



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

**OBTENCIÓN DE ÁRIDOS LIVIANOS A PARTIR DE ESCORIA DE ALTO HORNO  
ACTIVADA MEDIANTE SOLUCIÓN ALCALINA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

**BRAULIO ENRIQUE BURGOS MOYA**

PROFESOR GUIA:  
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
YURI TOMICIC CALVO  
MIGUEL ÁNGEL GONZÁLEZ TALEP

SANTIAGO, CHILE  
2014

RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil  
POR: Braulio Enrique Burgos Moya  
FECHA: 04/09/2014  
PROFESOR GUÍA: Federico Delfín Ariztía

## **OBTENCIÓN DE ÁRIDOS LIVIANOS A PARTIR DE ESCORIA DE ALTO HORNO ACTIVADA MEDIANTE SOLUCIÓN ALCALINA**

Se ha demostrado la factibilidad de producir pellet, partículas aglomeradas a partir de subproductos, tales como la escoria de alto horno y la ceniza volante, que actúan como fuentes de aluminosilicatos que se activan por medio de una solución alcalina, formada por silicato de sodio e hidróxido de sodio, mediante el uso del disco peletizador. Los pellets obtenidos en la presente investigación poseen un densidad real en estado saturado con superficie seca (dr sss) igual a  $1892 \text{ kg/m}^3$  y una densidad aparente suelta igual a  $1019 \text{ kg/m}^3$ , junto con poseer un excelente comportamiento bajos las sollicitaciones normales de compresión, desgaste y desintegración por sulfato. Asimismo se ha verificado su adecuada afinidad con el cemento hidráulico, presentando una reactividad potencial álcali-sílice muy por debajo del límite inferior estipulado por norma.

El objetivo del estudio ha sido poner a prueba una metodología para generar árido liviano a partir de desechos de otras industrias que pueda reemplazar a la fracción de árido grueso en la dosificación de hormigones especiales, con la finalidad de introducir mejoras a los procesos constructivos, que redunden en la obtención de hormigones sustentables, ya que de esta manera se controlan los desechos contaminantes para el medio ambiente mediante su transformación (inertización), disminuyendo los problemas asociados con su manejo y su disposición, así como la posible contaminación del aire, o a nivel de subsuelo en aguas subterráneas debido a la eventual lixiviación de contaminantes pesados.

Por otra parte se reduce la explotación de recurso natural que actualmente proviene de distintos depósitos, ya sea de lechos de ríos, canteras o pozos. También el uso de este árido liviano de síntesis geopolimérica en la dosificación de hormigón, permite disminuir las cargas propias, traduciéndose en diseños estructurales más eficientes.

El estudio experimental contempló el estudio de distintas formulaciones, variando las proporciones de escoria de alto horno, ceniza volante y distintas composiciones de la solución alcalina activadora ( $\text{NaOH}$  y  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ), con el fin de obtener el pellet que cumpla con una densidad real (dr sss) menor a  $2000 \text{ kg/m}^3$  y que posea un buen comportamiento mecánico. A partir de la composición óptima se obtuvo el árido suficiente para la fabricación de hormigones de prueba.

Finalmente para comparar el comportamiento relativo de este árido liviano, se realizaron hormigones de prueba variando la fracción gruesa: pellet experimental geopolimérico, árido de arcilla expandida y árido natural del río Maipo. Concluyendo con estas series de pruebas que el pellet geopolimérico en estudio, siendo la fracción gruesa capaz de formar un hormigón de densidad promedio igual a  $1830 \text{ kg/m}^3$ , con un comportamiento mecánico superior al de la arcilla expandida en un 40 %, e inferior al árido natural en un 30 %.

## Agradecimientos

---

En primer lugar dar gracias a mi familia, padres, hermanas, tíos, primos, mascotas, que han sido el apoyo, la base, el pilar que siempre ha sustentado e impulsado mis sueños. Me han acompañado en este camino que mediante este trabajo se da por concluido y da paso a otros anhelos aún sin cumplir. En especial a mis padres pilar fundamental en mi vida.

Agradezco a mis amigos, aquella familia que uno escoge, por estar siempre presentes ya sea con ideas, interrogantes, palabras de apoyo cuando se necesitan y denotar mis errores para así corregirlos, además de una comprensión y paciencia infinita. Amigos de por vida e incluso aquellos que llegue a conocerlos en poco tiempo pero que me dieron fuerza para terminar esta aventura y así poder comenzar otras. Entre aquellos quisiera nombrar a Jose P., Bastián M., Made A., Sinay V. y Luis Y.

También doy gracias en especial al equipo de trabajo del Instituto de Investigación y Ensayo de Materiales IDIEM. Por su comprensión y continuo apoyo, en donde recibí una mano desde inspectores, compañeros de trabajo y jefaturas. Entro los cuales quisiera nombrar a Gino F., Smyrna H. y Hugo L.

Aunque quisiera no podría nombrar a todo aquel que me brindo su ayuda permitiendo que este trabajo vea la luz del día, pero si quiero poder transmitir mis sinceras y profundas “Gracias Totales”.

Soy un agradecido de la vida, de quienes me rodean, de quien ha estado a mi lado, del camino recorrido y por recorrer.

## Tabla de contenido

**Contenido**

1.	Introducción.....	1
1.1.	Motivación.....	1
1.2.	General.....	2
1.3.	Alcance y Objetivos.....	3
1.3.1.	Alcance.....	3
1.3.2.	Objetivos Generales.....	3
1.3.3.	Objetivos Específicos.....	3
2.	Antecedentes.....	4
2.1.	Generalidades.....	4
2.2.	Marco de referencia.....	5
2.3.	Geopolímeros.....	8
2.3.1.	Escoria de alto horno.....	11
2.3.2.	Ceniza volante.....	14
2.3.3.	Activadores alcalinos.....	16
2.3.3.1.	Efecto del tipo de ion alcalino (Hidróxido de sodio).....	16
2.3.3.2.	Efecto del contenido de silicatos solubles (silicato de sodio).....	16
2.3.4.	Estado actual de la investigación y uso de geopolímeros.....	17
2.3.4.1.	Fabricación y desempeño de árido livianos formados en frío usando activadores alcalinos para hormigón de alto desempeño (38).....	20
2.4.	Áridos sintéticos para hormigones livianos.....	22
3.	Planteamiento del problema.....	24
3.1.	Problema.....	24
3.2.	Metodología.....	25
3.2.1.	Obtención y acondicionamiento de materiales.....	26
3.2.2.	Ensayo para la peletización de áridos geopoliméricos.....	26
3.2.2.1.	Aplicación por separado de activadores.....	27
3.2.3.	Obtención de árido liviano geopolimérico.....	27
3.2.3.1.	Utilización de núcleos de baja densidad para la obtención de pellet liviano.....	27
3.2.4.	Caracterización de árido geopolimérico óptimo.....	28
3.2.5.	Comportamiento de hormigón con árido geopolimérico.....	29
4.	Materiales.....	30
4.1.	Escoria de alto horno.....	30
4.1.1.	Acondicionamiento de escoria de alto horno.....	33
4.2.	Ceniza Volante.....	34
4.2.1.	Acondicionamiento de ceniza volante.....	35
4.3.	Solución alcalina activadora.....	36
4.3.1.	Silicato de sodio.....	36
4.3.2.	Hidróxido de sodio.....	37
4.3.2.1.	Acondicionamiento del hidróxido de sodio.....	37

4.4.	Cemento.....	39
5.	Equipos.....	40
6.	Desarrollo experimental.....	43
6.1.	Ensayos para la obtención de pellets livianos geopolímeros.....	43
6.1.1.	Aplicación por separado de activadores.....	44
6.2.	Obtención de árido liviano geopolimérico.....	45
6.2.1.	Razón escoria de alto horno / ceniza volante.....	45
6.2.2.	Utilización de núcleos de baja densidad.....	46
6.2.2.1.	Núcleo de escoria gruesa.....	46
6.2.2.2.	Núcleo de poliestireno expandido (perlitas).....	47
6.2.2.3.	Núcleo de geopolímero a base de ceniza volante.....	47
6.2.3.	Selección final de la composición y proceso de peletización para la obtención de áridos livianos geopoliméricos.....	48
6.3.	Caracterización del árido geopolimérico obtenido por peletización.....	50
6.4.	Comportamiento de hormigón con árido geopolimérico.....	52
7.	Resultados.....	55
7.1.	Ensayos para la obtención de áridos geopoliméricos por peletización.....	55
7.1.1.	Aplicación por separado de activadores.....	56
7.1.2.	Proceso de peletizado óptimo.....	56
7.2.	Obtención de árido liviano geopolimérico.....	57
7.2.1.	Razón escoria de alto horno / ceniza volante.....	57
7.2.2.	Utilización de núcleo de baja densidad.....	57
7.2.2.1.	Núcleo de escoria gruesa (no molida).....	57
7.2.2.2.	Núcleo de poliestireno expandido.....	60
7.2.2.3.	Núcleo de geopolímero a base de ceniza volante.....	60
7.2.3.	Selección final.....	61
7.2.4.	Árido geopolimérico liviano óptimo.....	63
7.3.	Caracterización de árido geopolimérico.....	65
7.3.1.	Determinación del desgaste por el método de la Máquina de Los Ángeles. (NCh 1369) 65	
7.3.2.	Características granulométricas.....	65
7.3.3.	Determinación de la desintegración por sulfatos (NCh 1328).....	66
7.3.4.	Determinación de reactividad potencial Alkali-Sílice (ASTCM C 1260).....	66
7.4.	Comportamiento de hormigón con árido geopolimérico.....	67
7.4.1.	Hormigón geopolimérico.....	69
8.	Análisis.....	71
8.1.	Ensayos para la peletización de geopolímeros.....	71
8.1.1.	Incorporación de la solución alcalina en el proceso de peletizado.....	72
8.2.	Obtención de árido liviano geopolimérico.....	73
8.3.	Caracterización del árido geopolimérico.....	75
8.3.1.	Análisis de las propiedades: granulometría, resistencia al desgaste y estabilidad frente a la desintegración.....	75

8.3.1.1.	Granulometría.....	75
8.3.1.2.	Resistencia al desgaste método de la Maquina de los Ángeles (NCh 1369).....	76
8.3.1.3.	Estabilidad frente a la desintegración por sulfatos (NCh 1328).....	76
8.3.1.4.	Análisis de la reactividad potencial.....	76
8.3.2.	Análisis de toxicidad del árido geopolimérico.....	78
8.4.	Comportamiento de hormigón con árido geopolimérico.....	79
8.4.1.	Comportamiento del hormigón geopolimérico.....	80
8.4.2.	Comportamiento del pellet ante ciclos de Hielo y deshielo.....	82
9.	Conclusión.....	83
10.	Recomendaciones para futuros estudios.....	85
11.	Bibliografía.....	86
Anexo A	.....	90
Anexo B	.....	95
Anexo C	.....	97
Anexo D	.....	98
Anexo E	.....	99
Anexo F	.....	101
Anexo G	.....	102
Anexo H	.....	104
Anexo I	.....	105
Anexo J	.....	106
Análisis costo-competitividad	.....	106
Línea teórica de producción del árido geopolimérico	.....	108
Adquisición de insumos principales	.....	108
Pretratamiento y almacenaje	.....	108
Operación de peletizado	.....	109
Curado del árido geopolimérico y control de calidad	.....	109
Almacenaje de producto final y venta del árido geopolimérico	.....	109
Análisis FODA	.....	110
Fortalezas:	110	
Oportunidades:	.....	110
Debilidades:	.....	111
Amenazas:	111	

**Figuras**

Figura 1 Evolución capacidad instalada y demanda máxima (MW).....	7
Figura 2 Potencia instalada según tipo.....	7
Figura 3 Potencia instalada por región y tipo.....	7
Figura 4 Estructura básica de geopolímero y modelo conceptual de geopolimerización. ....	9
Figura 5 Flujograma de acero siderúrgico.....	11
Figura 6 Diagrama de fase CaO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub> .....	12
Figura 7 Ceniza volante.....	14
Figura 8 Mapa de evolución de número de investigación en torno a geopolímeros. ....	17
Figura 9 Papers publicados por año con la palabra clave " Geopolymer". ....	17
Figura 10 Unidades aproximadas de peso y uso de las clasificaciones de agregados de concretos liviano. .....	23
Figura 11 Etapas del trabajo.....	25
Figura 12 Escoria granulada de alto horno (GBFS).....	30
Figura 13 Diagrama de fases.....	31
Figura 14 Análisis de difracción de rayos x a muestra de escoria de alto horno CAP. (N° 5820).....	31
Figura 15 Secado de escoria.....	33
Figura 16 Molino planta piloto IDIEM.....	33
Figura 17 Granulometría de ceniza volante.....	34
Figura 18 Análisis de rayos X de cenizas volantes División Ventanas.....	35
Figura 19 Pesaje de NaOH.....	38
Figura 20 Agitador magnético.....	38
Figura 21 Disco peletizador.....	40
Figura 22 Esquematación de giro de disco peletizador.....	40
Figura 23 Ajuste de ángulo de inclinación de disco peletizador.....	41
Figura 24 Esquematación de pulso según eje del tambor, ángulo de inclinación y giro del plato peletizador.....	41
Figura 25 Zonas en disco peletizador.....	41
Figura 26 Imagen proceso peletizado.....	42
Figura 27 Esquematación de movimiento de material en disco peletizador.....	42
Figura 28 Penetrómetro manual.....	48
Figura 29 Placa base.....	48
Figura 30 Ensayo con penetrómetro.....	49
Figura 31 Ejemplo de falla de pellet ensayado con penetrómetro.....	49
Figura 32 Molde probetas ASTM C 490.....	51
Figura 33 Probetas ASTM C 1260.....	51
Figura 34 Molde cilíndrico PVC.....	54
Figura 35 Molde 10 x 10 x 5 cm malla metálica.....	54
Figura 36 Partida N° 3.....	55
Figura 37 Partida N° 10.....	58
Figura 38 Partida N° 12.....	58

Figura 39 Partida N° 13.....	58
Figura 40 Partida N° 16A.....	60
Figura 41 Resistencia mecánica en función de la edad de ensayo. ....	62
Figura 42 Curva de reactividad potencial ASTM C 1260. ....	66
Figura 43 Probetas MC-AG, MC-AE, MC-AG-CH, MG-AG y MG-AG-HP.....	67
Figura 44 Confección probetas MG-AG-PP-55 Y MG-AG-PP-65. ....	69
Figura 45 Probeta MG-AG-PP-65.....	69
Figura 46 Rendimiento V/S Ángulo de peletización.....	71
Figura 47 Bandas granulométricas.....	75
Figura 48 Anexo A - Informe de difracción de rayos X. ....	90
Figura 49 Anexo A - Informe de difracción de rayos X. ....	91
Figura 50 Anexo A - Informe de difracción de rayos X. ....	92
Figura 51 Anexo A - Informe de difracción de rayos X. ....	94
Figura 52 Anexo B - Informe de ensayo de áridos IDIEM.....	95
Figura 53 Anexo B - Resultados informe áridos IDIEM. ....	96
Figura 54 Anexo E - Silicato de sodio AC.....	99
Figura 55 Anexo E - Silicato de sodio DM.....	100



**Tablas**

Tabla 1 Despacho anual de cemento y hormigón.....	5
Tabla 2 Producción mundial de acero de alto horno (miles de toneladas).....	6
Tabla 3 Producción de acero y escoria de alto horno en miles de toneladas.....	6
Tabla 4 Factores determinantes del proceso de geopolimerización.....	9
Tabla 5 Composición química de la escoria de altos hornos.....	12
Tabla 6 Producción y utilización anual de la escoria de altos hornos.....	13
Tabla 7 Parámetros de clases de ceniza volante.....	15
Tabla 8 Caracterización física de agregados peletizados de diversos autores.....	19
Tabla 9 Dosificaciones y propiedades físicas de los agregados livianos.....	20
Tabla 10 Resistencia a la rotura y resistencia a la trituración de áridos ligeros.....	20
Tabla 11 Dosificaciones de hormigones HPLWC.....	21
Tabla 12 Densidad y resistencia a la compresión a 56 días de hormigones HPLWC.....	21
Tabla 13 Series de hormigones a ensayar.....	29
Tabla 14 Análisis químico de la escoria de alto horno.....	30
Tabla 15 Identificación de fases cristalinas en la muestra escoria analizada.....	32
Tabla 16 Análisis químico de ceniza volante.....	34
Tabla 17 Identificación de fases cristalinas en la muestra de cenizas volantes División Ventanas.....	35
Tabla 18 Silicatos de sodio utilizados.....	36
Tabla 19 Solución de NaOH 10 M.....	37
Tabla 20 Cemento portland puzolánico.....	39
Tabla 21 Parámetros fijos del proceso de peletizado.....	43
Tabla 22 Proceso de peletización.....	43
Tabla 23 Parámetro variable del proceso de peletizado.....	44
Tabla 24 Parámetros de aplicación por separado de activadores.....	44
Tabla 25 Variables y partidas involucradas en búsqueda de pellet geopolimérico óptimo.....	45
Tabla 26 Peletizado escoria – ceniza - solución alcalina.....	45
Tabla 27 Peletizado escoria- solución alcalina con núcleos de escoria gruesa.....	46
Tabla 28 Peletizado ceniza - escoria – solución alcalina con núcleos de escoria gruesa.....	46
Tabla 29 Peletizado escoria - solución alcalina con núcleos de poliestireno expandido.....	47
Tabla 30 Peletización ceniza – solución activadora.....	47
Tabla 31 Peletización escoria – solución activadora con núcleos a base de ceniza volante.....	47
Tabla 32 Peletizado escoria – ceniza- solución activadora con núcleo de escoria gruesa para selección final.....	48
Tabla 33 Dosificación de áridos ASTM C 1260.....	50
Tabla 34 Leyenda de codificación de probetas.....	52
Tabla 35 Detalle de probetas por tipo de hormigones.....	53
Tabla 36 Dosificaciones por tipo de hormigón.....	54
Tabla 37 Dosificación hormigón MG-EG.....	54
Tabla 38 Rendimientos partidas 1-5.....	55
Tabla 39 Parámetros peletizado óptimo.....	56
Tabla 40 Rendimiento partidas 7-8.....	57

Tabla 41 Rendimiento partidas 9-11. ....	57
Tabla 42 Rendimiento partidas N° 12 - N° 13. ....	58
Tabla 43 Densidad aparente suelta y compacta.....	59
Tabla 44 Densidad real saturada superficie seca (Dr sss), seca (Dr s), neta (D n), absorción y porcentaje de huecos.....	61
Tabla 45 Valor de rotura (ensayo de resistencia mecánica). ....	61
Tabla 46 Resumen de partidas N° 1 a N° 17.....	63
Tabla 47 Determinación del desgaste por el método de la Máquina De Los Ángeles. ....	65
Tabla 48 Ensayo de granulometría.....	65
Tabla 49 Tamaño máximo y módulo de finura. ....	65
Tabla 50 Determinación de la desintegración por sulfatos. ....	66
Tabla 51 Expansión ASTM C 1260. ....	66
Tabla 52 Hormigón de matriz cementicia con árido geopolimérico (MC-AG). ....	67
Tabla 53 Hormigón de matriz cementicia con arcilla expandida (MC-AE).....	67
Tabla 54 Hormigón de matriz cementicia con árido natural (MC-AN). ....	68
Tabla 55 Hormigón de matriz cementicia con árido geopolimérico a ciclo hielo y deshielo (MC-AG-CH). .....	68
Tabla 56 MC-AG-CH - Pérdida de masa. ....	68
Tabla 57 MG-AG-PP-55 y MG-AG-PP-65 - Carga máxima (aplastamiento) y densidad aparente. ....	69
Tabla 58 Hormigón de matriz geopolimérica con árido geopolimérico (MG-AG). ....	70
Tabla 59 Sección de la tabla N° 1 de la norma ASTM C 330.....	75
Tabla 60 Determinación de la característica de toxicidad por lixiviación TCLP para metales pesados en muestras de ceniza volante y escoria de las unidades 1, 2 y 3 del Complejo Termoeléctrico Ventanas. Concentración (mg/l) .....	78
Tabla 61 Densidad por tipo de hormigón.....	79
Tabla 62 Resistencia a la compresión por tipo de hormigón.....	79
Tabla 63 Anexo C - Densidad suelta y compacta partidas 3, 4, 9, 10, 11, 12 y 13.....	97
Tabla 64 Anexo C - Densidad real saturada superficie seca (Dr sss), seca (Dr s), absorción y huecos, partidas 3, 9, 11 y 13. ....	97
Tabla 65 Anexo D - Reactividad potencial.....	98
Tabla 66 Anexo F - Ensayo de trituración. ....	101
Tabla 67 Anexo G - Nombre de probetas y fechas de ensayos. ....	102
Tabla 68 Anexo G - Resistencia y medidas de probetas. ....	103
Tabla 69 Anexo H - Peso específico y Blaine de escoria de alto horno CAP. ....	104
Tabla 70 Anexo I - Determinación de la característica de toxicidad por lixiviación TCLP para compuestos orgánicos en muestras de ceniza volante y escoria de las unidades 1, 2 y 3 del Complejo Termoeléctrico Ventanas. Concentración (mg/l).....	105
Tabla 71 Anexo J - Dólar, kWh, UF .....	106
Tabla 72 Anexo J - Análisis FODA. ....	112

## 1. Introducción.

### 1.1. Motivación.

Es necesario disminuir los desechos que deja el ser humano en todos sus procesos, y para ello es fundamental la reutilización de residuos industriales y empezar a integrarlos como subproductos o materias primas, como por ejemplo, la escoria de alto horno, la cual es un desecho de la industria siderúrgica o las cenizas volantes, provenientes de centrales eléctricas a base de carbón. Las que ya se utilizan como elementos sustitutos del cemento, pero a una velocidad menor a la de la generación de éstos. La escoria de alto horno a nivel nacional se usa en su totalidad, sin embargo esto no replica a nivel mundial, ya que países como España posee una tasa de reutilización de la escoria granulada del 66%, siendo ocupada principalmente como adición suplementaria cementicia, capa de base de carreteras y en agricultura (1). La ceniza volante se utiliza cerca del 43% del monto total dentro de los Estados Unidos (2) y cerca de un 56 % se reutiliza en India (3), y a nivel mundial se habla de aproximadamente de un 65 % de ceniza volante que se desecha en botaderos. Buscando un uso más intensivo de estos recursos en la fabricación de materiales de construcción reduciendo el impacto ambiental de estos elementos en depósitos.

Además la producción mundial de hormigón crece actualmente, esto de la mano con la producción de cemento la cual ha presentado un crecimiento de 8,1 % y 5,3 % en los años 2011 y 2013, respectivamente (4). Es por ello que se requiere aún más materias primas del hormigón a una tasa que va en aumento, donde el año 2012 el despacho de hormigón en Chile presentó un crecimiento de un 6 % (5). Esto es insostenible, ya sea por la producción de CO<sub>2</sub> en todos sus ámbitos de producción del cemento hasta su colocación final en la estructura, sino también por la utilización de recursos naturales como son los áridos.

Chile es un país abundante en ríos y por lo tanto en áridos ideales para la construcción, considerando las características de esférico, rodado, e idealmente sin fisuras. Sin embargo, no por eso como país se puede dejar llevar por la facilidad de la obtención del recurso y simplemente seguir tomándolo a destajo, ya que esto influye directa y negativamente en los cauces propios de los ríos, en los hábitats que éstos representan para la flora y fauna del país, y también se traduce en destrucción de paisajes y rutas turísticas. Además, hay que considerar que existen áreas donde ya se agotaron o se redujo notoriamente la accesibilidad a depósitos vírgenes, elevándose su valor y cuando hoy en día la demanda por construcción aumenta.

En el presente trabajo experimental se estudia la **factibilidad técnica y económica** de obtener un árido artificial a partir de la activación de materiales sílico-aluminosos (escorias y cenizas), que constituyen desechos industriales, mediante su activación. Proceso para preparar el material geopolimérico conocido como técnica de “peletización”, al que se le definirán los parámetros influyentes en la producción de un árido geopolimérico liviano.

## 1.2. General.

El desarrollo sustentable y sostenible se ha vuelto un objetivo claro de empresas líderes, países vanguardistas y visionarios que se han dado cuenta que el avance del ser humano, otorgando confort al diario vivir, posee un costo, el cual si no es atendido ahora, amenaza al progreso en sí, a la población actual y futura. Además, de que estas tendencias no sólo son actos para prevenir la deforestación, el deshielo, la contaminación, sino que también son medidas que reducen costos y aumentan el valor de las empresas que los practican así como lo demuestra el reporte anual de GreenBiz Group en conjunto con TrueCost (6)

Una de las actividades primordiales para el continuo desarrollo de nuestra civilización es la construcción, la que proyecta para el año 2014 un incremento en la inversión de 4,0 % en Chile (7). Área productiva en constante aceleración fomentada por un crecimiento poblacional continuo, siendo ésta una de las múltiples razones, dentro de las cuales, también se pueden enumerar: una economía fuerte, mayor disposición a la inversión y al gasto, nuevas tecnologías constructivas, entre otras.

Lamentablemente el ámbito de la construcción se alimenta constantemente de materias primas, por lo que al haber mayor productividad hay más gasto de recursos naturales, y a la vez mayor producción de desechos, ya sea por productos intermedios o por la realización de la obra final. También hay que considerar el hecho de que toda estructura posee una vida útil y por lo mismo tras haber sido completamente utilizada ésta pasa a ser un desecho en sí mismo.

La segunda actividad influyente para la realización de este trabajo, es la inyección continua de energía eléctrica ya que la producción industrial depende de este tipo de energía (8). Una de las formas principales de generación de electricidad son las termoeléctricas. Instalaciones ubicadas en mayor proporción en el sector norte de nuestro país, las cuales poseen una tasa de producción en función de la minería.

Se nombran en especial dichas actividades ya que el estudio se orienta hacia el aprovechamiento de estos desechos mediante dos frentes. El primero, es utilizar subproductos o desechos de los procesos, para transformarlos mediante un proceso eficiente y sostenible, en materiales química y mecánicamente estables de fácil manejo y almacenamiento que pueda cumplir funciones como relleno o como árido para distintos materiales de uso masivo en construcción de obras de infraestructura. El segundo frente, es lograr suplir la demanda de recursos naturales, en especial árido grueso de baja densidad, reemplazándolo por el árido geopolimérico.

### **1.3. Alcance y Objetivos.**

#### **1.3.1. Alcance.**

Este trabajo se define como una experiencia de investigación e innovación dentro del marco de la sustentabilidad, que tiene como fin la generación de un árido artificial liviano justificando su uso para hormigón estructural o algún otro uso comercial que lo haga atractivo no sólo por el valor agregado como producto sustentable, sino que también posea factibilidad económica para su ejecución. Por lo que los frentes principales de acción son:

- a) Reutilización de desechos.
- b) Disminución de demanda de materias primas naturales.
- c) Justificación técnica, económica y medio ambiental del proyecto.

#### **1.3.2. Objetivos Generales.**

- Obtener árido artificial liviano a base de escoria de alto horno proveniente de la *Compañía Siderúrgica Huachipato S.A. CAP* con una solución alcalina activadora.
- Evaluar comportamiento de hormigones obtenidos reemplazando la fracción gruesa del árido de un hormigón estructural típico, por el árido liviano geopolimérico.

#### **1.3.3. Objetivos Específicos.**

- Implementar un proceso, a escala de laboratorio para la producción de áridos livianos en base a materiales geopoliméricos.
- Evaluar y caracterizar completamente el árido liviano geopolimérico.
- Evaluar el hormigón estructural con árido liviano geopolimérico, mediante ensayo de compresión y durabilidad del elemento final.

## 2. Antecedentes.

### 2.1. Generalidades.

La ingeniería civil es una de las disciplinas que por excelencia ha llevado al desarrollo, crecimiento, y continua evolución de la sociedad. Sin embargo, por mucho tiempo lo hizo a costa del medio ambiente sobrexplotándolo, lo cual pudo ser algo no significativo, pero hoy ya posee ramificaciones a nivel mundial afectando el clima, hábitat, mares, y ecosistemas completos de manera negativa.

Actualmente el concepto de sostenibilidad cobra fuerza, ya que no sólo el ser humano debe preocuparse de manera cortoplacista, o fomentando tendencias que no son necesarias. La gran diferencia entre sustentabilidad y sostenibilidad, es que la primera busca preservar, conservar y proteger los **Recursos Naturales** para el beneficio inmediato y futuro, pero, no toma en cuenta las necesidades sociales, políticas ni culturales, llegando a términos inverosímiles pero políticamente correctos como “Jacuzzi Sustentable”, “Mansiones de Lujo Sustentables”, etc.

Los pilares de un desarrollo sostenible son la sociedad, la economía y el medio ambiente, respaldando y fomentando una visión positiva del crecimiento del Hombre como especie, pero siempre, teniendo en cuenta a este como parte de un sistema finito llamado Planeta Tierra y que la satisfacción de necesidades del presente ya sean fundamentales o no, no perjudiquen o desmedren las condiciones para futuras generaciones. Para esto se deben cumplir las siguientes tres reglas básicas.

- 1.- Ningún recurso renovable deberá utilizarse a un ritmo superior al de su generación.
- 2.- Ningún contaminante deberá producirse a un ritmo superior al que pueda ser reciclado, neutralizado o absorbido por el medio ambiente.
- 3.- Ningún recurso no renovable deberá aprovecharse a mayor velocidad de la necesaria para sustituirlo por un recurso renovable utilizado de manera sostenible. (9)



## 2.2. Marco de referencia.

Esta sección describe los sectores productivos, particularmente la industria de la construcción cuyos efectos influyen directamente en la motivación de esta investigación, y así poder enfocar la idea principal del proyecto interrelacionando a los subsectores que actúan como contribuyentes primarios.

- Construcción:
  - Hormigón
    - Áridos
  - Acero
- Generación de energía:
  - Termoeléctricas a base de carbón

El sector de la construcción a nivel mundial agrupa a diversas industrias que actualmente movilizan capitales y recursos con un crecimiento aproximado del 5% anual impulsado principalmente por China e India, y dentro de este marco Chile como país líder en Sudamérica que ha alcanzado un nivel de desarrollo importante, presenta una tendencia que lo posiciona dentro de las economías fuertes e idóneas para la inversión evidenciando un crecimiento anual del 4,6 %, según el Índice mensual de la construcción desde el año 2004 (5).

Y este incremento en la construcción se ve reflejado en el despacho de cemento y hormigón nacional total como se ilustra en la tabla 1.

**Tabla 1 Despacho anual de cemento y hormigón.**

Año	Despacho Hormigón (m <sup>3</sup> )	Despacho Cemento (Miles ton)
<b>2009</b>	5.696.893	3.876
<b>2010</b>	6.134.273	3.871
<b>2011</b>	7.239.860	4.406
<b>2012</b>	7.664.705	4.722

Fuente (5)

De esto se desprende que a partir del año 2009 presenta un crecimiento sostenido hasta la fecha y por lo cual la demanda de árido posee a la vez una demanda creciente, ya que el porcentaje de árido (grueso y fino) presente en el hormigón representa entre el 60% al 70% en peso del hormigón estructural. Esto sin considerar el porcentaje de áridos utilizados para pavimentos asfálticos.

Otro punto que se ve afectado por un sector constructivo en continuo desarrollo, es la producción de acero, donde China es el país con la producción bruta más alta a nivel mundial como se ilustra a continuación en la tabla 2. Chile se ubica en el lugar N° 32 en la producción de acero de alto horno.

**Tabla 2 Producción mundial de acero de alto horno (miles de toneladas).**

N°	País	2010	2011	2012
1	China	595.601	629.693	654.269
2	Japón	82.283	81.028	81.405
3	Rusia	47.934	48.120	50.522
4	India	38.685	38.900	42.258
5	Corea Sur	35.065	42.218	41.718
6	Estados Unidos	26.843	30.233	32.113
7	Ucrania	27.349	28.867	28.488
8	Brasil	30.898	33.243	27.045
9	Alemania	2.856	27.795	26.753
10	Taiwán, China	9.358	12.940	11.784
11	Francia	10.137	9.698	9.532
12	Italia	8.555	9.824	9.417
13	Turquía	7.679	8.173	8.613
14	Canadá	7.666	7.520	7.650
32	<b>Chile</b>	<b>635</b>	<b>1.130</b>	<b>1.065</b>

Fuente (10)

Es necesario destacar el hecho de que sólo se muestra la producción de hierro de alto horno ya que esta producción influye directamente en la cantidad final de escoria de alto horno, la cual equivale aproximadamente al 25 % de la producción de hierro. Y de manera más cercana, la producción de acero a nivel local también es un sector con producción en aumento pero de manera desacelerada en comparación con el hormigón ya que el precio externo de este material, ha afectado a la industria local, sin contar con el cierre provisional de uno de los hornos por reparaciones post-terremoto del 27 de Febrero del año 2010. A continuación, se ilustra la producción de acero de alto horno, en conjunto con la escoria producida y declarada por la empresa “*Compañía Siderúrgica Huachipato S.A. CAP*”.

**Tabla 3 Producción de acero y escoria de alto horno en miles de toneladas.**

Producción	2010	2011	2012
<b>Acero Alto Horno CAP (Mt)</b>	632	1072	1068
<b>Escoria AAHH (Mt)</b>	136	252	267
<b>Porcentaje (%)</b>	<b>22</b>	<b>24</b>	<b>25</b>

Fuente (11)

El último sector de interés es el sector energético el cual por razón de crecimiento poblacional ha sido un nicho con una demanda creciente y en consecuencia, una capacidad instalada con un desarrollo por sobre la demanda, como se ilustra en el siguiente gráfico.



