y la solución alcalina,

donde se produce la disolución de la fase vítrea de la ceniza volante formando monómeros. Cabe destacar que la velocidad de la disolución depende fuertemente del pH del activador alcalino y de otras condiciones experimentales. Luego, estos monómeros inter-reaccionan para formar dímeros, que a su vez reaccionan con otros monómeros para formar trímeros, tetrameros y así sucesivamente. Cuando la solución alcanza la saturación, precipita un gel de aluminosilicatos. Inicialmente se trata de un gel rico en aluminio, denominado Gel 1. Lo anterior se explica, ya que los enlaces Al-O son más débiles que los del Si-O, por lo que son fáciles de romper [24]. A medida que avanza la reacción, se disuelven más grupos Si-O aumentando la concentración de silicio en el medio y aumentando gradualmente su proporción en el gel precursor zeolítico (Gel 2). Finalmente, se lleva a cabo una reorganización estructural que determina la composición final del polímero, así como la microestructura y distribución de los poros en el material, factores críticos en el desarrollo de muchas propiedades físicas del geopolímero resultante [25].

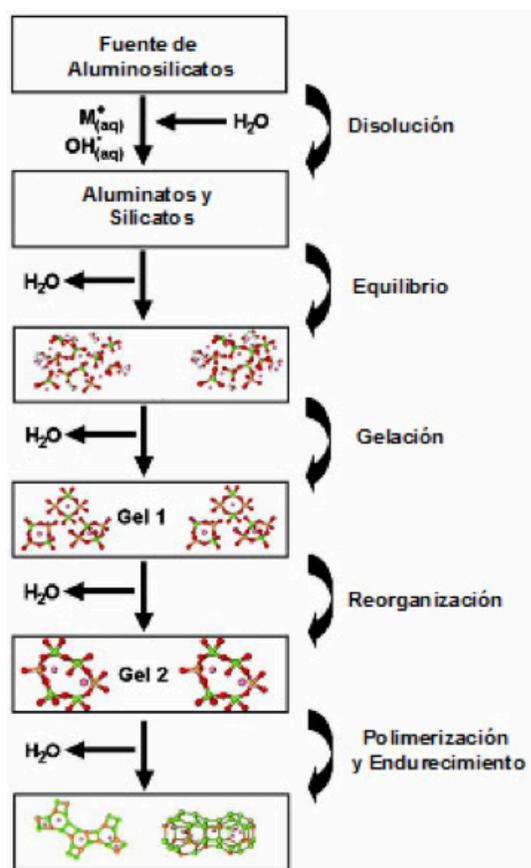


Figura 3: Etapas de la Geopolimerización. Fuente: Adaptado de [26].

2.3.2 Modelo descriptivo geopolimerización ceniza volante

Fernández-Jiménez et al. [27] propusieron un modelo descriptivo para explicar la activación alcalina de la ceniza volante (Figura 4). La Figura 4 (a) muestra que el ataque químico comienza en la superficie de una partícula de ceniza volante, que puede ser hueca o parcialmente hueca, y avanza formando un agujero cada vez más grande, lo que provoca la exposición de las partículas más pequeñas que se encuentran atrapadas dentro de esta al

ataque alcalino bidireccional, ya que actúa desde adentro hacia fuera y desde el exterior hacia adentro (Figura 4 (b)). Debido a lo anterior, se generan productos de reacción (gel prezeolítico) tanto dentro como fuera de la cáscara de la ceniza hasta que esta se consume completa o casi completamente (Figura 4 (c)). La etapa que involucrada en esta reacción corresponde a la de disolución. Al mismo tiempo, a medida que la solución alcalina penetra y entra en contacto con las partículas más pequeñas que se encuentran dentro de las esferas más grandes, el espacio interior de estas últimas empieza a llenarse con producto de reacción lo que da origen a una matriz densa.

La precipitación masiva de productos de reacción provoca que una capa de estos cubra ciertas porciones de las esferas más pequeñas, lo que evitaría su contacto con el medio alcalino (Figura 4 (e)). Además las reacciones en curso dentro de la masa de la matriz consolidan dichas cortezas, lo que provoca que las partículas de ceniza volante que no han reaccionado, confinadas por recubrimiento de productos de reacción, no puedan ser afectadas por el alto pH del activador, lo que reduce la velocidad de reacción de la matriz aglomerante.

Los procesos descritos no son uniformes en toda la matriz, varían localmente dependiendo de la distribución del tamaño de partícula y de la química local (por ejemplo, pH). Por lo tanto, varias morfologías pueden coexistir en una sola pasta: partículas sin reaccionar, partículas atacadas por la solución alcalina pero que mantienen su forma esférica, productos de reacción, entre otros. (Figura 4 (d)).

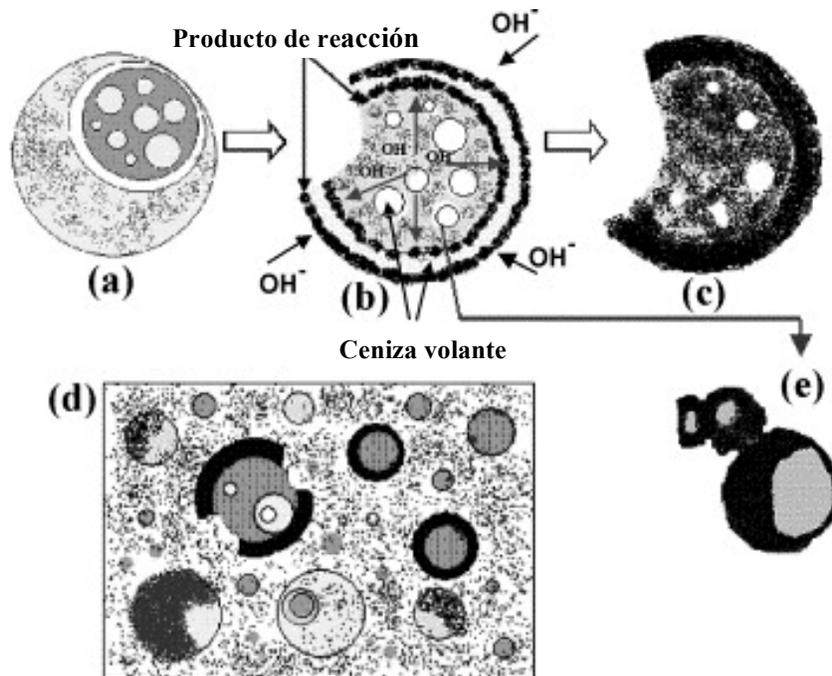


Figura 4: Modelo descriptivo de la activación alcalina de ceniza volante. Fuente: [27].

2.4 Hormigón geopolimérico

El hormigón geopolimérico ha demostrado ser un material muy competente en el rubro de la construcción ya que sus propiedades tanto mecánicas como de durabilidad alcanzan valores iguales o superiores en comparación con el hormigón convencional. A continuación se resume la información con sus características destacables.

- **Alta resistencia a edades tempranas**

El hormigón geopolimérico curado térmicamente (60-80°C durante 12 horas) alcanza altas resistencias a edades tempranas. Rangan et al [28] registraron resistencias a compresión de alrededor de 60 MPa para un hormigón en base a ceniza volante ensayado a los 7 días.

- **Resistencia al ataque por sulfatos**

Dentro de las patologías que afectan la durabilidad del hormigón convencional se encuentra el ataque por sulfato, el cual puede provocar el agrietamiento, expansión y/o pérdida de resistencia del material. Los sulfatos pueden reaccionar con diversos productos de la pasta de cemento y formar yeso y etringita. En el caso que reaccione con la portlandita forma yeso y si reacciona con los compuestos aluminosos presente en el cemento produce etringita. Estas reacciones que son de carácter expansivo se llevan a cabo en los espacios libres de la pasta endurecida, lo que genera esfuerzos internos indeseables en el hormigón. El hormigón geopolimérico producido con una fuente de aluminosilicatos con bajo contenido de calcio, no sufriría estas mismas consecuencias ya que dentro de los productos principales de la geopolimerización no se encuentran ni el yeso ni la portlandita.

Distintos estudios se han realizado para demostrar la alta resistencia a los sulfatos que presenta el hormigón geopolimérico. Rangan et al [29] estudiaron cómo se ve afectado este tipo de hormigón al ser expuesto a una solución de 5% en peso de sulfato de sodio. Como resultado se observó que luego de un año, las muestras no cambiaron en apariencia, su masa no se vio afectada, hubo poca variabilidad en la resistencia a la compresión y la variación en la longitud de las probetas alcanzó una expansión extremadamente pequeña de 0,015%. Este valor se encuentra lejos de las expansiones alcanzadas en el hormigón con cemento Portland. Wee et al [30] observaron que el cambio de longitud del hormigón convencional con relación agua/cemento de 0,4 a 0,5 fue de entre 0,035 a 0,1% después de 32 semanas en una solución del 5% de sulfato de sodio.

- **Resistencia al ataque ácido**

En general el hormigón convencional no tiene una buena resistencia frente al ataque ácido, sollicitación común en proyectos mineros. Estos agentes reaccionan con los compuestos cálcicos del hormigón (hidróxido de calcio, silicato de calcio hidratado y aluminato de calcio hidratado) transformándolos en sales cálcicas que agrietan y disgregan la pasta de cemento. Las sales formadas generalmente son solubles y su eliminación provoca el aumento de la porosidad del hormigón dejando espacios para una mayor penetración del ácido.

Los ácidos más comunes corresponden al ácido clorhídrico que al atacar al hormigón genera cloruro cálcico, ácido nítrico que produce nitrato de calcio (ambos productos solubles en agua) y el ácido sulfúrico que produce sulfato cálcico que precipita

como yeso que también es soluble.

Varias investigaciones se han realizado con respecto al ataque del ácido sulfúrico al hormigón convencional y geopolimérico, ya que este se encuentra de manera natural en aguas subterráneas y suelos. Davidovits [31] concluyó que al exponer al hormigón convencional a ácido sulfúrico diluido (5%) estos pierden entre un 30 y 60% de masa, mientras que el geopolimérico, entre un 5 y 8% (el periodo de exposición no se indicó en el trabajo). Song et al [32] rectificó la superioridad del hormigón geopolimérico basado en cenizas volantes frente al ataque ácido en comparación con el hormigón convencional. Ambos tipos de hormigón fueron expuestos a una solución de ácido sulfúrico al 10%. El hormigón geopolimérico después de 56 días de exposición presentó muy bajas pérdidas de masa, menos del 3%, mientras que el hormigón con cemento Portland experimentó un deterioro significativo perdiendo el 41% de masa en 4 semanas.

- **Resistencia a altas temperaturas**

El hormigón geopolimérico presenta generalmente un buen comportamiento frente a su exposición a elevadas temperaturas. Al someter una pasta de geopolimero en base a ceniza volante a dicho efecto ha resultado en un aumento de la resistencia mecánica a medida que la temperatura crece, hasta alcanzar su máximo valor (77 MPa) a los 300°C. Luego, la resistencia se fue deteriorando gradualmente. Sin embargo, a los 800°C la muestra presentaba una resistencia de 58 MPa, mientras que la pasta de hormigón convencional a los 400°C ya había perdido toda resistencia residual, lo que se explica por la descomposición de la portlandita (Ca(OH)_2) a dicha temperatura [33].

- **Baja retracción por secado**

La retracción por secado del hormigón geopolimérico confeccionado con ceniza volante es generalmente muy baja en comparación con el hormigón de cemento Portland. Este tipo de retracción provoca una deformación volumétrica del hormigón como consecuencia de la pérdida de agua que se produce por el secado del material. En el caso del hormigón geopolimérico curado térmicamente, la mayor parte del agua liberada durante la reacción química se evapora durante el curado. Por lo tanto, como el agua restante que se encuentra en los poros del material es escasa entonces la retracción por secado es baja [29].

3 Planteamiento de la investigación

3.1 Introducción

El hormigón geopolimérico se ha estado estudiando desde hace varios años demostrando ser un material con características similares e incluso mejores a las del hormigón convencional tanto en su desempeño como en sustentabilidad.

Con la presente investigación se busca obtener hormigón geopolimérico con propiedades mecánicas similares a las del hormigón convencional estructural a partir de ceniza volante con bajo contenido de calcio proveniente de central termoeléctrica Ventanas. Para ello, en primer lugar se deben caracterizar los materiales a ser utilizados en este estudio, ya que es necesario conocer su composición química, especialmente de la fuente de aluminosilicato, de la cual dependen las propiedades del geopolímero. Luego se contempla optimizar las propiedades del material mediante el mejoramiento del comportamiento de la ceniza volante, el ajuste experimental de las dosificaciones de los materiales y a partir de la incorporación de adiciones ternarias, como la escoria de alto horno y microsílíce.

Al igual que en el hormigón convencional, se requiere que el hormigón geopolimérico sea trabajable, por lo que se estudia la influencia del contenido de agua extra y de aditivo superplastificante en la mezcla de manera de poder controlar el comportamiento en estado fresco de este hormigón sin comprometer el nivel de resistencia mecánica.

Además, otro factor importante a la hora de masificar el uso del hormigón geopolimérico como material de construcción es el tratamiento de curado que requiere durante el periodo inicial. En la literatura se especifica que para obtener mayores resistencias el curado debe ser a temperaturas entre 60 y 80°C, ya que de esa manera la reacción de geopolimerización se desarrolla a mayor velocidad. Este procedimiento puede jugar en contra de la masificación de este material, ya que involucra una implementación más difícil de llevar a cabo en comparación con el hormigón convencional. Este hecho motiva a estudiar el nivel de temperatura de curado que optimiza las propiedades del hormigón geopolimérico.

En la industria de los prefabricados una cualidad que puede ser de alta relevancia es el periodo de descanso previo a la aplicación del ciclo de curado térmico, ya que se debe contar con suficiente tiempo entre la colada del hormigón y su curado, por lo tanto también se considera el periodo de espera como una de las variables a ser considerada.

Otro parámetro importante a la hora de la elaboración de la mezcla geopolimérica corresponden a la composición de la solución alcalina, por lo que se estudia la influencia que tiene la concentración de la solución de hidróxido de sodio y la alcalinidad del silicato de sodio junto con su viscosidad.

Finalmente, basándose en planteamientos encontrados en la literatura se quiere verificar la buena adherencia entre la pasta geopolimérica y las partículas del agregado que presentaría el hormigón, por lo que se estudia cómo afecta la variación de la granulometría de los áridos en las propiedades del hormigón geopolimérico.

3.2 Programa de ensayo

Para el programa de ensayo se considera un estudio preliminar que pretende obtener dosificaciones que se adecúen a los materiales disponibles en el país. Por lo tanto, se contempla ajustar experimentalmente, mediante una serie de mezclas de prueba, las relaciones solución alcalina/fuente de aluminosilicatos y la proporción de áridos en la mezcla con tal de obtener los mejores resultados en cuanto a trabajabilidad y desarrollo de resistencias.

Para cumplir con el objetivo de la investigación, el programa de ensayo se basa en estudiar cómo influye la variación de la composición de la pasta geopolimérica y su método de elaboración sobre propiedades como la densidad, resistencia a la compresión y a la flexotracción del hormigón geopolimérico basado en cenizas volantes. Las variables en estudio se enlistan a continuación:

1. Composición fuente de aluminosilicatos
 - 1.1. Porcentaje de pérdida por calcinación (LOI) de ceniza volante
 - 1.2. Ceniza con adición de escoria de alto horno
 - 1.3. Ceniza con adición de microsilíce
2. Composición solución alcalina
 - 2.1. Concentración de la solución de hidróxido de sodio
 - 2.2. Composición de silicato de sodio
3. Aditivos
 - 3.1. Contenido de agua extra
 - 3.2. Superplastificante
4. Condiciones de curado
 - 4.1. Temperatura de curado
 - 4.2. Periodo de descanso
5. Granulometría áridos

Para llevar a cabo las distintas mezclas, se hace uso de la mezcladora, balanza electrónica, hornos para curado y máquinas de ensayos de resistencias mecánicas. Para cada serie se confeccionó un molde RILEM, el cual cuenta con tres probetas de 4x4x16 cm, por lo tanto, se obtienen tres datos para la densidad y para la resistencia a flexotracción. Por otro lado, se ensayan a compresión las mitades de las probetas ensayadas a flexión, consiguiendo seis valores. Ahora bien, los resultados entregados en el Capítulo 6 corresponden al promedio de estos datos.

Las tablas Tabla 3 y Tabla 4 presentan el detalle de las dosificaciones empleadas en cada mezcla.

Cabe destacar que se considera como mezcla base la correspondiente a la Mezcla 1 de la Tabla 3, la cual utiliza una molaridad de la solución de hidróxido de sodio de 10M, 10% de agua y 1,5% de superplastificante. Esta mezcla es utilizada como referencia, por lo tanto es comparada con las otras mezclas al analizar las propiedades del material. La dosificación que utiliza se ocupa además para los parámetros en los que se estudia los procesos a los cuales es sometida la pasta geopolimérica, es decir, se utiliza para el estudio de la temperatura de curado y periodo de descanso.

Tabla 3: Detalle de mezclas 1 a 9.

N° mezcla	Fuente de aluminosilicatos	Agregado		Solución de NaOH		Silicato de Sodio	Agua extra		Superplastificante	
		Gravilla 7 mm	Arena fina	kg/m ³	Molaridad		kg/m ³	%	kg/m ³	%
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	%
1	509 ^(a)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5
2	509 ^(b)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5
3	509 ^(c)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5
4	509 ^(d)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5
5	509 ^(e)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5
6	509 ^(f)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5
7	509 ^(a)	-	1560	94,5	8	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5
8	509 ^(a)	-	1560	94,5	12	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5
9	509 ^(a)	-	1560	94,5	14	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5

^(a) Ceniza volante, LOI = 10,7%

^(b) Ceniza volante, LOI = 20,17%

^(c) Ceniza volante, LOI = 15,36%

^(d) Ceniza volante, LOI = 7,13%

^(e) Ceniza volante (70%) + Escoria (30%)

^(f) Ceniza volante (70%) + Microsílice (30%)

⁽ⁱ⁾ Silicato de Sodio 2.0

Tabla 4: Detalle de mezclas 10 a 19.

N° mezcla	Fuente de aluminosilicatos	Agregado		Solución de NaOH		Silicato de Sodio	Agua extra		Superplastificante	
		Gravilla 7 mm	Arena fina	kg/m ³	Molaridad		kg/m ³	%	kg/m ³	%
	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	%	kg/m ³	%	
10	509 ^(a)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5
11	509 ^(a)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱⁱⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5
12	509 ^(a)	-	1560	94,5	10	236,4 ^(iv)	50,9	10	7,6	1,5
13	509 ^(a)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	0,0	0	7,6	1,5
14	509 ^(a)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	76,4	15	7,6	1,5
15	509 ^(a)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	101,8	20	7,6	1,5
16	509 ^(a)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	10,2	2
17	509 ^(a)	-	1560	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	12,7	2,5
18	509 ^(a)	1092*	468	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5
19	509 ^(a)	1248**	312	94,5	10	236,4 ⁽ⁱ⁾	50,9	10	7,6	1,5

^(a) Ceniza volante, LOI = 10,7%

⁽ⁱ⁾ Silicato de Sodio 2.0

⁽ⁱⁱ⁾ Silicato de Sodio 30°Be

⁽ⁱⁱⁱ⁾ Silicato de Sodio 38-39°Be

^(iv) Silicato de Sodio 50-52°Be

(*) Árido granulometría continua

(**) Árido granulometría discontinua

4 Materiales

4.1 Fuentes de aluminosilicatos

4.1.1 Ceniza Volante

La ceniza volante (Figura 5) utilizada como fuente de aluminosilicatos proviene de la división Ventanas de AES GENER y su composición química fue determinada mediante un análisis por fluorescencia de rayos X (FRX), que se presenta en la Tabla 5.



Figura 5: Ceniza volante.

Tabla 5: Composición de ceniza volante determinada por FRX (% masa)

Óxidos	Contenido de óxido (%)
SiO ₂	58,35
Al ₂ O ₃	29,20
Fe ₂ O ₃	5,17
MgO	3,00
K ₂ O	1,64
CaO	1,05
TiO ₂	0,77
SO ₃	0,70
V ₂ O ₅	0,05
MnO	0,04
SrO	0,02
Cr ₂ O ₃	0,02
ZnO	0,01
Rb ₂ O	0,01
LOI	21,07

Se puede observar en la Tabla 5 que la razón molar SiO₂/Al₂O₃ es de aproximadamente 2, el contenido de óxido de calcio es bastante bajo, menor a un 2% y la suma de SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ alcanza un 92,72%, sobre el 70%, por lo que esta ceniza se clasifica como de tipo F. Cabe destacar que el contenido de carbón sin combustionar (LOI)

alcanza un 21,07%, lo cual es alto para lo revisado en la literatura, donde se explica que el LOI debe ser inferior al 5% [16]. Por lo tanto, la ceniza debe ser tratada para conseguir un material que reaccione de manera óptima con la solución alcalina, para ello se debe reducir dicho porcentaje.

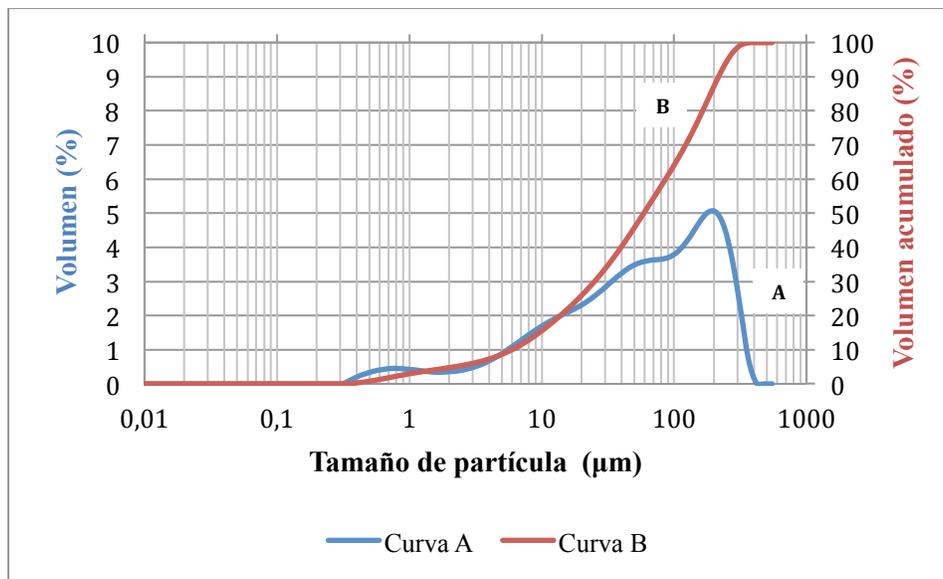


Figura 6: Distribución de tamaño de partícula.

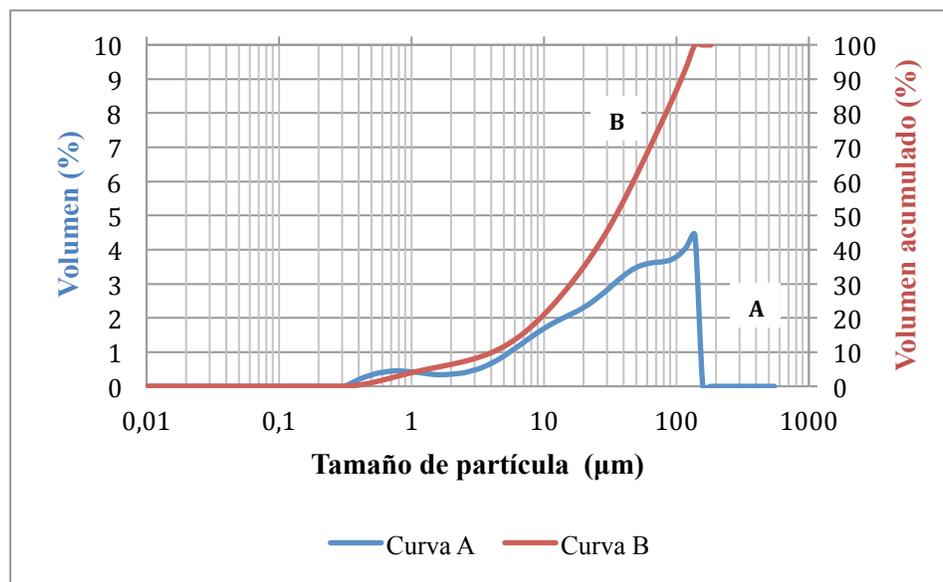


Figura 7: Distribución de tamaño de partículas bajo tamiz #100.

La distribución granulométrica de la ceniza volante se presenta en la Figura 6. La curva A entrega en forma porcentual el volumen de partículas de distintos tamaños que contiene la ceniza, en cambio la curva B muestra la distribución del tamaño de partículas mediante el volumen acumulado, es decir, el total de partículas que es inferior al tamaño correspondiente. Como se puede observar, el 80% de las partículas son más pequeñas que 170 µm.

La ceniza volante fue secada en horno a una temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$ por un periodo de 24 horas y luego fue tamizada bajo una malla #100, con una abertura de 0,15 mm. El objetivo es reducir el elevado porcentaje de pérdida por calcinación (LOI) y eliminar las partículas de mayor tamaño. Luego de este proceso, el LOI se redujo a un 10,7% y se puede observar en la curva granulométrica de la Figura 7 que el 80% de las partículas presenta un tamaño inferior a $80 \mu\text{m}$.

Según los datos presentados, la ceniza volante luego de ser tamizada cumple solamente algunas de las condiciones indicadas por Fernández-Jiménez et al. [16]:

- El porcentaje de pérdida por calcinación (LOI) es de un 10,7%, superior al 5% recomendado.
- El contenido de Fe_2O_3 no supera el 10%, cumple con lo recomendado.
- El CaO se encuentra en bajas proporciones, cumple con lo recomendado.
- El porcentaje de partículas de tamaño inferior a $45 \mu\text{m}$ es de un 58%, por lo tanto la ceniza volante en estudio tiene partículas de mayor tamaño que lo indicado en la literatura.

4.1.2 Escoria de alto horno

La escoria de alto horno utilizada en algunas mezclas en conjunto con la ceniza volante, proviene de la empresa "Compañía Siderúrgica Huachipato S.A. CAP" y fue facilitada por Idiem Concepción.

El análisis químico fue realizado mediante fluorescencia de rayos X (FRX) y se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6: Composición escoria determinada por FRX (% masa)

Óxidos	Contenido de óxido (%)
CaO	37,69
SiO ₂	35,11
Al ₂ O ₃	10,05
MgO	6,91
Fe ₂ O ₃	1,64
TiO ₂	1,42
K ₂ O	0,44
Na ₂ O	0,34

La escoria de alto horno originalmente presentaba un gran porcentaje de humedad por lo cual fue secada en horno a una temperatura de $60 \pm 5^\circ\text{C}$ por un periodo de 24 horas. Además, su tamaño de partícula era grueso por lo que se procedió a moler en el Molino de Bolas, marca Salas con capacidad de 5 kg que se muestra en la Figura 8. Para la molienda se cargaba la máquina con 3 kg de material y se ajustaba para que diese 3240 número de vuelta y así conseguir una finura sobre los $3300 \text{ cm}^2/\text{g}$. En la Figura 9 se observa la escoria de alto horno previo a la molienda y luego de esta.