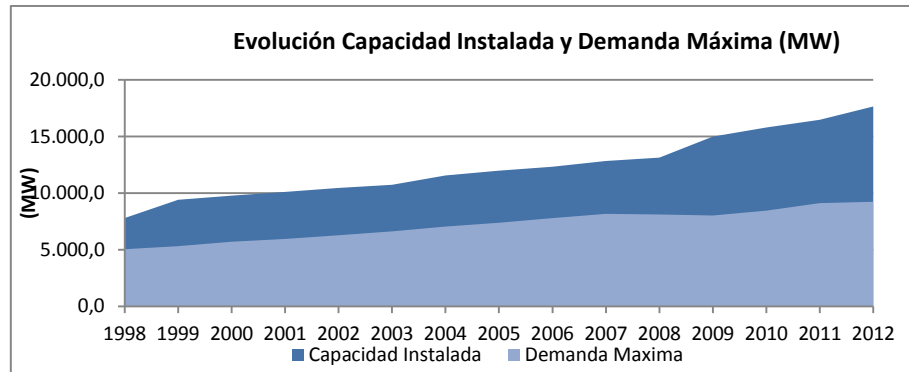


Figura 1 Evolución capacidad instalada y demanda máxima (MW)

Fuente (12)

La generación termoeléctrica a base de carbón a nivel nacional es cercana al 20 % de la producción total nacional como se muestra en la figura 2, sin embargo, ésta se da principalmente en el sector norte del país, en la región de Antofagasta, como se muestra en la figura 3.

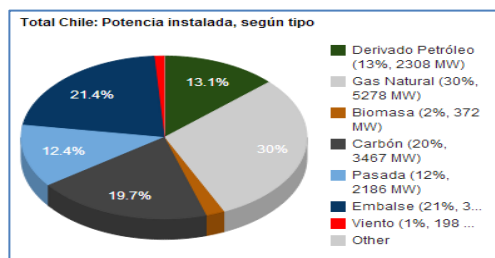


Figura 2 Potencia instalada según tipo.

Fuente (13)

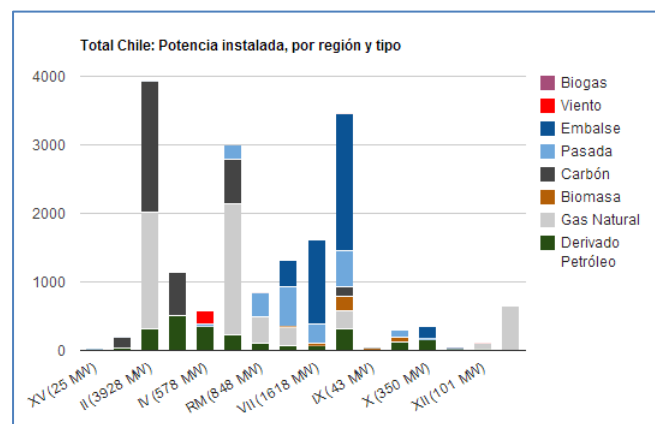


Figura 3 Potencia instalada por región y tipo.

Fuente (13)

A nivel mundial la producción de desechos de termoeléctricas fue de aproximadamente 780 Mt en 2011, siendo reutilizado efectivamente unos 415 Mt o 53 % de los desechos. Subproductos que se componen por sobre el 85 % de ceniza volante (14). Chile en el año 2011 se estimó gracias a las termoeléctricas existentes, a los proyectos ingresados aprobados y en revisión en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y la Comisión Nacional de Energía (CNE), que para el año 2016 se generará aproximadamente 9916 t/día de ceniza volante. (15)

El mercado de árido artificial liviano es un mercado en pleno desarrollo, siendo el principal exponente de este tipo de material, la arcilla expandida, conocida comercialmente como Leca. Que en conjunto con esquistos, pizarras y otros, que al ser calentados por sobre los 1200 °C, se expanden gracias a la liberación de gases internos disminuyendo la densidad. Este tipo de materiales se encuentran normados por:

- IRAM 1567 (16)
- ACI 213R - 03 (17)

### 2.3. Geopolímeros.

Término que hace referencia y acuña a aquellos polímeros sintéticos inorgánicos a base de materiales con altos porcentajes de aluminosilicatos dentro de su composición, y debido a esto son también conocidos como aluminosilicatos inorgánicos. El término “Geopolímero” fue acuñado por el científico e ingeniero químico francés Joseph Davidovits en el año 1979, sin embargo, este tipo de materiales han sido investigados ya desde los años 50s por la Unión Soviética, con el nombre de “Cementos de Suelo” (18).

Es por esto que este tipo de cementos ya poseen un amplio respaldo científico, técnico y práctico para su uso, no obstante es necesario notar que este tipo de material no es nueva tecnología ya que las antiguas civilizaciones utilizaban este tipo de aglomeraciones en la construcción, como por ejemplo, en nada menos que las pirámides, estudio que realizó el mismo J. Davidovits, donde sentenció que la Pirámide del Sol de Bosnia, está constituida por piedras aglomeradas que concuerdan con el modelo de formación de la geopolimerización (19).

Las ventajas de utilizar elementos geopoliméricos son:

- Resistencia mecánica elevada.
- Excelente comportamiento en ambientes agresivos.
- Producción con baja emisiones de CO<sub>2</sub>.
- Resistencia a altas temperaturas.
- Utilización de materiales de bajos costos.

Esencialmente los materiales geopoliméricos utilizan como fuente de aluminosilicatos, materiales como arcillas calcinadas, minerales naturales, desechos de variadas industrias, rocas volcánicas o mezclas de dos o más materiales activados mediante una solución altamente alcalina, donde comúnmente se utiliza una mezcla de hidróxido de sodio y silicato alcalino (sodio o potasio).

El proceso de mezcla de la fuente de aluminosilicato y activador alcalino, se denomina geopolimerización, el cual se modela en 5 etapas (18), que se ilustran a continuación:

- i. Disolución.
- ii. Equilibrio.
- iii. Gelificación.
- iv. Reorganización.
- v. Polimerización y endurecimiento.

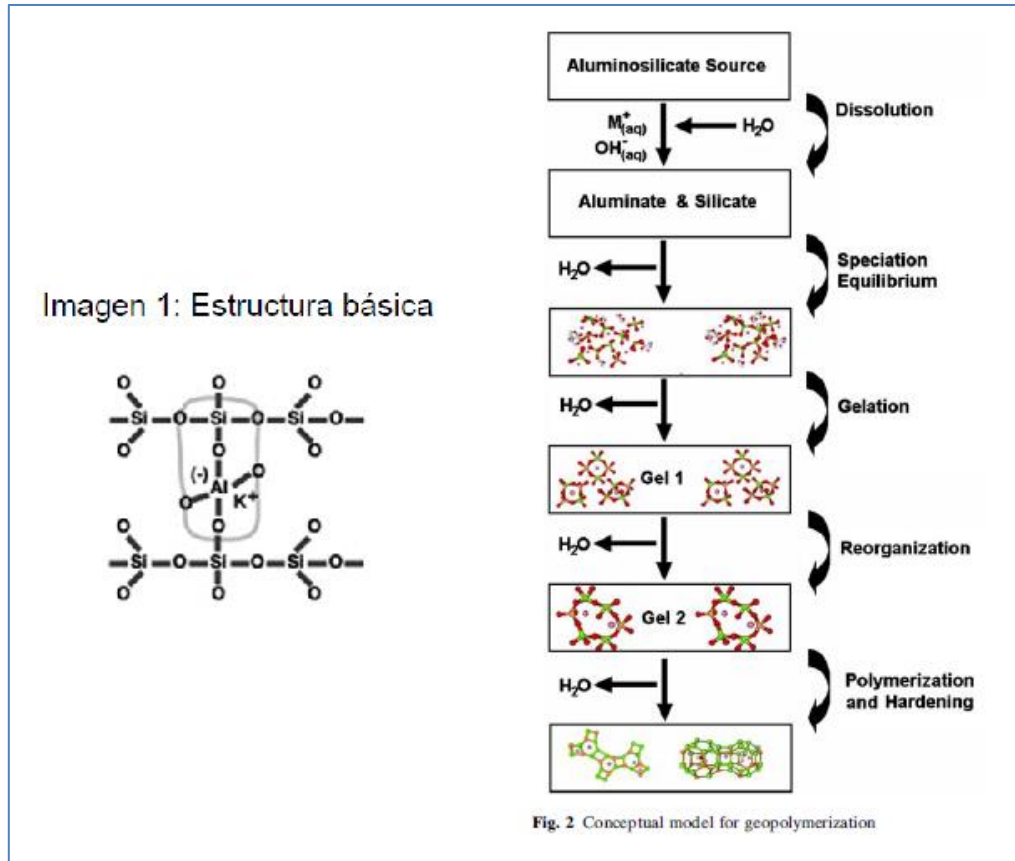
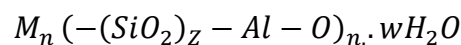


Figura 4 Estructura básica de geopolímero y modelo conceptual de geopolimerización.

Fuente: (18)

La fórmula empírica general es:



Donde “M” representa un catión alcalino, los valores de “z” fluctúan entre 1, 2 ó 3, el valor de “n” es el grado de polimerización y “w” es la cantidad de moléculas de agua asociadas. (20)

Por lo cual este proceso está determinado esencialmente por la fuente de aluminosilicatos y el medio de activación, los cuales poseen las siguientes características propias que se ven reflejadas en el producto final.

Tabla 4 Factores determinantes del proceso de geopolimerización.

Fuente de Aluminosilicatos	1. Composición química
	2. Mineralogía
	3. Microestructura
	4. Distribución de tamaño de partícula
Activador Alcalino	1. Alcalinidad
	2. Tipo y naturaleza
	3. Relación Si/Catión (Na <sup>+</sup> o K <sup>+</sup> )
	4. Relación especies iónicas/Catión (Na <sup>+</sup> o K <sup>+</sup> )

Fuente (21)

En este trabajo se utilizó como fuentes de aluminosilicatos los siguientes subproductos:

- Ceniza Volante.
- Escoria de Alto Horno.

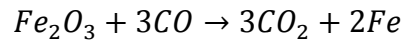
Y como activador alcalino se utilizó una mezcla de las siguientes soluciones.

- Hidróxido de sodio. ( $\text{NaOH}$ )
- Silicato de sodio. ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ )

### 2.3.1. Escoria de alto horno.

La escoria de alto horno es un desecho de unos de los procesos de la fabricación del acero siderúrgico, aleación metálica conformada por hierro y carbono que se produce en dos fases; la primera, llamada fase de reducción, el mineral de hierro es fundida con coque y piedra caliza produciendo hierro fundido denominado arrabio, el cual es conducido a la segunda fase, denominada de acería, la que reduce el contenido de carbono y elimina impurezas residuales del primer proceso.

La ecuación principal de la reacción en el alto horno es:



Y a continuación, se presenta un diagrama de flujo de la producción de acero siderúrgico.

Fuente: (22)

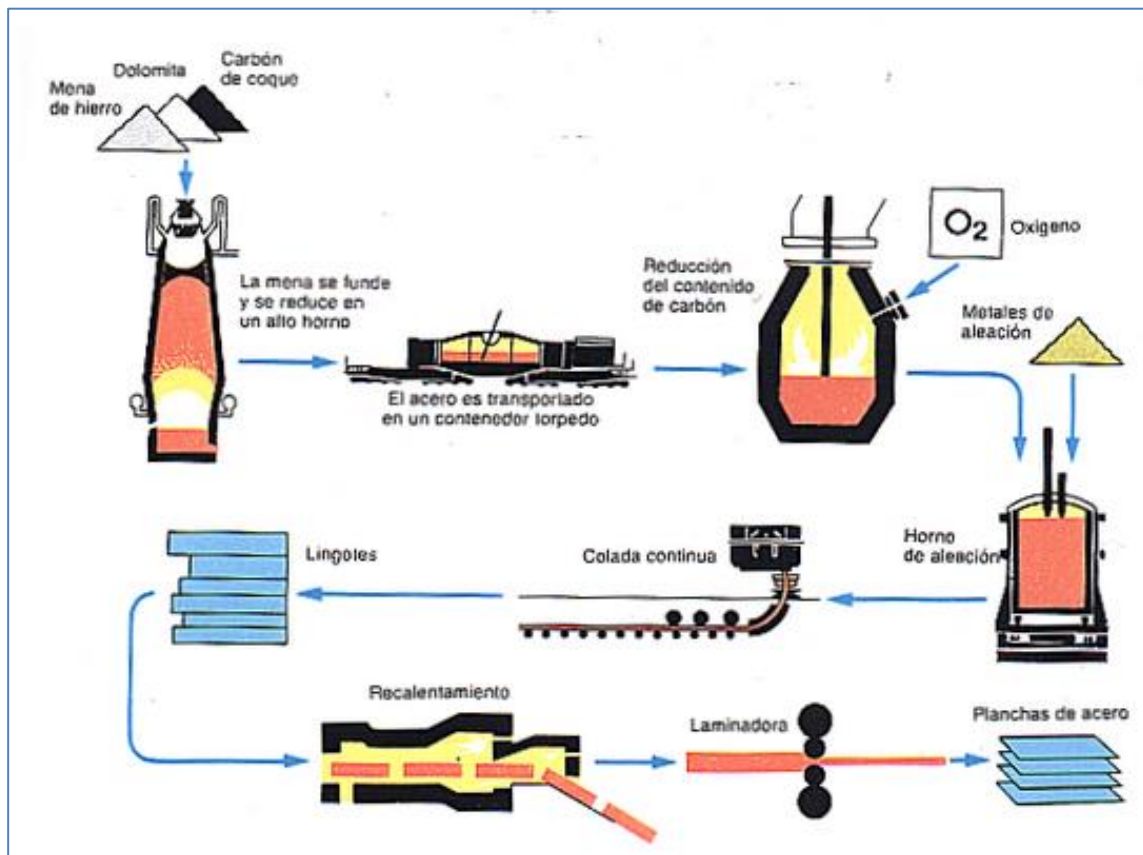


Figura 5 Flujograma de acero siderúrgico.

De la Fase de reducción en los altos hornos, se obtiene como desecho escoria, la cual se procesa de las siguientes maneras:

- Escoria enfriada al aire (Blast Furnace Slag BFS):
  - Escoria cristalina, inerte hidráulicamente
- Escoria expandida:
  - Proceso de enfriamiento controlado, cantidad de agua limitada, material celular de peso ligero.
- Escoria granulada (Granulated Blast Furnace Slag GBFS):
  - Proceso de templado con agua a presión, material vítreo, hidráulicamente activo.
  - La escoria granulada al ser procesada mediante molienda se le conoce como Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS).
- Escoria peletizada.

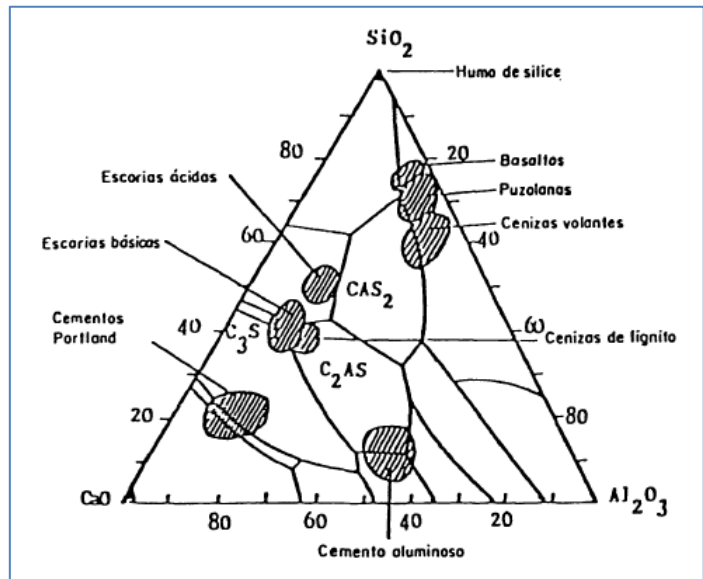
La escoria granulada es la que posee el comportamiento hidráulico más favorable para este tipo de estudios ya que al ser bruscamente enfriada con agua a presión, gran parte de su estructura molecular es vítrea de forma irregular y posee una gran energía interna (Aproximadamente 200 (J/g)) (23), lo cual la convierte en un material altamente inestable y de gran reactividad.

A continuación, se muestra los rangos típicos de la composición química de la escoria de alto horno y el diagrama de fase que clasifica a la escoria de alto horno acorde a sus tres fracciones principales  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ , en un gráfico donde también se encuentran variados tipos de cementos y cenizas.

**Tabla 5 Composición química de la escoria de altos hornos.**

Constituyentes Químicos	Composición (% Por Masa)
$\text{SiO}_2$	27-40 %.
$\text{Al}_2\text{O}_3$	5-33 %.
$\text{CaO}$	30-50 %.
$\text{MgO}$	1-21 %.
$\text{Fe}_2\text{O}_3$	< 1 %.
S	< 3 %.
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	0,003-0,007 %.
Cl	0,19-0,26 %.
$\text{TiO}_2$	< 3 %.
F	0,09-0,23 %.
$\text{MnO}_2$	< 2 %.
$\text{P}_2\text{O}_5$	0,02-0,09 %.
$\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$	1-3%.

Fuente (24)



**Figura 6 Diagrama de fase  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ .**

Fuente (23)

La escoria de alto horno enfriada al aire es ampliamente utilizada como árido en pavimentos, mientras que la escoria granulada, es molida para ser utilizada como elemento cementicio suplementario y formar parte de los cementos siderúrgicos.

Acorde a la norma chilena NCh 148 Of.68 “Cemento: Terminología, Clasificación y Especificaciones Generales”, se define la escoria básica granulada de alto horno como: “el producto que se obtiene por enfriamiento brusco de la masa fundida no metálica que resulta en el tratamiento del mineral de hierro en un alto horno. Este producto tiene como constituyentes principales silicatos o silicoaluminatos de calcio y su composición química es tal que cumple con el siguiente requisito:

$$\frac{(C + M + A)}{S} > 1$$

Adicionalmente la escoria de alto horno, por el decreto DS 148/2003 del Ministerio de Salud y a nivel internacional, este material es categorizada como residuo no peligroso. Siendo las hormigoneras responsables del consumo del 1/3 a 2/3 de la escoria de alto horno generada en la producción de acero. En la tabla 6 se muestra la producción anual de escoria de alto horno y su utilización en los países de mayor producción de acero a nivel mundial.

**Tabla 6 Producción y utilización anual de la escoria de altos hornos.**

País	Producción (Millones ton.)	Utilización (Millones ton.)
<b>Australia</b>	4,7	0,12
<b>Canadá</b>	2,9	0,20
<b>China</b>	22	16
<b>Francia</b>	10,4	1,9
<b>Alemania</b>	15	2,8
<b>India</b>	7,8	2,8
<b>Japón</b>	24	8,2
<b>Holanda</b>	1,1	1
<b>Noruega</b>	0,1	Ninguna
<b>Sudáfrica</b>	1,5	0,6
<b>Suecia</b>	0,1	0,03
<b>Reino Unido</b>	4	4
<b>EE.UU.</b>	13	1

Fuente (25)

### 2.3.2. Ceniza volante.

La ceniza volante es un desecho de la producción energética a base de carbón. Este tipo de generación de energía eléctrica ha ganado terreno debido a su estabilidad en los precios del material, gracias a la existencia actual de carbón que se proyecta hacia los 200 años, mientras que el petróleo y gas natural, se proyectan sólo hasta el año 2030. No obstante, hoy en día se muestran alzas continuas e insuficiencia permanente de éstos insumos.



Figura 7 Ceniza volante.

A nivel mundial cerca del 40 % de la generación eléctrica es a base de carbón (26), hoy con una población por sobre los 7.000 millones de personas en el globo, y las proyecciones del crecimiento poblacional sitúa la cantidad de personas para el año 2030 por sobre los 8.400 millones, lo cual aclara un escenario de demanda energética creciente (27).

Las reservas de carbón a nivel mundial el 83% de estas reservas están localizadas en el hemisferio norte, y de este, el 60% se encuentra concentrado en sólo tres países: China, los EE.UU. y Rusia. De la potencia instalada, el 97 % de las termoeléctricas a base de carbón son del tipo convencional *Pulverized Coal Combustion* (PCC), lo que influye directamente en que la generación eléctrica a base de carbón sea el responsable del 42 % de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>, y acorde a la Agencia Internacional de Energía (IEA) hacia el año 2050 el 47% de la energía mundial se generará mediante centrales termoeléctricas basadas en carbón, lo cual no es favorable en cuanto a la reducción de gases de invernadero, y si no se generan cambios políticos drásticos, no se verán cambios favorables para las generaciones futuras (28).

En Chile la situación no es distinta, donde cerca del 20% de la potencia instalada corresponde a termoeléctricas a base de carbón, localizadas principalmente en la II, III y V región (13). Esto debido a los recursos propios de cada región, ya que a medida que se avanza hacia el sur el porcentaje de generación hidroeléctrica es mayor. Y considerando nuevamente los precios variables y crecientes del gas natural y del petróleo.

El carbón luego de ser transportado, triturado y pulverizado, es combustionado como fuente energética en una termoeléctrica. Los residuos de esta combustión son recolectados mediante procesos de separación como ciclones, filtros mangas o precipitadores electrostáticos. Ya que estas partículas son de tamaño pequeño (0,5-100µm) y se presentan con facilidad en suspensión, al ser arrastradas por flujos gaseosos (29).

Acorde la norma europea EN-450, las cenizas volantes (*Fly Ash*) se definen como granos de polvo fino, compuesto por partículas vítreas esféricas (ECOBA, 2006). Poseen un color grisáceo oscuro y su densidad relativa varía entre 1,9 a 2,8 (30). Su composición química dista de gran manera de un proceso a otro y del tipo de carbón utilizado, pero debido a que este estudio se enfoca en un tipo de proceso, sus rangos de composiciones están bien definidos y clasificados.

Primordialmente están conformados por vidrio de sílice, conteniendo sílice, aluminio, hierro y calcio. Su superficie específica está contenida entre 1.700 a 10.000 (cm<sup>2</sup>/g) (31). Acorde a la norma ASTM C 618-93, las cenizas volantes se clasifican en dos clases C y F. Las cenizas de



clase C son aquellas producidas por la calcinación de carbón sub-bituminoso o lignito, la cual posee propiedades puzolánicas y a la vez propiedades cementicias. Las cenizas de clase F, son cenizas producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso y poseen propiedades puzolánicas, que para endurecer básicamente necesitaría una adición de Cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y agua.

**Tabla 7 Parámetros de clases de ceniza volante.**

Características	Clase F	Clase C
<b>Dióxido de silicio + óxido de aluminio + óxido de fierro, mín. %</b>	70	50
<b>Trióxido de azufre (<math>\text{SO}_3</math>), máx. %</b>	4	5
<b>Contenido de humedad, máx. %</b>	3	3
<b>Pérdida por calcinación, máx. %</b>	10	6

Fuente (32)

La ceniza volante es comúnmente usada como elemento suplementario al cemento dentro del rango de 15 a 25 %, sin embargo también es utilizada como terraplén, relleno fluido, suelo estabilizado, estabilizador y solidificador de desechos, geopolímeros, ladrillos, entre otros. Sin embargo a nivel mundial más del 65 % de la ceniza volante se continúa depositando como desecho (3), provocando serios problemas ambientales tales como:

- Contaminación de aguas subterráneas.
- Derrames de almacenamiento a granel.
- Presencia de contaminantes (metales pesados).

### 2.3.3. Activadores alcalinos.

Los activadores alcalinos se encargan de acelerar la reacción de la fuente de aluminosilicatos, y de esta manera asistir la formación de hidratos estables de baja solubilidad y promover una estructuración compacta con estos hidratos.

Purdon O. (33) fue el primero en trabajar con este tipo de materiales, en su estudio del efecto que tiene la incorporación de hidróxido de sodio (NaOH) sobre una variedad de minerales que principalmente estaban formados por Si y/o Al. Luego en los años setenta, Davidovits J. (34) desarrolló un sistema de activación alcalina de materiales basados en caolín (K) y metacaolín (MK). En este estudio se utilizó hidróxido de sodio y silicato de sodio como complejo activador y a continuación se explica la función de cada uno de ellos.

#### 2.3.3.1. *Efecto del tipo de ion alcalino (Hidróxido de sodio).*

Se le denomina tipo ion alcalino ya que éste al disolverse se presenta como  $\text{Na}^+$  y  $\text{OH}^-$ , donde los cationes alcalinos desempeñan su rol en la primera etapa de la geosíntesis, ordenando las moléculas de agua y facilitando el actuar de los silicatos solubles. En esta fase, el catión determina la estructura final y sirve como patrón para direccionar y controlar la capacidad, tan rápido como sea posible, de la policondensación y crecimiento estructural, donde el ión alcalino, ya sea  $\text{Na}^+$  o  $\text{K}^+$ , se sitúa en la sección central de la unidad básica del geopolímero.

Una de las variables principales del proceso de geopolimerización es la concentración del activador, ya que se ha visto que a mayor concentración del ion hidróxido se incrementa la solubilidad de la fuente de aluminosilicatos, lo cual influye directamente en una resistencia mecánica más alta. Sin embargo, acorde a estudios de Palomo A. (35) éste tipo de comportamiento no se ve reflejado si se utiliza una solución de hidróxido de sodio de 12 M a una solución de 18 M ya que se obtienen resistencias menores con la segunda concentración.

#### 2.3.3.2. *Efecto del contenido de silicatos solubles (silicato de sodio).*

Se ha observado que el contenido de silicatos solubles afecta considerablemente el mecanismo y la cinética de las reacciones de geopolimerización, por lo que las características físicas del material geopolimérico se ven mejoradas a medida de una alta concentración de silicatos solubles presentes en el activador. Mostrando un alto comportamiento mecánico debido a la fortaleza del enlace Si-O-Si, frente a los enlaces Si-O-Al o Al-O-Al (36).

**2.3.4. Estado actual de la investigación y uso de geopolímeros.**

Desde hace más de 55 años que se inició el estudio de los materiales denominados como geopolímeros, sin embargo el interés de la comunidad científica por el estudio de este tipo de material sólo se ve incrementado en los últimos diez años, como se ve en figura 8 y en el figura 9.

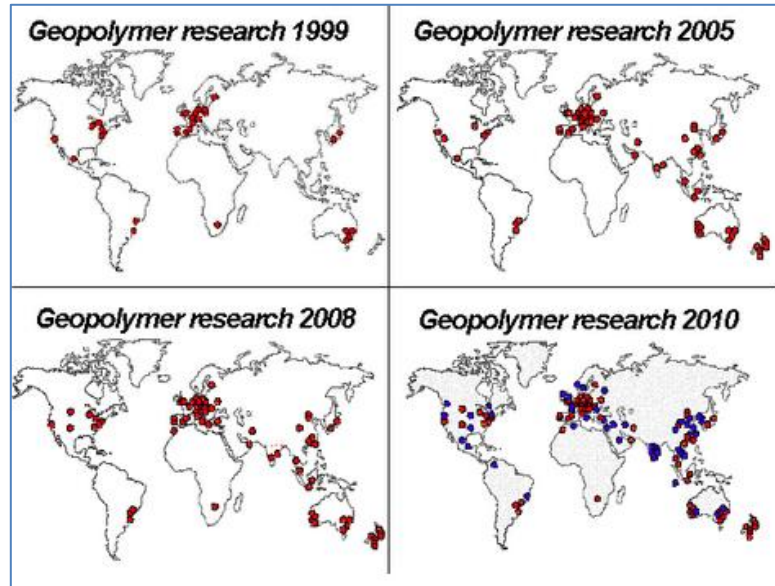


Figura 8 Mapa de evolución de número de investigación en torno a geopolímeros.

Fuente (37)

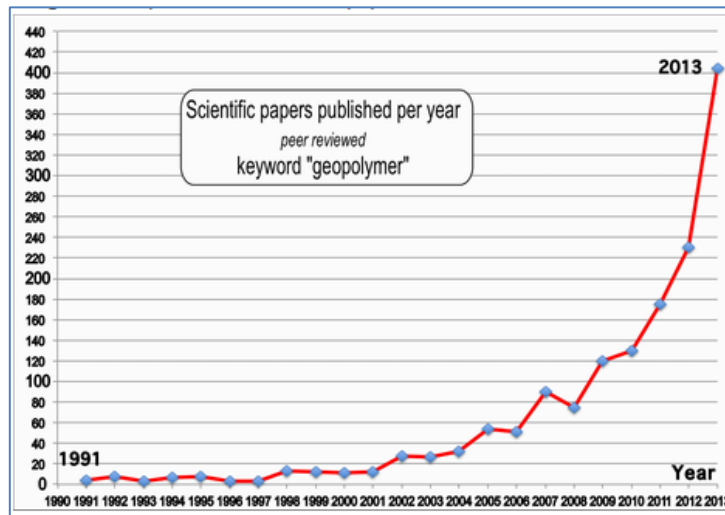


Figura 9 Papers publicados por año con la palabra clave " Geopolymer".

Fuente (38)

Las empresas relacionadas con materiales geopoliméricos, se centran en las siguientes áreas de aplicación de esta tecnología (38).

- Precursores de geopolímeros.
- Resinas, grouts, pinturas y aglutinantes geopoliméricos
- Concreto y cementos geopoliméricos.
- Aplicaciones farmacéuticas y geobiológicas.
- Cerámicos geopoliméricos.
- Paneles y compuestos de fibra reforzadas geopoliméricos.

Sin embargo, el estudio de los geopolímeros en el área de generación de pellets como agregado liviano, es un área de estudio con alta demanda, llevando a cabo ensayos que evalúan la utilización ya sea de ceniza volante, escoria de alto horno, residuos de sílice de arcos eléctricos, ceniza de la quema de la cascara de arroz, residuos de la producción de áridos ligeros entre otros, siendo activados mediante la aplicación de calor, o con aglomerantes como cemento, cal y yeso en conjunto con agua (39), o mediante una solución alcalina (40). La fabricación más típicas de árido ligero en frío se han basado en la utilización de ceniza volante (41) (42), donde también, se ha estudiado el uso de estos pellets geopoliméricos livianos como agregados ligeros para hormigones de baja densidad (43) (44), mediante el estudio del comportamiento mecánico y características físico- químicas, de estos materiales. En cambio el proceso de peletizado de este tipo de materiales no se evalúa en estos estudios, así como el costo que se incurre en la producción e insumos.

Actualmente las tecnologías usadas en el proceso de peletización son las siguientes:

- Peletizado en caldera giratoria.
- Extrusión de masa a peletizar.
- Lecho fluidizado.
- Dispositivos de centrifugado (disco, tambor, cónico).

El peletizado por caldera, representa una solución comúnmente usada debido a su bajo coste en comparación con las otras tecnologías, sin embargo dentro de las desventajas que presenta este tipo de proceso, se encuentran la fuerte carga térmica, tratamiento de gases, difícil dosificación de materias primas de tal manera de generar áridos homogéneos traduciéndose en costos ambientales y baja reproducibilidad del proceso. El proceso de extrusión necesita una masa compacta capaz de ser moldeada para luego ser peletizada, aunque para lograr una masa trabajable de escoria de alto horno con uso de activador alcalino, esto se debe hacer con una razón de activador/escoria superior al usado a largo del estudio (aproximadamente 0,16), lo cual provocaría mayor exudación y pérdidas de insumos así como, mayores costes.

El peletizado mediante lecho fluidizado y tambor peletizador son procesos viables para ser utilizados con escoria de alto horno y ceniza volante activada mediante una solución alcalina, sin embargo, el disco peletizador posee una mayor eficiencia, sin ser necesario una recirculación del material.

A continuación se ilustran las propiedades físicas de agregados peletizados obtenidos de diversos autores, utilizando principalmente ceniza volante mediante el proceso de sinterización.

**Tabla 8 Caracterización física de agregados peletizados de diversos autores.**

Autor	Tipo de LWA	Peso específico		Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )		Vacíos (%)		Absorción de agua (%)		Resistencia a la rotura por pellet (Mpa)
		SSS	S	Suelta	Compacta	Suelta	Compacta	24	48	
Niyazi Turan, 2011	CLWA	1.63	1.3	789	842	39.2	35.1	-	25.5	3.7
	SFA+1200+10B	1.57	1.56	933	993	40.1	36.2	-	0.7	12
	SFA+1200+10G	1.6	1.6	936	936	41	37	-	0.7	9.6
Ramamurthy, 2006	SFA+20B	-	1.83	850	-	-	15.8	-	-	-
Amor et al., 2010	PFW LWA	45		21		13,9		-		-
Chi et al., 2003	CLWA	1.8	1.4	972		-		20.8		8.57

LWA - Agregado liviano (lightweight aggregate); SFA – Agregado de ceniza volante sinterizado (sintered fly ash aggregate); SFA+1200+10G – Agregado de ceniza volante sinterizado con 10% de vidrio en polvo a 1200°C; SFA+1200+10B - Agregado de ceniza volante sinterizado con 10% bentonita a 1200°C; CLWA-Agregado liviano de arcilla (clay lightweight aggregate) ; SSS - Saturado superficie seca; S – Seca; PFW - Residuos de espuma de poliuretano (polyurethane foam waste)

Fuente (41)

**2.3.4.1. Fabricación y desempeño de árido livianos formados en frío usando activadores alcalinos para hormigón de alto desempeño (40)**

El estudio dirigido por Le Anh-tuan Bui y su equipo (40), demostró la factibilidad de fabricar árido ligero mediante un proceso en frío activando fuentes de aluminosilicatos con una solución alcalina. Los áridos ligeros obtenidos poseyeron una densidad aparente suelta entre 769 a 1090 kg/m<sup>3</sup>, siendo utilizados en mezclas de hormigones ligeros de alto desempeño (HPLWC) obteniendo resistencias a la compresión entre 14,8 a 38,1 MPa a una edad de 28 días.

Las fuentes de aluminosilicatos utilizados en este estudio fueron; ceniza volante clase F (FA), escoria de alto horno (GGBFS), ceniza de cáscara de arroz (RHA). Siendo estos activados mediante una solución alcalina conformada por una solución de hidróxido de sodio (10 M) y una solución de silicato de sodio (con Na<sub>2</sub>O 8.26%, SiO<sub>2</sub> 25.7% y agua 66.04%).

El proceso de fabricación del árido ligero consistió en la aplicación del activador alcalino en forma pulverizada (spray), a una mezcla de FA, GGBFS y RHA en el disco peletizador. Curando el árido a una temperatura de 23° C a una humedad del 60%, seleccionando granos de tamaño máximo de 9,5 mm y mínimo de 4,75 mm. Las dosificaciones ocupadas para la fabricación del árido ligero se muestran en la tabla 9, donde también se muestra la densidad suelta aparente (g/cm<sup>3</sup>) y la capacidad de absorción (%) del árido ligero obtenido por cada dosificación.

**Tabla 9 Dosificaciones y propiedades físicas de los agregados livianos.**

Tipo no.	Proporciones de Mezcla (%)			Activador alcalino (g)		Absorción (%)	Densidad aparente suelta (kg/m <sup>3</sup> )
	FA	GGBFS	RHA	10 M NaOH	Silicato de sodio		
<b>T1</b>	100	–	–	703.7	1148.3	10.6	903.1
<b>T2</b>	75	25	–	603.2	984.2	8.3	1002.5
<b>T3</b>	50	50	–	502.7	820.2	7.8	1059.7
<b>T4</b>	75	–	25	754.0	1230.3	10.8	833.2
<b>T5</b>	50	–	50	804.3	1312.3	20.5	768.5
<b>T6</b>	75	13	12	678.6	1107.3	10.1	894
<b>T7</b>	50	25	25	653.5	1066.3	9.8	855

Las series de pellets generados se ensayaron a la rotura por pellet a distintas edades y se sometieron al ensayo de trituración según la norma (CNS 14779). Resultados que se muestran en la tabla 10.

**Tabla 10 Resistencia a la rotura y resistencia a la trituración de áridos livianos.**

Tipo N°	Resistencia a la rotura (kgf)					Resistencia a la trituración
	1 Día	3 Días	7 Días	14 Días	28 Días	28 Días (MPa)
<b>T1</b>	ND	ND	ND	ND	15.0	5.7
<b>T2</b>	15.2	25.0	28.0	31.2	30.9	15.5
<b>T3</b>	17.0	19.0	23.7	24.0	31.2	15.7
<b>T4</b>	ND	11.6	13.7	18.5	18.9	8.1
<b>T5</b>	ND	ND	16.6	16.7	18.5	6.0
<b>T6</b>	ND	ND	13.9	14.9	17.3	8.8
<b>T7</b>	ND	10.6	11.6	13.1	15.1	8.1

ND- La resistencia a la rotura fue menor a 9 kgf.

Las series fueron utilizadas como agregados livianos en las siguientes dosificaciones de hormigones livianos de alto desempeño (HPLWC) mostradas en la tabla 11, las cuales fueron ensayadas a compresión, donde la resistencia a 56 días y la densidad de cada tipo de hormigón se muestran en la tabla 12.

**Tabla 11 Dosificaciones de hormigones HPLWC.**

Mezcla N°	Tipo de LWA	w/b	LWA	Arena	FA	Cemento	Agua + SP
<b>M1</b>	Agregado natural	0.30	822.1	804.9	110.6	455.6	169.9
<b>M2</b>	T1	0.30	558.5	767.8	105.5	434.6	162.0
<b>M3</b>	T6	0.30	570.1	777.1	106.7	439.9	164.0
<b>M4</b>	T2	0.30	589.5	770.7	105.9	436.3	162.6
<b>M5</b>	T4	0.30	540.2	778.8	107.0	440.9	164.4
<b>M6</b>	T5	0.30	512.4	784.6	107.8	444.1	165.6

LWA - Agregado liviano (lightweight aggregate); w/b - Razón agua/aglomerante (wáter to binder); FA- Ceniza volante (fly ash); SP- super plastificante tipo G.

**Tabla 12 Densidad y resistencia a la compresión a 56 días de hormigones HPLWC.**

Mezcla N°	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a la compresión a 56 días (MPa)
<b>M1</b>	2224	52
<b>M2</b>	1931	22
<b>M3</b>	1992	23
<b>M4</b>	2056	38,1
<b>M5</b>	1902	17
<b>M6</b>	1836	14,8

Concluyendo, que las mezclas con ceniza volante (FA) y escoria de alto horno (GGBFS) poseen un mejor comportamiento mecánico que otras, y que la resistencia mecánica disminuye a medida que la proporción de ceniza volante o de ceniza de cascara de arroz (RHA) aumentan. La densidad disminuye a medida que aumenta el porcentaje de RHA, sin embargo la densidad aumenta a medida que el porcentaje de GGBFS aumenta, así como la absorción de agua disminuye.

## 2.4. Áridos sintéticos para hormigones livianos.

EL desarrollo tecnológico de los áridos sintéticos, se inició preponderantemente durante la segunda guerra mundial, debido al desarrollo temprano de la arcilla expandida y la utilización del carbón bituminoso en la fabricación de albañilería de concreto. El segundo impulso de esta tecnología se produjo después de la segunda guerra mundial, donde se buscó el uso de hormigones livianos en la fabricación de hogares. Actualmente, existen nuevas tecnologías en la fabricación de áridos livianos además de los recursos naturales de baja densidad ya existentes.

Dos de las diferencias principales entre un árido liviano artificial sintético y uno natural, es que este último, por lo general, posee gran porcentaje de huecos, lo que se traduce posteriormente en que el hormigón posea una menor resistencia mecánica. Y la segunda diferencia es la posibilidad de reacciones adversas con el cemento, tales como virutas o elementos de la madera que provocan una tardanza en el tiempo de fraguado.

El uso de hormigón liviano posee la gran ventaja que permite reducir costos, ya que las cargas muertas por peso propio del material se ven disminuidas, el costo de las fundaciones poseen un claro descenso, al igual que la enfierradura y el espesor de los muros basales, por lo que en resumen se utiliza menor cantidad de material y por ende menos mano de obra. Todo esto balanceado por el mayor costo que tiene utilizar un tipo de árido liviano.

Las siguientes definiciones son proporcionadas por el documento *ACI 213R-87 (Re. 1999) Guide for Structural Lightweight Concrete* (17), y se enumeran los tres tipos de áridos livianos:

a) Agregado liviano fino:

Este tipo de agregado está compuesto principalmente de material celular natural o procesado, de origen mineral, la cual es utilizable para hormigón estructural liviano. Son propiamente graduados con el 85 a 100% del material pasando la malla N° 4. Posee una densidad suelta seca no mayor a 1120 (kg/m<sup>3</sup>) y cumple con la norma ASTM C 330.

b) Agregado liviano grueso:

Este tipo de agregado en mayor proporción está compuesto principalmente de material celular natural o procesado, de origen mineral, la cual es utilizable para hormigón estructural liviano. Son propiamente graduados con el 100% del material pasando un tamaño máximo designado. Y posee una densidad suelta seca no mayor a 880 (kg/m<sup>3</sup>) y cumple con la norma ASTM C 330.

c) Agregado liviano para concreto estructural:

Árido que en una matriz cementicia posee a 28 días una resistencia mínima de 17,24 (MPa), donde la densidad seca al aire no excede 1850 (kg/m<sup>3</sup>) y puede estar conformado por completo por árido liviano o por una combinación de árido liviano y normal.



En función de éstos se presentan los siguientes tipos de hormigones livianos:

a) Hormigones de baja densidad:

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

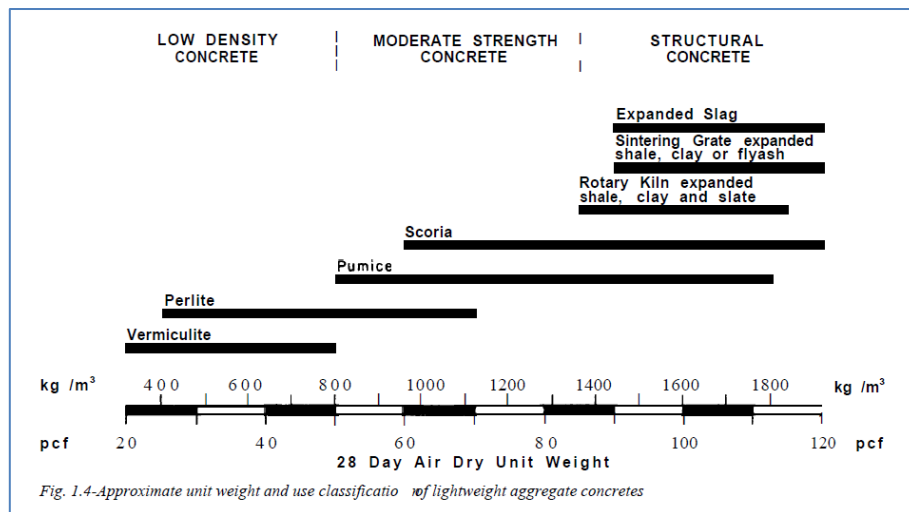
b) Hormigones de resistencia moderada:

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

c) Hormigones livianos estructurales:

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

Finalmente se ejemplifica mediante la siguiente imagen los tipos de hormigón liviano a partir de distintos áridos livianos, y los rangos de densidad que se obtienen.



**Figura 10 Unidades aproximadas de peso y uso de las clasificaciones de agregados de concretos liviano.**

Fuente (17)

### 3. Planteamiento del problema.

#### 3.1. Problema.

Del marco y escenario descrito, los problemas que motivan este estudio son los siguientes:

- a) Producción y depósitos de desechos.
  - a. Escoria de alto horno (GBS y GGBFS)
  - b. Ceniza volante (FA)
- b) Extracción de áridos.

Con el fin de afrontar y disminuir las externalidades negativas al medio ambiente y a la sociedad en su conjunto, se plantea la utilización de estos desechos -GGBFS y FA- en la formación de un árido artificial liviano, y así suplir la necesidad de árido natural.

Para esto se definieron los siguientes objetivos del proceso de elaboración del árido geopolimérico.

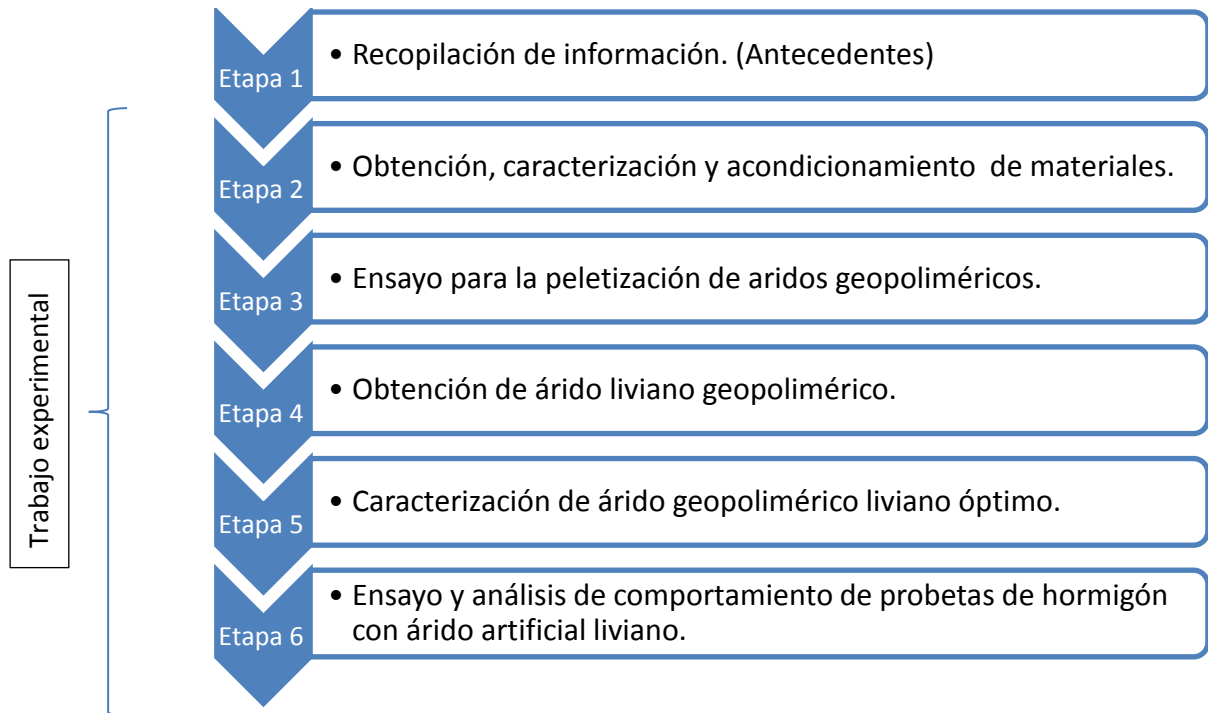
- a) Implementar un proceso de peletizado adecuado para la producción de árido geopolimérico liviano.
- b) Implementar un proceso de alta eficiencia con alto contenido de escoria de alto horno y ceniza volante.

Cumpliendo con los siguientes requisitos:

- a) Ejecutar un proceso en frío o minimizando la liberación de CO<sub>2</sub>.
- b) Ejecutar un proceso *Zero-Waste*, siendo una producción mínima o nula de desechos.
- c) Evitar utilización de materias primas anexas en proporciones mayores a las de los activadores.
- d) Asegurar un proceso confiable, manejable, repetible y económicamente sustentable.

### 3.2. Metodología.

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos, se definieron las siguientes etapas de trabajo, donde su orden responde al de una investigación de carácter exploratorio, que permite ajustar las variables en estudio en función de los resultados parciales obtenidos.



**Figura 11 Etapas del trabajo.**

La etapa 1 corresponde al estudio previo al trabajo experimental y sus resultados se resumen en el capítulo 2 de esta memoria.

### 3.2.1. Obtención y acondicionamiento de materiales.

Este trabajo se basó en la utilización de subproductos industriales, en especial de escoria de alto horno, subproducto del proceso de producción de Arrabio (Iron Pig), producto intermedio en la obtención de acero a partir de la fundición de las menas de hierro, y de ceniza volante, desecho de la producción de energía eléctrica en centrales termoeléctricas. Estos materiales fuentes de aluminosilicatos fueron proporcionados por *Compañía Siderúrgica Huachipato CAP* y *AES GENER* respectivamente.

Con el fin de asegurar la trazabilidad y reproductibilidad de la experiencia, estos elementos fueron caracterizados y normalizados de acuerdo a los siguientes parámetros.

- a) Composición química.
  - a. Análisis químico.
- b) Composición estructural molecular.
  - a. Difracción de rayos X (DRX).
- c) Finura.
  - a. Superficie específica (Blaine).
- d) Humedad.
  - a. Secado al horno.

Por otra parte los activadores alcalinos hidróxido de sodio y silicato de sodio, fueron proporcionados por *Droguerías Michelson S.A.*

### 3.2.2. Ensayo para la peletización de áridos geopoliméricos.

Debido a trabajos anteriores y a la experiencia adquirida tras el manejo de estos materiales en el disco peletizador, se definieron parámetros fijos a las siguientes variables del proceso de peletizado.

- a) Velocidad de rotación de disco peletizador.
- b) Cantidad máxima de carga por proceso.
- c) Punto de aplicación de activador.
- d) Tiempo de proceso de peletizado.

Adicionalmente en esta etapa se ensayó una variante del proceso de peletizado para la formación de partidas de árido de prueba, donde la variable considerada fue:

- a) Ángulo de inclinación de disco peletizador.

Los parámetros comparativos, para calificar el proceso de peletizado y la calidad de los pellets obtenidos para las distintas modalidades son:

1. Factibilidad.
2. Rendimiento.  $\left( \frac{\text{Masa de material peletizado sobre malla N}^\circ 4}{\text{Masa Fuente de aluminosilicatos} + \text{Masa Activador alcalino}} \right)$
3. Esfericidad de partidas obtenidas.

En donde se definió como material peletizado a aquel por sobre malla n° 4, ya que se buscó obtener un agregado grueso liviano cuyas partículas permiten controlar las propiedades volumétricas del hormigón a formar.

### **3.2.2.1. Aplicación por separado de activadores.**

Se quiso observar cómo influye en el proceso de peletizado de árido geopolimérico, la aplicación por separado de la solución activadora. Donde el proceso de peletizado como tal, se realizó aplicando hidróxido de sodio, debido a su papel en la etapa inicial de la geopolimerización. Donde luego los pellets fueron impregnados con silicato de sodio durante su etapa de curado.

### **3.2.3. Obtención de árido liviano geopolimérico.**

Con el fin de seleccionar el árido geopolimérico a fabricar se tomaron tres parámetros de comparación a siete partidas que difieren en su dosificación (fuente de aluminosilicatos, activador alcalino). Los parámetros fueron, la densidad, absorción y resistencia a la rotura, medida mediante un Penetrómetro manual, a 1 día, a 6 días y a 8 días de curado en ambiente de laboratorio (20 °C y 60% HR).

El ensayo de dureza con penetrómetro se realizó aplicando una fuerza diametral a 20 pellet por edad y por partida. Porciones que fueron escogidas dentro de una banda granulométrica comprendiendo diámetros entre 10 a 12 mm.

#### **3.2.3.1. Utilización de núcleos de baja densidad para la obtención de pellet liviano.**

Se analizó la utilización de material de baja densidad, que cumpla la función de una semilla para los pellets, ya que debe ser capaz de ser envuelto por una capa de mezcla geopolimérica durante el proceso de peletización mediante el disco peletizador. Los materiales utilizados como semillas fueron:

- a) Esferas de poliestireno.
- b) Escoria gruesa (escoria natural tamizada bajo malla 3/8" y sobre malla N° 4).
- c) Pellet geopolimérico en base a ceniza volante.

### 3.2.4. Caracterización de árido geopolimérico óptimo.

Al árido escogido como óptimo, de acuerdo a los criterios establecidos en la sección 3.2.3, se le sometió a los ensayos de caracterización siguientes:

- a) Densidad aparente (NCh 1116 Of. 77).
- b) Densidad neta, densidad real y porcentaje de absorción (NCh 1117 Of 76)
- c) Granulometría (NCh 165).
- d) Determinación del desgaste de las gravas por el método de la Máquina de los Ángeles (NCh 1369).
- e) Determinación de la desintegración por sulfatos (NCh 1328)
- f) Reactividad potencial (ASTM C 1260-07)

Los ensayos de densidad aparente suelta, densidad compacta, densidad real saturada con superficie seca, absorción y porcentaje de huecos fueron realizados en la sección 3.2.3.

Ensayos como el desgaste por el método de la *Maquina de los Ángeles*, o la determinación de la desintegración por sulfatos, no son requeridos sin embargo, estas pruebas permiten evaluar distintas opciones de transporte del agregado, tiempo de amasado en la betonera, así como lugares, espacio, cuidados respecto al acopio del material y se logra una visión comparativa con los áridos usualmente utilizados como agregados para hormigón.

### 3.2.5. Comportamiento de hormigón con árido geopolimérico.

En esta etapa se comparó el comportamiento de cuatro series de hormigones, donde tres de ellos se compone de una matriz cementicia y se diferencian en el árido utilizado. La primera serie, se dosifica con árido natural (río Maipo), la segunda serie con arcilla expandida comercial, y la tercera, con árido geopolimérico óptimo definido en la etapa anterior. La cuarta serie de hormigón se conformó de una matriz geopolimérica y árido geopolimérico. Las probetas utilizadas poseen 7 cm de diámetro y 14 cm de altura, razón acorde a la norma NCh 1017, cumpliendo también con el diámetro mínimo exigido en función del tamaño máximo del árido a trabajar.

Las series de hormigones que se confeccionaron para comparar el desempeño del árido geopolimérico, arcilla expandida y árido natural, constaron de 5 probetas cada uno, para ser ensayadas a una edad de 28 días. Se dosificó el árido por volumen donde el tamaño máximo y mínimo de los áridos nombrados fue de 19 mm y de 4,75 mm respectivamente, y la lechada de cemento se trabajó con una razón agua-cemento ( $\frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}}$ ) equivalente a 0,5. Esto debido a la gran absorción que posee tanto el árido geopolimérico como el de arcilla expandida. Se elaboró una serie de 5 probetas con árido geopolimérico y matriz cementicia para ser ensayados a ciclos de hielo y deshielo, acorde a metodología usada en estudio titulado “*Influencia de los ciclos hielo-deshielo en la resistencia del concreto (caso Tunja)*” (45).

También se confeccionaron once probetas cilíndricas cuya matriz es geopolimérica a base de escoria de alto horno activada mediante una solución alcalina (NaOH a 12 M y Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> de razón SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O igual a 2), y el agregado ocupado fue el árido geopolimérico óptimo, donde seis se confeccionaron con vacíos, de tal manera de obtener un material poroso.

Finalmente se elaboraron 6 probetas para evaluar las ideas de manejo y trabajabilidad de la mezcla anterior para confeccionar hormigones porosos en probetas prismáticas de dimensiones 5 cm x 10 cm x 10 cm.

La tabla 13 resume los tipos de hormigones a evaluar, así como la cantidad de probetas y los ensayos a realizarse a cada set.

**Tabla 13 Series de hormigones a ensayar.**

Tipo de hormigón	N° Probetas	Ensayo
1 Matriz Cementicia + Árido Natural	5	Compresión
2 Matriz Cementicia + Arcilla Expandida	5	Compresión
3 Matriz Cementicia + Árido Geopolimérico	5	Compresión
	5	Ciclo de hielo y deshielo - Compresión
4 Matriz Geopolimérica + Árido Geopolimérico	5	Compresión
	6	Hormigón Poroso Pro. Cilíndrica - Compresión
	6	Hormigón Poroso Pro. Prismática - Compresión

#### 4. Materiales.

En esta sección describe lo relativo al origen y a las características propias de las materias primas utilizadas para la obtención de los áridos geopoliméricos.

##### 4.1. Escoria de alto horno.

La escoria de alto horno fue proporcionada por la empresa “*Compañía Siderúrgica Huachipato S.A. CAP*”. Esta fue entregada en 6 tinetas, siendo en total 100 kg de material. La figura 12 presenta la escoria de alto horno seca.



**Figura 12 Escoria granulada de alto horno (GBFS).**

Fuente (46)

El análisis químico realizado en IDIEM a la escoria utilizada corresponde a la serie N° 5820 presentado en la tabla 14, en la cual adicionalmente se presente el análisis químico proveniente del control de calidad de *CAP* presentando una densidad real de 2,87 g/cm<sup>3</sup>.

**Tabla 14 Análisis químico de la escoria de alto horno.**

Componentes	7019	6710	6445	6153	5820
<b>CaO</b>	36,7	35,1	35,6	35,5	<b>36</b>
<b>MgO</b>	6	8,2	7,6	7,1	<b>8,1</b>
<b>SiO<sub>2</sub></b>	34,2	33,3	33,6	34,4	<b>35,4</b>
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	15,4	15,8	15,3	14,1	<b>15,1</b>
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0	0	0	0	<b>0</b>
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	0,9	2,7	2	1,5	<b>1</b>



En base a los análisis químicos se concluyó que ésta escoria se encuentra en un área limítrofe entre las escorias ácidas y básicas, lo cual se indica en el siguiente diagrama de fases de la escoria. Acorde a los análisis químicos mostrados en la tabla 14, la escoria se encuentra en el área demarcada con color amarillo en la figura 13.

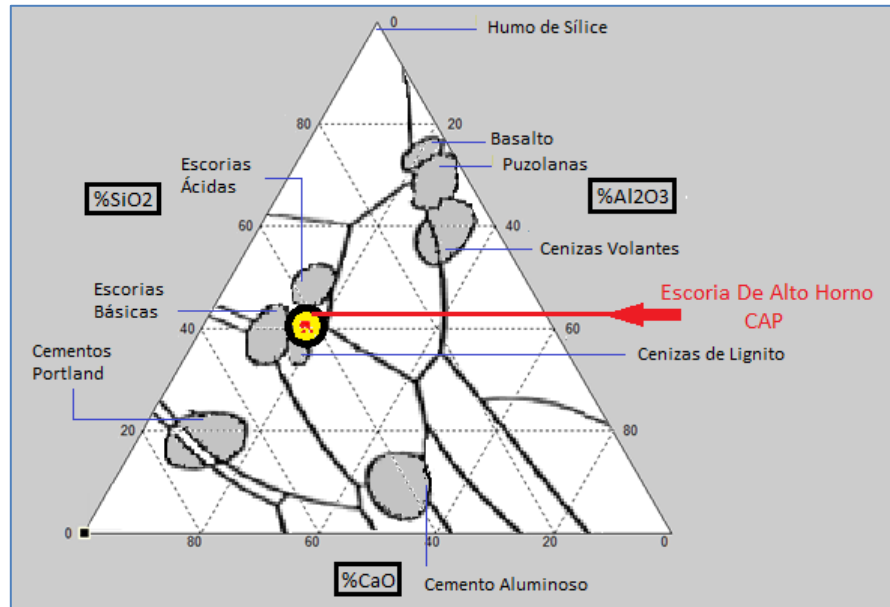


Figura 13 Diagrama de fases.

Fuente (23)

La difracción de rayos X realizado a una muestra de la escoria, se presenta a continuación.

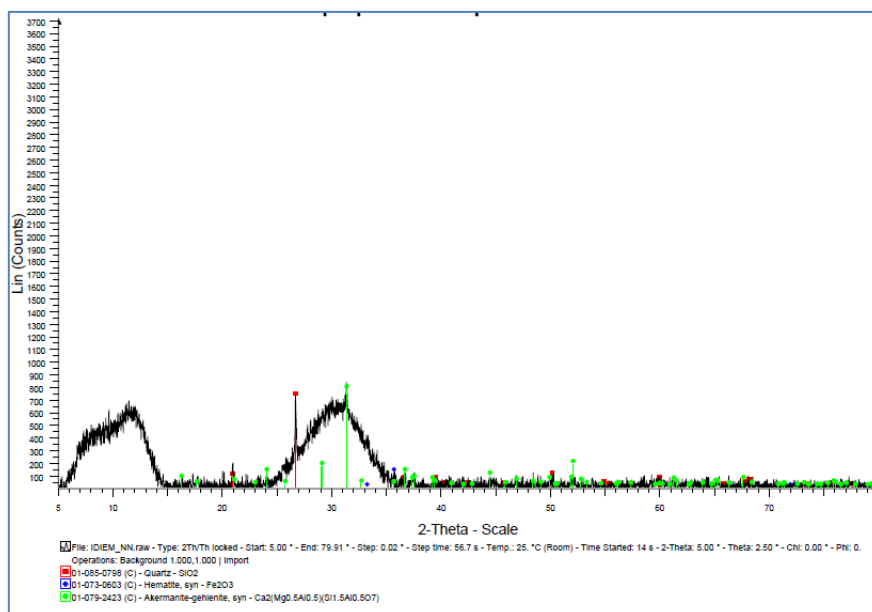


Figura 14 Análisis de difracción de rayos x a muestra de escoria de alto horno CAP. (N° 5820)

Acorde a la información entregada por este análisis, la escoria al ser principalmente amorfa, no se puede determinar numéricamente las fases cristalinas presentes dentro del material pero si se detectó la existencia de las siguientes fases cristalinas; Cuarzo, Hematita y fase Akermanita-Gelenita.

**Tabla 15 Identificación de fases cristalinas en la muestra escoria analizada.**

Código PDF-2	Nombre del compuesto	Formula
<b>01-085-0798</b>	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
<b>01-073-0603</b>	Hematita, syn	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
<b>01-079-2423</b>	Akermanita-Gelenita,syn	Ca <sub>2</sub> (Mg <sub>0,5</sub> Al <sub>0,5</sub> )(Si <sub>1,5</sub> Al <sub>0,5</sub> O <sub>7</sub> )

Estas fases minerales amorfas serian reactivas y polimerizables.

#### 4.1.1. Acondicionamiento de escoria de alto horno.

La escoria de alto horno proviene de un proceso de enfriado rápido, presentando un alto porcentaje de humedad siendo requerido secar en horno a una temperatura de  $105 \pm 5$  °C por un período de 24 h, en bandejas donde el material se dispuso con una altura de capa máxima de 1,5 cm presentado en la figura 15.



**Figura 15** Secado de escoria.

Luego pasó a un proceso de molienda, ajustando el número de vueltas a un total de 9.072 revoluciones alcanzando una finura sobre los  $3.400 \text{ cm}^2/\text{g}$ .



**Figura 16** Molino planta piloto IDIEM.

#### 4.2. Ceniza Volante.

La ceniza volante utilizada proviene de la División Ventanas de AES GENER, la que posee la siguiente composición química, obtenido mediante fluorescencia de radios X.

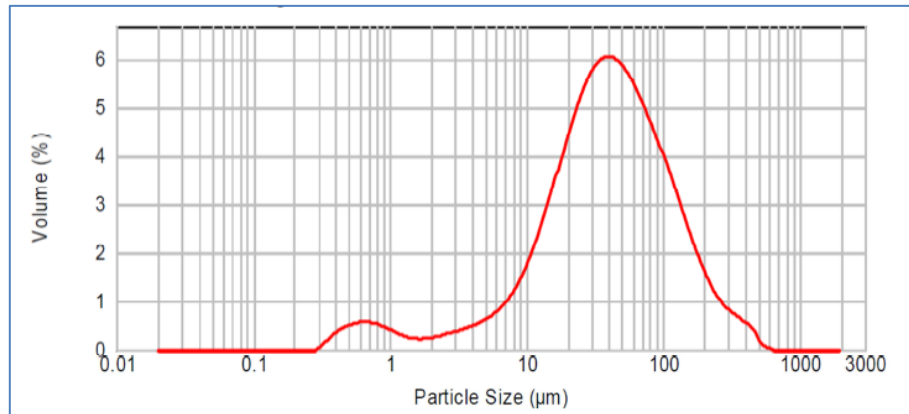
**Tabla 16 Análisis químico de ceniza volante.**

Oxido	Contenido
<b>Si<sub>2</sub>O</b>	55,1
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	26,5
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	8,5
<b>CaO</b>	4,4
<b>K<sub>2</sub>O</b>	2,3
<b>TiO<sub>2</sub></b>	1,1
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,6
<b>SO<sub>3</sub></b>	0,6

Fuente (47)

Debido a su composición química esta ceniza se puede clasificar como clase F acorde la norma *ASTM C 618*, debido a que la cantidad de calcio es menor a 5 % y la suma (Si<sub>2</sub>O+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) = 90,1 % es mayor a 70 %. Además la razón Si<sub>2</sub>O/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> = 2,08 por lo que posee en un buen comportamiento como fuente de aluminosilicatos para formación de geopolímeros.

La superficie específica (Blaine) de este material es de 6470 cm<sup>2</sup>/g y su curva granulométrica se ilustra en figura 17.



**Figura 17 Granulometría de ceniza volante.**

Fuente (47)

Mostrando que el material granular se encuentra entre 0,3 a 600 µm, con un tamaño promedio de partícula aproximado de 40 µm.

El ensayo de difracción de rayos X se presenta en la figura 18.

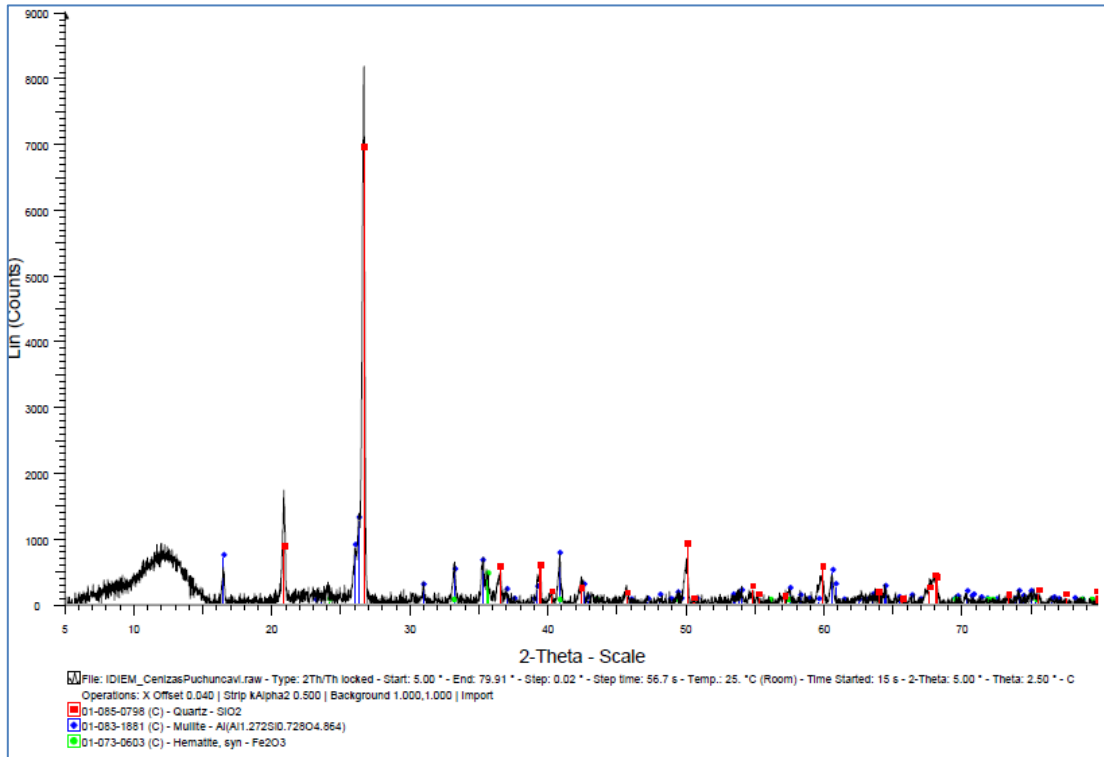


Figura 18 Análisis de rayos X de cenizas volantes División Ventanas.