Figura 8: Molino de bolas, planta piloto IDIEM.



Figura 9: Escoria de alto horno. A la izquierda, escoria sin procesar y a la derecha, escoria luego de ser molida.

4.1.3 Microsílice

La microsíllice utilizada en este estudio fue SikaFume, proporcionada por la empresa Sika S.A., la cual se presenta en polvo fino de color gris y cumple con la Norma ASTM C1240. Sus datos técnicos se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Datos técnicos de microsíllice.

Peso específico	2,2
Pérdida por ignición	< 6%
Superficie específica	> 15m ² /gr
Retenido en 45 µm	< 10%
Análisis químico	
SiO ₂	> 90%
SiO ₃	< 2,0%
Cl	< 0,3%
CaO libre	< 1%

4.2 Solución Alcalina

En este estudio se utilizó un activador alcalino compuesto por solución de silicato de sodio e hidróxido de sodio. Dichos componentes presentan las características que se describen a continuación:

4.2.1 Hidróxido de Sodio

La solución de hidróxido de sodio se obtuvo a partir de la disolución de hidróxido de sodio en forma de pellets en agua destilada. Las cantidades a disolver dependen de la molaridad deseada. En este estudio se utilizaron cuatro molaridades, 8M, 10M, 12M y 14M.

A modo de ejemplo, se explica a continuación el cálculo para la preparación de una solución de hidróxido de sodio 10M. En primer lugar, se obtiene el peso molecular del hidróxido de sodio a partir de la suma de sus componentes:

$$PM_{\text{NaOH}} = PA_{\text{Na}} + PA_{\text{O}} + PA_{\text{H}} = 22,99 + 15,99 + 1,01 = 39,99 \approx 40 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]$$

Debido a que la concentración molar corresponde a la cantidad de moles en un litro de solución, para preparar una solución de 10 M, equivale a agregar 400 g de soluto hasta obtener un litro de solución.

$$\text{Solución NaOH 10M} = \frac{10 \text{ moles (NaOH)}}{1 \text{ litro de sol}} = \frac{10 \text{ moles (NaOH)} \cdot 40 \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right]}{1 \text{ litro de sol}} = \frac{400 \text{ g (NaOH)}}{1 \text{ litro de sol}}$$

El mismo procedimiento se lleva a cabo para las soluciones con molaridad 8M, 12M y 14M. Donde se debiesen agregar 320, 480 y 560 g de soluto hasta alcanzar un litro de solución, respectivamente.

4.2.2 Silicato de Sodio

Las soluciones de silicato de sodio fueron proporcionadas por la empresa Austral Chemicals Chile S.A. La utilizada en la mayoría de las mezclas presenta una razón $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 2,0 y cuenta con las especificaciones que se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8: Análisis físico químico Silicato de Sodio 2.0.

Composición	
Alcalinidad Total (% Na_2O)	14,7
Sílice Soluble (% SiO_2)	29,4
Agua (% H_2O)	55,9
Características	
Densidad 20°C	1,525 g/ml
Viscosidad	310 cps
Condiciones físicas	Líquido viscoso opalescente

Además, se incluyeron otras formulaciones para la solución de silicato de sodio, las que se describen a continuación:

a) Silicato de Sodio 30 °Be

Tabla 9: Análisis físico químico Silicato de Sodio 30 °Be.

Composición	
Alcalinidad Total (% Na_2O)	7,12
Sílice Soluble (% SiO_2)	22,85
Agua (% H_2O)	70,03
Características	
Densidad 20°C	1,270 g/ml
Viscosidad	20 cps
Condiciones físicas	Líquido viscoso opalescente

b) Silicato de Sodio 38-39 °Be

Tabla 10: Análisis físico químico Silicato de sodio 38-39 °Be.

Composición	
Alcalinidad Total (% Na_2O)	8,03
Sílice Soluble (% SiO_2)	27,5
Agua (% H_2O)	64,47
Características	
Densidad 20°C	1,360 g/ml
Viscosidad	100 cps
Condiciones físicas	Líquido viscoso opalescente

c) Silicato de Sodio 50-52 °Be

Tabla 11: Análisis físico químico Silicato de Sodio 50-52 °Be.

Composición	
Alcalinidad Total (%Na ₂ O)	13
Sílice Soluble (%SiO ₂)	30,5
Agua (%H ₂ O)	56,5
Características	
Densidad 20°C	1,570 g/ml
Viscosidad	1900 cps
Condiciones físicas	Líquido viscoso opalescente

4.3 Áridos

Los áridos utilizados en esta investigación corresponden a una gravilla con tamaño máximo 7 mm y una arena fina. La primera tiene como procedencia el Río Maipo y fue facilitada por Idiem Cerrillos, mientras que la arena fue proporcionada por Polpaico y proviene de la Planta La Junta, sector La Obra, Río Maipo. Su granulometría se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12: Granulometría arena fina.

Tamaño tamiz [mm]	Agregados	
	7 [mm]	Arena fina
19	100	100
12,5	100	100
9,5	100	100
4,75	20	99
2,36	4	97
1,18	2	96
0,6	1,5	95
0,3	1	90
0,16	0	49

4.4 Aditivo Reductor de Agua

Con el objetivo de aumentar la trabajabilidad de la mezcla sin disminuir sus resistencias mecánicas y agregando la menor cantidad de agua posible, se utiliza el aditivo reductor de agua de alto rango MasterGlenium 330, facilitado por la empresa BASF.

Este aditivo es de Tipo Policarboxilato y posee una densidad aproximada de 1,07 g/cm³ a 20°C.

5 Trabajo en laboratorio

5.1 Trabajo preliminar

Con el fin de familiarizarse con la fabricación de morteros u hormigones geopoliméricos a partir de ceniza volante tipo F de la central Ventanas se realiza un trabajo preliminar en el laboratorio para poder ajustar la dosificación teórica teniendo en cuenta los efectos asociados a variables propias de los materiales, el proceso de mezcla, curado, entre otros. Para ello, se tomó como base experiencias internacionales anteriores, particularmente estudios australianos [28]. Por lo tanto, a partir de las materias primas nacionales sin tratamiento previo, se intenta verificar los resultados de dichos estudios.

Como dosificación inicial se utiliza la estudiada por Rangan et al.[28], donde se fijan las siguientes relaciones:

1. $\frac{\text{Solución alcalina}}{\text{Ceniza volante}} = 0,35$
2. $\frac{\text{Solución silicato de sodio}}{\text{Solución hidróxido de sodio}} = 2,5$
3. Áridos (gravilla 14mm – arena fina) = 77%

Cabe destacar que las mezclas realizadas por Rangan et al. contienen arena fina y gravilla con tamaño máximo de árido de 14 mm. En el caso del presente estudio se utilizó solamente arena fina.

Los resultados de la primera colada de prueba que utiliza las relaciones anteriores es un material que no presenta las propiedades deseadas, ya que se trata de una mezcla seca, con nula o baja trabajabilidad (al no incorporar agua extra) y con bajas resistencias mecánicas, alcanzando solamente 3 MPa a la compresión.

- **Mejoramiento de la mezcla**

Uno de los factores más determinantes a la hora de mejorar las propiedades del material geopolimérico corresponde al tratamiento de la ceniza volante para reducir la cantidad de carbón sin combustionar y las partículas de gran tamaño presentes en ella, para ello las cenizas son tamizadas bajo la malla #100, como se explicó anteriormente, lo que reduce el LOI.

Debido a las malas propiedades presentadas, se preparan múltiples mezclas de prueba variando las cantidades de cada componente (fuente de aluminosilicatos, solución alcalina, áridos, superplastificante y agua extra) y las razones entre ellos, principalmente razón entre solución alcalina/fuente de aluminosilicatos y la relación silicato de sodio/solución de hidróxido de sodio.

En base al estudio realizado por Díaz [1] se fija la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicatos en 0,65. Con ello se estudia cómo afecta el porcentaje de áridos en las propiedades de la mezcla. En la Figura 10 se presentan las resistencias a compresión medidas a los 7 días luego de preparada la mezcla. Como se puede observar a medida que disminuye la cantidad de áridos aumenta la resistencia. Debido a la pequeña diferencia

entre las mezclas con 60 y 65% de áridos se prefirió fijar en 65% puesto que disminuir tanto la cantidad de agregado significa un costo mucho más elevado del geopolímero.

Luego se fija dicho porcentaje y se analiza nuevamente la razón solución alcalina/ceniza volante. Como se puede visualizar en la Figura 11, a mayor razón, mayor es la resistencia a compresión a los 7 días de ensayo. Nuevamente, por la pequeña diferencia entre los resultados obtenidos con razón 0,65 y 0,75, se decide mantener en 0,65 ya que la solución alcalina es la más costosa de los materiales y es difícil de conseguir.

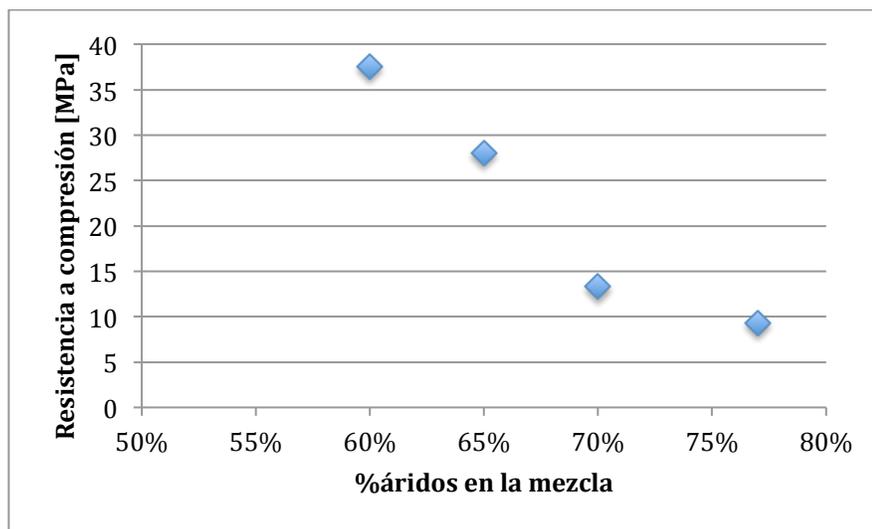


Figura 10: Influencia cantidad de áridos en resistencia a compresión de la mezcla con razón solución alcalina/ceniza volante de 0,65.

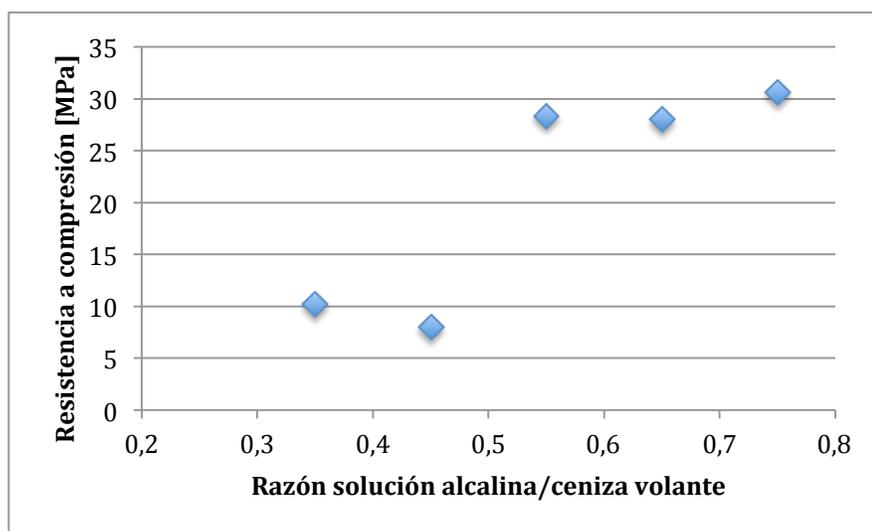


Figura 11: Influencia razón solución alcalina/ceniza volante en resistencia a compresión de la mezcla con 65% de áridos.

Finalmente, los cambios en la dosificación inicial corresponden a la reducción del porcentaje de áridos y a un aumento en la razón solución alcalina/ceniza volante, lo que resultó en un aumento de las resistencias mecánicas.

Durante el trabajo preliminar también se jugó con la cantidad de agua en la mezcla y se observó cómo a medida que se agregaba más agua mejoraba la trabajabilidad del hormigón y se formaba una pasta más viscosa, a diferencia de las mezclas sin agua que resultaban bastante secas. Además otro fenómeno que se destacó fue la exudación de agua al momento de la compactación en las mezclas con alto contenido de agua, con mayor cantidad de solución alcalina o menor cantidad de componentes secos (ceniza y áridos).

Por otro lado, basado en las experiencias internacionales, se decidió imitar su procedimiento llevado a cabo en el laboratorio para la preparación de las mezclas. Incluyendo la preparación previa de la solución alcalina, que consiste en mezclar la solución de hidróxido de sodio con la solución de silicato de sodio al menos un día antes de la fabricación de los geopolímeros.

Cabe destacar que más adelante se retoma el estudio del mejoramiento de la fuente de aluminosilicatos mediante la incorporación de adiciones como escoria de alto horno y microsílíce.

5.2 Dosificación final mezcla

Basándose en las investigaciones y trabajo preliminar realizado sobre la pasta de hormigón geopolimérico, se presentan a continuación los rangos seleccionados para los constituyentes de las mezclas:

5.2.1 Ceniza volante (CV)

- Razón entre solución alcalina y ceniza volante

La razón que suele ser la más utilizada en la literatura varía entre 0.3 y 0.4. Para este estudio se consideró una razón de 0.65 puesto que con menos solución alcalina se consiguió una mezcla bastante seca.