Mostrando un material con un porcentaje cristalino superior al de la escoria, sin embargo, aún el porcentaje de material amorfo es mayor al cristalino, traduciéndose en un comportamiento hidráulico latente, pero menor al de la escoria de alto horno. Siendo las fases cristalinas presentes, Cuarzo, Mullita y Hematita, las que se enumeran en la tabla 17:

Tabla 17 Identificación de fases cristalinas en la muestra de cenizas volantes División Ventanas.

Código PDF-2	Nombre del compuesto	Formula
01-085-0798	Cuarzo	SiO <sub>2</sub>
01-083-1881	Mullite	Al(Al <sub>1,272</sub> Si <sub>0,728</sub> O <sub>4,864</sub> )
01-073-0603	Hematita, syn	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

Siendo las fases minerales amorfas detectadas reactivas ante la solución alcalina de hidróxido de sodio y silicato de sodio.

**4.2.1. Acondicionamiento de ceniza volante.**

La ceniza volante fue secada al igual que la escoria de alto horno, en horno a una temperatura de 105 ±5 °C por un periodo de 24 horas.

### 4.3. Solución alcalina activadora.

La solución alcalina activadora, es una mezcla de una solución de silicato de sodio en conjunto con una solución de hidróxido de sodio, caracterizadas a continuación.

#### 4.3.1. Silicato de sodio.

El silicato de sodio ocupado en la fase de peletización, fue proporcionado por “*Droguerías Michelson S.A.*” con las siguientes características mostradas en tabla 18, denominado como silicato de sodio N° 1. El silicato de sodio ocupado para la confección de hormigón geopolimérico fue proporcionado por *Austral Chemicals Chile S.A.*, denominado silicato de sodio N° 2 presentando las siguientes especificaciones.

**Tabla 18 Silicatos de sodio utilizados.**

Silicato de sodio N°1			Silicato de sodio N° 2		
Uso		Peletización	Uso		Hormigón geopolimérico
<b>Alcalinidad Total</b>	%Na <sub>2</sub> O	9,3	<b>Alcalinidad Total</b>	%Na <sub>2</sub> O	14,8
<b>Razón</b>	SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	3,2	<b>Razón</b>	SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> O	2,1
<b>Oxido de silicio</b>	%SiO <sub>2</sub>	29,8	<b>%SiO<sub>2</sub></b>	%SiO <sub>2</sub>	30,8
<b>Densidad a 20°C</b>	g/cm <sup>3</sup>	1,4	<b>Densidad a 20°C</b>	g/cm <sup>3</sup>	1,6
<b>Viscosidad a 20°C</b>	cps	400	<b>Viscosidad a 20°C</b>	cps	900
<b>Agua</b>	%H <sub>2</sub> O	60,9	<b>Agua</b>	%H <sub>2</sub> O	54,3
<b>Líquido Viscoso Opalescente</b>			<b>Líquido Viscoso Opalescente</b>		

Se utilizó el silicato de sodio N° 1 en la fase de peletización, debido a que sus características se ajustan al ocupado en el estudio realizado por *Le Anh-tuan Bui* y su equipo (40), probando la viabilidad de esta solución en la fabricación de pellets a base de escoria de alto horno, ceniza volante y ceniza de cascara de arroz. El silicato de sodio N° 2 se usó en para la confección de hormigón geopolimérico debido a los resultados parciales de un estudio en paralelo llevado a cabo por el laboratorio IDIEM a mezclas geopoliméricas.

### 4.3.2. Hidróxido de sodio.

El hidróxido de sodio, utilizado en la solución alcalina para la obtención del árido geopolimérico se usó en concentración 10 M. Para la obtención de la matriz geopolimérica en el caso de la confección de hormigón geopolimérico, la solución de hidróxido de sodio se dosificó con una concentración de 12 M.

#### 4.3.2.1. Acondicionamiento del hidróxido de sodio.

El hidróxido de sodio en forma de escamas con una pureza del 98 %, fue diluido en agua destilada a una concentración de 10 M. Esta solución debido a su alto potencial corrosivo y su reacción violenta exotérmica al mezclarse el hidróxido de sodio anhidro con agua, fue necesario la utilización de matraces capaces de manejar tales temperaturas.

A continuación se ilustra el procedimiento de cálculo de hidróxido de sodio anhidro necesario para obtener una solución 10 M, en un litro de agua.

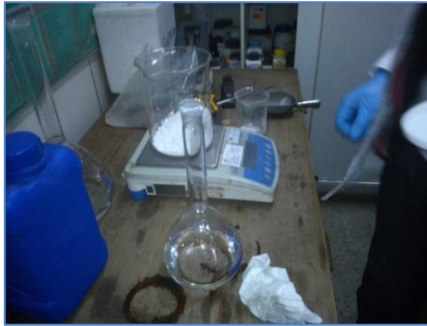
$$M(\text{NaOH}) = M(\text{Na}) + M(\text{O}) + M(\text{H}) \approx 22,990 + 15,999 + 1,007 = 39,996 \approx 40 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\text{Solución } 10\text{M (NaOH)} = \frac{10 \text{ moles (NaOH)}}{1 \text{ litro solución}} = \frac{10 \text{ moles (NaOH)} * 40 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{1 \text{ litro solución}} = \frac{400 \text{ g (NaOH)}}{1 \text{ litro solución}}$$

**Tabla 19 Solución de NaOH 10 M.**

Hidróxido de sodio (10 M)		
NaOH (escamas)	400	g
Solución (Agua destilada + NaOH)	1	l

En la figura 19 y figura 20 se ilustra el proceso de obtención de la solución de hidróxido de sodio (soda caustica) a 10 M, en el laboratorio.



**Figura 19 Pesaje de NaOH.**



**Figura 20 Agitador magnético.**

El proceso se ciñó a los estándares de seguridad propios de un laboratorio calificado para el manejo de estas soluciones. En la figura 20 el matraz ubicado a la derecha de la fotografía, posee un color blanquecino propio de la solución al estar por sobre los 90 °C, a medida que la mezcla se estabiliza y homogeniza, va perdiendo la efervescencia hasta quedar transparente.

La cantidad de hidróxido de sodio anhidro para formar una solución con una concentración de 12 M, es equivalente a 480 g por cada litro de agua, acorde a los cálculos presentados a continuación.

$$\text{Solucion } 12M (\text{NaOH}) = \frac{12 \text{ moles } (\text{NaOH})}{1 \text{ litro solución}} = \frac{12 \text{ moles } (\text{NaOH}) * 40 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{1 \text{ litro solución}} = \frac{480 \text{ g } (\text{NaOH})}{1 \text{ litro solución}}$$



#### 4.4. Cemento.

Para la fabricación de hormigones convencionales con áridos livianos se utilizó un cemento portland puzolánico de alta resistencia, presentando las siguientes características, tabla 20.

**Tabla 20 Cemento portland puzolánico.**

Ensayos	Unidad	M1	M2	M3	M4	M5	Promedio
<b>Peso Específico</b>		3,03	3,03	3,00	2,99	2,99	<b>3,01</b>
<b>Superficie específica</b>	cm <sup>2</sup> /g	3950	4200	4000	4000	4100	<b>4050</b>
<b>Tiempo de fraguado:</b>							
<b>Inicial</b>	h:min	2:50	3:00	3:10	3:00	2:50	<b>2:58</b>
<b>Final</b>	h:min	3:50	3:50	4:00	3:50	3:40	<b>3:50</b>
<b>Resistencias mecánicas</b>							
<b>Compresión a 7 días</b>	kgf/cm <sup>2</sup>	371	388	351	382	356	<b>369,6</b>
<b>Compresión a 28 días</b>	kgf/cm <sup>2</sup>	571	553	518	549	531	<b>544,4</b>

Muestras que corresponden al control de calidad realizado por el laboratorio IDIEM.

## 5. Equipos.

Este estudio se llevó a cabo en los laboratorios del *Instituto de Investigación y Ensayo de Materiales* IDIEM de la Universidad de Chile, ocupando los siguientes instrumentos, máquinas y equipos a lo largo del trabajo.

- *Horno.*

Se ocupó un horno eléctrico de cuatro bandejas con termostato y ventilador cuyo consumo eléctrico es 3 kWh, que permitía procesar una cantidad aproximada de 18 kg de escoria de alto horno envasada directamente del proceso de enfriado mediante la aplicación de agua a presión.

- *Balanzas.*

Las balanzas utilizadas para la dosificación fueron de sobremesa con una precisión de 0,1 gramos y de plataforma con una precisión de 10 gramos en el caso de utilizar cantidades de material sobre los 5 kg.

- *Agitador magnético.*

Se utilizaron agitadores magnéticos en el proceso de mezcla del hidróxido de sodio anhidro con agua. Asegurando homogeneidad y continuidad.

- *Disco peletizador.*

El disco peletizador básicamente es un tambor mezclador de fondo plano que gira con un ángulo de inclinación regulable con respecto a la vertical. El disco posee un diámetro de 70 cm con una profundidad de 10 cm, cuyos ángulos de trabajabilidad varía desde 0° hasta 90°.

A continuación se muestra el disco utilizado, esquematizando sus condiciones de operación: giro con respecto a su eje y del desplazamiento (pulso) normal al disco.



Figura 21 Disco peletizador

Giro del Disco

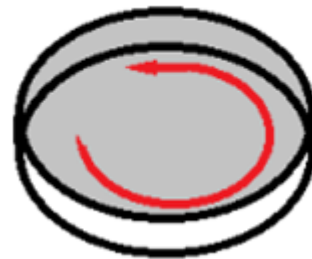
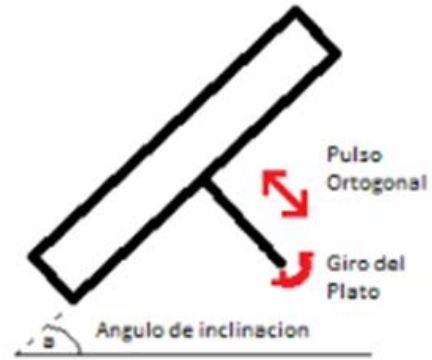


Figura 22 Esquematización de giro de disco peletizador.



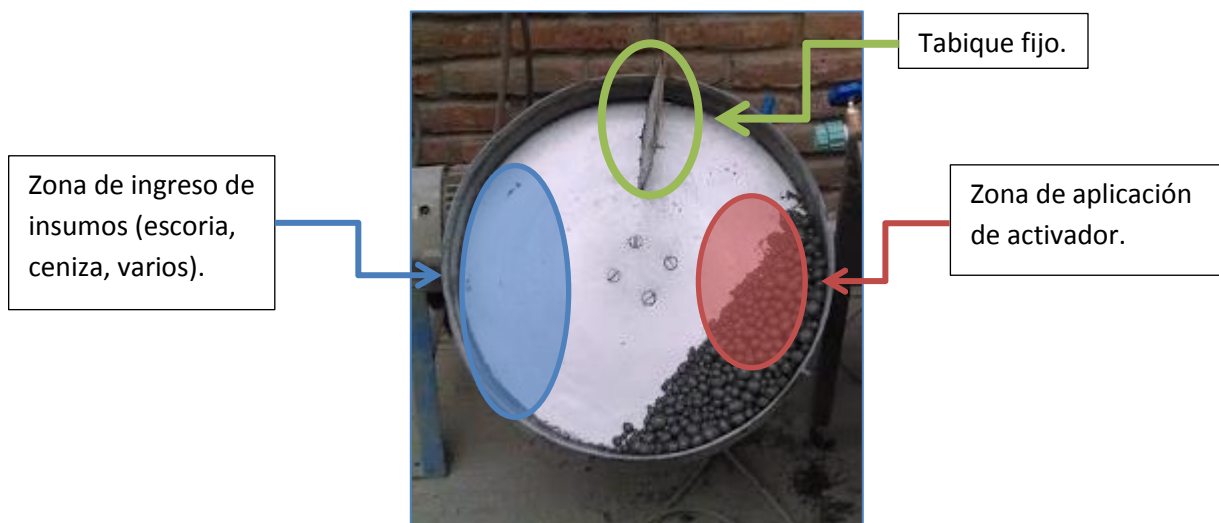
**Figura 23** Ajuste de ángulo de inclinación de disco peletizador.



**Figura 24** Esquemmatización de pulso según eje del tambor, ángulo de inclinación y giro del plato peletizador.

El disco posee un tabique fijo en la sección superior, el cual actúa como confinamiento para la mezcla dentro del tambor peletizador. El ángulo de inclinación del plato se fija como se muestra en la figura 23.

Durante la operación la mezcla dentro del disco recorre una trayectoria semicircular y debido a esto se definió como la zona de ingreso de material al sector izquierdo del plato y la zona de aplicación del activador al sector derecho del plato. A continuación se ilustra en la figura 25 esas zonas, la distribución de la mezcla dentro del disco en funcionamiento y el tabique fijo.



**Figura 25** Zonas en disco peletizador.



Figura 26 Imagen proceso peletizado.

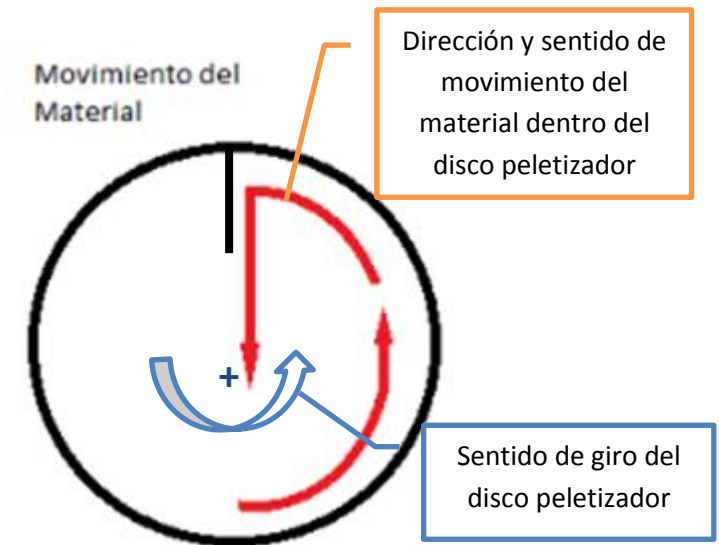


Figura 27 Esquematización de movimiento de material en disco peletizador.

- *Molino.*

Se ocupó un molino de bolas mostrado en la figura 16, con un consumo eléctrico de 1,9 kWh, que permite regular el tiempo de molienda a través de la cantidad de vueltas programadas a realizar ya que la velocidad de trabajo del molino es de 72 rpm. Al ser un molino de bolas esto requiere que el material a moler no posea humedad, ya que esto disminuye la eficiencia del proceso de molienda.

- *Penetrómetro.*

El penetrómetro utilizado corresponde a un penetrómetro manual, cuya graduación de medición de fuerza va desde 0 kgf hasta 100 kgf.

- *Prensa.*

Las probetas de hormigón fueron ensayadas en la Unidad Hormigones Laboratorio de IDIEM, a una velocidad de carga de 0,1 kN por segundo.

**6. Desarrollo experimental.**

**6.1. Ensayos para la obtención de pellets livianos geopolímeros.**

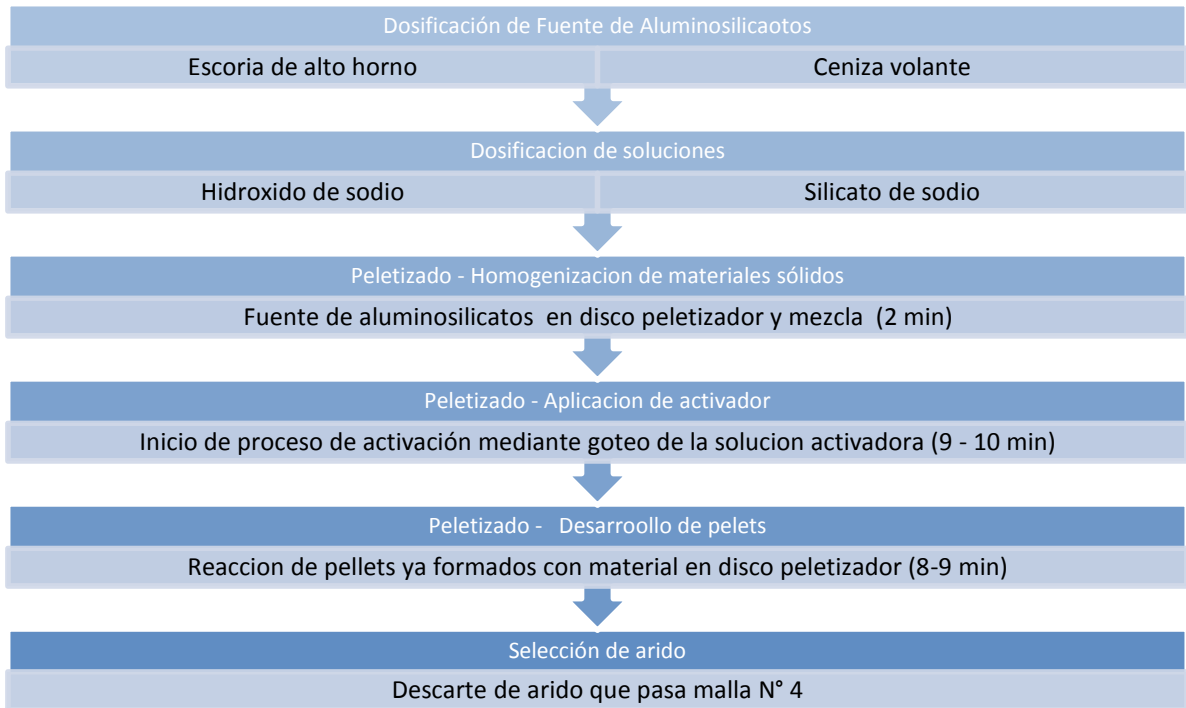
Etapa en la cual se buscó ajustar el ángulo de inclinación, fijando las variables detalladas en la tabla 21 y que corresponden a un trabajo similar (40). La cantidad neta de material a procesar, así como el tiempo de homogeneización, que corresponde a la etapa donde el material circula en el disco previa a la aplicación del activador, ya sea escoria de alto horno, ceniza volante o mezcla de ambos aluminosilicatos.

**Tabla 21 Parámetros fijos del proceso de peletizado.**

Parámetros		Cant.	Uni.	Descripción.
<b>Fuente de aluminosilicatos</b>	Masa inicial	1	kg	Escoria de alto horno, ceniza volante o mezcla de ambos.
	<b>Solución activadora Alcalina</b>	Solución hidróxido sodio	60	g
	Solución silicato de sodio	98	g	
<b>Parámetros generales</b>	Tiempo total	20	min	Proceso peletizado
	Tiempo de homogeneización	2	min	Desde el termino de la incorporación de los materiales
	Velocidad de rotación	25	rpm	Máxima velocidad del equipo.

Donde el proceso de peletizado se esquematiza a continuación.

**Tabla 22 Proceso de peletización.**



Se verificó que la velocidad de operación óptima para una masa de mezcla de 1 kg corresponde en este caso a 25 rpm (velocidad máxima). La aplicación de la solución de hidróxido de sodio y silicato de sodio se hizo mediante goteo, ajustado mediante una boquilla.

Los ángulos fueron evaluados acorde a la eficiencia de las partidas N° 1, N° 2, N° 3, N° 4 y N° 5, difiriendo precisamente en el ángulo de cada proceso de peletizado siendo detallados en la tabla 23, con los parámetros de peletizado mostrados en la tabla 21.

**Tabla 23 Parámetro variable del proceso de peletizado.**

Parámetro Variable	Partida 1	Partida 2	Partida 3	Partida 4	Partida 5
<b>Ángulo</b>	30°	41,25°	45°	52,5°	60°

### 6.1.1. Aplicación por separado de activadores.

De acuerdo a antecedentes (40) la activación de la escoria de alto horno y ceniza volante en el plato peletizador, se realiza aplicando la solución alcalina de hidróxido de sodio y silicato de sodio previamente homogenizados. Sin embargo estas dos soluciones cumplen un rol en distintas fases del proceso de geopolimerización, siendo el hidróxido de sodio protagonista de la fase inicial de la generación de los geopolímeros, y el silicato de sodio realiza su función en la fase de curado del material geopolimérico (21). Debido a esto se evaluó la aplicación por separado de los activadores, estableciendo los parámetros de peletizado en la tabla 24. Siendo los pellets resultantes de este proceso impregnados en un segunda etapa en silicato de sodio.

**Tabla 24 Parámetros de aplicación por separado de activadores.**

Parámetros		Cantidad	Unidad
<b>Fuente de aluminosilicatos</b>	Escoria de alto horno	1	kg
<b>Solución activadora alcalina</b>	Sol. hidróxido sodio	160	g
<b>Parámetros generales</b>	Tiempo	20	min
	Tiempo de homogenización	2	min
	Velocidad de rotación	25	rpm
	Ángulo	52,5°	grados

## 6.2. Obtención de árido liviano geopolimérico.

Esta etapa tiene como fin obtener un árido liviano de resistencia a trituración adecuada para su manejo en mezclas con un alto rendimiento de los materiales, por lo cual se generaron partidas mezclando escoria molida y ceniza volante, de esta forma estudiar cual es la influencia de distintas proporciones de estas dos fuentes de aluminosilicatos en la producción de los pellets geopoliméricos. También se analizó la utilización de material de relleno que cumpla la función de núcleo para la formación de pellets geopolimérico de baja densidad. La tabla 25 presenta las variables de composición estudiadas y las partidas.

**Tabla 25 Variables y partidas involucradas en búsqueda de pellet geopolimérico óptimo.**

Factor de estudio	Partidas Involucradas
<b>Razón (Escoria de alto horno/Ceniza volante)</b>	N° 7 - N° 8
<b>Núcleo</b> Escoria gruesa (escoria natural tamizada bajo malla 3/8" y sobre malla N° 4)	N° 9 - N° 10 - N° 11 - N° 12 - N° 13
Núcleos de poliestireno	N° 14 - N° 15
Pellet a base ceniza volante	N° 16A – N° 16B

Tras lo cual se generaron las partidas N° 17, N° 18 y N° 19, las que consideran las opciones de dosificaciones factibles de mayor resistencia a la trituración, mejor condiciones de esfericidad, redondez y rendimiento del proceso de peletizado.

### 6.2.1. Razón escoria de alto horno / ceniza volante.

Variando la composición de la fuente de aluminosilicatos se incluyeron series que incorporan ceniza volante y escoria molida en dos proporciones, generando las partidas N° 7 y N° 8 con los parámetros de peletizado mostrados en la tabla 26.

**Tabla 26 Peletizado escoria – ceniza - solución alcalina.**

Agente	Variables de composición	Partida 7	Partida 8
<b>Fuente de aluminosilicatos</b>	Escoria molida (g)	500	250
	Ceniza Volante (g)	500	750
<b>Solución activadora Alcalina</b>	Solución hidróxido sodio (g)	100	120
	Solución silicato de sodio (g)	160	200
<b>Parámetro general</b>	Ángulo (°)	52,5	52,5

## 6.2.2. Utilización de núcleos de baja densidad.

### 6.2.2.1. Núcleo de escoria gruesa.

Las partidas que involucran escoria gruesa y escoria molida, presenta los siguientes parámetros de peletizado.

**Tabla 27 Peletizado escoria- solución alcalina con núcleos de escoria gruesa.**

Agentes	VARIABLES DE COMPOSICIÓN	Partida 9	Partida 10	Partida 11
<b>Fuente de aluminosilicatos</b>	Escoria molida (g)	400	700	900
<b>Solución activadora Alcalina</b>	Solución hidróxido sodio (g)	60	60	60
	Solución silicato de sodio (g)	98	98	98
<b>Núcleo</b>	Escoria gruesa (g)	400	300	100
<b>Parámetro general</b>	Ángulo (°)	41,25	45	45

Las partidas N° 12 y N° 13 se confeccionaron con el fin de evaluar el comportamiento de pellets elaborados con la escoria molida y ceniza volante incorporando escoria gruesa (no molida) como núcleos del proceso de peletizado según se detalla en la tabla 28.

**Tabla 28 Peletizado ceniza - escoria – solución alcalina con núcleos de escoria gruesa.**

Agentes	VARIABLES DE COMPOSICIÓN	Partida 12	Partida 13
<b>Fuente de aluminosilicatos</b>	Escoria molida (g)	175	700
	Ceniza volante (g)	525	200
<b>Solución activadora alcalina</b>	Solución hidróxido sodio (g)	120	120
	Solución silicato de sodio (g)	200	200
<b>Núcleo</b>	Escoria gruesa (g)	300	100
<b>Parámetro general</b>	Ángulo (°)	45	45



### 6.2.2.2. Núcleo de poliestireno expandido (perlitas).

Las partidas que se confeccionaron con núcleos de poliestireno expandido, fueron peletizadas manteniendo constante la composición de la matriz geopolimérica variando solamente el tipo de núcleo incorporado como se indica en la tabla 29, donde la partida N° 14 tuvo una adición de esferas de poliestireno de 5 mm de diámetro mientras que la partida N° 15 tuvo una adición de una mezcla de esferas con diámetros de 10 mm, 15 mm y 25 mm.

**Tabla 29 Peletizado escoria - solución alcalina con núcleos de poliestireno expandido.**

Agentes	Variables de composición	Partida 14	Partida 15
<b>Fuente de aluminosilicatos</b>	Escoria molida (g)	1000	1000
<b>Solución activadora Alcalina</b>	Solución hidróxido sodio (g)	60	60
	Solución silicato de sodio (g)	98	98
<b>Núcleo</b>	Diámetro de esferas de poliestireno (mm)	5	10, 15 y 25
	Volumen de esferas de poliestireno (cc)	200	200
<b>Parámetro general</b>	Ángulo (°)	45	45

### 6.2.2.3. Núcleo de geopolímero a base de ceniza volante.

Se generó una partida peletizada en dos etapas, la primera etapa (partida 16A), se peletizó la ceniza volante para ser utilizada como núcleo, en la etapa siguiente (partida 16B), se peletizó escoria, incorporando núcleos de pellets de ceniza volante.

**Tabla 30 Peletización ceniza – solución activadora.**

Agente	Variables de composición	Partida 16A
<b>Fuente de aluminosilicatos</b>	Ceniza volante (g)	500
<b>Solución activadora alcalina</b>	Solución hidróxido sodio (g)	70,4
	Solución silicato de sodio (g)	114,8
<b>Parámetro general</b>	Ángulo (°)	52,5

**Tabla 31 Peletización escoria – solución activadora con núcleos a base de ceniza volante.**

Agente	Variables de composición	Partida 16B
<b>Fuente de aluminosilicatos</b>	Escoria de alto horno (g)	500
<b>Solución activadora alcalina</b>	Solución hidróxido sodio (g)	30
	Solución silicato de sodio (g)	50
<b>Núcleo</b>	Pellet de ceniza volante	450
<b>Parámetro general</b>	Ángulo (°)	52,5

### 6.2.3. Selección final de la composición y proceso de peletización para la obtención de áridos livianos geopoliméricos.

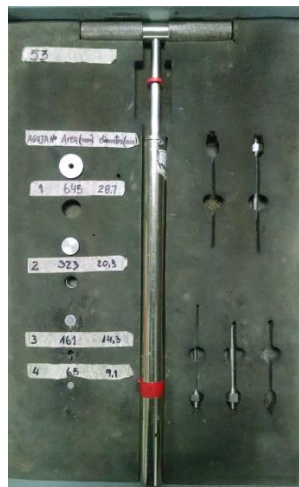
Para la fase final de selección del árido se generaron las siguientes tres partidas, donde las tres poseen dentro de su dosificación un 10 % de escoria gruesa, ya que este material resultó ser la mejor opción para ser utilizado como núcleo dentro del pellet.

La partida N° 11 presenta una dosificación que permite la mayor resistencia a la rotura y de esta forma conocer la resistencia máxima a este tipo de dosificación. La partida N° 17 se dosificó con el fin de conocer la resistencia a la rotura menor sin disminuir el rendimiento del proceso de peletizado. Finalmente la partida N° 13 presentó una dosificación que permite una resistencia intermedia entre las anteriores, mostrando una alta resistencia, y a la vez una baja densidad. Estas partidas fueron sometidas al ensayo utilizando el Penetrómetro con el fin de conocer el valor de rotura por pellet dentro de la banda granulométrica de 10 mm a 12 mm de diámetro.

**Tabla 32 Peletizado escoria – ceniza- solución activadora con núcleo de escoria gruesa para selección final.**

Agente	Parámetros	Partida 11	Partida 13	Partida 17
<b>Fuente de aluminosilicatos</b>	Escoria molida (g)	1800	1400	800
	Ceniza volante (g)	0	400	1000
<b>Solución activadora alcalina</b>	Solución hidróxido sodio (g)	180	240	240
	Solución silicato de sodio (g)	280	394	394
<b>Núcleo</b>	Escoria gruesa (g)	200	200	200
<b>Parámetro general</b>	Ángulo (°)	45	45	45

El ensayo de resistencia mecánica mediante el uso del penetrómetro se ilustra a continuación, donde se observa la dirección y forma de aplicación de la carga en el pellet. Y la placa base en que se deposita el pellet a ser comprimido y como éste falla ante la sollicitación de compresión puntual.



**Figura 28 Penetrómetro manual.**



**Figura 29 Placa base.**



**Figura 30** Ensayo con penetrómetro.



**Figura 31** Ejemplo de falla de pellet ensayado con penetrómetro.

### 6.3. Caracterización del árido geopolimérico obtenido por peletización.

A partir de las evaluaciones realizadas, se selecciona como óptimo el material resultante correspondiente a la partida N° 17, confeccionándose un volumen suficiente para efectuar los ensayos de caracterización. Estos ensayos fueron los siguientes:

- g) Densidad aparente (NCh 1116 Of. 77).
- h) Densidad Neta, Densidad Real y Porcentaje de Absorción (NCh 1117 Of.76)
- i) Granulometría (NCh 165).
- j) Determinación del desgaste por el método de la Máquina De Los Ángeles (NCh 1369).
- k) Determinación de la desintegración por sulfatos (NCh 1328)

Los ensayos de densidad aparente suelta, densidad compacta, densidad real saturada con superficie seca, absorción y porcentaje de huecos fueron realizados en la sección 6.2.3.

Se decidió además hacer el ensayo de reactividad potencial álcali-árido (ASTM C 1260), esto debido a la utilización de soluciones activadoras alcalinas ricas en sílice que podrían interactuar con el cemento Portland. Las probetas de mortero correspondientes se confeccionaron con árido geopolimérico (fracción fina), tabla 33.

**Tabla 33 Dosificación de áridos ASTM C 1260.**

Pasa el Tamiz	Retiene el Tamiz	Masa %
4,75 mm (N° 4)	2,40 mm (N° 8)	10
2,40 mm (N° 8)	1,20 mm (N° 16)	25
1,20 mm (N° 16)	0,60 mm (N° 30)	25
0,60 mm (N° 30)	0,30 mm (N° 50)	25
0,30 mm (N° 50)	0,15 mm (N° 100)	15

Este material fue obtenido por la acumulación del material descartado del proceso de peletizado, ya que se encontraba bajo la malla n° 4, pero este se guardó con el sólo propósito de ser usado para éste ensayo. El cemento usado para la confección de este ensayo fue cemento Portland que cumple con la norma ASTM C 150 y cuya expansión en autoclave es menor a 0,2%. La razón agua-cemento ocupada fue igual 0,47.

Las probetas para ensayo de reactividad potencial, y los moldes correspondientes se muestran en las figuras siguientes.



Figura 32 Molde probetas ASTM C 490.



Figura 33 Probetas ASTM C 1260.

### 6.4. Comportamiento de hormigón con árido geopolimérico.

En esta etapa se comparó el comportamiento de cuatro series de hormigones, donde tres de ellos se compone de una matriz cementicia y se diferencian en el árido utilizado. La primera serie, se dosifica con árido natural (río Maipo), la segunda serie con arcilla expandida comercial, y la tercera, con árido geopolimérico optimo definido en la etapa anterior. La cuarta serie de hormigón se conformó de una matriz geopolimérica y árido geopolimérico.

La matriz cementicia, se dosificó con una razón agua-cemento igual a 0,5 para asegurar penetración de la lechada por los vacíos durante la confección de las probetas con árido pre-empacado saturado. Esta lechada, se mezcló durante 2 minutos, para luego dar paso a la confección de las probetas. El proceso de mezcla de la lechada geopolimérica, se realizó de la misma forma pero variando el tiempo de mezcla, donde para las lechadas de razón de 0,55, se mezcló durante 30 segundos, mientras que para la lechada de razón 0,65 se mezcló durante 1 minuto. Esta reducción de tiempo de mezcla de la lechada geopolimérica en comparación con la lechada cementicia, se debe al bajo tiempo de inicio de la lechada geopolimérica, debido a la cinética de reacciones de la solución activadora con la escoria de alto horno.