5.2.2 Solución alcalina (SA)

- Razón entre solución de silicato de sodio e hidróxido de sodio

Esta razón puede estar entre 0.4 y 2.5. Para este estudio se utilizó una razón de 2.5, pues el silicato es considerablemente más barato que el hidróxido de sodio.

- Molaridad del hidróxido de sodio

Las soluciones de hidróxido de sodio cuentan con molaridades de: 8M, 10M, 12M y 14M, usando en la mayoría de las mezclas el 10M debido a su menor complejidad de preparación en comparación con las de 12M y 14M.

5.2.3 Agregados

La cantidad de áridos utilizada para fabricar un hormigón geopolimérico está entre un 75% y un 80% en peso. Sin embargo, se ocupó un 65% en peso de áridos debido a la granulometría de estos, ya que al tratarse en la mayoría de las mezclas de arena fina presenta una mayor superficie específica lo que provoca que la mezcla sea más seca, menos trabajable y de baja compacidad, por lo tanto menos resistente.

5.2.4 Superplastificante

La cantidad de superplastificante utilizado varía entre 1,5% y 2,5% de masa de ceniza volante.

5.2.5 Agua extra

En el estudio preliminar se observó que la pasta era seca, lo que obligó a agregar agua extra. En la mayoría de las mezclas se agrega un 10% con respecto al peso de ceniza volante.

5.3 Dosificación teórica

La dosificación de las mezclas de hormigón geopolimérico conlleva el procedimiento explicado a continuación. A modo de ejemplo se describirá una mezcla con 65% de áridos, una razón solución alcalina-ceniza volante de 0,65 y una razón entre silicato e hidróxido de sodio de 2,5.

En primer lugar, se supone una densidad de 2400 [kg/m³]. Luego como el 65% de la mezcla en peso corresponde al agregado entonces la cantidad de áridos es la siguiente:

$$\text{Áridos} = 65\% \cdot 2400 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = 1560 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

La masa de solución alcalina (SA) y ceniza volante (CV) corresponde a la densidad del hormigón menos la cantidad en peso de áridos:

$$SA + CV = 2400 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] - 1560 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = 840 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Considerando la razón solución alcalina-ceniza volante de 0,65, la masa de ceniza volante corresponde a:

$$CV = \frac{840 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}{(1 + 0,65)} = 509 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Por lo tanto el contenido de solución alcalina es:

$$SA = 840 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] - 509 = 331 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Como la razón entre silicato de sodio (Na₂SO₃) e hidróxido de sodio (NaOH) es de 2,5 y la suma de los componentes es el total de la solución alcalina, se resuelve el sistema de ecuaciones obteniendo lo siguiente:

- Solución de hidróxido de sodio

$$\text{NaOH} = \frac{SA}{(1 + 2,5)} = \frac{331 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]}{(1 + 2,5)} = 94,6 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

- Solución de Silicato de Sodio

$$\text{Na}_2\text{SO}_3 = 2,5 * \text{NaOH} = 2,5 * 94,6 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] = 236,5 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

5.4 Procedimiento en laboratorio

Para la fabricación de probetas tipo RILEM de pasta geopolimérica se siguen las etapas que se presentan a continuación:

5.4.1 Preparación previa de materiales

El día anterior a la elaboración de la mezcla geopolimérica se prepara la solución alcalina. Para ello, se pesa la solución de hidróxido de sodio y la de silicato de sodio en las proporciones correspondientes dependiendo de la mezcla a realizar. Luego se mezclan y se dejan reposar a temperatura ambiente (25°C) en el laboratorio hasta el día siguiente.

Previa a la mezcla, los áridos, ya sea arena fina o grava son homogeneizados y se les mide la humedad. Con este dato y con su absorción se puede corregir la cantidad de agua extra que se debe agregar a la mezcla a modo de conseguir que el árido se encuentre en estado Saturado Superficialmente Seco (SSS).

5.4.2 Mezclado

En primer lugar, se pesan los componentes del mortero conforme a la dosificación calculada (Figura 12). Dentro de los componentes se encuentra la fuente de aluminosilicatos, que puede ser ceniza volante sola o con alguna adición (escoria de alto horno o microsílíce), la solución alcalina previamente mezclada, los áridos, agua extra y aditivo superplastificante.



Figura 12: Materiales para fabricar hormigón geopolimérico.

Para el mezclado, se utilizó una mezcladora rotativa Quanli de 10 litros de capacidad (Figura 13) y se procedió a mezclar en seco los componentes sólidos, es decir, los agregados y las cenizas volantes, en la mezcladora durante aproximadamente tres minutos.

Luego, la parte líquida de la mezcla, es decir, la solución de silicato de sodio, la solución de hidróxido de sodio y si es que hay, el agua extra y el superplastificante, se mezclaron previamente y se añadieron a los sólidos (Figura 14). Esta mezcla húmeda se realizó durante otros cuatro minutos, obteniendo la pasta presentada en la Figura 15.



Figura 13: Mezcladora.



Figura 14: Adición de componentes líquidos a la mezcla seca.



Figura 15: Pasta geopolimérica.

5.4.3 Colocación y compactación

El molde RILEM de la Figura 16 que tiene capacidad para fabricar tres probetas rectangulares de 4x4x16 cm se cubre con papel film en la base y es aceitado en todas sus caras para que al desmoldar el geopolímero no se adhiera al acero.

La pasta se coloca en dos capas en los moldes y se compacta manualmente, con 20 golpes por capa. Luego, se utiliza la mesa de fluidez como mesa de sacudida y se coloca el molde sobre esta y se somete a 25 sacudidas.



Figura 16: Compactación.

5.4.4 Curado

El curado se realizó en seco en el horno de laboratorio a elevadas temperaturas. Las probetas se mantuvieron en el horno (Figura 17) durante 24 horas a una temperatura fija. Cumplido este tiempo, se sacan, se dejan enfriar y se desmoldan para luego ser envueltas en papel film hasta su fecha de ensayo.



Figura 17: Horno para curado térmico seco.

5.4.5 Ensayos

Para obtener las resistencias mecánicas de las probetas RILEM, se hace uso del equipo Toni Technik (Figura 18) con la cual se realizan los ensayos de flexotracción y compresión en viguetas de 4x4x16 cm.

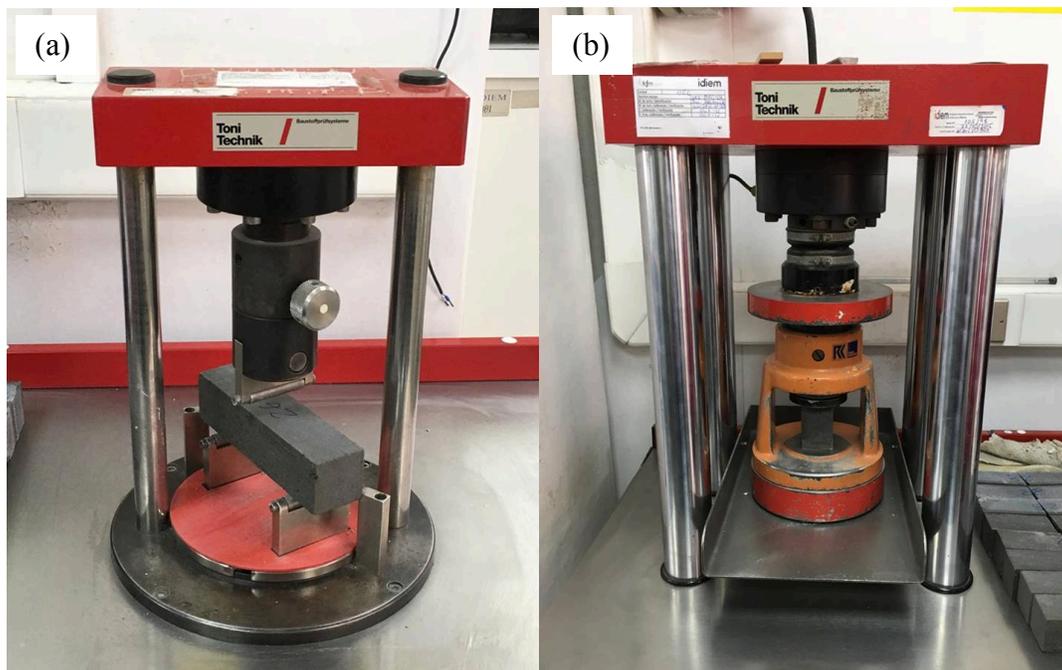


Figura 18: (a) Ensayo a flexotracción (b) Ensayo a compresión.

6 Presentación y análisis de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del análisis de distintas variables. Se estudia la composición de la mezcla, donde se incluye la composición de la fuente de aluminosilicato, de la solución alcalina y de los aditivos. Además de lo anterior, se analizan las condiciones de curado, ya sea el tiempo previo al curado y la temperatura de éste y la granulometría de los áridos.

Se realizaron ensayos a flexotracción y a compresión en probetas RILEM. Mientras que para obtener la densidad se pesaron las probetas y dicho valor se dividió en su volumen. Los resultados obtenidos se presentan en las tablas del Anexo A (Tabla 27, Tabla 28 y Tabla 29)

6.1 Composición fuente de aluminosilicatos

6.1.1 Porcentaje de pérdida por calcinación (LOI) de ceniza volante

Como se especificó en el punto 2.2.1 algunos de los factores a tener en cuenta con respecto a la reactividad de la ceniza volante son el contenido de carbón sin combustionar (LOI) y la distribución del tamaño de partículas. El primero influye en la activación alcalina de la ceniza volante, puesto que el material no quemado corresponde a partículas porosas y ásperas que no reaccionan con la solución alcalina y además, presentan gran superficie específica, por lo que son las responsables del aumento de la razón solución/ceniza. La cantidad de carbón residual en la ceniza depende de la velocidad y temperatura de combustión, grado de pulverización del carbón original, proporción entre combustible y aire y de la naturaleza del material que se quema [34]. Como se especificó en la caracterización del material utilizado, la ceniza facilitada presentaba un LOI de 20,17%, el cual al ser tamizado por una malla #100 (Mezcla 1, Tabla 3) se redujo a 10,7%, que continúa siendo alto según Fernández-Jiménez et al [16], quienes aseguran que la ceniza volante debiese tener un LOI inferior al 5% para conseguir una correcta activación.

Por otro lado, la distribución granulométrica de las cenizas volantes desempeña un rol fundamental en el desarrollo de resistencia mecánica del hormigón geopolimérico. La finura de la ceniza depende principalmente del grado de pulverización del carbón, del proceso térmico y del tipo de precipitador electrostático de la central termoeléctrica. Para obtener una reacción óptima entre ceniza y activador alcalino, estudios anteriores afirman que debe haber entre un 80 y 90% de partículas con tamaño inferior a 45 μm [16]. En este estudio, como se observa en la granulometría presentada en la Figura 6, antes de tamizar la ceniza, bajo los 45 μm solamente se encontraba el 43% de las partículas y en la Figura 7, luego de pasarla por la malla #100, se alcanzó un 58%, por lo tanto el tamaño de partículas de la ceniza utilizada es mucho más grande que lo óptimo. De hecho, en los estudios en los que se basa este trabajo, utilizan cenizas con un LOI entre el rango 1,1 a 1,6% [28].

Con el fin de estudiar cómo afectan en las propiedades del hormigón geopolimérico la variación del porcentaje de pérdida por calcinación y a la vez, el cambio del tamaño de partículas se prepararon cuatro mezclas. La mezcla 1 utiliza la ceniza tamizada por la malla #100. Luego, la ceniza que pasa bajo el tamiz #30 se utiliza para la mezcla 2, mientras que las que pasan bajo los tamices #50 y #200 conforman las mezclas 3 y 4 respectivamente

(Tabla 3). Las probetas fabricadas son curadas a 60°C en un horno y se ensayan a los 7 días (Tabla 13).

Tabla 13: Densidades y Resistencias mecánicas según LOI.

Tamiz	LOI (%)	Densidad [kg/m ³]	Resistencia flexotracción [MPa]	Resistencia compresión [MPa]
<#30	20,17	1682	1,65	9,14
<#50	15,37	1766	1,95	11,06
<#100	10,70	2005	3,30	19,26
<#200	7,13	2121	4,12	22,23

Según lo explicado anteriormente, el carbón tiene una superficie específica muy elevada por lo que a medida que hay mayor cantidad de este en las mezclas la densidad disminuye. Por otro lado, estas partículas sin combustionar se pueden encontrar en formas esféricas, angulosas, porosas, pegadas a las cenizas e incluso como núcleo de ellas, lo que dificulta el desarrollo de la resistencia mecánica del material. Las partículas de carbón pueden absorber la solución alcalina lo que afectaría la reacción y disolución de la ceniza volante o pueden absorber los aditivos superplastificantes que son utilizados para mejorar las características de la pasta. Por lo tanto, como se observa en la Tabla 13, las cenizas con altos porcentajes de carbón sin quemar disminuyen la resistencia a flexión y a compresión. Como se observa en la Figura 19 cuando se obtiene un porcentaje de pérdida por calcinación del 7%, la resistencia a compresión alcanza los 22[MPa] aproximadamente. Esta resistencia podría aumentar de manera considerable al darle un mejor tratamiento a la ceniza, es decir, disminuyendo aún más el contenido de carbón sin combustionar.

Cabe destacar que las mezclas al ser tamizadas redujeron su tamaño de partículas, lo que también influye en las propiedades de la pasta. Cuando se tienen partículas con mayor tamaño, como en el presente estudio, la mezcla es más seca, lo que obliga a aumentar la razón solución alcalina/ceniza volante para obtener una pasta fluida.

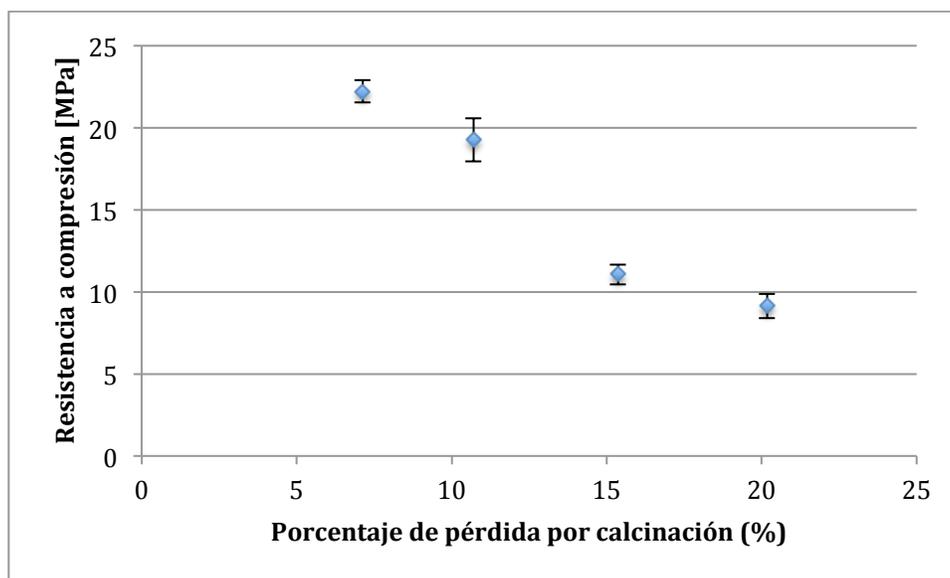


Figura 19: Efecto de LOI sobre resistencia a compresión

6.1.2 Ceniza con adición de escoria de alto horno

- **Mezcla a base de ceniza volante**

En este punto se estudió cómo influye la edad del hormigón en sus propiedades. Para ello se realizaron cinco conjuntos de probetas RILEM con la dosificación de la mezcla 1 (Tabla 3). Estas fueron curadas térmicamente a 60°C durante 24 horas. Luego se dejaron envueltas en papel film en condiciones ambientales del laboratorio (25°C) y cuando cumplieron la edad en estudio (3, 7, 14, 21 y 28 días) se llevaron al laboratorio de IDIEM para ser ensayadas.

En la Tabla 14 se exponen los resultados de las probetas al medir su densidad, resistencia a flexotracción y compresión en función de la edad de ensayo.

En la Figura 20 se visualiza que las probetas geopoliméricas a base de ceniza ganan resistencia a compresión durante los primeros días y luego se mantiene con el paso del tiempo. Al día 3 de ensayo, se alcanza aproximadamente un 75% de su resistencia final y a los 7 días está pronta a alcanzar la totalidad de esta. Esto se explica porque la reacción química del gel de geopolímero se debe a un proceso de polimerización sustancialmente rápido. Esta observación contrasta con el conocido comportamiento del hormigón convencional, que experimenta un proceso de hidratación y, por lo tanto, gana resistencia a lo largo del tiempo.

Tabla 14: Densidades y Resistencias mecánicas según edad de ensayo.

Días	Densidad [kg/m ³]	Resistencia flexotracción [MPa]	Resistencia compresión [MPa]
3	2055	2,53	15,51
7	2005	3,30	19,26
14	2008	3,45	19,09
21	2004	3,41	19,28
28	2007	3,46	20,28

- **Mezcla a base de ceniza volante con adición de escoria de alto horno**

En comparación con otros estudios el mortero geopolimérico en base a ceniza volante alcanza resistencias relativamente bajas por lo que se planteó la alternativa de incluir otras fuentes de aluminosilicatos, como la escoria de alto horno. Por lo tanto se confeccionaron cinco conjuntos de probetas con la dosificación de la mezcla 5 (Tabla 4). Para la fabricación de la mezcla se sigue el mismo procedimiento, sin embargo la ceniza volante es reemplazada en un 30% por escoria, luego se cura en el horno a 60°C por 24 horas y después se mantienen a temperatura ambiente (25°C) hasta su edad de ensayo. Los resultados de la densidad y resistencias mecánicas de las mezclas se presentan en la Tabla 15.

Las mezclas con ceniza y escoria de alto horno presentan mejor trabajabilidad que las mezclas que sólo contienen ceniza. En la Figura 20 se observa que también alcanzan altas resistencias a la compresión durante los primeros días, ya que la geopolimerización corresponde a una reacción que se da durante las primeras horas de la exposición de la mezcla a elevadas temperaturas.

Tabla 15: Densidades y Resistencias mecánicas según edad de ensayo.

Días	Densidad [kg/m ³]	Resistencia flexotracción [MPa]	Resistencia compresión [MPa]
3	2096	3,50	28,17
7	2072	4,31	29,88
14	2076	4,31	30,55
21	2047	4,63	31,66
28	2081	4,00	30,79

En la Figura 20 se compara el desarrollo de la resistencia a la compresión del geopolímero producido a partir de ceniza volante con el que se le agrega 30% de escoria. Se observa que la mezcla con adición de escoria desarrolla mayores resistencias en comparación con la que sólo tiene ceniza. Por lo que resulta en una buena alternativa para mejorar las propiedades mecánicas del geopolímero a base de ceniza, ya que aumenta hasta un 30% la resistencia de esta a los 28 días. La explicación para dicho aumento se basa en el contenido de calcio en la mezcla, puesto que la escoria es rica en este compuesto, lo que influye en el proceso de geopolimerización. El calcio reacciona fuertemente con el silicio en presencia de agua formando varias fases de silicato de calcio hidratado. Además reacciona con el aluminio y se forma aluminato de calcio hidratado. Los compuestos anteriores corresponden a los principales productos de la hidratación del cemento portland ordinario, los cuales aportan en la resistencia del material [26].

Por otro lado, la densidad aumenta al incluir escoria de alto horno, lo que concuerda con lo explicado anteriormente, puesto que al generarse mayores productos a partir de la geopolimerización, se densifica la matriz disminuyendo los poros dentro de ella.

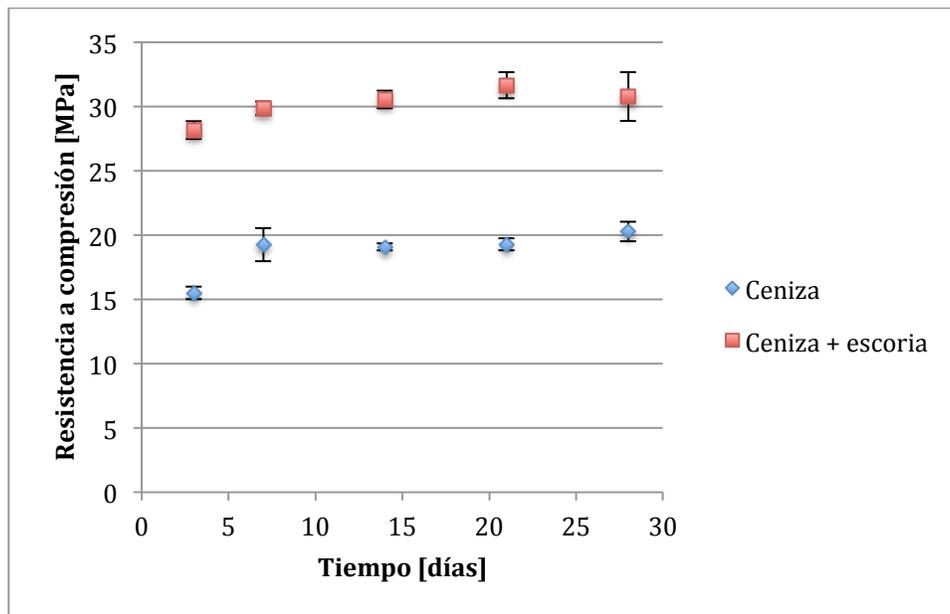


Figura 20: Desarrollo de resistencia a compresión de mezclas con ceniza volante y con adición de escoria.

- **Variación de temperatura de curado en mezcla con adición de escoria**

Las mezclas geopoliméricas con escoria de alto horno, a diferencia de las que solo tienen ceniza volante, no requieren elevadas temperaturas para ser activadas, debido a sus propiedades hidráulicas. Por lo tanto, para estudiar el efecto mencionado, se prepara la mezcla 5 (Tabla 4) la cual fue curada a temperatura ambiente (25°C) y en horno a 60°C. Luego fue ensayada a los 7 días desde su preparación y se obtienen los resultados de la Tabla 16.

En la Tabla 16 se puede observar que con un curado térmico (60°C) se obtienen mayores resistencias mecánicas en comparación con un curado a temperatura ambiente. Esto se explica ya que las mezclas contienen un 70% de ceniza volante, por lo que requieren de temperatura para que sus reacciones se aceleren. Sin embargo, la resistencia a compresión alcanzada a temperatura ambiente se asemeja a la desarrollada por la mezcla fabricada sólo con ceniza volante y curada térmicamente a 60°C. Esto resulta interesante, puesto que uno de los problemas de la masificación de la fabricación de geopolímeros se podría dar en cuanto a la necesidad del curado térmico.

Tabla 16: Densidades y resistencias mecánicas según temperatura de curado.

Temperatura [°C]	Densidad [kg/m ³]	Resistencia flexotracción [MPa]	Resistencia compresión [MPa]
25	2168	2,69	21,61
60	2072	4,31	29,88

6.1.3 Ceniza con adición de microsílíce

Otra alternativa para mejorar las resistencias mecánicas del mortero geopolimérico en base a ceniza volante fue incluir microsílíce. Para esto, se preparó la mezcla 6 (Tabla 3), donde la ceniza volante es reemplazada en un 30% por microsílíce y luego las probetas se someten a un curado térmico en el horno a 60°C por 24 horas. Los resultados de la densidad y resistencias mecánicas de las mezclas medidas a los 7 días desde su preparación se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17: Comparación propiedades entre mezcla con ceniza y otra con microsílíce.

Fuente de aluminosilicatos	Densidad [kg/m ³]	Resistencia flexotracción [MPa]	Resistencia compresión [MPa]
Ceniza	2005	3,30	19,26
Ceniza + microsílíce	2034	2,64	13,20

Dutta et al. [35] estudiaron cómo afectaba la incorporación de un 5% de humo de sílice sobre la porosidad y la resistencia a la compresión de una pasta geopolimérica y un mortero geopolimérico. Para el caso de la pasta, encontraron que la resistencia a la compresión disminuyó con la adición de este material, ya que aumentaba la porosidad. Sin embargo, en el mortero se obtuvo un aumento de la resistencia a la compresión, ya que disminuyó la porosidad. Se explica que en la pasta geopolimérica la adición de microsílíce, la cual tiene un alto porcentaje de SiO₂, podría haber afectado en el proceso de geopolimerización, ya que al existir mayor sílice en la mezcla se requiere mayor solución alcalina para la disolución de estas, por lo tanto como no hay más solución alcalina

disponible, parte de la microsilíce se mantendrá sin reaccionar en el gel geopolimérico. Sin embargo, en el caso de los morteros, estas partículas finas entran en los huecos existentes, disminuyendo la porosidad de la mezcla.

En otros estudios [36], se fabricaron hormigones geopoliméricos aumentando la cantidad de humo de sílice en la mezcla, donde se encontró que la resistencia a compresión aumentaba continuamente hasta el 40% de adición (porcentaje máximo agregado), lo que ocurre ya que las partículas finas entran en los poros del hormigón haciendo la estructura más compacta. Además, la cantidad adicional de sílice amorfa, podría formar una mayor cantidad de gel de aluminosilicato en la matriz del geopolímero.

En la presente investigación se utilizó un 30% de adición de microsilíce, obteniendo una probeta más oscura que la que sólo tiene ceniza, más porosa y además luego del curado térmico aumentó su volumen, provocando una expansión en la cara de enrase.

Como se observa en la Tabla 17, la densidad del mortero con microsilíce es mayor que la mezcla que contiene sólo ceniza. Lo anterior, se debe a que la microsilíce tiene un tamaño de partícula excesivamente fino, como se explicó con anterioridad, por lo que forma una estructura más compacta, por lo tanto más densa. Por otro lado, la incorporación de microsilíce provoca una disminución en las resistencias mecánicas de la mezcla, lo que concuerda con la explicación dada por Dutta et al. para la pasta geopolimérica, ya que la mezcla sin microsilíce ya es bastante seca y como se ha demostrado en otros ensayos, al aumentar la molaridad del hidróxido de sodio aumenta la resistencia a la compresión, lo que da a entender que faltan partículas por reaccionar, por lo que aumentar dichas partículas sin reaccionar conlleva a una evidente disminución de resistencia.

6.2 Composición solución alcalina

6.2.1 Concentración de la solución de hidróxido de sodio

Para estudiar cómo afecta la concentración de la solución de hidróxido de sodio en las propiedades del geopolímero se realizaron las mezclas 1, 7, 8 y 9 de la Tabla 3, utilizando concentraciones de 8, 10, 12 y 14M, respectivamente. Estas probetas fueron curadas térmicamente a 60°C durante 24 horas, se sacaron del horno y fueron envueltas en papel film para no perder la humedad. Luego, fueron ensayadas a los 7 días y se obtuvieron los datos de la Tabla 18. Las resistencias a la compresión se grafican en la Figura 21.