Las probetas de hormigón se elaboraron en moldes cilíndricos y prismáticos. Las identificación de cada tipo de probetas, se conforman de pares de letras, donde el primer par hace referencia al tipo de matriz, siendo matriz cementicia (MC) o matriz geopolimérica (MG). El segundo par hace referencia al tipo de árido, siendo árido natural de rio (AN), arcilla expandida (AE). El tercer par hace referencia a condiciones de ensayo especiales tales como, ciclos de hielo y deshielo (CH), probeta de hormigón poroso (HP), probeta de hormigón poroso prismático (PP). Aquellas siglas que terminan con un número, hacen referencia a la razón activador-escoria, la cual fue de 5,5 (código 5) y razón 6,5 (código 6). La tabla 34 resume los códigos y su significado.

**Tabla 34 Leyenda de codificación de probetas.**

Primer Par		Segundo Par		Tercer Par		Numero	
Código	Significado	Código	Significado	Código	Significado	Código	Significado
MC	Matriz cementicia	AN	Árido natural	CH	Ciclo de hielo y deshielo	55	Razón 5,5
MG	Matriz geopolimérica	AE	Arcilla expandida	HP	Hormigón poroso	66	Razón 6,5
		AG	Árido geopolimérico	PP	Hormigón poroso probeta prismática		

Por ejemplo una serie de probeta identificada como MG-AG-HP-55, hace referencia a aquellas formadas con una matriz geopolimérica con árido geopolimérico, para la confección de hormigón poroso a una razón de activador-escoria igual a 5,5.

La tabla 35 se presenta el detalle de las probetas por tipo de hormigón.

**Tabla 35 Detalle de probetas por tipo de hormigones.**

Tipos de hormigón	Sigla	Razón A/C* o Ac/EH**	Edad de Ensayo	N° Probetas	Tipo de probeta
<b>Matriz Cementicia + Árido Natural</b>	MC-AN	0,5	28 días	5	Cilíndrica
<b>Matriz Cementicia + Arcilla Expandida</b>	MC-AE	0,5	28 días	5	Cilíndrica
<b>Matriz Cementicia + Árido Geopolimérico</b>	MC-AG	0,5	28 días	5	Cilíndrica
	MC-AG-CH	0,5	72 días	5	Cilíndrica
<b>Matriz Geopolimérica + Árido Geopolimérico</b>	MG-AG	0,65	28 días	5	Cilíndrica
	MG-AG-HP-65	0,65	28 días	3	Cilíndrica
	MG-AG-HP-55	0,55	28 días	3	Cilíndrica
	MG-AG-PP-55	0,55	56 días	3	10 x 10 x5 cm
	MG-AG-PP-65	0,65	56 días	3	10 x 10 x5 cm

- \* Razón Agua-Cemento.
- \*\* Razón Activador-Escoria de alto horno.

Las probetas cilíndricas se confeccionaron en moldes de PVC de 7 cm de diámetro interior y 14 cm de altura. Se llenaron en tres capas, donde en primer lugar se depositó el árido correspondiente, para luego descargar la lechada (cementicia o geopolimérica), y vibrar durante 20 segundos mediante el uso de una mesa vibradora. Proceso que se repite dos veces más, hasta alcanzar la altura total de la probeta, donde finalmente se enraso para darle un acabado plano a la cara superior.

Las probetas prismáticas (losetas), mencionadas en la sección 3.2.5, fueron confeccionadas en moldes de malla metálica con dimensiones interiores de 5 cm x 10 cm x 10 cm. El proceso de confección consistió en pre-mezclar el árido peletizado con la lechada geopolimérica, para luego depositar esta mezcla en los moldes de malla metálica, para finalmente ser vibrados durante 20 segundos en la mesa vibradora, con el fin de retirar todo exceso de lechada y sólo dejar en el molde, una mezcla formada esencialmente por pellets con una fina capa de lechada geopolimérica.

A continuación se ilustran el molde cilíndrico y el molde 10 x 10 x 5 cm.



Figura 34 Molde cilíndrico PVC.



Figura 35 Molde 10 x 10 x 5 cm malla metálica.

Las dosificaciones de los hormigones con áridos pre-empacados se realizó en función del volumen requerido dependiendo el tipo de probeta y árido (árido geopolimérico, arcilla expandida, o árido de río). Mostrándose a continuación la dosificación por probeta en la tabla 36:

Tabla 36 Dosificaciones por tipo de hormigón.

Tipo de Hormigón	Árido (g/litro)	Cemento (g/litro)	Agua (g/litro)
<b>MC-AG</b>	943	609	305
<b>MC-AE</b>	527	802	401
<b>MC-AN</b>	1329	543	271

La dosificación para el hormigón de matriz geopolimérica con árido geopolimérico se muestra en la tabla 37.

Tabla 37 Dosificación hormigón MG-EG.

Tipo de Hormigón	Árido (g/litro)	Escoria de alto horno (g/litro)	Hidróxido de sodio (g/litro)	Silicato de sodio (g/litro)
<b>MG-EG</b>	951	743	183	300



**7. Resultados.**

**7.1. Ensayos para la obtención de áridos geopoliméricos por peletización.**

La búsqueda del ángulo de trabajo del proceso de peletizado, descrito en la sección 6.1, entrega los rendimientos mostrados en la tabla 38, de las partidas N° 1, N° 2, N° 3, N° 4 y N° 5, cuyas dosificaciones se encuentran en la tabla 21. Los rendimientos se calcularon mediante la división del pellet obtenido del proceso de peletizado por sobre la malla N° 4 dividido por la masa del material inicial, el cual contempla la masa de la fuente de aluminosilicatos y la masa del activador alcalino, como se muestra en la siguiente formula.

$$Rendimiento = \left( \frac{Masa\ de\ material\ peletizado\ sobre\ malla\ N^{\circ}\ 4}{Masa\ fuente\ de\ aluminosilicatos + Masa\ activador\ alcalino} \right)$$

**Tabla 38 Rendimientos partidas 1-5.**

Parámetros	Partida 1	Partida 2	Partida 3	Partida 4	Partida 5
Ángulo de disco peletizador (°)	30	41,25	45	52,5	60
Pellet sobre malla N° 4 (g)	NF*	652	890	933	NF*
Rendimiento (%)	-	56	77	80	-

(\*) NF= No Factible



**Figura 36 Partida N° 3.**

### 7.1.1. Aplicación por separado de activadores.

La partida N° 6 consideró dos etapas en la peletización utilizando hidróxido de sodio como solución activadora y su proceso de curado fue impregnado con silicato de sodio observándose una aglomeración de los pellets que hacen impracticable esta solución.

### 7.1.2. Proceso de peletizado óptimo.

En conjunto con los datos obtenidos, y las observaciones del comportamiento del proceso de peletizado, se estimó los siguientes parámetros como óptimos en la generación del pellet geopolimérico.

**Tabla 39 Parámetros peletizado óptimo.**

Agente	Parámetros	Cantidad	Unidad
<b>Parámetros generales</b>	Tiempo total	20	min
	Tiempo de homogenización	2	min
	Velocidad del disco	25	rpm
	Ángulo	52,5°	grados

Sin embargo el ángulo utilizado en el proceso de peletización varía en función del tipo de material de baja densidad (núcleos de poliestireno, escoria gruesa, etc.) utilizados como núcleos en el proceso de peletizado. Debido a esto al utilizarse material como núcleo en el proceso, se evidenció que la mejor opción es emplear el ángulo de trabajo de 45°, aún cuando el óptimo resultado ser 52,5° en las pruebas de peletización. Se buscó trabajar con una carga constante de un kilogramo de material sólido a peletizar debido a la facilidad de poder controlar el material de trabajo, mediante el peso en comparación con el volumen y de esta manera facilitar la comparación entre partidas.

## 7.2. Obtención de árido liviano geopolimérico.

### 7.2.1. Razón escoria de alto horno / ceniza volante.

La tabla 40 presenta los rendimientos de las partidas N° 7 y N° 8, partidas donde se evaluó el desempeño de la mezcla escoria con ceniza volante dentro del proceso de peletizado, cuyas dosificaciones se encuentran en la tabla 26.

**Tabla 40 Rendimiento partidas 7-8.**

Parámetros	Partida 7	Partida 8
<b>Pellet sobre malla N° 4 (g)</b>	1004	964
<b>Rendimiento (%)</b>	80	73

### 7.2.2. Utilización de núcleo de baja densidad.

#### 7.2.2.1. Núcleo de escoria gruesa (no molida).

La tabla 41 muestra los rendimientos de las partidas N° 9, N° 10 y N° 11. Partidas que evaluaron la utilización de diferentes porciones de escoria molida y escoria gruesa como núcleo en el proceso de peletización, cuyas dosificaciones se encuentran en la tabla 27. Los rendimientos se calcularon mediante la división del pellet obtenido del proceso de peletizado por sobre la malla N° 4 dividido por la masa del material inicial, el cual contempla la masa de la fuente de aluminosilicatos, la masa del material ocupado como núcleo y la masa del activador alcalino, como se muestra en la siguiente formula.

$$\text{Rendimiento} = \left( \frac{\text{Masa de material peletizado sobre malla N° 4}}{\text{Masa fuente de aluminosilicatos} + \text{Masa de núcleos} + \text{Masa activador alcalino}} \right)$$

**Tabla 41 Rendimiento partidas 9-11.**

Parámetros	Partida 9	Partida 10	Partida 11
<b>Pellet sobre malla N° 4 (g)</b>	453	731	921
<b>Rendimiento (%)</b>	47	63	79

La figura 37 muestra como la utilización de núcleos de escoria gruesa a razón del 30 % con respecto al material sólido a peletizar (fuente de aluminosilicatos más núcleos), determina la formación de pellets no uniformes, presentando huecos, y formas cóncavas, además de zonas de escoria no reaccionada, que se traducen en partículas defectuosas.



**Figura 37 Partida N° 10.**

Las partidas N° 12 y N° 13, son partidas que buscan evaluar la interacción de escoria molida y ceniza volante, incorporando núcleos de escoria gruesa (no molida) dentro del proceso de peletizado, cuyas dosificaciones se presenta en la tabla 27. Los resultados del proceso de peletización de estas partidas se presentan en la tabla 42 y la calidad de las partículas se muestran en la figura 38 y figura 39.

**Tabla 42 Rendimiento partidas N° 12 - N° 13.**

Parámetros	Partida 12	Partida 13
Escoria peletizada (Sobre Malla N° 4) (g)	1033	1020
Rendimiento (%)	78	77



**Figura 38 Partida N° 12.**



**Figura 39 Partida N° 13.**

En la tabla 43, se resumen los resultados de determinación de densidades aparentes sueltas y compactadas de las partidas de árido peletizado de mayor relevancia, las cuales son las N° 3, N° 4, N° 9, N° 11, N° 12 y N° 13.

**Tabla 43 Densidad aparente suelta y compacta.**

Partidas	Densidad Aparente Suelta (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Compactada (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Partida 3</b>	1,12	1,19
<b>Partida 4</b>	1,12	1,18
<b>Partida 9</b>	0,56	0,60
<b>Partida 10</b>	0,71	0,76
<b>Partida 11</b>	1,00	1,05
<b>Partida 12</b>	0,57	0,63
<b>Partida 13</b>	1,02	1,11

Las partidas N° 1 y N° 5 son descartadas debido a su no factibilidad. Las partidas N° 2 y N° 6 son descartadas por su bajo rendimiento y las partidas N° 7 y N° 8 son descartadas por su baja resistencia mecánica.

### 7.2.2.2. *Núcleo de poliestireno expandido.*

Las partidas N° 14 y N° 15, correspondientes a las partidas con incorporación de núcleos de poliestireno expandido, cuyas dosificaciones se presentan en la tabla 29, produjeron pellets no homogéneos con baja esfericidad y redondez, donde el poliestireno en vez de estar embebido dentro de una capa geopolimérica, éste se presenta adherido a la maza del pellet.

### 7.2.2.3. *Núcleo de geopolímero a base de ceniza volante.*

La partida N° 16 corresponde al proceso de peletizado en dos etapas; la primera se peletizó solo ceniza volante para luego estos pellets ser ocupados en la segunda etapa de peletizado como núcleo en conjunto con escoria de alto horno, cuyos parámetros se encuentran en la tabla 30 y tabla 31.

En la primera etapa se formaron pellets con tamaño máximo de 30 mm, sin embargo estos pellets no poseen resistencia mecánica además de ser un proceso de muy baja eficiencia (38%) como se muestra en la figura 40, donde gran porcentaje de la ceniza no reaccionó y al entrar en la segunda fase estos pellets no pueden ser utilizados como núcleos debido a que el proceso del disco peletizador los disgrega y la escoria de alto horno reacciona formando pellets por si sola y no como capa exterior de los núcleos de ceniza volante.



**Figura 40 Partida N° 16A.**

**7.2.3. Selección final.**

Acorde a los datos obtenidos, se selecciona las partidas que dieron origen a pellets de características aceptables para árido liviano correspondiendo a las partidas N° 3, N° 9, N° 11 y N° 13, donde las partidas N° 3 y N° 9 son partidas patrones de máxima y menor densidad respectivamente. En la tabla 44 se presentan los resultados de las propiedades de estos pellets

**Tabla 44 Densidad real saturada superficie seca (Dr sss), seca (Dr s), neta (D n), absorción y porcentaje de huecos.**

Partidas	Densidad Suelta (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad Compactada (g/cm <sup>3</sup> )	Dr sss (g/cm <sup>3</sup> )	Dr s (g/cm <sup>3</sup> )	D n (g/cm <sup>3</sup> )	Absorción (%)	Huecos (%)
<b>Partida 3</b>	1,1	1,2	2,1	1,8	2,5	15	38,8
<b>Partida 9</b>	0,6	0,6	1,3	1,0	1,4	30	44,4
<b>Partida 11</b>	1,0	1,1	1,8	1,6	2,1	15	37,6
<b>Partida 13</b>	1,0	1,1	1,8	1,7	2,1	11	40,1

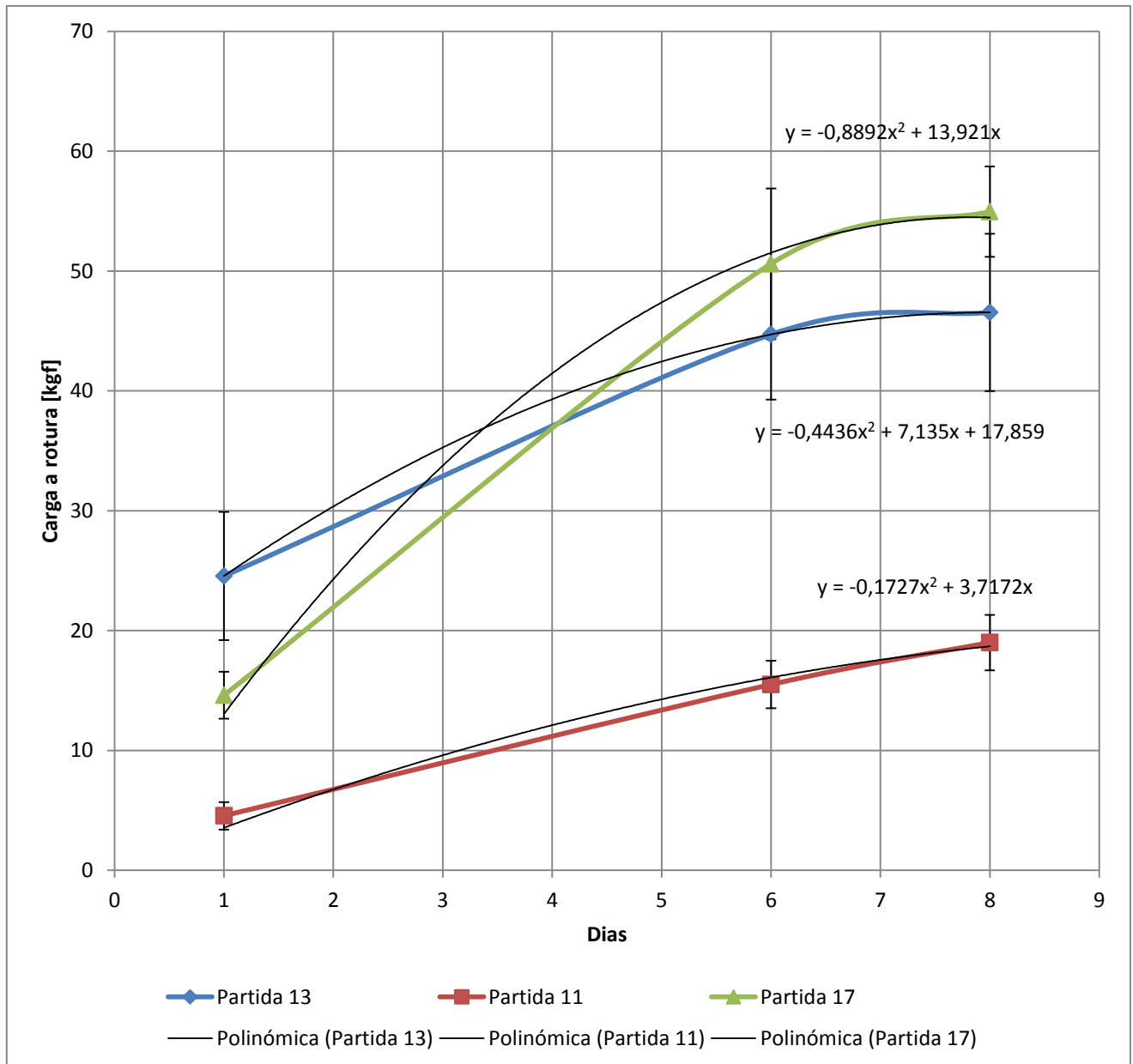
La partida N° 4 se descartó debido a que la partida N° 3 posee mayor densidad compacta y densidad aparente suelta, siendo un mejor representante de la partida con mayor densidad posible. Se descartaron las partidas N° 10 y N° 12 debido a su baja esfericidad y redondez. A la vez se descarta la partida N° 3 ya que se dosificó a partir de escoria molida en su totalidad, no utilizando ceniza volante o núcleos de escoria gruesa (no molida) y la partida N° 9 se descarta debido a su bajo rendimiento y a la generación de pellets defectuosos.

Por otra parte, en la tabla 45 se presentan los resultados obtenidos del ensayo de resistencia mecánica bajo carga concentrada (penetración) ejecutados a las partidas N° 11, N° 13 y N° 17, cuyos parámetros se presentan en la tabla 32, siendo las mejores opciones de generar pellets geopolimérico de baja densidad con buen comportamiento mecánico, esto debido a las características cualitativas en la sección 6.2.3.

**Tabla 45 Valor de rotura (ensayo de resistencia mecánica).**

Partidas	Partida 11			Partida 13			Partida 17		
Días	1	6	8	1	6	8	1	6	8
Unidad	kgf	kgf	kgf	kgf	kgf	kgf	kgf	kgf	kgf
<b>Promedio</b>	14,6	51	55,2	24,6	44,5	46,6	4,6	15,5	18,7
<b>Desviación</b>	<b>2,0</b>	<b>6,3</b>	<b>3,8</b>	<b>5,4</b>	<b>5,4</b>	<b>6,6</b>	<b>1,1</b>	<b>2,0</b>	<b>2,3</b>

En el figura 41 se presentan las curvas de comportamiento de los distintos pellets en el ensayo de resistencia mecánica en función de la edad de ensayo.



**Figura 41 Resistencia mecánica en función de la edad de ensayo.**

Observando que las partidas N° 11, N° 13 y N° 17 alcanzan su mayor resistencia a las edades aproximadas de 7,8, 8,0 y 10,8 días, respectivamente. Diferencia dada por el contenido de escoria de alto horno, ya que a mayor porcentaje de este material, mayor velocidad de reacción posee, traduciéndose en una menor cantidad de días para adquirir la resistencia máxima.



### 7.2.4. Árido geopolimérico liviano óptimo.

La selección del árido geopolimérico óptimo, se obtuvo teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Esfericidad y redondez.
- Densidad real saturada con superficie seca y densidad aparente suelta.
- Resistencia mecánica (Penetrómetro).

Además de la factibilidad y rendimiento del proceso en la generación de pellets como árido liviano geopolimérico. La tabla 46 presenta la que resume los resultados obtenidos de las partidas N° 1 a la partida N° 17.

**Tabla 46 Resumen de partidas N° 1 a N° 17.**

Partida N°	Composición (% en peso del material sólido)			Poliestireno expandido (cm <sup>3</sup> )	Características de los pellets			Observaciones
	EH <sup>1</sup>	CV <sup>2</sup>	ENM <sup>3</sup>		Forma	Densidad aparente suelta (g/cm <sup>3</sup> )	Resistencia Mecánica (8 días) (kgf)	
1	100	0	0	0	Esférico	-	-	No factible
2	100	0	0	0	Esférico	1,11	-	Descartado - Bajo rendimiento
3	100	0	0	0	Esférico	1,11	-	Descartado - Buen rendimiento, pero solo utiliza escoria molida.
4	100	0	0	0	Esférico	1,11	-	Descartado - Buen rendimiento, pero acepta poco volumen de material a peletizar.
5	100	0	0	0	Esférico	-	-	No factible
6	100	0	0	0	Aglomeración amorfa	-	-	Descartado - Bajo rendimiento y presenta aglomeración de pellets
7	50	50	0	0	Esférico	1,06	-	Descartado - No utiliza núcleo.
8	25	75	0	0	Esférico	1,00	-	Descartado - Nula resistencia mecánica
9	50	0	50	0	Amorfo	0,56	-	Descartado - Pellets defectuosos
10	70	0	30	0	Amorfo	0,71	-	Descartado - Pellets defectuosos
11	90	0	10	0	Esférico	1,00	55,2	Descartado - No utiliza ceniza volante
12	18	52	30	0	Esférico con irregularidades	0,57	-	Descartado - Pellets defectuosos
13	70	20	10	0	Esférico	1,00	46,6	Óptimo
14	100	0	0	200	Amorfo	-	-	Descartado - Pellets defectuosos
15	100	0	0	200	Amorfo	-	-	Descartado - Pellets defectuosos
16	50	50 P <sup>4</sup>	0	0	Esférico	-	-	Descartado - Bajo rendimiento y presenta aglomeración de pellets
17	40	50	10	0	Esférico	0,98	18,7	Descartado - Baja resistencia mecánica

EH: Escoria de alto horno; CV: Ceniza volante; ENM: Escoria no molida; P: Peletizada previamente.

De los ensayo se deriva que la partida N° 17 presenta un comportamiento significativamente más bajo (70 %) que la partida N° 11, que se utilizó como patrón. Ésta solo contenía escoria molida por lo que se traduce en una mayor resistencia mecánica como lo refleja el ensayo de resistencia mecánica presentando el mejor comportamiento mecánico, superior al de las partidas N° 13 y N° 17. La partida N° 17 mostró un buen comportamiento mecánico donde su diferencia con la partida N° 19 fue de solo un 13%. De lo anterior se deduce que la dosificación de la partida N° 13 corresponde a la óptima para la obtención de árido liviano geopolimérico según el procedimiento en estudio.

La partida N° 13 ocupó ceniza volante en una razón de 20 % con respecto al material sólido a peletizar, ya que no muestra cambio significativo en la propiedad de densidad o absorción de humedad con un 10 %, pero si ya con un 20 % se disminuye la absorción de agua en un 25%, se aumenta la esfericidad de los pellets y el llenado de la escoria gruesa. Si se ocupa una razón del 50 % de escoria como la partida N° 7, el pellet obtenido es de buen tamaño (tamaño máximo superior a 25 mm), sin embargo no poseen resistencia mecánica. Por estas razones se escogieron las proporciones de las partidas N° 11, N° 13 y N° 17, para ensayo de resistencia mecánica, determinando cuál de estas partidas refleja un mejor comportamiento mecánico

### 7.3. Caracterización de árido geopolimérico.

A continuación, se muestran los resultados de la caracterización del árido considerado como óptimo el cual corresponde de acuerdo a tabla 46, a la partida N° 13.

#### 7.3.1. Determinación del desgaste por el método de la Máquina de Los Ángeles. (NCh 1369)

El pellet formado conforme de la dosificación de la partida N° 13, fue evaluado frente a sollicitación por desgaste mediante la máquina de los Ángeles, método de ensayo NCh 1369.

**Tabla 47 Determinación del desgaste por el método de la Máquina De Los Ángeles.**

Parámetros	Resultado
Grado de ensayo	5
Fracción sometido a ensayo (mm)	20-10
Pérdida de masa de la muestra (%)	44,2

Según la práctica, áridos con pérdidas por desgaste menores a 50 % pueden ser utilizados para todo tipo de hormigón, excepto para hormigones sometidos a desgaste directo (pavimentos).

#### 7.3.2. Características granulométricas.

El ensayo de granulometría acorde a norma NCh 165, se presenta en la tabla 48 y en la figura 47. El tamaño máximo y el módulo de finura del árido se incluyen en la tabla 49.

**Tabla 48 Ensayo de granulometría.**

Tamices		Porcentaje que pasa (en peso)
ASTM	mm	M1
2"	50	-
1 1/2"	37,5	-
1"	25	100
3/4"	19	99
1/2"	12,5	46
3/8"	9,5	17
4	4,75	1
8	2,36	-
16	1,18	-
30	0,60	-
50	0,30	-
100	0,15	-

**Tabla 49 Tamaño máximo y módulo de finura.**

Parámetro	Resultado
Tamaño máximo nominal (mm)	19
Módulo de finura	6,83

**7.3.3. Determinación de la desintegración por sulfatos (NCh 1328).**

La Tabla 50 presenta el resultado del ensayo de la desintegración ante sulfatos, ensayo que permite evaluar el comportamiento frente a ciclos de expansión interna por cristalización de sales (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>).

**Tabla 50 Determinación de la desintegración por sulfatos.**

Parámetros	Resultados
Sal utilizada para ensayo	Sulfato de Sodio anhidro
Fracción sometida a ensayo (mm)	20-5
Pérdida de masa de la muestra (5 Ciclos) (%)	4,2

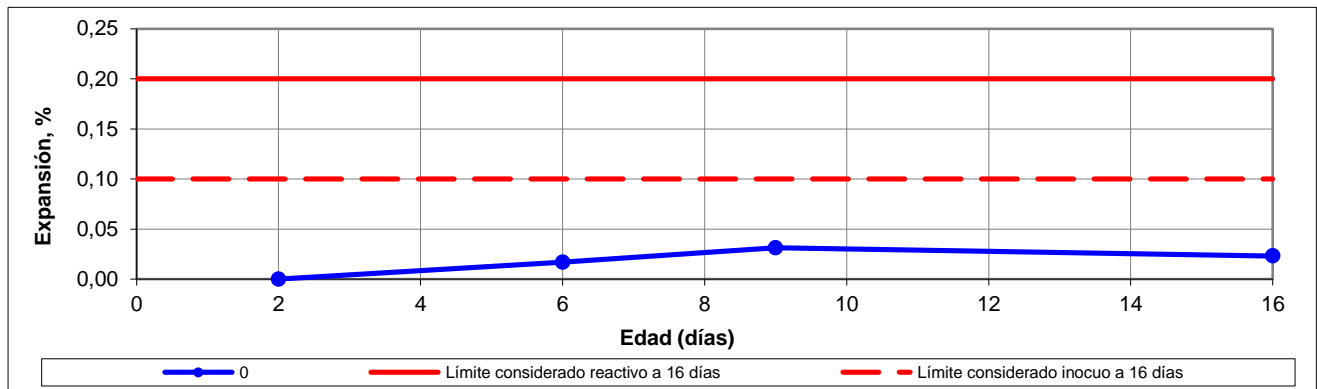
Clasificándolo como un árido con excelente comportamiento ante fenómenos de cristalización interna de sales.

**7.3.4. Determinación de reactividad potencial Álcali-Sílice (ASTCM C 1260).**

Se confeccionaron probetas de mortero con árido geopolimérico para el ensayo de reactividad potencial. Las deformaciones registradas durante el almacenamiento bajo las condiciones de ensayo se presentan en la tabla 51, y se grafican en la figura 42. Se puede observar que la máxima expansión se logra a los 7 días de inmersión en NaOH, correspondiente a un 0,03 %, muy por debajo del límite de 0,1 % que se establece para calificar un árido como reactivo.

**Tabla 51 Expansión ASTM C 1260.**

Expansión de barras de mortero (ASTM C 1260) (%)	(%)
Medición cero (tras 48 horas)	0,00
Tras 4 días de inmersión en NaOH	0,02
Tras 7 días de inmersión en NaOH	0,03
Tras 14 días de inmersión en NaOH	0,02



**Figura 42 Curva de reactividad potencial ASTM C 1260.**

### 7.4. Comportamiento de hormigón con árido geopolimérico.

Los probetas correspondientes a los hormigones de matriz cementicia con árido geopolimérico (MC-AG y MC-AG-CH), matriz cementicia con arcilla expandida (MC-AE), matriz geopolimérica con árido geopolimérico (MG-AG y MG-AG-HP) se muestran en la figura 43, luego de ser desmoldadas y pesadas.



**Figura 43 Probetas MC-AG, MC-AE, MC-AG-CH, MG-AG y MG-AG-HP.**

A continuación, se muestran los resultados obtenidos para cada probeta de cada set de muestras, donde se ilustra la densidad obtenida por probeta y la resistencia a la compresión transformada a una resistencia de probeta cubica de 20 cm x 20 cm x 20 cm, acorde a los factores de conversión estipulados en la norma NCh 170 Of. 85.

**Tabla 52 Hormigón de matriz cementicia con árido geopolimérico (MC-AG).**

Probeta	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	D Prom. (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a compresión (MPa)	R Prom. (MPa)
MC-AG 1	995,6	1811	1832	16,19	15,4
MC-AG 2	997,8	1832		15,56	
MC-AG 3	1008,8	1832		15,19	
MC-AG 4	1007,1	1838		14,81	
MC-AG 5	996,1	1845		15,33	

**Tabla 53 Hormigón de matriz cementicia con arcilla expandida (MC-AE).**

Probeta	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	D Prom. (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a compresión (MPa)	R Prom. (MPa)
MC-AE 1	750,9	1337	1292	10,78	10,95
MC-AE 2	708,1	1254		11,62	
MC-AE-3	734,6	1309		10,33	
MC-AE 4	704,7	1271		11,16	
MC-AE 5	711,1	1289		10,86	

Tabla 54 Hormigón de matriz cementicia con árido natural (MC-AN).

Probeta	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	D Prom. (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a compresión (MPa)	R Prom. (MPa)
MC-AN 1	1140,6	2073	2076	20,08	20,23
MC-AN 2	1142,3	2078		19,76	
MC-AN 3	1140,8	2055		20,17	
MC-AN 4	1148,6	2093		20,77	
MC-AN 5	1150,2	2081		21,59	

Para calificar el comportamiento frente a ciclos de congelamiento y deshielo se ensayó una muestra de cinco probetas de hormigón de matriz cementicia con árido geopolimérico (MC-AG-CH). Los resultados de estos ensayos se presentan en la tabla 55 y la pérdida de masa se muestra en la tabla 56.

Tabla 55 Hormigón de matriz cementicia con árido geopolimérico a ciclo hielo y deshielo (MC-AG-CH).

Probeta	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	D Prom. (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a compresión (MPa)	R Prom. (MPa)
MC-AG-CH 1	1013,4	1826	1805	12,87	12,94
MC-AG-CH 2	997,4	1779		0,00	
MC-AG-CH 3	1003	1804		12,39	
MC-AG-CH 4	993,3	1828		13,45	
MC-AG-CH 5	1001,2	1785		13,04	

Tabla 56 MC-AG-CH - Pérdida de masa.

Probeta	Masa inicial (kg)	Masa final (kg)	Pérdida de masa (%)
MC-AG-CH-11	1,01	0,93	9%
MC-AG-CH-12	1,00	0,91	9%
MC-AG-CH-13	1,00	0,94	6%
MC-AG-CH-14	0,99	0,91	9%
MC-AG-CH-15	1,00	0,90	10%

**7.4.1. Hormigón geopolimérico.**

Las probetas moldeadas correspondientes a hormigón poroso MG-AG.HP, no presentaron las características de porosidad esperada, razón por lo cual se decidió una vía alternativa para fabricar probetas de hormigón poroso a base de materiales geopoliméricos. Se optó por utilizar molde malla de dimensiones 10 cm x 10 cm x 5 cm de sigla MG-AG-PP-55 y MG-AG-PP-65, donde el número final hace referencia a una dosificación Activador/Escoria de razón 0,55 y 0,65 respectivamente. Se ilustra a continuación la confección y una de las probetas ya desmoldadas.



**Figura 44 Confección probetas MG-AG-PP-55 Y MG-AG-PP-65.**



**Figura 45 Probeta MG-AG-PP-65.**

Las probetas con razón Activador/Escoria igual a 0,65 (MG-AG-PP-65), mostraron ser altamente permeables, donde las uniones entre pellets se formaban por el contacto directo entre los mismos, esto debido a que la lechada geopolimérica cubre de manera superficial y completa a los pellets sin escurrir de manera excesiva, formando una película, la cual finalmente forma los puentes de unión entre pellet. Propiedad que no se refleja de igual manera en las probetas MGAGPP5 cuya razón Activador/Escoria es igual a 5,5. A continuación se muestran las cargas máximas soportadas por los bloques de hormigón poroso denominados MG-AG-PP-55 y MG-AG-PP-65.