Tabla 18: Densidades y resistencias mecánicas según molaridad NaOH

Concentración molar [M]	Densidad [kg/m ³]	Resistencia flexotracción [MPa]	Resistencia compresión [MPa]
8	1883	2,24	12,96
10	2005	3,30	19,26
12	2068	3,50	20,90
14	2109	4,33	25,02

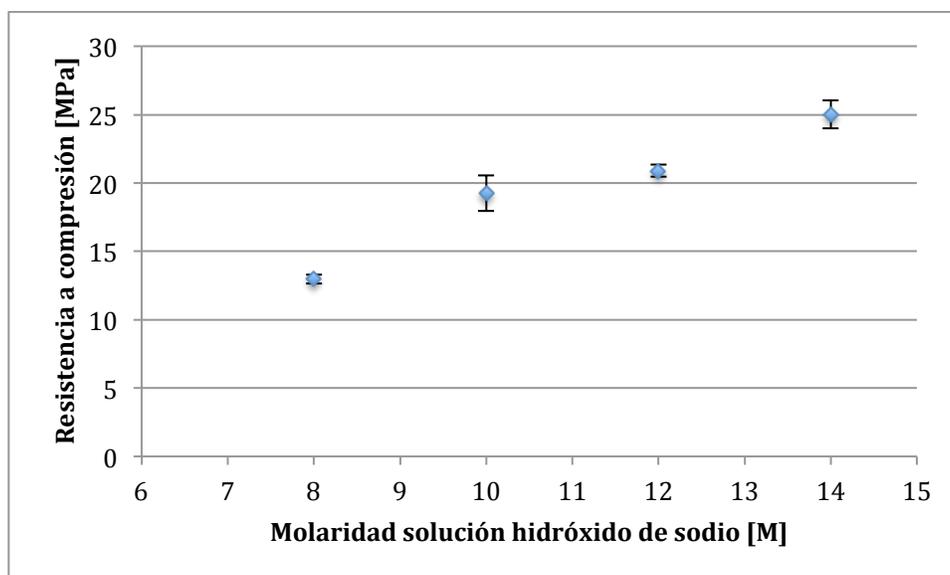


Figura 21: Resistencia a compresión con respecto a la concentración molar de NaOH.

Los resultados conseguidos para la densidad demuestran que esta asciende a medida que aumenta la molaridad de la solución. Durante la reacción de geopolimerización se libera el agua presente en la mezcla y luego, durante el curado es evaporada, por lo tanto se espera que a mayor concentración molar, es decir, cuando la solución de hidróxido de sodio contiene menor cantidad de agua aumente la densidad, pues existe menos agua que se puede evaporar.

Por otro lado, al igual que en el estudio de Díaz [1] los valores de la resistencia a la flexión y a la compresión aumentan conforme aumenta la concentración molar, alcanzando su mayor valor a los 14M. Esto ocurre ya que al crecer la concentración, la cantidad de soluto de NaOH aumenta, por ende los iones OH^- y los metales alcalinos disponibles serán mayores. Al haber mayor presencia de los aniones existe una mayor disolución de la fase vítrea de la fuente de aluminosilicatos, por lo tanto se generará más material cementante que desarrollará resistencia mecánica. Sin embargo, debiese existir una concentración límite sobre la cual se deje de aportar resistencia, ya sea porque no quede material por disolver o porque no hayan cargas eléctricas que balancear, lo que implica que los cationes y aniones permanezcan en la matriz. Estos al no formar parte de las cadenas de geopolímero podrían generar una reacción con otros compuestos y provocar estados tensionales indeseables que afectarían en la resistencia mecánica del material cementante.

En la experiencia realizada no se alcanza dicho límite, que en otros estudios [37] se consigue con una concentración de 12M. Díaz [1] explica que se puede deber al agua extra que reduce el pH de la solución alcalina, por lo tanto, al reducir la alcalinidad de la solución se reduciría la capacidad de disolver sílice y alúmina. Además agrega que en el caso en que se disolviese todo el material amorfo disponible y se contara con la presencia de material cristalino, este comenzaría a reaccionar y aportaría en la formación de gel de aluminosilicatos o precursor zeolítico. Por otro lado, como existe calcio en la fuente de aluminosilicatos, este podría haber reaccionado con silicio formando CSH que igualmente se incorporaría en la matriz.

6.2.2 Composición de silicato de sodio

Como se ha discutido durante este estudio, el rol que juega la solución alcalina es fundamental, por lo que se comparó el uso de distintos tipos de silicato de sodio en la pasta. Para ello, además de la mezcla 1, que utilizó el silicato con una razón $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 2,0, al igual que la mayoría de las probetas, se preparan tres mezclas más. La mezcla 10, con el silicato 30°Be, la mezcla 11, con silicato 38-39°Be y la mezcla 12, con silicato 50.52°Be (Tabla 4).

Cabe destacar que el silicato con razón 2,0 no se comercializa a gran escala en Chile, por lo que se le solicitó a la empresa proveedora Austral Chemicals Chile S.A. que lo fabricara con las dosis especificadas. La empresa informó que los valores de los silicatos que venden fluctúan entre \$380 y \$490 por kilo (más IVA), donde el precio se fija dependiendo del porcentaje de agua presente en la solución, a mayor contenido de agua menor es el precio. Sin embargo, se podría pensar que al ser un silicato especial, su costo sería superior, pero la proveedora explica que un 80% de sus clientes piden dosificaciones y/o viscosidades específicas. Por lo tanto el uso del silicato con razón 2:1 se encontraría en el mismo rango de precios.

En la Tabla 19 se comparan las características de cada una de las soluciones de silicato de sodio y en la Tabla 20 se muestran los resultados de los ensayos realizados a las mezclas geopoliméricas a los 7 días de su confección.

Tabla 19: Tipos de silicatos con su caracterización fisicoquímica.

Tipos de Silicato	%Na ₂ O	%SiO ₂	%H ₂ O	Densidad [g/ml]	Viscosidad [cps]
Silicato 30°Be	7,12	22,85	70,08	1,27	20
Silicato 38-39°Be	8,03	27,50	64,47	1,36	100
Silicato 50-52°Be	13,00	30,5	56,5	1,57	1900
Silicato 2:1	14,7	29,4	55,9	1,525	310

Tabla 20: Densidades y resistencias mecánicas según tipo de silicato.

Tipos de Silicato	Densidad [kg/m ³]	Resistencia flexotracción [MPa]	Resistencia compresión [MPa]
Silicato 30°Be	1911	0,82	2,74
Silicato 38-39°Be	1995	1,36	6,15
Silicato 50-52°Be	2081	2,97	15,85
Silicato 2:1	2005	3,30	19,26

Las densidades del mortero geopolimérico varían dependiendo del tipo de silicato utilizado. Dicha variación sigue un comportamiento conforme a la densidad de cada uno de los silicatos, por lo tanto como el silicato 50-52° presenta la mayor densidad, la mezcla preparada con este también.

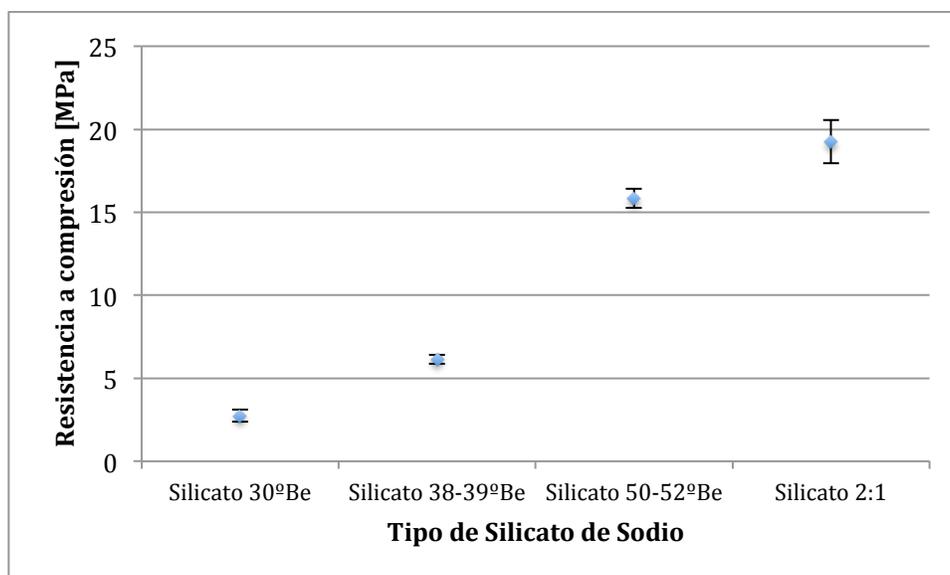


Figura 22: Efecto tipo de silicato de sodio sobre resistencia a compresión.

Por otro lado, el silicato con razón 2:1 alcanza la mayor resistencia tanto a flexión como a compresión, lo que justifica su uso en la mayoría de las mezclas. Además se puede observar que a mayor contenido de agua en la solución, la resistencia es inferior. Si se comparan las resistencias obtenidas entre el silicato 50-52ºBe y el 2:1, los que presentan una cantidad de agua similar, se observa que hay una diferencia de resistencia importante, lo que coincide con lo estudiado por Rangan [28], ya que a menor cantidad de Na_2O , la razón $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ aumenta, por lo que disminuye la resistencia mecánica del material geopolimérico.

6.3 Aditivos mezcla geopolimérica

6.3.1 Contenido de agua extra

Con el objetivo de estudiar el efecto del contenido de agua extra en la mezcla geopolimérica se prepararon las mezclas 1 (Tabla 3), 13, 14 y 15 (Tabla 4). En ellas se modificó el porcentaje de agua con respecto a la cantidad de ceniza volante. Los resultados de los ensayos realizados a los 7 días desde su fabricación se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21: Densidades y Resistencias mecánicas según contenido de agua extra.

Agua extra (%)	Densidad [kg/m^3]	Resistencia flexotracción [MPa]	Resistencia compresión [MPa]
0	1974	4,63	24,50
10	2005	3,30	19,26
15	2063	2,96	14,73
20	2023	2,58	11,57

En primer lugar, se debe señalar que a diferencia del hormigón convencional a base de cemento portland ordinario (OPC), en las mezclas de hormigón geopolimérico no se produce una reacción química de hidratación de la pasta. De hecho, cuando ocurre la

geopolimerización se libera agua, la cual en el largo plazo es expulsada de la probeta. Aún así, los resultados obtenidos en el laboratorio demuestran que el contenido de agua extra influye tanto en la preparación como en las propiedades del hormigón geopolimérico.

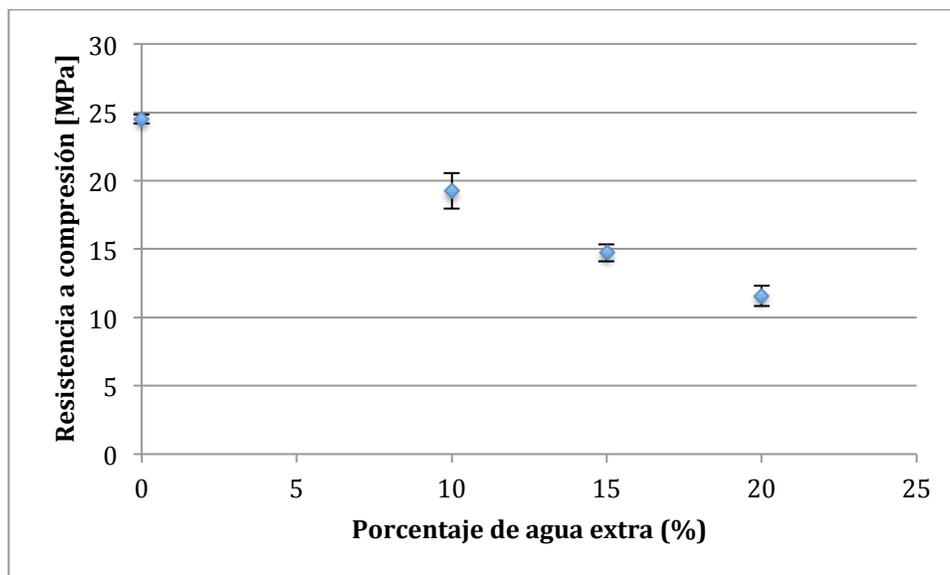


Figura 23: Influencia cantidad de agua sobre resistencia a compresión.

El agua extra al igual que en el hormigón convencional mejora la trabajabilidad de la mezcla geopolimérica, propiedad que hace posible la colocación, consolidación y buen acabado del material. Sin embargo, como se observa en la Figura 23, aumentar la cantidad de agua en la mezcla geopolimérica va en desmedro de la resistencia mecánica. Esta tendencia es análoga al efecto bien conocido de la relación agua/cemento sobre la resistencia a la compresión del hormigón de cemento Portland.

Si se hace una comparación en las densidades obtenidas para cada mezcla se puede observar que a medida que aumenta el porcentaje de agua extra, la densidad decrece. Al igual como se explicó con anterioridad, al existir mayor agua expulsada durante la mezcla es mayor la cantidad que puede ser evaporada.

Como ya fue mencionado, la resistencia a la flexión y compresión disminuyen al aumentar la cantidad de agua extra. Esto se produce ya que baja la alcalinidad de la mezcla, lo que provoca que se disuelva menos sílice y alúmina presente en la ceniza volante, por lo tanto se produciría menor cantidad de material cementante.

En sí la mezcla geopolimérica es bastante seca, por lo que resulta fundamental agregar agua extra o aumentar la cantidad de superplastificante para mejorar la trabajabilidad.

6.3.2 Superplastificante

Los aditivos superplastificantes se utilizan para aumentar la trabajabilidad del hormigón fresco, sin necesidad de agregar más agua a la mezcla y también proporciona un incremento en el desarrollo de resistencias mecánicas del hormigón endurecido. Debido a que la mezcla geopolimérica es bastante seca se vio la necesidad de encontrar la forma de mejorar su trabajabilidad. Para ello, se prepararon tres mezclas con distinto porcentaje de

aditivo superplastificante, dicho porcentaje se mide en base a la cantidad en masa de la ceniza volante en la mezcla. La mezcla base utilizó un porcentaje de 1,5% (Mezcla 1) y las otras, mezclas 16 y 17 (Tabla 4), con 2 y 2,5 % de aditivo, respectivamente. Al séptimo día después de su colada, las probetas se pesaron para medir su densidad y se ensayaron a compresión y a flexión (Tabla 22).

Para el estudio del efecto del aditivo se utilizó un superplastificante de tipo policarboxilato. Durante la fabricación de las mezclas no se notó ninguna diferencia significativa en la trabajabilidad de la pasta geopolimérica al añadirle dicho aditivo. Además, en la Figura 24 se muestra cómo el aumento de superplastificante presentó efectos perjudiciales en la resistencia a compresión.

Algunos estudios plantean que el uso de superplastificante en base a naftaleno en las mezclas geopoliméricas presenta mejores propiedades en el hormigón fresco, mejorando la trabajabilidad. Sin embargo, también muestran que al usar sobre el 2% de superplastificante en base a naftaleno produce un deterioro en la resistencia a la compresión [28].

En este estudio se verifica que para las mezclas con superplastificante de tipo policarboxilato el porcentaje óptimo de aditivo sería del 1,5%.

Tabla 22: Densidades y resistencias mecánicas según cantidad de superplastificante.

Aditivo superplastificante (%)	Densidad [kg/m ³]	Resistencia flexotracción [MPa]	Resistencia compresión [MPa]
1,5	2005	3,30	19,26
2	2048	3,10	16,78
2,5	2064	2,99	16,72

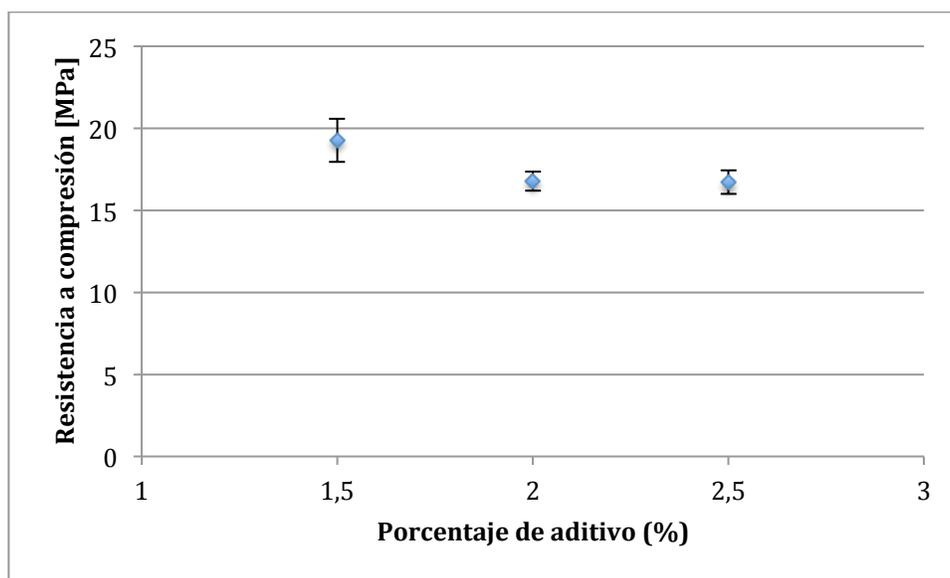


Figura 24: Influencia cantidad de aditivo sobre resistencia a compresión.

6.4 Condiciones de curado

6.4.1 Temperatura de curado

Para estudiar el efecto de la temperatura de curado en las propiedades del material geopolimérico, se realizaron cuatro conjuntos de probetas con la dosificación de la mezcla 1. Luego, cada una de ellas se sometió a una temperatura de curado diferente, 45, 60, 75 y 90°C durante 24 horas. Estas probetas fueron ensayadas a los 7 días y se obtuvieron los resultados que se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23: Densidades y resistencias mecánicas según temperatura de curado.

Temperatura de curado [°C]	Densidad [kg/m ³]	Resistencia flexotracción [MPa]	Resistencia compresión [MPa]
45	2038	1,59	8,29
60	2005	3,30	19,26
75	1924	3,23	19,31
90	1887	4,60	19,70

Al aumentar la temperatura de curado la densidad de las probetas disminuye, ya que como se ha explicado anteriormente, la geopolimerización libera agua. Por lo tanto al exponer la mezcla a mayores temperaturas se expulsa mayor cantidad de agua, disminuyendo así la densidad.

La temperatura es un factor que acelera la reacción de geopolimerización, de hecho, su efecto es tan intenso que las etapas de la reacción se superponen entre sí y la calorimetría no puede detectar pasos separados [19].

En la Figura 25 se puede observar que hay un gran aumento en la resistencia a la compresión cuando se aumenta de 45 a 60°C, sin embargo, al elevar la temperatura sobre este último valor, la resistencia no aumenta tan notoriamente. Por lo tanto, la temperatura óptima está en el rango de los 60°C.

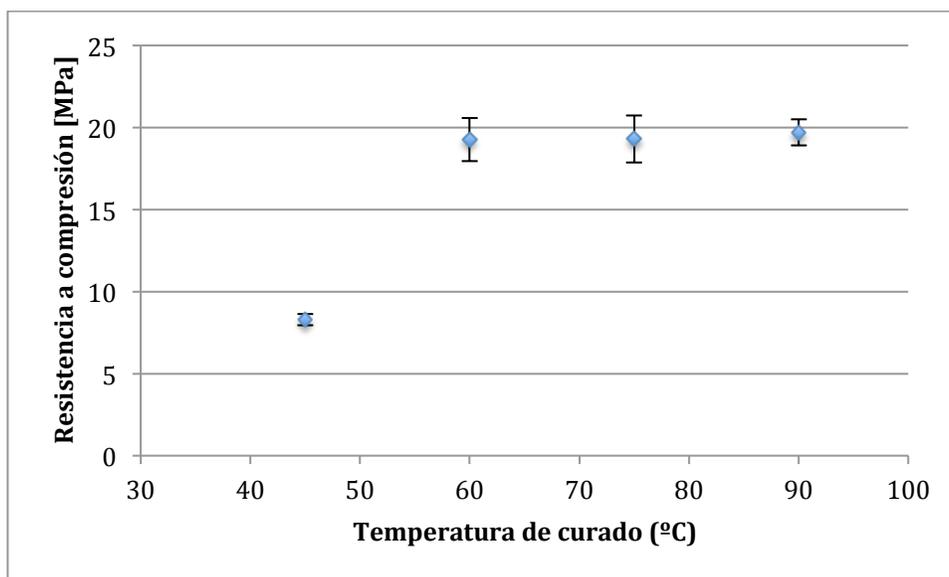


Figura 25: Influencia de temperatura de curado sobre resistencia a compresión.

6.4.2 Periodo de descanso

El periodo de descanso corresponde al tiempo transcurrido desde que se finaliza la colada de la probeta hasta que comienza el curado térmico. Este tiempo es importante a la hora de utilizar el hormigón geopolimérico como por ejemplo en la industria de los prefabricados, ya que debe haber tiempo suficiente entre la colada del hormigón y enviarlos a la sala de curado sin que se vean afectadas sus propiedades.

Para estudiar el periodo de descanso, se confeccionaron tres conjuntos de probetas con la dosificación de la mezcla 1. Una de ellas fue colocada directamente en el horno una vez terminada la colada, en cambio, las otras dos se dejaron en condiciones ambientales (25°C) durante 1 y 2 días antes del comienzo del curado en horno, el cual fue realizado a 60°C durante 24 horas.

Los ensayos se llevaron a cabo a los 7 días desde la fabricación de las probetas y se puede observar en la Tabla 24 que estas ganan resistencia después del periodo de descanso. A pesar de que la ganancia no es relevante, asegura que en el caso de que el traslado de los bloques de hormigón desde el lugar donde se confecciona a donde son curados sea largo, no se perdería resistencia mecánica.

Tabla 24: Densidades y Resistencias mecánicas según periodo de descanso.

Periodo de descanso [días]	Densidad [kg/m ³]	Resistencia flexotracción [MPa]	Resistencia compresión [MPa]
0	2005	3,30	19,26
1	2006	3,44	20,68
2	2008	3,46	21,39

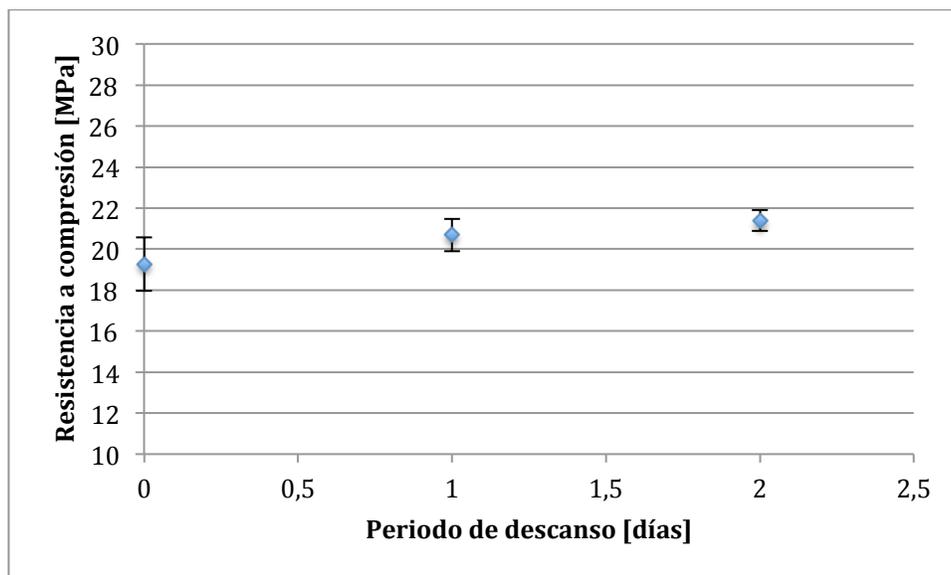


Figura 26: Efecto del periodo de descanso sobre resistencia a compresión.

La explicación del aumento de resistencia no está clara, sin embargo una de las posibles razones podría ser que el periodo de descanso permita a las burbujas de hidrógeno que resultan de la reacción ser liberadas del hormigón fresco, dando como resultado que el hormigón endurecido alcance una mayor resistencia a la flexión y compresión [38].

6.5 Granulometría áridos

En la literatura se destaca la buena adherencia que presenta la pasta geopolimérica con los áridos por lo tanto para probar dicha cualidad en este punto se fabricaron probetas RILEM de hormigón geopolimérico, donde se estudió cómo afecta en las propiedades del material la variación de la granulometría de los áridos. Para ello, se usó una gravilla de tamaño máximo 7 mm, la cual fue tamizada entre las mallas 3/8'' y #4 que tienen una abertura de 9,5 mm y 4,75 mm, respectivamente y por las mallas #4 y #8 (2,36 mm de abertura). Luego, se confeccionó la granulometría continua y la discontinua siguiendo la distribución presentada en la Tabla 25.

Tabla 25: Distribución granulométrica, continua y discontinua

	Gravilla 7mm		Arena
	3/8-#4	#4-#8	
Gr continua	58%	12%	30%
Gr discontinua	80%	-	20%

Teniendo los áridos separados por tamaño, se realizaron las mezclas de hormigón, las cuales muestran un notorio aumento en la trabajabilidad en comparación con los morteros. Luego se curaron en el horno durante 24 horas a 60°C y ensayados a los 7 días (Tabla 26).

En el presente estudio se puede observar que no existe un cambio evidente en las resistencias mecánicas al variar la distribución granulométrica, resultando en una pequeña disminución de resistencia al tratarse de una granulometría discontinua, sin embargo como los valores alcanzados son bastante similares se puede destacar lo beneficioso que es poder usar sólo un rango de tamaño de gravilla y obtener buenos resultados.

Tabla 26: Densidades y resistencias mecánicas según granulometría de áridos.

Granulometría áridos	Densidad [kg/m ³]	Resistencia flexotracción [MPa]	Resistencia compresión [MPa]
Arena	2005	3,30	19,26
Gr continua	2215	3,10	23,60
Gr discontinua	2246	3,06	21,64

7 Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran que la ceniza tipo F proveniente de la central termoeléctrica Ventanas puede ser utilizada como fuente de aluminosilicatos y ser activada por la solución alcalina de silicato e hidróxido de sodio para generar un material geopolimérico con buenas propiedades cementantes, pero para ello debe ser expuesta a un tratamiento previo que permita eliminar el alto contenido de carbón residual.

La ceniza volante que se utiliza no presenta las características requeridas para ser activada alcalinamente de manera óptima según lo que describen estudios anteriores [16], donde se demuestra que el porcentaje de pérdida por calcinación (LOI) debe ser inferior al 5% y el porcentaje de partículas con un tamaño inferior a 45 μm debe ser entre 80 y 90%. Por lo tanto, se recurrió a efectuar tratamiento de tamizado a la ceniza disponible. De esta forma se logra reducir el LOI de un 20 a un 10% y se aumenta de un 43 a un 57% la fracción bajo malla 45 μm de la ceniza. Además para optimizar la mezcla geopolimérica se ajustó experimentalmente la razón solución alcalina/fuente de aluminosilicatos y el porcentaje de áridos.