**Tabla 57 MG-AG-PP-55 y MG-AG-PP-65 - Carga máxima (aplastamiento) y densidad aparente.**

Probeta	Masa (g)	Densidad Aparente (kg/m3)	Prom. (kg/m3)	Carga Máxima (kN)	C Prom. (kN)
MG-AG-PP-55 1	790	1501		24,10	
MG-AG-PP-55 2	820	1569	1563	22,30	23,2
MG-AG-PP-55 3	810	1620		23,30	
MG-AG-PP-65 1	720	1440		3,30	
MG-AG-PP-65 2	680	1360	1387	3,10	3,3
MG-AG-PP-65 3	680	1360		3,50	

Las probetas de código MG-AG, MG-AG-HP, que hacen referencia a las probetas de matriz geopolimérica con árido peletizado a ser ensayadas a una edad de 28 días y las probetas experimentales tipo hormigón poroso para ensayo a 28 días, respectivamente, reaccionaron

debido a tres razones, la dosificación usada, el tipo de silicato de sodio e hidróxido de sodio ocupados en la confección de la matriz geopolimérica y el ambiente húmedo en que se conservaron las probetas durante su periodo de curado.

Debido a esta reacción al cabo del periodo de 28 días, estas probetas fueron anuladas del proceso de ensayo a compresión ya que no presentan viabilidad alguna en uso real, debido a la nula durabilidad del tipo de mezcla. Sin embargo las probetas MG-AG se ensayaron a una edad de 76 días con el fin de conocer la resistencia residual que presentan estas probetas a pesar de haber reaccionado, resultados que se ilustran en la tabla 58.

**Tabla 58 Hormigón de matriz geopolimérica con árido geopolimérico (MG-AG).**

Probeta	Masa (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Prom. (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia a compresión (MPa)	R Prom. (MPa)
<b>MGAG-16</b>	1093,8	1925		34,72	
<b>MGAG-17</b>	1105,6	1972		36,80	
<b>MGAG-18</b>	1093,4	1957	1963	35,49	35,10
<b>MGAG-19</b>	1110,0	2007		35,44	
<b>MGAG-20</b>	1046,2	1953		33,07	

Una de las razones por la cual se utilizó esta mezcla fue la gran resistencia adquirida de la matriz geopolimérica a una edad temprana de 7 días por sobre los 40 MPa para una dosificación de razón 0,55 (activador alcalino/escoria de alto horno).

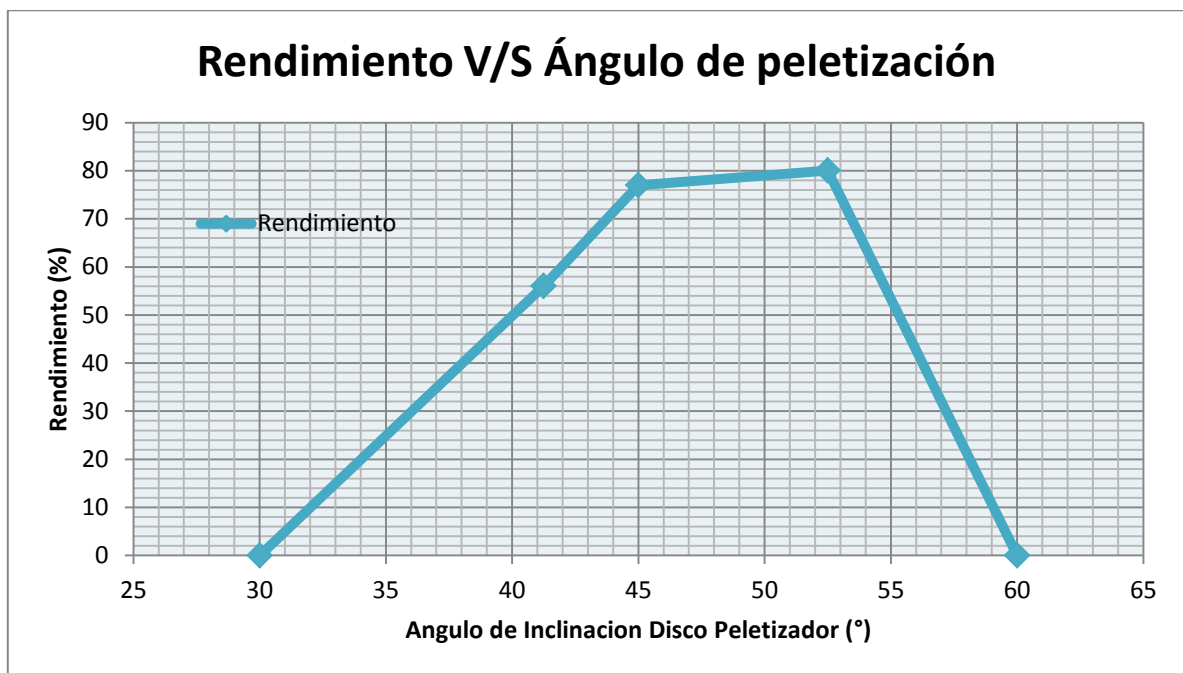
De la reacción de la probetas con matriz geopolimérica se observó que el volumen de material reaccionado fue mayor en las probetas con razón 0,65 a las probetas con razón 0,55, que al no tener contacto con el ambiente húmedo, no presentó reacción alguna, como el área de apoyo de las probetas con el estante. Por lo cual se puede desprender que las reacciones no son endógenas, en consecuencia no reaccionan a menos que estén presentes dentro de un ambiente con humedad alta. A causa de ésto se prefirió esperar a una edad de 56 días para ensayar las probetas tipo MG-AG-PP (MG-AG-PP-55 y MG-AG-PP-65), las cuales no presentaron reacción alguna, factor determinante ya que la lechada utilizada para las probetas que reaccionaron y las tipo MG-AG-PP, fueron confeccionadas a partir del mismo activador, dosificación y tipo de escoria.



## 8. Análisis.

### 8.1. Ensayos para la peletización de geopolímeros.

Una de las variables más influyentes en el proceso de peletizado es el ángulo de inclinación del plato, dado el tamaño y la geometría del disco, el ángulo de inclinación que permite optimizar el proceso de peletizado de escoria y ceniza fina por goteo de la solución alcalina esta entre  $30^\circ$  y  $60^\circ$ . Cuando el ángulo es de  $30^\circ$  o menos la escoria no circula y solo se aglutina en la parte superior del plato por lo cual no es factible peletizar y cuando el ángulo es superior o igual a  $60^\circ$  el disco no posee el suficiente contacto con el rotor, condición que produce discontinuidades en el proceso, además de producir pérdidas de escoria debido a que la pared del disco peletizador no puede retener el material. A continuación se ilustra una simple gráfica de los rendimientos obtenidos en función del ángulo de inclinación del disco peletizador.



**Figura 46 Rendimiento V/S Ángulo de peletización.**

A mayor ángulo, por sobre  $30^\circ$ , se obtiene una mayor eficiencia y aprovechamiento del material procesado, sin embargo, esto también está limitado por el volumen máximo de utilización del disco, debido a esto se llegó a que entre los ángulos  $45^\circ$  a  $51,25^\circ$  se trabaja correctamente, utilizando una masa de 1 kg de mezcla molida estaría la inclinación óptima del disco. Pero, si se utiliza parte de escoria gruesa como núcleo de formación de pellet el ángulo adecuado de trabajo es  $45^\circ$ .

### 8.1.1. Incorporación de la solución alcalina en el proceso de peletizado.

La utilización del activador alcalino durante la peletización, en el caso de procesar 100% de escoria molida la demanda de solución alcalina óptima se encuentra para una razón 0,16 (activador/escoria), comprobando que es una razón que permite una formación estable de pellets, observándose que para una razón de 0,25 y 0,4 los pellets presentan exceso de humedad, tras el proceso por lo cual empiezan a aglutinarse entre ellos y al ser depositados se achatan o deforman.

Por otra parte, al modificar el proceso introduciendo la solución alcalina en dos etapas, partiendo con hidróxido de sodio, se obtiene un proceso de peletizado eficiente, pellets redondeados y de mayor tamaño, debido a la mayor reactividad y menor viscosidad de esta solución. Sin embargo estos pellets no poseen una resistencia mecánica y al aplicar en una segunda etapa la solución de silicato de sodio, la eficiencia disminuye ya que se utiliza una cantidad superior de silicato de sodio por la reacción de la solución con la presencia superficial de escoria no reaccionada en los pellets resultantes del proceso anterior. Aunque hay que dejar en claro que el silicato sí logra penetrar al pellets sellándolo superficialmente, evitando la aparición de material no reaccionado en la superficie de los pellets, aumentando la resistencia al impacto. Además de esta etapa se generó la idea de poder fabricar un tipo de hormigón poroso a base de este material (pellets con cubierta de silicato de sodio) desarrollo que podría dar origen a un estudio específico.

## 8.2. Obtención de árido liviano geopolimérico.

Las partidas N° 7 y N° 8 se dosificaron con ceniza volante y escoria de alto horno molida, de lo cual se observó que la utilización de ceniza volante en reemplazo de escoria molida demanda mayor solución alcalina, sin embargo esto se traduce en esferas más redondeadas y uniformes, de un color oscuro a negro y se observó que a medida que aumenta el porcentaje de ceniza con relación a la escoria molida, disminuye la resistencia al impacto y a la compresión de los pellets. Sin embargo, al usar mezclas de ceniza volante y escoria molida es necesario homogeneizar estas fuentes de aluminosilicatos en el siguiente orden: siendo el primer elemento que ingresa al disco peletizador la escoria, luego la ceniza volante y de esta manera se consigue que la ceniza no se suspenda al ambiente.

Las partidas N° 9 a la N° 16, fueron confeccionadas con el fin de evaluar la utilización de “semillas”, elemento que se ocupa como núcleo para el desarrollo de pellets livianos, de las cuales las partidas N° 9, N° 10 y N° 11 se confeccionaron con escoria gruesa como núcleo, presentando gran afinidad con la escoria molida y el goteo del activador, resultando así diferentes tipos de pellets por tipo de dosificación de los elementos mencionados. Observando que mientras se ocupe un porcentaje menor o igual a 10 % de escoria gruesa, siendo estos núcleos incorporados dentro de los pellets sin afectar la regularidad de la forma esférica y redondeada de los mismos, reduciendo en este caso la densidad real en 13 % en comparación con la partida N° 3, que fue formada con 100 % escoria molida, disminución que se traduce en una densidad aparente suelta  $997 \text{ kg/m}^3$ .

La utilización de escoria gruesa resultó ser una muy buena opción, debido a que la escoria gruesa reacciona, pero en mucho menor grado que la escoria molida. Lo cual asiste en la unión de esta semilla en los pellets. Eso sí por sobre el 10 % de utilización de escoria gruesa se pierde la forma esférica de los pellets y aparecen vesículas en los áridos, las cuales representan zonas de debilidad para los mismos, aunque su densidad disminuye notoriamente.

El poliestireno expandido inicialmente surge como una posibilidad factible de utilización como semilla para obtener un árido liviano por peletización del aluminosilicato formando una capa geopolimérica. Sin embargo si se utilizan esferas de diámetro menor a 5 mm, éstas tienden a adherirse en la superficie de los pellets generando debilidades dentro del mismo. La utilización de esferas por sobre este diámetro no produce el recubrimiento adecuado de estos núcleos debido a que por su baja densidad tienden a desplazarse por sobre el material de escoria circundante. Debido a ésto se intentó usar un puente adherente sobre el poliestireno para permitir la formación de una capa inicial de escoria alrededor de estos núcleos, sin embargo el proceso dentro del disco peletizador es demasiado brusco lo que hace que esta capa termine por desprenderse dejando al descubierta la esfera de poliestireno, descartándose esta idea.

Se estima sin embargo que este tipo de pellet liviano sería factible, pero se requeriría de un proceso distinto al del plato peletizador dado que manualmente se logró obtener partículas perfectamente esféricas con núcleo de poliestireno y recubrimiento geopolimérico. Como proceso alternativo se propone desarrollar la metodología que utiliza, ya sea un lecho fluidificado o algún dispositivo que permita aplicar a los núcleos de poliestireno recubiertos con el puente de adherencia a la envolvente de escoria y activador alcalino.



### 8.3. Caracterización del árido geopolimérico.

A partir de los resultados obtenidos en la partida N° 13, se observa una significativa disminución de la densidad con respecto a un árido natural, tomando en cuenta que un árido natural presenta una densidad real por sobre 2600 kg/m<sup>3</sup> y la densidad real en estado saturado con superficie seca (dr sss) de la partida N° 17 resultó ser de 1890 kg/m<sup>3</sup>. Sin embargo estos pellets presentan una absorción alta equivalente a 11%.

#### 8.3.1. Análisis de las propiedades: granulometría, resistencia al desgaste y estabilidad frente a la desintegración.

##### 8.3.1.1. Granulometría

El tamaño máximo del árido geopolimérico óptimo resultó igual a 19 mm. El módulo de finura fue equivalente a 6,8. Lo interesante, sin embargo no es el módulo de finura, sino que es la banda granulométrica natural que genera el proceso del disco peletizador, el cual se ilustra a continuación, en conjunto con las banda superior e inferior, para áridos de tamaños límites 20-5, la cual aparece en la tabla N° 1 de la norma ASTM C330.

Tabla 59 Sección de la tabla N° 1 de la norma ASTM C 330.

Tamiz	19-4,75	
mm	Límite inferior	Límite superior
25	100	100
19	90	100
9,5	10	50
4,75	0	15
2,5	0	0

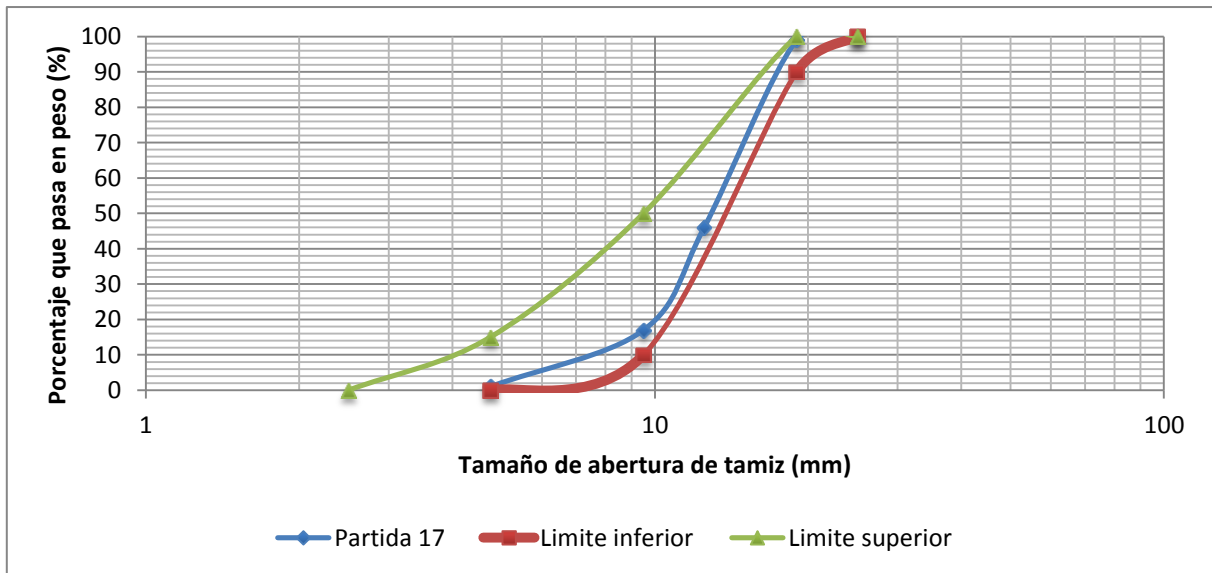


Figura 47 Bandas granulométricas.

De la cual se desprende que a partir del proceso de peletizado, se genera un árido que posee características granulométricas comparables con la banda sugerida para su utilización en hormigón, sin requerir procesos de selección adicionales.

#### **8.3.1.2. Resistencia al desgaste método de la Máquina de los Ángeles (NCh 1369).**

La pérdida de masa causada por el desgaste en la máquina de Los Ángeles, fue igual a un 44,2 %. De lo cual se concluye que este árido artificial puede ser utilizado para la confección de hormigón en betoneras, trompos, o métodos de mezclado similares, ya que presenta una mediana a buena resistencia ante este tipo de acción abrasiva. Y acorde a la norma NCh 163 se puede utilizar para todo tipo de hormigón, excepto para hormigones sometidos a desgaste directo como la capa de rodadura de los pavimentos.

#### **8.3.1.3. Estabilidad frente a la desintegración por sulfatos (NCh 1328)**

La resistencia a la desintegración del árido por acción de ciclos de inmersión y secado en solución de sulfatos de sodio equivale a 4,2 %. Clasificándolo como un árido con excelente comportamiento ante fenómenos físico-químicos causados por la cristalización del sulfato, teniendo en cuenta que la norma chilena NCh 163 establece como límite para el agregado (tamaño grava) una pérdida de masa de hasta 12 %. Lo cual se traduce como un buen comportamiento ante ambientes donde se presenten ciclo de hielo y deshielo, ya que asimila ante los efectos de expansión de la cristalización provocando tensiones internas.

Característica que debe su buen desempeño a su gran porcentaje de huecos (sobre 40 %) mostrado en la tabla 44, lo cual permite la expansión de cristales dentro de la estructura del árido sin provocar grandes daños debido a los efectos del aumento de la presión interna.

#### **8.3.1.4. Análisis de la reactividad potencial.**

Tanto la escoria de alto horno como la ceniza volante son elementos que hoy en día ya se usan como elementos suplementarios y/o reemplazantes del cemento, por lo cual no solo está comprobado teóricamente, sino que empíricamente que estos materiales trabajan en excelente forma en conjunto. Sin embargo la motivación de realizar un ensayo de reactividad potencial entre el árido formado a partir de la escoria de alto horno y la ceniza volante no viene de estos mismos, sino del hecho que estos se trabajan en conjunto con un activador alcalino, el cual posee NaOH, y Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, en una razón 1 es a 2 entre ambas solución, dentro del activador alcalino. Provocando una riqueza en moléculas de SiO<sub>2</sub>.

Componente que puede reaccionar con los álcalis del cemento, provocando una reacción de álcali-sílice, entre el cemento y el árido artificial, formando un gel expansivo potencialmente dañino para el elemento. Por lo cual se realizó el ensayo de reactividad potencial acorde a la norma ASTM C 1260-07, dando como resultados los mostrados en la tabla 51 y en la figura 42.

Concluyendo que el árido artificial de la partida N° 17 es inocuo, ya que posee una expansión máxima equivalente a un 0,03 %, muy por debajo del límite inferior de expansión para caracterizar un elemento como potencialmente dañino equivalente a 0,1 %.

### 8.3.2. Análisis de toxicidad del árido geopolimérico.

Los pellet geopoliméricos fueron confeccionados a partir de una solución alcalina activadora, escoria de alto horno y ceniza volante, cuyas composiciones químicas se muestran en la tabla 14 y en la tabla 16 respectivamente, mostrando que sus componentes son principalmente óxidos y compuestos presentes en las rocas de forma natural. Los activadores alcalinos son consumidos en su totalidad debido al proceso de geopolimerización llevado a cabo durante la peletización de estos materiales, donde el agua sobrante es exudada durante el curado de los pellet geopoliméricos. La escoria de alto horno por el decreto DS 148/2003 del Ministerio de Salud es categorizada como residuo no peligroso ya que no presenta elementos tóxicos dentro de su composición en proporciones que puedan afectar al medio ambiente o al ser humano. La ceniza volante debido a su composición variante en función del tipo de carbón, método de generación eléctrica y de su captación, es necesario realizar estudios de toxicidad por lixiviación TCLP para materiales pesados.

El estudio de lixiviación acorde a la norma USEPA 1311 de las cenizas volantes provenientes de las distintas unidades del complejo termoeléctrico Ventanas, mostrado en la tabla 60, observando que las cenizas provenientes de esta central termoeléctrica no presentan lixiviados con presencia de metales pesados superior a la norma DS 148. Ensayos realizados para la respuesta a la *Solicitud de Aclaraciones, Rectificaciones o Ampliaciones a la Agenda del Proyecto "Manejo y Disposición de RISES de combustión del Complejo Termoeléctrico Ventanas (48)*, donde también se mostró que las cenizas volantes no presentan compuestos orgánicos dentro de su composición como ilustra la tabla 70 en el anexo 0.

**Tabla 60 Determinación de la característica de toxicidad por lixiviación TCLP para metales pesados en muestras de ceniza volante y escoria de las unidades 1, 2 y 3 del Complejo Termoeléctrico Ventanas. Concentración (mg/l)**

Compuesto	LD	LC	D.S. 148	Unidades 1 y 2 (a)				Unidad 3 (b)		
				Muestra 1 Ceniza Volante	Muestra 2 Ceniza Volante	Muestra 3 Ceniza Volante	Muestra 4 Ceniza Volante	Muestra 1 Ceniza Volante	Muestra 2 Ceniza Volante	Muestra 1 Ceniza Escoria
<b>Arsénico</b>	2,80E-02	9,30E-02	<b>5</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
<b>Bario</b>	1,20E-04	4,00E-04	<b>100</b>	0,473	0,38	0,454	0,514	1,33	1,41	0,819
<b>Cadmio</b>	7,70E-04	2,57E-03	<b>1</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
<b>Cromo</b>	5,43E-03	1,81E-02	<b>5</b>	<LD	0,124	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
<b>Plomo</b>	3,20E-03	1,06E-02	<b>5</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
<b>Selenio</b>	2,12E-02	7,07E-02	<b>1</b>	0,648	0,45	0,712	0,725	<LD	<LD	<LD
<b>Plata</b>	5,60E-04	1,87E-03	<b>5</b>	0,0149	0,0182	0,0182	0,0163	0,131	0,132	0,066
<b>Mercurio</b>	3,00E-04	1,00E-03	<b>0,2</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD

LD – Limite de detección; LC – Limite de cuantificación.

Fuente (48)



#### 8.4. Comportamiento de hormigón con árido geopolimérico.

Las series de hormigones fueron confeccionadas con una banda granulométrica acotada (20-5) y con una pasta de cemento de relación Agua/cemento igual a 0,5. Las series de probetas de hormigón fueron similares en cuanto a tamaño, dosificación y edades de ensayo comparable para los tres tipos de áridos empleados. En cuanto a las densidades obtenidas con los distintos hormigones en función del árido utilizado, las probetas que se confeccionaron con arcilla expandida, obtuvieron la densidad más baja, siendo esta del orden en promedio  $1300 \text{ kg/m}^3$ , seguido por las probetas con el pellet a base de escoria y ceniza, en el orden de los  $1850 \text{ kg/m}^3$ , lo que lo clasifica como hormigón estructural liviano (considerando sólo la densidad). Finalmente las probetas con árido de río se obtuvo una densidad de orden de los  $2100 \text{ kg/m}^3$ . En la tabla 61 se resumen los valores de densidad de los distintos hormigones comparados.

**Tabla 61 Densidad por tipo de hormigón.**

Tipo de Hormigón	Serie	Densidad Promedio ( $\text{kg/m}^3$ )
<b>Matriz cementicia + Árido geopolimérico</b>	MC-AG	1832
<b>Matriz cementicia + Arcilla expandida</b>	MC-AE	1293
<b>Matriz cementicia + Árido natural de río</b>	MC-AN	2076

La resistencia obtenida a una edad de 28 días, mostró que las probetas de hormigón liviano con áridos de arcilla expandida, no tan solo poseen la densidad más baja, sino que también la resistencia a la compresión más baja, siendo éste del orden de 11 MPa, donde las probetas presentaron daño propios de una sollicitud compresiva y los pellets de arcilla expandida mostraron fracturas y desprendimientos a lo largo de toda la sección dañada por el esfuerzo. Las probetas con pellet a base de escoria y ceniza mostraron una resistencia intermedia del orden de 15,5 MPa, siendo un 41 % mayor que la obtenida con áridos livianos de arcilla expandida y considerando el hecho que solo un aproximado del 5 % del pellet en la sección de la probeta dañada por compresión mostró signos de fractura y desprendimiento, por lo cual el 95 % del árido en esta sección se mantuvo intacto.

Las probetas con árido de río mostraron un comportamiento superior, al obtener la mayor resistencia a la compresión del orden de 20 MPa, siendo mayor que las probetas con arcilla expandida y pellet a base de escoria y ceniza en un 84,8% y 31,2% respectivamente. Resistencia que ayuda a tener una idea general de cuál es el comportamiento del pellet a base de escoria y ceniza, siendo esta última mucho mayor que la arcilla expandida, y relativamente baja en comparación con el árido natural. En la tabla 62 se resumen estos resultados comparativos.

**Tabla 62 Resistencia a la compresión por tipo de hormigón.**

Tipo de Hormigón	Serie	R (MPa)
<b>Matriz cementicia + Árido geopolimérico</b>	MC-AG	15,42
<b>Matriz cementicia + Arcilla expandida</b>	MC-AE	10,95
<b>Matriz cementicia + Árido natural de río</b>	MC-AN	20,23

#### 8.4.1. Comportamiento del hormigón geopolimérico.

Las series de hormigón geopolimérico MG-AG y MG-AG-HP a la edad de 28 días, mantenidas en cámara húmeda, reaccionaron presentando secciones no sólo de fisuras sino que también oquedades nuevas, que en comparación al momento de ser desmoldadas no las presentaban. Lo cual fue motivo de descarte de las mismas debido a que esta reacción representa una falla que afecta la durabilidad y potencial uso en condiciones de servicio.

La serie de hormigón geopolimérico poroso MG-AG-HP fueron descartadas a la vez, debido a su nula representatividad de un hormigón poroso, esto a causa de que las lechadas geopoliméricas no eran lo suficientemente fluidas como para continuar el trayecto a lo largo de toda la probeta cilíndrica, teniendo como resultado probetas con nidos y espacios sin lechada ni árido, en vez de un hormigón poroso.

Posteriormente las probetas MG-AG fueron ensayadas a una edad de 73 días, con el fin de conocer la resistencia que presenta este tipo de material geopolimérico, aun cuando haya presentado reacciones y fisuración superficial, observándose una resistencia superior a todas las series anteriormente ensayadas. Característica relevante ya que fueron confeccionadas con el mismo método y dosificación de las probetas a base de árido artificial y lechada cementicia.

Obteniendo una resistencia a la compresión promedio de 35,1 MPa. Donde las probetas, que reaccionaron generando una capa de material fino, fue una reacción superficial y no dañó o afectó la integridad de las probetas. Del análisis de lo observado con las series MG-AG-HP, MG-AG-PP-55 y MG-AG-PP-65 se deduce que los factores por los cuales se haría producido las reacciones en el hormigón geopolimérico estarían los siguientes:

- Razón escoria - activador alcalino.
- Razón de lechada geopolimérica y pellets a base de escoria de alto horno y ceniza volante.
- Ambiente húmedo.

Las probetas MG-AG-PP mostraron que el proceso de confección mediante “canastillos” y vibrado permite la fabricación eficiente y efectiva de un material que es posible denominarlo como hormigón poroso, además que se observó que la lechada al estar en contacto directo con el árido en una razón baja en comparación con las probetas MG-AG-HP y MG-AG, la matriz no sufre reacciones anómalas en el ambiente húmedo, o al variar la razón de activador-escoria. A partir de la lechada geopolimérica con razón de 0,55 y 0,65 (Activador-Escoria), formando una capa fina entre pellets, capaz de formar puentes de adherencia y así confeccionar un elemento esencialmente poroso y permeable a partir del árido artificial.

A medida que la razón activador/escoria aumenta y particularmente para el 0,75 (probeta única adicional como prueba de concepto), la capa que actúa como puente adherente disminuye su grosor donde la probeta confeccionada con razón 0,75, perdió la capa en los pellets superiores de lo cual se concluye que existiría una relación activador/escoria óptima para la confección de una lechada geopolimérica en la dosificación de hormigón poroso.

La condición de permeabilidad del hormigón poroso se desarrolla, ya sea con una lechada con razón 0,55 o 0,65, sin embargo el paso a través de los espacios cavernosos que quedan en la probetas son más restrictivos en las probetas con lechada 0,55 que las con lechada a razón de

0,65. Sin embargo, la resistencia a la compresión para las probetas MG-AG-PP-55 fue de 23,2 kN equivalente a 2,3 Mpa, donde la carga fue aplicada sobre una superficie de 10 cm x 10 cm.

Las probetas cuya razón de lechada geopolimérica es de 0,65, presentaron un comportamiento deficiente ante compresión. Por lo que la utilización de lechada geopolimérica a razón de 0,55 en la fabricación de hormigón poroso se presenta como una posible aplicación que requeriría de una evaluación mayor considerando los siguientes pasos:

- Estudiar distintas dosificaciones y bandas granulométricas que permitan optimizar la estructura porosa del material resultante.
- Variar el método de compactación y analizar el tiempo de vibrado óptimo para lograr la porosidad y la resistencia requerida.
- Encontrar tiempo efectivo de trabajabilidad de la lechada geopolimérica a base de escoria molida y activador alcalino.
- Caracterizar las propiedades del material poroso resultante: permeabilidad y resistencia mecánica.

#### 8.4.2. Comportamiento del pellet ante ciclos de Hielo y deshielo.

Se decidió estudiar de manera preliminar el comportamiento de las probetas a base de árido de escoria de alto horno y ceniza volante. Árido que posee sobre un 40 % de huecos, no obstante se conoce que los hormigones con áridos livianos presentan un buen comportamiento frente a este tipo de sollicitación. Este estudio sólo tuvo como fin observar el potencial de este árido en una matriz cementicia, y no categorizar acorde norma su comportamiento, ya que un ensayo de esta característica como el descrito en la norma ASTM C-666, requiere de un estudio específico mayor. En este caso se decidió realizar un ensayo similar al descrito en el trabajo titulado “*Influencia de los ciclos hielo-deshielo en la resistencia del concreto (caso Tunja)*” (45), que sirve para verificar el comportamiento de los hormigones en estudio frente a este tipo de sollicitaciones.

Del proceso como tal, se observó que luego de realizados 29 ciclos, las probetas mostraron fisuras superficiales que acorde al patrón solo se presentaban en las secciones de lechada entre los pellet, y luego de 45 ciclos las probetas empezaron a perder secciones en la cara superior e inferior, hecho que no se repitió en las secciones centrales de las probetas.

Al final de los 71 ciclos, se volvieron a pesar las mismas, presentando una disminución de masa, que en promedio, son del orden de 8%, y una reducción en la resistencia con respecto a la serie patrón MC-AG de un 16% aproximadamente. Comportamiento que no se encuentra muy alejado de los resultados obtenidos en el estudio del Caso Tunja, sin embargo no sería concluyente para aseverar o refutar que un hormigón con agregados de pellet a base de escoria de alto horno y ceniza volante activada mediante una solución alcalina, presente una adecuada resistencia a los ciclos de hielo-deshielo.

De estos ensayo se deriva que los hormigones confeccionados con pellets de la partida N° 13 no presentan daños o fisuras visibles en las zonas de contacto de los pellets con la matriz cementicia, así como el árido geopolimérico, concluyendo que el árido en si posee un buen comportamiento ante ciclos de hielo y deshielo así como lo demostró ante el ensayo de desintegración (NCh 1328).

## 9. Conclusión.

Del presente estudio de carácter exploratorio, sobre aprovechamiento de materiales de desecho, que pueden ser utilizados como fuente de aluminosilicatos y su transformación por peletización en áridos geopoliméricos, se derivan las siguientes conclusiones:

1. El proceso de peletizado mediante el uso del disco, permite la producción a escala de laboratorio de áridos livianos geopoliméricos, aprovechando sobre el 80 % de los insumos, minimizando el nivel de desechos.

La capacidad del disco y su velocidad de rotación permite generar pellets a un ritmo de 3,3 kg/hr. Lo cual es fácilmente escalable, al aumentar el diámetro del disco así como su capacidad útil para permitir procesar mayor cantidad de material, a la vez que el rango de rotación óptimo se encuentra alrededor de las 35 rpm.

2. Los áridos obtenidos por peletizado corresponde a en la categoría de áridos livianos (densidad real menor a  $2000 \text{ kg/m}^3$ ) y su forma y resistencia mecánica son aceptables para aplicaciones en construcción. Posee una absorción alta (sobre el 10 %) y un porcentaje de huecos superior al 40%, ambos aspectos esperables de este árido. Lo cual se traduce en una mayor necesidad de agua de amasado para las dosificaciones de hormigón a base de éste material.

Los pellets correspondientes a la partida N° 13 demostraron poseer un comportamiento mecánico óptimo (resistencia a la rotura), una baja densidad real saturada siendo menor a  $2000 \text{ kg/m}^3$  y una densidad aparente suelta aproximada de  $1000 \text{ kg/m}^3$ .

3. El pellet geopolimérico no presenta reacciones del tipo álcali-sílice con el cemento, donde la Reactividad Potencial obtenida es mínima y muy por debajo al valor inferior considerado en la norma ASTM C 1260 y gracias a su densidad permite la fabricación de hormigón mediante la inyección de lechada al árido pre-empacado, método que se utilizó para la confección de las probetas. Donde la serie de hormigón de matriz cementicia con árido geopolimérico (MC-AG) posee una densidad aproximada de  $1850 \text{ kg/m}^3$ .

De las series de hormigones de matriz cementicia con árido de arcilla expandida (MC-AE), árido geopolimérico (MC-AG) y árido natural (MC-AN) se logra concluir que el pellet posee un mejor comportamiento a la compresión que la arcilla expandida comercial y un cercano pero menor desempeño a la compresión que el árido natural en una matriz cementicia.

4. La producción del pellet posee un precio superior al árido natural. Aunque el valor agregado del pellet geopolimérico como producto sustentable, aumenta en la medida que la población toma conciencia del ambiente y su alrededor, provocando que aunque hoy en día podría ser competitivo bajo las mejores opciones, en un futuro no muy lejano este tipo de árido será requerido y/o demandado con mayor fuerza aumentando su competitividad y viabilidad como alternativo de agregado grueso en el hormigón. También está la posibilidad de entregar hormigón prefabricado a base de este árido, siendo sustentable y

liviano, características que comercial y técnicamente son atractivos hoy en día en el sector de la construcción.