Luego de una serie de ensayos variando distintos parámetros en la composición de la mezcla o en su curado, se concluye lo siguiente:

1. Para mejorar las propiedades de los geopolímeros a base de ceniza volante se plantea la alternativa de incluir otras fuentes de aluminosilicatos a la mezcla, escoria de alto horno y microsílíce. Al incluir un 30% de escoria como reemplazo de la ceniza volante aumentan las resistencias mecánicas y la trabajabilidad, alcanzando 30MPa a la compresión a una edad de 7 días. Esto ocurre ya que la escoria contiene calcio que forma los compuestos principales del cemento portland que aportan con resistencia temprana a la mezcla.
2. Al disminuir el contenido de carbón sin combustionar (LOI) en la mezcla la resistencia a flexotracción y a compresión mejora, ya que el carbón residual al presentar una superficie específica muy elevada puede absorber la solución alcalina de la mezcla afectando la disolución de la ceniza volante.
3. El geopolímero en base a ceniza volante desarrolla su resistencia a edades tempranas, consiguiendo ser desmoldado inmediatamente al término del curado térmico y además alcanza su resistencia final a los 7 días. Lo anterior es una propiedad fundamental en la industria de los prefabricados.
4. Un aumento en la molaridad de la solución de hidróxido de sodio produce un aumento en la resistencia mecánica desarrollada por el geopolímero, ya que al haber mayor cantidad de aniones en la mezcla se disuelve más material amorfo de la ceniza volante.
5. El silicato con razón $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 2,0, el cual es utilizado en estudios internacionales [28] presenta la mayor resistencia en comparación con algunos de los silicatos más comercializados en Chile.
6. El agua extra que se incorpora a la mezcla por encima de la que aporta la solución alcalina tiene una doble influencia en las propiedades de los geopolímeros. Por un lado, mejora la trabajabilidad de la mezcla pero esto a coste de una reducción

- significativa en la resistencia mecánica del geopolímero. Lo anterior se debe a que baja la alcalinidad de la mezcla, por lo que se disuelve menos sílice y alúmina.
7. El efecto del superplastificante de tipo carboxilato no fue significativo en cuanto a la trabajabilidad de la mezcla. Se propone el uso de superplastificante en base a naftaleno.
 8. La incorporación de microsílice en proporción de 30% en reemplazo de ceniza volante si bien mejora sustancialmente la trabajabilidad de la mezcla, disminuye las resistencias mecánicas de esta, ya que al agregar un alto porcentaje de SO_2 se requiere de una mayor cantidad de solución alcalina, la que en esta mezcla es escasa.
 9. El período de descanso, definido como el tiempo transcurrido entre la colada de la mezcla y el comienzo del curado, al ser de uno o dos días no presenta un aumento significativo en la resistencia mecánica.
 10. La temperatura de curado influye en el desarrollo de la resistencia mecánica, siendo la óptima cercana a los 60°C , no apreciándose incrementos significativos en estas propiedades para temperaturas mayores. La temperatura aumenta la velocidad de la reacción de geopolimerización por lo que es importante para obtener altas resistencias a edades tempranas.
 11. Se observa que al comparar un hormigón geopolimérico con áridos con granulometría continua y otro con discontinua no existe mayor diferencia en las resistencias.

Como consecuencia de este estudio y de experiencias internacionales se considera el hormigón geopolimérico como una alternativa bastante factible de ser implementada en el rubro de la construcción, ya que presenta propiedades similares e incluso mejores a las del hormigón convencional, tanto en su desempeño como en sustentabilidad.

Entendiendo que el uso de los hormigones geopoliméricos es una tecnología relativamente nueva en el país, aún queda un amplio margen para su optimización, lo que podría significar condiciones más favorables tanto técnicas como económicas, por lo que profundizar en su uso y estudio resulta relevante.

8 Bibliografía

- [1] P. Díaz, “Estudio de Factibilidad de obtención de hormigones geopoliméricos a partir de desechos minerales,” 2012.
- [2] M. Valenzuela, “Estudio experimental de las propiedades de geopolímeros sintetizados a partir de puzolana natural,” 2014.
- [3] World Energy Council, “World Energy Resources | 2016,” 2016.
- [4] F. D. Ramón, “El inicio del fin de la era de los combustibles fósiles,” pp. 1–10, 2006.
- [5] Generadoras de Chile, “Boletín del Mercado Eléctrico Sector Generación Febrero 2017,” 2017.
- [6] Energética, “Estudio de revisión de metodología de determinación de precio de paridad del carbón mineral,” 2009.
- [7] C. Salazar, “Estimación de la generación de cenizas de centrales térmicas a carbón y su reuso en la industria del cemento y hormigón,” 2009.
- [8] L. Canals Alvarez, “Estudio de la aplicabilidad de las cenizas volantes, de la planta térmica de Mudunuru (India), en materiales de construcción,” 2007.
- [9] J. F. A. Muñoz, “Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile,” 2015.
- [10] I. Estad, “Informe Estadístico 2013 - FICEM,” *Fed. Interam. Del Cem.*, p. 41, 2013.
- [11] IEA, *Energy Technology Perspectives 2008 - Scenarios and Strategies to 2050*. 2008.
- [12] CSI, “Cement Industry Energy and CO2 Performance,” *World Business Council for Sustainable Development - Getting the Numbers Right*, 2009.
- [13] V. F. F. Barbosa, K. J. D. MacKenzie, and C. Thaumaturgo, “Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: Sodium polysialate polymers,” *Int. J. Inorg. Mater.*, vol. 2, no. 4, pp. 309–317, 2000.
- [14] H. Xu and J. S. J. Van Deventer, “Geopolymerisation of multiple minerals,” *Miner. Eng.*, vol. 15, pp. 1131–1139, 2002.
- [15] J. G. S. Van Jaarsveld, J. S. J. Van Deventer, and G. C. Lukey, “The characterization of source materials in fly ash-based geopolymers,” *Mater. Lett.*, vol. 57, pp. 1272–1280, 2003.
- [16] A. Fernández-Jiménez and A. Palomo, “Characterisation of fly ashes. Potential reactivity as alkaline cements,” *Fuel*, vol. 82, no. 18, pp. 2259–2265, 2003.
- [17] T. D. Buckley and D. F. Pflughoeft-Hassett, “National Synthesis report on regulations, standards, and practices related to the use of coal combustion products.” 2007.
- [18] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, and M. Criado, “Activación alcalina de cenizas

- volantes. Estudio comparativo entre activadores sódicos y potásicos,” *Mater. Construcción*, vol. 56, no. 281, pp. 51–65, 2006.
- [19] A. Palomo, M. W. Grutzeck, and M. T. Blanco, “Alkali-activated fly ashes: A cement for the future,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 29, no. 8, pp. 1323–1329, 1999.
- [20] H. Xu and J. S. J. Van Deventer, “The geopolymerisation of alumino-silicate minerals,” *Int. J. Miner. Process.*, vol. 59, no. 3, pp. 247–266, 2000.
- [21] A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, and M. Criado, “‘Geopolímeros’: una única base química y diferentes microestructuras,” *Mater Construcc*, vol. 54, pp. 77–91, 2004.
- [22] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, and M. M. Alonso, “Alkali activation of fly ashes: Mechanisms of reaction,” in *2nd Inter. Symposium Non-Traditional Cement and Concrete*, 2005.
- [23] A. Palomo, A. Fernández-Jiménez, M. Criado, and M. M. Alonso, “The alkali activation of fly ashes: From macro to nanoscale,” in *2nd International Symposium on Nanotechnology in Construction*, 2005.
- [24] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, I. Sobrados, and J. Sanz, “The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes,” *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 91, pp. 111–119, 2006.
- [25] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, and C. López-Hombrados, “Engineering properties of alkali-activated fly,” *ACI Mater. J.*, vol. 103, no. 2, pp. 106–112, 2006.
- [26] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J. L. Provis, G. C. Lukey, A. Palomo, and J. S. J. Van Deventer, “Geopolymer technology: The current state of the art,” *J. Mater. Sci.*, vol. 42, no. 9, pp. 2917–2933, 2007.
- [27] A. Fernández-Jiménez, A. Palomo, and M. Criado, “Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 35, no. 6, pp. 1204–1209, 2005.
- [28] D. Hardjito and B. V Rangan, “Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete,” 2005.
- [29] S. E. Wallah and B. V Rangan, “Low-Calcium Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties,” *Concrete*, p. 107, 2006.
- [30] T. H. Wee, A. K. Suryavanshi, S. F. Wong, and A. K. M. A. Rahman, “Sulfate Resistance of Concrete Containing Mineral Admixtures,” *ACI Mater. J.*, vol. 97, no. 5, pp. 536–549, 2000.
- [31] J. Davidovits, “Properties of Geopolymer Cements,” *First Int. Conf. Alkaline Cem. Concr.*, pp. 131–149, 1994.
- [32] X. J. Song, M. Marosszeky, M. Brungs, and R. Munn, “Durability of fly ash based Geopolymer concrete against sulphuric acid attack,” *Durab. Build. Mater.*, no. April, pp. 17–20, 2005.
- [33] D. L. Y. Kong and J. G. Sanjayan, “Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 40, no. 2, pp. 334–339, 2010.
- [34] L. E. Santaella Valencia, “Caracterización física química y mineralógica de las

cenizas volantes,” *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, pp. 47–62, 2001.

- [35] D. Dutta, S. Thokchom, P. Ghosh, and S. Ghosh, “Effect of Silica Fume Additions on Porosity of Fly Ash Geopolymers,” vol. 5, no. 10, pp. 74–79, 2010.
- [36] F. N. Okoye, J. Durgaprasad, and N. B. Singh, “Effect of silica fume on the mechanical properties of fly ash based-geopolymer concrete F.N.,” *Ceram. Int.*, 2015.
- [37] M. F. Nuruddin, S. Demie, M. F. Ahmed, and N. Shafiq, “Effect of Superplasticizer and Na OH Molarity on Workability , Compressive Strength and Microstructure Properties of Self-Compacting Geopolymer Concrete,” *Int. J. Environ. Chem. Ecol. Geol. Geophys. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 187–194, 2011.
- [38] D. Hardjito, S. E. Wallah, D. M. J. Sumajouw, and B. V. Rangan, “Effect of mixing time and rest period on the engineering of fly ash-based geopolymer concrete,” in *Geopolymer, Green Chemistry and Sustainable Development Solutions*, 2008, pp. 145–147.

9 Anexo A

Tabla 27: Propiedades de mezclas 1 a 4 (*).

N° mezcla	Curado		Edad de ensayo	Densidad promedio	Resistencia flexotracción promedio	Desviación estándar	Resistencia compresión promedio	Desviación estándar	Observaciones
	Tiempo	Temperatura							
	horas	°C							
1	24	60	7	2005	3,3	3,93	19	1,30	Ceniza Volante Periodo de descanso: 0 días
	24	60	7	2000	3,4	2,10	21	0,78	Periodo de descanso: 1 día
	24	60	7	2008	3,5	4,52	21	0,50	Periodo de descanso: 2 días
	24	45	7	2038	1,6	1,64	8	0,35	Temperatura curado 45°C
	24	75	7	1924	3,2	2,88	19	1,44	Temperatura curado 75°C
	24	90	7	1887	4,6	1,92	20	0,80	Temperatura curado 90°C
	24	60	3	2055	2,5	1,26	16	0,49	Edad de ensayo: 3 días
	24	60	14	2008	3,5	0,11	19	0,28	Edad de ensayo: 14 días
	24	60	21	2004	3,4	1,58	19	0,46	Edad de ensayo: 21 días
	24	60	28	2007	3,5	2,50	20	0,76	Edad de ensayo: 28 días
2	24	60	7	1682	1,7	1,62	9	0,75	LOI = 20,17%
3	24	60	7	1766	1,9	1,20	11	0,62	LOI = 15,36%
4	24	60	7	2121	4,1	3,74	22	0,68	LOI = 7,13%

Tabla 28: Propiedades de mezclas 5 a 13 (*).

N° mezcla	Curado		Edad de ensayo	Densidad promedio	Resistencia flexotracción promedio	Desviación estándar	Resistencia compresión promedio	Desviación estándar	Observaciones
	Tiempo	Temperatura							
	horas	°C	días	kg/m ³	MPa	MPa			
5	24	60	3	2096	3,5	1,26	28	0,68	Ceniza + 30% de escoria Edad de ensayo: 3 días
	24	60	7	2076	4,3	1,47	30	0,54	Edad de ensayo: 7 días
	24	60	14	2076	4,3	1,33	31	0,68	Edad de ensayo: 14 días
	24	60	21	2047	4,6	1,63	32	1,02	Edad de ensayo: 21 días
	24	60	28	2081	4,0	3,00	31	1,90	Edad de ensayo: 28 días
	24	25	7	2168	2,7	1,26	22	0,72	Temperatura de curado 25°C
6	24	60	7	2034	2,6	1,45	13	0,20	Ceniza + 30% de microsílíce
7	24	60	7	1883	2,2	2,49	13	0,31	Molaridad NaOH 8[M]
8	24	60	7	2068	3,5	1,59	21	0,44	Molaridad NaOH 12[M]
9	24	60	7	2109	4,3	1,26	25	1,04	Molaridad NaOH 14[M]
10	24	60	7	1911	0,8	0,74	3	0,37	Silicato 30°Be
11	24	60	7	1995	1,4	1,15	6	0,28	Silicato 38-39°Be
12	24	60	7	2081	3,0	1,30	16	0,59	Silicato 50-52°Be
13	24	60	7	1974	4,6	5,22	25	0,32	0% Agua extra

Tabla 29: Propiedades de mezclas 14 a 19 (*).

N° mezcla	Curado		Edad de ensayo	Densidad promedio	Resistencia flexotracción promedio	Desviación estándar	Resistencia compresión promedio	Desviación estándar	Observaciones
	Tiempo	Temperatura							
	horas	°C							
14	24	60	7	2063	3,0	0,86	15	0,62	15% Agua extra
15	24	60	7	2023	2,6	1,26	12	0,73	20% Agua extra
16	24	60	7	2048	3,1	2,10	17	0,58	2% superplastificante
17	24	60	7	2064	3,0	0,88	17	0,72	2,5% superplastificante
18	24	60	7	2215	3,1	1,49	24	0,95	Árido con granulometría continua
19	24	60	7	2246	3,1	1,33	22	0,85	Árido con granulometría discontinua

(*) Cada resultado promedio presentado en las tablas fue obtenido a partir de los resultados parciales de tres probetas ensayadas para cada mezcla.