## 10. Recomendaciones para futuros estudios.

A partir de la experiencia adquirida a través del estudio realizado, se propone implementar los siguientes estudios complementarios.

- 1) Confeccionar probetas con una dosificación acorde a la norma ACI 213 R-87, donde el agregado grueso será a base del pellet de escoria de alto horno y ceniza volante, variando el agregado fino, siendo este también material geopolimérico, o arena natural.
- 2) Estudiar con mayor profundidad la aptitud de los pellets geopoliméricos para producir hormigón poroso, probando diferentes metodologías de confección, así como distintas dosificaciones de la lechada geopolimérica (posible uso de aditivos fluidificantes y retardantes).
- 3) Estudiar la factibilidad de ocupar este árido en la confección de hormigón, donde el árido haya sido pre-empacado en el elemento y la lechada cementicia sea vaciada posteriormente, lo que permite la utilización de este material en rellenos o reparaciones insitu, debido a la densidad y rugosidad del árido.
- 4) Estudiar el comportamiento térmico, conductividad, y resistencia al fuego del hormigón con árido a base de escoria y ceniza.
- 5) Realizar el test de ciclo hielo-deshielo, con una serie de probetas de comparación ante comportamiento de ciclos de hielo y deshielo, no solo con el árido geopolimérico sino con árido natural.
- 6) Estudiar el efecto de curado en horno a distintas temperaturas, y determinar si es posible mediante el curado en horno la producción de pellets geopoliméricos con menor densidad y/o con mayor resistencia mecánica.

## 11. Bibliografía.

1. **Unión de Empresas Siderúrgicas.** *Escoria De Alto Horno*. Madrid : s.n., Diciembre, 2011.
2. **American Coal Ash Associaton Educational Fundation .** *Coal Combustion Products*. 2009.
3. **Mission Energy Fundation.** FAU Fly Ash Utilisation. *FAU Fly Ash Utilisation*. [En línea] 2012. <http://flyash2012.missionenergy.org/intro.html>.
4. **Federación interamericana del cemento.** *Informe Estadístico 2013*. 2013.
5. **CChC.** Cámara Chilena de la Construcción. *Cámara Chilena de la Construcción*. [En línea] 9 de Febrero de 2013. [Citado el: 9 de Febrero de 2013.] <http://www.cchc.cl/>.
6. **GreenBiz Group Inc.** *State Of Green Business 2014*. s.l. : GreenBiz.com, ENero 2014.
7. **CChC.** *Informe MACH Macroeconomía y Construcción*. Santiago : s.n., 2013.
8. **Systemp.** Central Energía. *Los Desafíos del 2014*. [En línea] 15 de Enero de 2014. <http://www.centralenergia.cl/2014/01/15/los-desafios-del-2014/#more-8489>.
9. **Oñate, J. J., Pereira, D., Suárez, F., Rodríguez, J. J., Cachón, J.** *Evaluación Ambiental Estratégica: la evaluación ambiental de Políticas, Planes y Programas*. Madrid : Ediciones Mundi-Prensa, 2002.
10. **World Steel Association.** World Steel Association. *Steel Statistical Yearbook*. [En línea] Noviembre de 2013. <http://www.worldsteel.org/statistics/statistics-archive/yearbook-archive.html>.
11. **CAP.** *Reporte de sustentabilidad 2012*. 2013.
12. **CNE.** Comisión Nacional de Energía. *Estadísticas Energía Eléctrica*. [En línea] 9 de Enero de 2014. <http://www.cne.cl/estadisticas/energia/electricidad>.
13. **Central Energía.** Central Energía. *Capacidad instalada SIC*. [En línea] 30 de Octubre de 2012. [Citado el: 9 de Febrero de 2014.] <http://www.centralenergia.cl/centrales/capacidad-instalada-sic/>.
14. *Coal combustion products: A global Perspective.* **Haidrich, Craig, Feuerborn, Hans-Joachim y Weir, Anne.** Lexington KY : s.n., 2013.
15. **Araneda, Cristian.** Vitrina Ambiental. *Centro de sustentabilidad*. [En línea] UNAB, 18 de Marzo de 2011. [Citado el: 4 de Junio de 2014.] <http://ambiental.unab.cl/2011/03/cenizas-volantes%E2%80%A6-%C2%BFun-problema-o-una-oportunidad/>.
16. **Instituto Argentino de Normalización y Certificación IRAM.** *IRAM 1567*. 2008.
17. **ACI, American Concrete Institute.** ACI 213 R-87 Guide for Structural Lighthweight Concrete. 1999.
18. **Deventer, P. Duxson / A. Fernández-Jimanez / J. L. Provis / G. C. Lukey / A. Palomo / J. S. J. Van.** Geopolymer technology: the current state of the art. *J Mater Sci (2007)*. s.l. : Springer Science+Business Media, LLC 2006, 2006, págs. 2917-2933.



19. **West, Deborah.** Piramides de bosnia. *Evidencia científica de que las piramides de bosnia fueron construidas con cementos geopoliméricos.* [En línea] 27 de Agosto de 2013. [Citado el: 11 de Febrero de 2014.] <http://piramidesdebosnia.com/2013/08/27/evidencia-cientifica-de-que-las-piramides-de-bosnia-fueron-construidas-con-un-cemento-geopolimero/>.
20. **Pinto, P. Soares / A. T.** Geopolímeros basados en residuos de la producción de áridos ligeros. [aut. libro] ISSN. *Materiales de Construcción* V. 48. 2008, págs. 23-34.
21. **Martínez, Erich David Rodríguez.** *Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante.* Valencia : s.n., 2009.
22. **Rodriguez, Diego Esteban.** Proyepto. *EL proceso de elaboración del "Metal".* [En línea] 9 de Octubre de 2013. [http://proyepto.blogspot.com/2013\\_10\\_01\\_archive.html](http://proyepto.blogspot.com/2013_10_01_archive.html).
23. *Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico.* **PUERTAS, F.** Madrid : Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 1993, MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN. Vol. 43, págs. 37-48.
24. *VIII Congreso Internacional de la Química del Cemento.* **Uchikawa, H.** Río de Janeiro : s.n., 1986. Vol I, Tema III, pp. 249-280.
25. **Detwiler, Rachel J., Bhatti, Javed I. y Bhattacharja, Sankar. r,** *Supplementary Cementing Materials for Use in Blended Cements.* s.l. : Portland Cement Association, 1996. Research and Development Bulletin RD112.
26. **CECHSA.** CECHSA. *Generación de Energía Eléctrica Utilizando Carbón.* [En línea] 2007. <http://www.cechsa.com/node/13>.
27. **Roland Berger Strategy Cosultants.** *Conjunto de Tendencias para 2030.* 2011.
28. *El futuro del sector eléctrico.* **Carranza, Hugo Alberto.** 2011, Pretotecnia, págs. 10-20.
29. **American Coal Ash Association.** *Fly ash facts for highway engineers.* 2003.
30. **Portland Cement Association.** *Green in Practice 107 - Supplementary Cementitious Materials (SCMs).* 2012.
31. *A review on the utilization of fly ash.* **Ahmaruzzaman, M.** 2010, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 36, págs. 327-363.
32. **ASTM.** ASTM C618 - 12a Especificación normalizada para Ceniza Volante de Carbón y Puzolana Natural en Crudo o Calcinada para Uso en Concreto.
33. *The action of alkalis on blast-furnace slag.* **O., Purdon.** 1940, J. Soc. Chem. Ind. Trans. Commun., Vol. 59., págs. 191-202.

34. *30 years of successes and failures in geopolymer applications. market trends and potential breakthroughs.* **J., Davidovits.** Melbourne, Australia : s.n., 2002. Proceedings Geopolymer 2002 Conference.
35. *Alkali-Activated fly ashes: A cement for the future.* **Palomo A. Grutzeck M.W., Blanco M.T.** 1999, Cement and Concrete Research., Vol. 29, págs. 1323-1329.
36. *Polimerization of Silicate and aluminate tetrahedral in glasses, melts, and aqueous solutions.* **Jong B.H.W.S, y Brown G.E.** 3, 1980, Electronic structure of H<sub>6</sub>Si<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, H<sub>6</sub>AlSiO<sub>7</sub>-, and H<sub>6</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-Geochimic., Vol. Cosmochimic. Acta. 44, págs. pp 491-511.
37. *Geopolymer Camp Keynote: State of the Geopolymer 2010.* **Davidovits, Prof. J.** 2010.
38. **Geopolymer Institute.** World-wide increase in geopolymer research. [En línea] Febrero de 2014. [Citado el: 5 de Mayo de 2014.] <http://www.geopolymer.org/science/world-wide-increase-in-geopolymer-research>.
39. **VIDELA, C. y MARTÍNEZ, P.** *Caracterización físico-mecánica y microscópica de áridos ligeros de cenizas volantes producidos en frío.* s.l. : Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile., 2002.
40. *Manufacture and performance of cold bonded lightweight aggregate using alkaline activators for high performance concrete.* **Le Anh-tuan Bui, Chao-lung Hwang, Chun-tsun Chen, Kae-long Lin, Meng-ying Hsieh.** 2012, Construction and Building Materials, Vol. 35, págs. 1056–1062.
41. *Pelletized fly ash lightweight aggregate concrete: A promising material.* **Sivakumar, A. y Gomathi, P.** 42-48, s.l. : Academic Journals, 2012, Vol. Journal of Civil Engineering and Construction Technology Vol. 3(2).
42. *Effects of fly ash properties on characteristics of cold-bonded fly ash lightweight aggregates.* **Gesoglu, M., Özturan, T y Güneyisi, E.** 1869–78, s.l. : Constr Build Mater, 2007, Vol. 21(9).
43. *Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete.* **Chi, Jim, y otros, y otros.** 197–205, s.l. : Cem Concr Compos, 2003, Vol. 25(2).
44. *Effects of cold-bonded fly ash aggregate properties on the shrinkage cracking of lightweight concretes.* **Gesoglu, M, Özturan, T y Güneyisi, E.** 598–605, s.l. : Cem Concr Compos, 2006, Vol. 28(7).
45. *INFLUENCIA DE LOS CICLOS HIELO-DESHIELO EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO (CASO TUNJA).* **Diego Fernando Páez Moreno, Vicente Edilson Leal Moreno, María Restrepo Burgos.** 15, julio-diciembre, 2009, Revista Ingenierías Universidad de Medellín, Vol. 8, págs. 95-110.
46. **ASA.** ASA Granulated Blast Furnace Slag (GBFS). [En línea] [Citado el: 15 de Febrero de 2014.] <http://www.asa-inc.org.au/granulated-blast-furnace-slag.php>.
47. **Díaz Sossa, Pedro Manuel.** *Estudio de factibilidad de obtencion de hormigones gepopolimericos a partir de desechos minerales.* Santiago, Chile : Universidad de Chile, 2012.

48. **AES GENER.** *Agenda N° 1, respuesta a la Solicitud de Aclaraciones, Rectificaciones o Ampliaciones a la Adenda del Proyecto "Manejo y Disposición de RISES de combustión del Complejo Termoeléctrica.* 2010.
49. **CDT - Corporación de desarrollo tecnológico.** *Idustria del árido en Chile tomo I – Sistematización de antecedentes tecnicos y ambientales.* Santiago : Corporación de Desarrollo Tecnológico., 2001.
50. **INN.** NCh 148 Of. 68. *Cemento. Terminología. Clasificación y. Especificaciones Generales.* 1968.
51. **Ministerio de Planificacion Federal.** *Reglamento CIRSOC 201-2005 "Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón".* s.l. : INTI Instituto Nacional de Tecnologia Industrial, 2005.
52. **American Society And Testin Materials.** *ASTM C 330 - 99 Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete.* Marzo 1999.
53. **Cid, Claudia.** *Aprovechamiento de Cenizas de Combustion de Lecho Fluidizado para la elaboracion de aridos livianos.* 2008.
54. **Ministerio de salud.** Decreto Supremo N° 148. *Reglamento sanitario sobre manejo de residuos peligrosos.* Santiago, Region Metropolitana, Chile : s.n., 12 de Junio de 2003.
55. **Vásquez, Dra. Ing. Rosaura.** Estudio de las adiciones de escoria de alto horno en el comportamiento de los cementos adicionados. *IX Coloquio de Química del Cemento.* Lima, Peru : CEMENTOS PACASMAYO S.A.A., 21 de Noviembre de 2002.

## Anexo A

fcfm		LABORATORIO DE CRISTALOGRAFÍA FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE
<b>Informe de Análisis por Difracción de Rayos X</b> 141-2013		Página 1 de 3
<b>Solicitante</b> Bastian Mellado L.		<b>Fecha</b> 07/11/2013
<b>DESCRIPCIÓN DE LA(s) MUESTRA(S)</b> Las muestras se encuentran trituradas		
<b>Objeto</b> 1.- Cenizas Puchuncavi 2.- Escoria 9120 3.- Escoria proporcionada por el solicitante	<b>Procedencia</b> IDIEM, Sección Tecnología del Cemento y Hormigón.	
<b>Objetivo</b> Determinación de fases cristalinas, determinación de presencia de asbesto.		
<b>ESPECIFICACIONES DE LA MEDIDA Y TRATAMIENTO DE DATOS.</b>		
<b>Instrumento</b>	Difractómetro D8 Advance con detector lineal LynxEye, para muestras policristalinas.	
<b><math>\lambda</math></b>	1,5406 Å, correspondiente a un ánodo de Cu.	
<b>Potencia</b>	40 KV / 30mA.	
<b>Paso / Tiempo</b>	0,02° cada 0,1 segundo.	
<b>Cond. Amb.</b>	24°C, presión y humedad no controlados.	
<b>Software Análisis.</b>	Diffract Plus, V 15. 2009.; Base de datos PDF-2.	
<b>Analista</b>	Andrés Ibañez.	
<b>Resultados:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• La muestra Cenizas Puchuncavi, presenta un difractograma mixto, con fases cristalinas y una fase amorfa, que se observa antes de los 15°.</li><li>• Las muestras Escoria 9120 y Escoria proporcionada por el solicitante, presenta un difractograma predominantemente amorfo, con fases cristalinas que difractan con bajas intensidades.</li></ul>		
<b>Observaciones:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Se adjunta los difractogramas con su caracterización correspondiente.</li></ul>		
 Andrés Alejandro Ibañez Muñoz Ingeniero Químico, Jefe de Laboratorio de Análisis de Polimorfismo. Laboratorio de Cristalografía, Departamento de Física. UNIVERSIDAD DE CHILE		
Av. Blanco Encalada 2008, Santiago – Chile Teléfono: 56 (2) 9784519 - 4344 Fax: 56 (2) 6987359 email: abenez@dfi.uchile.cl		

Figura 48 Anexo A - Informe de difracción de rayos X.

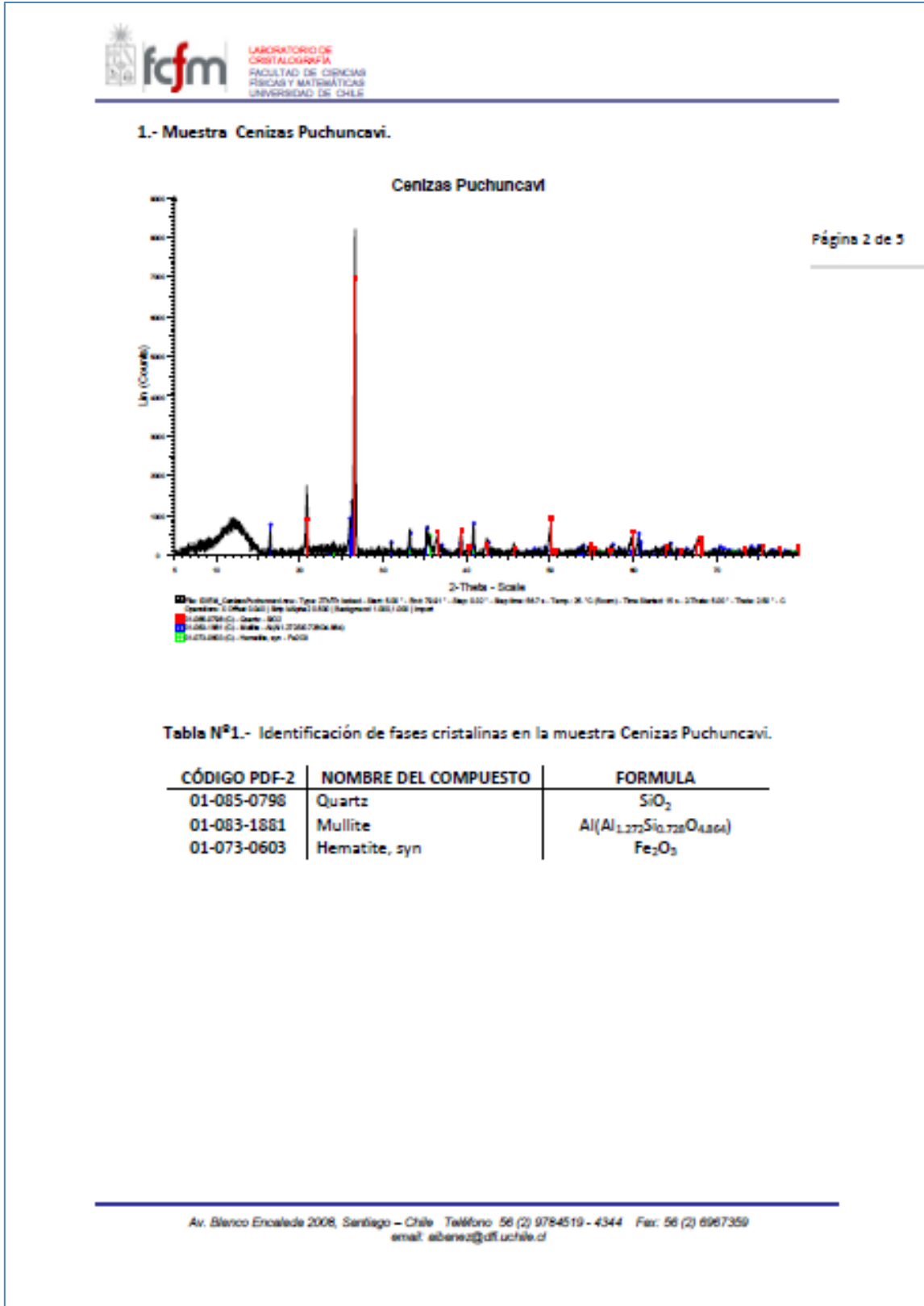
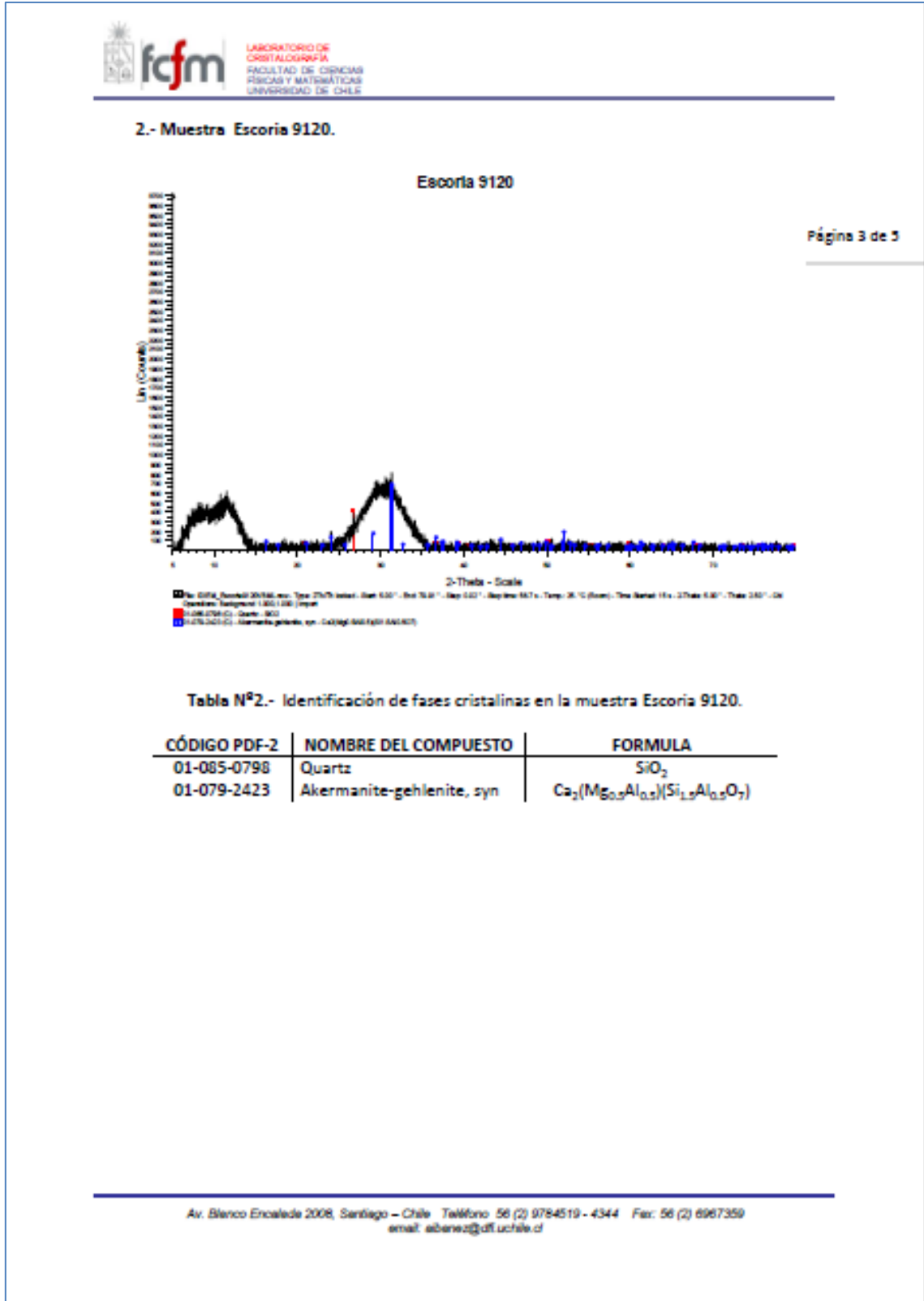


Figura 49 Anexo A - Informe de difracción de rayos X.



**Tabla N°2.- Identificación de fases cristalinas en la muestra Escoria 9120.**

Av. Blanco Encalada 2008, Santiago – Chile Teléfono: 56 (2) 9784519 - 4344 Fax: 56 (2) 6967359  
 email: aburgos@cfm.uchile.cl

Figura 50 Anexo A - Informe de difracción de rayos X.

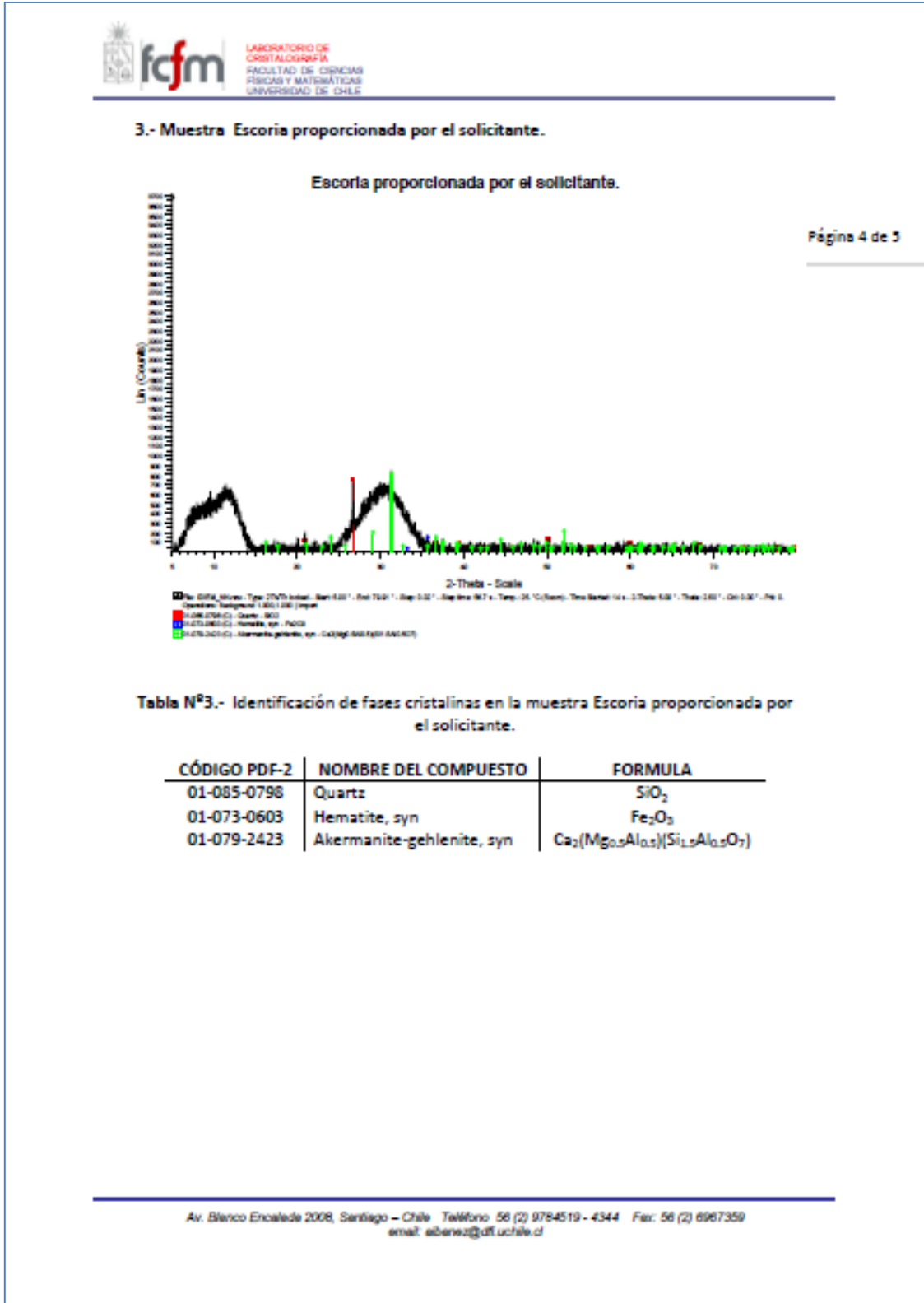


Ilustración 1 Anexo A - Informe de difracción de rayos X.

**IMPORTANTE:**

- La intensidad difractada, no implica necesariamente cantidad.
- El límite de detección de la técnica de difracción de Rayos-X, es de un 0,5% en peso de una sustancia cristalina, lo que será relativo a la naturaleza de la misma.
- No es posible analizar sustancias amorfas mediante difracción de Rayos-X ya que estas no presentan máximos de difracción.

Página 3 de 3

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

Les saluda muy atentamente,


  
Andrés Alejandro Ibañez Muñoz  
Ingeniero Químico, Jefe de Laboratorio de Análisis de Polimorfismo,  
Laboratorio de Cristalografía, Departamento de Física.  
UNIVERSIDAD DE CHILE

Figura 51 Anexo A - Informe de difracción de rayos X.



## Anexo B

<b>INFORME DE ENSAYO</b>	
<b>FECHA DE EMISIÓN</b>	: 23 de Enero de 2014.
<b>EMITIDO/ELABORADO POR</b>	: Sección Tecnología del Cemento y Hormigón / Hugo Leiva Valdivia.
<b>REFERENCIA</b>	: Ensayos físico-mecánicos y químicos de áridos para hormigones.
<b>SOLICITANTE</b>	: Universidad de Chile - FCFM.
<b>DESTINATARIO</b>	: Braulio Enrique Burgos Moya.
<b>OBRA / PROYECTO</b>	: Peletizado de escoria de alto horno.
<b>METODOLOGÍA</b>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>· NCh 164 Of 76. Áridos para morteros y hormigones – Extracción y preparación de muestras.</li> <li>· NCh 165 Of 2009. Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría.</li> <li>· NCh 1116 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la densidad aparente.</li> <li>· NCh 1117 Of 2010. Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades reales y neta y de la absorción de agua de las gravas.</li> <li>· NCh 1223 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación del material fino menor a 0,080 mm.</li> <li>· NCh 1328 Of 77. Áridos para morteros y hormigones – Determinación de la desintegración – Método de los sulfatos.</li> <li>· NCh 1369 Of 78. Áridos para morteros y hormigones – Determinación del desgaste de las gravas – Método de la Máquina de Los Ángeles.</li> </ul>	
<b>ANTECEDENTES</b>	
<b>M1</b>	: Peletizado de escoria de alto horno. <b>ID de la muestra</b> : -
<b>Procedencia de la muestra</b>	: -
<b>Muestreo efectuado por</b>	: Muestra proporcionada por el solicitante. <b>Fecha de muestreo</b> : -
<b>Lugar de muestreo</b>	: - <b>Fecha de recepción</b> : 08-Oct-13

Figura 52 Anexo B - Informe de ensayo de áridos IDIEM.

RESULTADOS		
GRANULOMETRÍA · Nch 165		
TAMICES		PORCENTAJE QUE PASA (EN PESO)
ASTM	mm	M1
2"	50	-
1 1/2"	37,5	-
1"	25	100
3/4"	19	99
1/2"	12,5	46
3/8"	9,5	17
4	4,75	1
8	2,36	-
16	1,18	-
30	0,600	-
50	0,300	-
100	0,150	-
Tamaño máximo nominal (mm)		19
Módulo de finura		6,83
Fecha ensayo		11-Dic-13
DETERMINACIÓN MATERIAL FINO · NCh 1223		
Fecha de ensayo		13-Dic-13
Material fino menor a 0,080 mm (%)		0,6
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD REAL Y NETA Y LA ABSORCIÓN DE LAS GRAVAS · Nch 1117		
Fecha de ensayo		13-Dic-13
Densidad real arido sss (kg/m <sup>3</sup> )		1.932
Densidad real arido seco (kg/m <sup>3</sup> )		1.739
Densidad neta (kg/m <sup>3</sup> )		2.156
Absorción de agua (%)		11,11
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD APARENTE · NCh 1116		
Fecha de ensayo		13-Dic-13
Densidad aparente compactada (kg/m <sup>3</sup> )		1.065
Densidad aparente suelta (kg/m <sup>3</sup> )		1.009
DETERMINACIÓN DEL DESGASTE DE LAS GRAVAS POR EL MÉTODO DE LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES - Nch 1369		
Fecha de ensayo		20-Dic-13
Grado de ensayo		5
Fracción de ensayo, mm		20 - 10
Pérdida de masa de la muestra (%)		44,2
DETERMINACIÓN DE LA DESINTEGRACIÓN POR SULFATOS · NCh 1328		
Fecha de ensayo		27-Dic-13
Sal utilizada para el ensayo		Sulfato de Sodio anhidro
Fracción de ensayo, mm		20 - 5
Pérdida de masa de la muestra, (%)		4,2

**Observación :** La determinación de la densidad aparente se realiza con una medida volumétrica distinta a lo indicado por la norma, debido a la insuficiencia de material de la muestra.

**Figura 53 Anexo B - Resultados informe áridos IDIEM.**

## Anexo C

Tabla 63 Anexo C - Densidad suelta y compacta partidas 3, 4, 9, 10, 11, 12 y 13.

Partidas	Masa suelta (g)	Densidad Aparente Suelta ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Masa compactada (g)	Densidad aparente Compactada ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )
Partida 3	772,1	1,12	821,4	1,19
	774,6	1,12	825	1,20
	765,2	1,11	816,6	1,18
Partida 4	777,1	1,13	812,2	1,18
	758,7	1,10	816,7	1,18
	778,6	1,13	816,4	1,18
Partida 9	493	0,71	528,5	0,77
	484,8	0,70	524,2	0,76
	493,8	0,72	527,1	0,76
Partida 10	388,2	0,56	414,3	0,60
	382,4	0,55	408,1	0,59
	389,1	0,56	411,5	0,60
Partida 11	688	1,00	724,5	1,05
	687,1	1,00	722,6	1,05
	689,1	1,00	728,6	1,06
Partida 12	396,1	0,57	444,7	0,64
	398,3	0,58	430	0,62
	393,8	0,57	435,3	0,63
Partida 13	702,9	1,02	767,8	1,11
	698,3	1,01	765,6	1,11
	707,6	1,03	773,5	1,12

Tabla 64 Anexo C - Densidad real saturada superficie seca ( $D_r$  sss), seca ( $D_r$  s), absorción y huecos, partidas 3, 9, 11 y 13.

Part.	Msum (g)	Msss (g)	Ms (g)	D Suelta ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	D Comp. ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$D_r$ sss ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$D_r$ s ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	$D_n$ ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Absorción (%)	Huecos (%)
Part. 3	260,4	496,0	430,1	1,1	1,2	2,11	1,83	2,53	15%	38,8%
Part. 9	34,7	148,5	114,6	0,6	0,6	1,30	1,01	1,43	30%	44,4%
Part. 11	196,0	430,1	374,0	1,0	1,1	1,84	1,60	2,10	15%	37,6%
Part. 13	195,6	414,9	373,0	1,0	1,11	1,89	1,70	2,10	11%	40,1%

Msum - Masa sumergida; Msss - Masa saturada superficie seca; Ms – Masa seca.

### Anexo D

Tabla 65 Anexo D - Reactividad potencial.

Reactividad Potencial ASTM C 1260-07														
Curado C.H. Lec. Ini.			Agua Pot. 80° C, Lec. 0			4 días, 16/12/2013			7 días, 19/12/2013			14 días, 26/12/2013		
N°	24 hrs, 11/12/2013	48 hrs, 12/12/2013	4 días, 16/12/2013	7 días, 19/12/2013	14 días, 26/12/2013	Curado C.H. Lec. Ini.	Agua Pot. 80° C, Lec. 0	4 días, 16/12/2013	7 días, 19/12/2013	14 días, 26/12/2013	Solución NaOH a 80°C			
Patrón	Probeta	Patrón	Probeta	AI	%	Patrón	Probeta	AI	%	Patrón	Probeta	AI	%	
1	5,657		5,805	5,858	0,042	0,017%	5,911	0,095	0,037%		5,867	0,051	0,020%	
2	5,873		6,021	6,070	0,049	0,015%	6,086	0,054	0,021%		6,081	0,049	0,019%	
3	5,701	4,571	5,854	5,907	0,053	0,017%	5,915	0,050	0,020%	4,572	5,904	0,039	0,015%	
4	5,985		6,082	6,140	0,058	0,019%	6,175	0,082	0,032%		6,145	0,052	0,020%	
			Promedio			0,02%		Promedio				Promedio		0,02%

Dimensiones Probetas				Dosificación			
Largo	285	mm		Agua	407,6	g	
Ancho	25	mm		Árido	1350	g	
Alto	25	mm		Cemento	600	g	

## Anexo E



# CERTIFICADO DE ANALISIS

### 1. ANTECEDENTES

Fecha : 02 / 08 / 2013  
Producto : SILICATO DE SODIO RAZÓN 2.0  
Cliente : BASTIAN MELLADO  
N° Solicitud : S/S

### 2. ANALISIS FISICO QUIMICO

Parámetro	Determinación
Alcalinidad Total (%Na <sub>2</sub> O)	14.2
Sílice Soluble ( %SiO <sub>2</sub> )	29.54
Razón	2.08
Densidad 20°C.(g/ml)	1.560
Viscosidad	950 cps
Condiciones Físicas	Líquido viscoso Opalescente

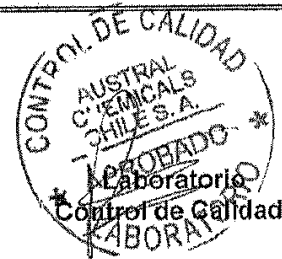


Figura 54 Anexo E - Silicato de sodio AC.



## DROGUERÍA MICHELSON S.A.

Antonio Secchi # 037 Ñuñoa  
Fonos: 25566098 – 25566205  
Fax: 25567457

### CERTIFICADO DE CALIDAD SODIO SILICATO

Lote 207988213  
Fecha de Elaboración 07/2013  
Fecha de Vencimiento 07/2015

#### PARÁMETROS DE CONTROL

PARÁMETRO	DETERMINACIÓN
Alcalinidad total (%Na <sub>2</sub> O)	9.30
Sílice Soluble (%SiO <sub>2</sub> )	29.76
Razón	3.20
Densidad 20° C (g/ml)	1.410
Viscosidad	400 cps
Condiciones Físicas	Líquido viscoso Opalescente

Nota: El presente certificado es una copia fiel del original aportado por nuestro proveedor.

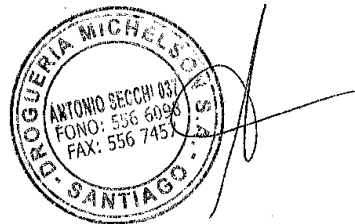


Figura 55 Anexo E - Silicato de sodio DM.

**Anexo F****Tabla 66 Anexo F - Ensayo de trituración.**

Partidas	Partida 11			Partida 13			Partida 17		
Días	1	6	8	1	6	8	1	6	8
Numero	kgf	kgf	kgf	kgf	kgf	kgf	kgf	kgf	kgf
<b>1</b>	13	50	56	37	47	43	3	14	20
<b>2</b>	17	57	57	28	49	49	6	15	19
<b>3</b>	11	40	54	25	56	51	4	13	18
<b>4</b>	16	49	51	24	43	39	5	17	18
<b>5</b>	17	44	54	23	39	42	3	18	15
<b>6</b>	13	57	56	18	44	52	4	19	21
<b>7</b>	14	55	50	25	46	56	6	14	17
<b>8</b>	16	56	54	23	40	45	5	14	16
<b>9</b>	14	45	56	25	38	53	5	15	21
<b>10</b>	15	57	64	18	43	36	5	16	22
<b>11</b>	13	42	52	27	40	48	3	18	20
<b>12</b>	13	41	51	18	43	34	4	18	18
<b>13</b>	17	48	55	22	52	50	5	14	18
<b>14</b>	14	53	56	17	43	42	4	15	17
<b>15</b>	15	51	53	30	49	54	6	13	23
<b>16</b>	14	42	58	25	53	49	4	16	16
<b>17</b>	18	55	63	27	37	41	5	18	21
<b>18</b>	13	59	57	18	41	40	7	15	22
<b>19</b>	12	55	51	27	51	55	3	16	21
<b>20</b>	17	56	51	34	40	52	4	12	17
<b>Promedio</b>	<b>15</b>	<b>51</b>	<b>55</b>	<b>25</b>	<b>45</b>	<b>47</b>	<b>5</b>	<b>16</b>	<b>19</b>

## Anexo G

**Tabla 67 Anexo G - Nombre de probetas y fechas de ensayos.**

Nombre	N°	Árido	Matriz	Razón A/C o Ac./MG	Fecha Muestreo	Hora Muestreo	Fecha de Desmolde	Fecha Ensayo
MC-AG	1	AG	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	15-01-2014
MC-AG	2	AG	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	15-01-2014
MC-AG	3	AG	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	15-01-2014
MC-AG	4	AG	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	15-01-2014
MC-AG	5	AG	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	15-01-2014
MC-AE	1	AE	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	15-01-2014
MC-AE	2	AE	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	15-01-2014
MC-AE	3	AE	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	15-01-2014
MC-AE	4	AE	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	15-01-2014
MC-AE	5	AE	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	15-01-2014
MC-AG-CH	1	AG	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	01-03-2014
MC-AG-CH	2	AG	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	01-03-2014
MC-AG-CH	3	AG	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	05-03-2014
MC-AG-CH	4	AG	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	01-03-2014
MC-AG-CH	5	AG	Matriz Cementicia	0,5	18-12-2013	16:00	20-12-2013	01-03-2014
MG-AG	1	AG	Matriz Geopolimérica	0,65	18-12-2013	17:30	20-12-2013	15-01-2014
MG-AG	2	AG	Matriz Geopolimérica	0,65	18-12-2013	17:30	20-12-2013	15-01-2014
MG-AG	3	AG	Matriz Geopolimérica	0,65	18-12-2013	17:30	20-12-2013	15-01-2014
MG-AG	4	AG	Matriz Geopolimérica	0,65	18-12-2013	17:30	20-12-2013	15-01-2014
MG-AG	5	AG	Matriz Geopolimérica	0,65	18-12-2013	17:30	20-12-2013	15-01-2014
MG-AG-HP-65	1	AG	Matriz Geopolimérica	0,65	18-12-2013	17:30	20-12-2013	15-01-2014
MG-AG-HP-65	2	AG	Matriz Geopolimérica	0,65	18-12-2013	17:30	20-12-2013	15-01-2014
MG-AG-HP-65	3	AG	Matriz Geopolimérica	0,65	18-12-2013	17:30	20-12-2013	15-01-2014
MG-AG-HP-55	1	AG	Matriz Geopolimérica	0,55	18-12-2013	18:00	20-12-2013	15-01-2014
MG-AG-HP-55	2	AG	Matriz Geopolimérica	0,55	18-12-2013	18:00	20-12-2013	15-01-2014
MG-AG-HP-55	3	AG	Matriz Geopolimérica	0,55	18-12-2013	18:00	20-12-2013	15-01-2014
MG-AG-PP-55	1	AG	Matriz Geopolimérica	0,55	26-12-2013	18:20	30-12-2014	20-02-2014
MG-AG-PP-55	2	AG	Matriz Geopolimérica	0,55	26-12-2013	18:20	30-12-2014	20-02-2014
MG-AG-PP-55	3	AG	Matriz Geopolimérica	0,65	26-12-2013	18:20	30-12-2014	20-02-2014
MG-AG-PP-65	1	AG	Matriz Geopolimérica	0,65	26-12-2013	18:20	30-12-2014	20-02-2014
MG-AG-PP-65	2	AG	Matriz Geopolimérica	0,65	26-12-2013	18:20	30-12-2014	20-02-2014
MG-AG-PP-65	3	AG	Matriz Geopolimérica	0,75	26-12-2013	18:20	30-12-2014	20-02-2014
MC-AN	1	AN	Matriz Cementicia	0,5	28-01-2014	19:00	30-01-2014	25-02-2014
MC-AN	2	AN	Matriz Cementicia	0,5	28-01-2014	19:00	30-01-2014	25-02-2014
MC-AN	3	AN	Matriz Cementicia	0,5	28-01-2014	19:00	30-01-2014	25-02-2014
MC-AN	4	AN	Matriz Cementicia	0,5	28-01-2014	19:00	30-01-2014	25-02-2014
MC-AN	5	AN	Matriz Cementicia	0,5	28-01-2014	19:00	30-01-2014	25-02-2014

AE – Arcilla expandida; AG – Árido geopolimérico; AN – Árido natural.



**Tabla 68 Anexo G - Resistencia y medidas de probetas.**

Nombre	N°	Masa(g)	Altura A	Altura B	Día C	Día D	Área	Densidad (kg/m³)	Carga Max. (kN)	Presión MPa	Promedio (MPa)
MC-AG	1	995,6	13,91	13,97	7,06	7,11	0,004	1811,6	52,1	13,2	12,6
MC-AG	2	997,8	13,83	13,83	7,11	7,05	0,004	1832,6	50,0	12,7	
MC-AG	3	1008,8	13,94	13,98	7,08	7,09	0,004	1832,9	48,9	12,4	
MC-AG	4	1007,1	13,96	13,99	7,04	7,09	0,004	1838,3	47,4	12,1	
MC-AG	5	996,1	13,70	13,76	7,11	7,04	0,004	1845,4	49,2	12,5	
MC-AE	1	750,9	14,24	14,32	7,05	7,10	0,004	1337,6	34,6	8,8	8,9
MC-AE	2	708,1	14,34	14,30	7,09	7,08	0,004	1254,2	37,4	9,5	
MC-AE	3	734,6	14,23	14,27	7,06	7,10	0,004	1309,4	33,2	8,4	
MC-AE	4	704,7	14,14	14,13	7,05	7,08	0,004	1271,7	35,7	9,1	
MC-AE	5	711,1	14,08	14,09	7,03	7,09	0,004	1289,7	34,7	8,9	
MC-AG-CH	1	1013,4	13,99	13,96	7,12	7,10	0,004	1826,4	41,7	10,5	10,6
MC-AG-CH	2	997,4	14,04	14,01	7,16	7,11	0,004	1778,6	0,0	0,0	
MC-AG-CH	3	1003	14,03	14,01	7,14	7,07	0,004	1804,4	40,1	10,1	
MC-AG-CH	4	993,3	13,85	13,83	7,06	7,08	0,004	1828,2	43,1	11,0	
MC-AG-CH	5	1001,2	14,04	14,05	7,14	7,12	0,004	1785,4	42,5	10,6	
MG-AG	1	1093,8	14,22	14,24	7,13	7,13	0,004	1925,1	121,1	30,3	30,7
MG-AG	2	1105,6	14,68	14,12	7,00	7,08	0,004	1972,4	126,3	32,4	
MG-AG	3	1093,4	14,17	14,09	7,14	7,05	0,004	1957,2	123,0	31,1	
MG-AG	4	1110	14,07	14,07	7,08	7,07	0,004	2006,7	122,1	31,1	
MG-AG	5	1046,2	13,84	13,68	7,00	7,08	0,004	1953,3	111,5	28,6	
MG-AG-HP-65	1	822,9									Descartadas por reacción de probetas
MG-AG-HP-65	2	888,1									
MG-AG-HP-65	3	928									
MG-AG-HP-55	1	912,1									
MG-AG-HP-55	2	900,7									
MG-AG-HP-55	3	1019,6									
MG-AG-PP-55	1	0,79	5,1	5,23	10,1	10,09	0,01	1500,87	24,1		
MG-AG-PP-55	2	0,82	5,12	5,17	10,08	10,08	0,01	1568,58	22,3		
MG-AG-PP-55	3	0,81	5	5	10	10	0,01	1620	23,3		
MG-AG-PP-65	1	0,72	5	5	10	10	0,01	1440	3,3		3,3*
MG-AG-PP-65	2	0,68	5	5	10	10	0,01	1360	3,1		
MG-AG-PP-65	3	0,68	5	5	10	10	0,01	1360	3,5		
MC-AN	1	1140,6	13,97	13,90	7,13	7,05	0,004	2073,2	45,3	16,4	16,72
MC-AN	2	1142,3	13,97	13,99	7,04	7,11	0,004	2078,4	63,4	16,1	
MC-AN	3	1140,8	14,03	14,05	7,09	7,10	0,004	2055,2	65,1	16,5	
MC-AN	4	1148,6	13,97	13,98	7,10	7,04	0,004	2093,6	46,6	17,0	
MC-AN	5	1150,2	14,02	14,01	7,05	7,12	0,004	2081,7	69,5	17,6	

\*) Corresponde al promedio de la cargas máxima (kN).

## Anexo H

**Tabla 69 Anexo H - Peso específico y Blaine de escoria de alto horno CAP.**

t1	m	V1	V2	t2	Peso específico	t	P	e	T	T	raíz(T)	S
°C	g	ml	ml	°C	$\gamma = \frac{m}{(V2 - V1)}$	°C	g	()	min	S	S <sup>0.5</sup>	cm <sup>2</sup> /g
20	64	0	22,3	20	2,87	21	26,6	0,5	1' 19" 05	79,05	8,89	3390
20	64	0	22,3	20	2,87	21	26,6	0,6	1' 20" 91	80,91	8,99	3428
Promedio					2,87						Promedio	3409

## Anexo I

**Tabla 70 Anexo I - Determinación de la característica de toxicidad por lixiviación TCLP para compuestos orgánicos en muestras de ceniza volante y escoria de las unidades 1, 2 y 3 del Complejo Termoeléctrico Ventanas. Concentración (mg/l)**

Compuesto	LD	Nivel regulatorio D.S. 148	Unidades 1 y 2				Unidad 3	
			M1	M2	M3	M4	M1	M2
<b>Compuestos Orgánicos Volátiles (a)</b>								
Benceno TCLP	0,001	<b>0,5</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Clorobenceno TCLP	0,002	<b>100</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Cloroformo TCLP	0,002	<b>6</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
1,4-Diclorobenceno TCLP	0,002	<b>7,5</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
1,2 Dicloroetano TCLP	0,002	<b>0,5</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
1,1-Dicloroetileno TCLP	0,002	<b>0,7</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Tetracloruro de Carbono TCLP	0,002	<b>0,5</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Tetracloroetileno TCLP	0,002	<b>0,7</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Tricloroetileno TCLP	0,002	<b>0,5</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Cloruro de Vinilo TCLP	0,01	<b>0,2</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Metilacetona TCLP	0,05	<b>200</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
<b>Compuestos Orgánicos Semivolátiles (b)</b>								
O-Cresol TCLP(**)	0,002	<b>200</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
m-Cresol TCLP(**)	0,002	<b>200</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
p-Cresol TCLP(**)	0,002	<b>200</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Cresol TCLP (**)	0,002	<b>200</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
2,4 Dinitrotolueno TCLP	0,004	<b>0,13</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Hexacloroetano TCLP	0,002	<b>3</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Nitrobenceno TCLP	0,002	<b>2</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Pentaclorofenol TCLP	0,002	<b>100</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Piridina TCLP	0,002	<b>5</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
2,4,5 Triclorofenol TCLP	0,002	<b>400</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Hexacloro-1,3 butadieno TCLP	0,002	<b>0,5</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
2,4,6 Triclorofenol TCLP	0,002	<b>2</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
<b>Pesticidas (c)</b>								
Clordano TCLP	0,01	<b>0,03</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Endrin TCLP	0,01	<b>0,02</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Heptacloro ( y su Epóxido) TCLP	0,0005	<b>0,008</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Hexaclorobenceno TCLP	0,0005	<b>0,13</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Lindano TCLP	0,005	<b>0,4</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Metoxicloro TCLP	0,0005	<b>10</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Toxafeno TCLP	0,0005	<b>0,5</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
<b>Herbicidas (d)</b>								
2,4 D TCLP	0,001	<b>10</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
2,4,6 TP ( Silvex) TCLP	0,001	<b>1</b>	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD

LD – Limite de detección; LC – Limite de cuantificación.

Fuente (48)

## Anexo J

### Análisis costo-competitividad.

A continuación se presenta un análisis somero del coste de producción de este árido, donde el análisis del costo solo se evaluó y se calculó por efectos propios de la producción del árido artificial, el cual está influenciado básicamente en cuatro factores:

1. Activador alcalino (Hidróxido de Sodio y Silicato de Sodio).
2. Secado de la escoria y la ceniza.
3. Molienda de la escoria.
4. Proceso de peletizado.

La ceniza volante a nivel mundial no supera el 65% de reutilización en los países de mayor uso de este material. Sin embargo, la escoria de alto horno en Chile es altamente utilizada, pero a nivel mundial, en países como Brasil o China, los depósitos de escoria de alto horno son hectáreas de tierra desperdiciadas en este uso, donde el precio por tonelada de escoria granulada (GGBFS) varía entre 25 a 60 USD.

En el análisis de costos se ocuparon los siguientes precios de Dólar, kWh y UF.

**Tabla 71 Anexo J - Dólar, kWh, UF**

Factor	Precio	Unidad
<b>UF</b>	\$ 23.557,0	CLP
<b>kWh</b>	\$ 85	CLP
<b>Dólar</b>	\$ 572,03	CLP

Como precio de referencia el árido natural grueso redondea los 0,47 UF/m<sup>3</sup> y áridos expandidos artificiales tales como la arcilla expandida se encuentra próxima a los 0,97 UF/m<sup>3</sup>.

El primer factor de importancia en el precio del árido es el coste del activador alcalino, que es una solución formada, por dos soluciones, hidróxido de sodio (10M) y silicato de sodio con razón 3,2 (SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O). Por lo que al conseguir un precio mayoritario en estos insumos se logra obtener una disminución del 11 % en el costo inicial del pellet. Además, de presentar la opción de utilizarse silicato de sodio anhidro, de igual manera que el hidróxido de sodio, debiendo ser diluido en una etapa previa.

El segundo factor, es el secado de la escoria de alto horno, la cual al ser enfriada bruscamente gracias a chorros de agua, este material presenta un gran porcentaje de humedad, hecho que influye negativamente en la etapa de molienda. Es necesario que la escoria se encuentre seca, con una humedad bajo al 6 %, siendo por esto necesario el secado de este material. El uso de hornos eléctricos es una opción que puede ser reemplazada o drásticamente disminuida, por secado al aire en canchas de aireación, ocupando un secado forzado por periodos mínimos de tiempo, ya que si se utiliza un horno eléctrico desde la toma directa de la escoria saturada con agua, el proceso posee un costo inviable para todo proyecto. Por lo tanto, lograr cambiar el método de

secado no solo está incentivado por el uso más eficiente de los recursos y de la energía con un fin ecológico y sustentable, sino que de esta manera se reduce de manera drástica el costo de producción del pellet.

El tercer factor incidente en el coste del pellet de manera significativa, es la molienda de la escoria de preparación antes del proceso de peletizado mediante el disco. Proceso que para este estudio se fijó de tal manera de alcanzar una finura sobre los 3500 Blaine. Esto debido a estudios previos (40), donde se observa que una superficie específica de 3500 cm<sup>2</sup>/g (Blaine), permite un buen comportamiento ante la activación alcalina. Sin embargo, este hecho aunque se ve ratificado en el proceso de peletizado realizado, no descarta la posibilidad de que se logre resultados similares a una menor finura, lo que se puede traducir en menor tiempo de molienda o de raíz cambiar el método de molienda de molino de bolas, por molienda por molinos de barras, martillos, o verticales. Los tipos de molinos utilizados en la trituración de este tipo de materiales en función de la finura buscada son:

- Molino trapezoidal.
- Molino de bolas.
- Molino Raymond.

Siendo el molino Raymond un triturador que entrega la mayor finesa en función del tiempo de molienda, e incluso aceptando material con un máximo de 6 % de humedad, permitiendo la viabilidad del secado al aire de la escoria de alto horno, siendo descartado el costo de secado del material. Permitiendo un procesamiento por sobre los 600 kg por hora, con un consumo de 15 kW, disminuyendo el costo de esta etapa. Otra opción a la molienda es adquirir la escoria de alto horno ya procesada GGBFS, con una finura deseable para el proceso de activación alcalina.

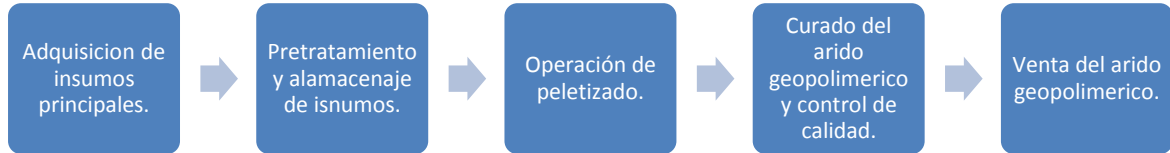
Debido a lo anterior considerando los insumos en forma anhidra, proceso de secado al aire, molienda eficiente y un gasto energético aproximado de 2 kWh por tonelada de pellet geopolimérico producido, se logra obtener un precio competitivo de 0,77 UF/m<sup>3</sup>, precio intermedio entre los precios de mercado mayorista del árido natural de semejante granulometría de 0,47 UF/m<sup>3</sup> y al precio de la arcilla expandida aproximadamente de 0,97 UF/m<sup>3</sup>. Adicionalmente si se toma la opción de adquirir la escoria de alto horno en forma procesada (GGBFS) el precio es 1,22 UF/m<sup>3</sup>.

Lo expuesto logra concluir que en gran parte, el costo final del pellet será en base a la logística interna bilateral, al obtener los insumos (Activadores alcalinos) al mejor precio, y al disponer de manera funcional los subproductos tales como Escoria de Alto Horno y Ceniza Volante. Ya que de esta manera se logra reducir los costes de la fase de operación y producción del producto. Y el margen de utilidades que se lograr obtener del mercado es en parte captando una sección de la necesidad de áridos livianos en la construcción.

Sin embargo el público objetivo de mayor alcance para este pellet, es aquel consumidor, que requiere o que busca emplear insumos ecológicos, viables, durables y de alto desempeño. Y de esta manera traspasar el valor sustentable del árido geopolimérico en estudio, al proyecto constructivo del cliente que lo requiera.

### Línea teórica de producción del árido geopolimérico.

Una teórica línea de producción de árido geopolimérico poseerá las siguientes actividades.



#### ***Adquisición de insumos principales.***

La adquisición de fuentes de aluminosilicatos tales como la escoria de alto horno, ceniza volante o algún otro material geopolimerizable, posee como alternativa la obtención por donación o al prestar servicio de control de desechos y debido a ser materiales remanentes de procesos industriales, es posible adquirirlo sin un coste directo por insumo, sino solo por transporte o incluso obtener beneficios ya que se cobraría por el control de estos remanentes. También se puede adquirir por compra directa, donde por ejemplo la escoria de alto horno se puede adquirir en el mercado internacional como un producto ya sea bruto (GBFS) o procesado (GGBFS) el cual se encuentra con una mayor superficie específica.

Y para formar la solución activadora, la adquisición del hidróxido de sodio como el silicato de sodio se pueden obtener en forma anhidra en el mercado nacional o internacional.

#### ***Pretratamiento y almacenamiento.***

Es necesario controlar la humedad y superficie específica de estos materiales por lo que deben pasar por los siguientes etapas. Donde en primer lugar, el material con un alto contenido de humedad debe secarse lo que puede realizarse en hornos o en canchas de secado, ya que es necesario que la humedad del material no supere el 6%. Para luego pasar por un proceso de molienda. Fase necesaria si la escoria de alto horno se obtiene en forma de gruesa (GBFS) y en caso contrario si se obtiene en forma molida (GGBFS) no sería necesario ya que posee una finura mayor a  $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$ . Mientras que la ceniza volante no requiere molienda.

El almacenaje debe permitir que el material pre-tratado no se exponga a la humedad ambiental y así mantener las condiciones óptimas para el proceso de peletizado.

También es necesario en caso de adquirir las soluciones en formato anhidro, diluir y acondicionar el hidróxido de sodio en una solución 10M y el silicato de sodio en una solución de razón 3,2, para su posterior uso como solución activadora. Proceso que en el caso del hidróxido de sodio debe hacerse bajo estrictos estándares de seguridad y manejo.

***Operación de peletizado.***

El proceso de peletización posee las etapas descritas en la tabla 22, donde los parámetros del proceso variarán acorde a la cantidad de material procesado, por lo cual de manera general se enumeran las etapas siguientes:

- a. Dosificación de fuentes de aluminosilicatos y núcleos.
- b. Dosificación de la solución activadora.
- c. Homogenización de las fuentes de aluminosilicatos en disco peletizador.
- d. Aplicación de la solución activadora en disco peletizador.
- e. Crecimiento de pellets en disco peletizador.

Tareas que en la línea de proceso teórica deben ser complementadas por la etapa cíclica siguiente.

- f. Tratamiento de remanentes y reincorporación a la cadena de proceso.

La cual permitirá una recirculación de los propios desechos del proceso de peletizado a la cadena de actividades disminuyendo los residuos totales de la línea de producción.

***Curado del árido geopolimérico y control de calidad.***

El árido peletizado debe ser curado por un mínimo de 8 días a 20°C con una humedad de 60%. Esto debido a que el pellet alcanza sobre el 90 % de su resistencia final a esta edad. Los cuales deben ser ensayados para el control de calidad según:

- i. IRAM 1567
- ii. ACI 213R – 03

Estudios previos ha demostrado que un curado entre 30 °C a 60 °C, mejora las características mecánicas y presentan una baja en la densidad de los pellet geopoliméricos a base de materiales similares. Factor interesante para futuros estudios, donde también se puede evaluar económicamente estas alternativas, ya que un curado a altas temperaturas se traduce en un mayor gasto energético.

***Almacenaje de producto final y venta del árido geopolimérico.***

Finalmente el almacenamiento de este pellet no posee diferencia de cómo se debe acopiar los áridos naturales comúnmente utilizados, esto debido a la resistencia mecánica, al desgaste y a la desintegración. Y tampoco sería necesario tratar los terrenos de acopio ante posibles materiales lixiviados, ya que no presentan metales pesados por sobre lo exigido, lo que permite considerar este árido como un material inofensivo al medio ambiente.

**Análisis FODA.**

A continuación se enumeran las fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas de este producto, y cómo interactúan entre ellas:

***Fortalezas:***

El pellet producido, logró ser un árido viable, de fácil manufactura mediante el uso de disco peletizador. Destaca un proceso inocuo con el medio ambiente mediante una activación en frío (solución alcalina) por lo que no produce de manera directa liberación de CO<sub>2</sub> a la atmosfera.

Es un pellet caracterizado como árido liviano, capaz de producir hormigones con densidad aproximada a 1850 kg/m<sup>3</sup>, lo cual se traduce en elementos livianos, y en consecuencia se disminuye el peso propio de la estructura.

Posee un buen comportamiento ante solicitud de compresión, y presenta una curva granulométrica dentro de los límites sugeridas para áridos livianos de tamaño 5-20 mm, excelente resistencia a la desintegración y un bajo desgaste en la Máquina de Los Ángeles.

***Oportunidades:***

La construcción es un sector en continuo crecimiento (aproximadamente 4 %), por lo que la demanda de acero y hormigón poseen una tendencia incremental, por lo cual la producción de escoria de alto horno, es un subproducto de alta producción, y el árido un recurso natural de gran necesidad. Lo que se traduce como una oportunidad a nivel de materia prima para la producción del pellet, así como un nicho de posible demanda de alternativas viables al árido natural ya sea de río o chancado.

Otro uso de este pellet o de algún aglomerado del mismo tipo es la estabilización de desechos industriales tales como escoria de alto horno, cenizas volantes, silica fume, o los restos del calcinamiento de la cascara de arroz, entre otros, permitiendo así neutralizar este tipo de subproductos disminuyendo drásticamente su impacto en el medio ambiente, ya sea por suspensión a la atmosfera debido a la fineza de estos, o la contaminación al ser transportados a flujos subterráneos mediante procesos de lixiviación o suspensión en fluidos.



**Debilidades:**

Posee un precio mayor que el árido natural, y el de la arcilla expandida, sin embargo, los costos están fuertemente influenciados por el método de secado y molido, lo que al cambiar el método y tecnología de estos procesos, se puede lograr mayor competitividad, alcanzado como cazo limite un precio intermedio entre el árido natural y la arcilla expandida.

La absorción propia del pellet superior a 11 %, se traduce en una mayor necesidad de agua de amasado para la confección de hormigón, pero esta característica puede ser apaliada mediante el uso de aditivos fluidificantes.

**Amenazas:**

La gran amenaza exterior frente a la posible entrada de este pellet al mercado, es el mercado del árido natural, en especial en un país con grandes cordones montañosos como lo es Chile, con grandes depósitos rocosos, así como lechos de ríos. Sin embargo la alta demanda de árido en sector densamente poblados como es la cuenca de Santiago, aislado y apartado de las zonas de extracción y chancado. Esto es mencionado en el *“Industria Del Árido En Chile; Tomo I”*, en el cual cita *“La capacidad de extracción de los cauces está regulada por efectos naturales de deshielo en la alta montaña, la cual se ha visto fuertemente reducida en los últimos años por efectos climáticos. Además, la capacidad de renovación del material no sería suficiente para cubrir la demanda por este material existente en la actualidad.*

*Por otro lado, el Plan Regulador restringe de cierto modo la instalación de plantas de procesamiento de áridos en los cauces de los ríos y esteros, lo que significaría trasladar complejas instalaciones con altos costos, situación que no es permitida por la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, dado el gran riesgo de inundación que existe, por encontrarse estos cauces muy cercanos a la cordillera.” (49)*

La segunda gran amenaza, es el mercado actual de árido artificial que hoy es un área en desarrollo, ocupándose aun tímidamente en el sector de la construcción. Actualmente el uso de árido reciclado es fuertemente utilizado en pavimento y carreteras, comportamiento que no se ve reflejado en el sector de la construcción de vivienda y edificios. Sin embargo la gran ventaja que presenta este pellet en comparación con los áridos artificiales ocupados hoy en día como la arcilla expandida, es que su obtención es mediante un proceso frío, por lo cual la utilización de hornos a gran temperatura, manejo de materias fundentes o grandes liberaciones de CO2 ambiental son elementos evitados por completo.

A continuación se ilustra la matriz FODA conglomerando el análisis superficial, ante la posibilidad de producir el pellet en cuestión e introducirlo al mercado actual.

**Tabla 72 Anexo J - Análisis FODA.**

FODA		Análisis Interno	
		Fortalezas 1.- Respaldo técnico. 2.- Cumplimiento de normas actuales. 3.- Árido artificial liviano. 4.- Árido artificial ecológico. 5.- Durabilidad respaldada. 6.- Proceso de manufactura factible y de gran facilidad de control de parámetros.	Debilidades 1.- Alto costo, en rango de baja producción. 2.- Baja difusión de datos históricamente investigados. 3.- Producto entrante a un mercado ya establecido. 4.- Alta absorción.
Análisis Externo	<b>Oportunidades</b> 1.- Producción continua y creciente de Escoria AH y Ceniza Volante. 2.- Necesidad continúa de áridos. 3.- Valoración creciente de insumos ecológicos. 4.- Necesidad de disminución de producción de CO2. 5.- Disminución de áreas de extracción de áridos.	<b>Estrategia FO</b> 1.- Certificar el pellet como producto ecológico, y venderlo como tal. 2.- Establecer dosificaciones en su uso como árido para hormigón, y/o otros usos, como jardinería. 3.- Lograr un traspaso de los beneficios del mercado de los bonos de carbono al cliente final. 4.- Establecer localidad operativa o de almacenaje, en las cercanías de los depósitos de los desechos en cuestión.	<b>Estrategia DO</b> 1.- Lograr acuerdos estratégicos con los productores de Escoria de Alto horno y Ceniza volante, buscando utilidades en un principio como manejo y control de desechos. 2.- Emplear aditivos plastificantes y/o hiperplastificantes, para disminuir la utilización de agua en dosificaciones de hormigón. 3.- Atracción mediante marketing intensivo, publicitando en gran parte su valor como producto verde. 4.- Respaldarse técnicamente, mediante la coalición con algún laboratorio certificando las propiedades publicitadas.
	<b>Amenazas</b> 1.- Mercado competitivo de árido natural. 2.- Venta nacional de Escoria de Alto Horno. 3.- Mercado competitivo de áridos artificiales.	<b>Estrategia FA</b> 1.- Buscar proveedores internacionales de los desechos donde manejen grandes volúmenes de producción tales como China, o Brasil. 2.- Publicitar el hecho de ser un árido artificial técnicamente efectivo buscando obtener beneficios de la plus valía otorgado por ser producto "verde".	<b>Estrategia DA</b> 1.- Buscar una máxima reducción de costos, bajo una estrategia de alta producción. 2.- Marketing intensivo, recalcando el factor sustentable y técnico. 3.- Asociarse con proveedores de aditivos plastificantes, buscando no solo respaldo técnico, sino que también estudiar el hecho de proveedor con mezclas prefabricadas de hormigón liviano.