



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

TECNOLOGÍAS DE MEJORAMIENTO DE LA CENIZA VOLANTE CON ALTOS CONTENIDOS DE CARBÓN Y SUS BENEFICIOS AL UTILIZAR CENIZA MEJORADA COMO ADICIÓN AL CEMENTO PORTLAND

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
LUIS ANDRES YAÑEZ VALDES

PROFESOR GUÍA:
FEDERICO DELFÍN ARIZTÍA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MIGUEL GONZALEZ TALEP
DAVID CAMPUSANO BROWN

SANTIAGO - CHILE
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE: Ingeniero Civil
POR: Luis Andrés Yáñez Valdés
FECHA: 06 de mayo del 2018
PROFESOR GUÍA: Federico Delfín Aristía

TECNOLOGIAS DE MEJORAMIENTO PARA LA CENIZA VOLANTE RESULTANTE DE LA COMBUSTIÓN DE CARBÓN EN PLANTAS TERMoeLECRICAS A FIN DE OPTIMIZAR SU DESEMPEÑO COMO MATERIAL CEMENTICEO EN LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN

En el presente estudio se describe una investigación sobre tecnologías utilizadas para reducir el contenido de carbón residual en la ceniza volante generada como desecho en la combustión de carbón en plantas termoeléctricas y permitir su aprovechamiento como material cementiceo suplementario, de calidad aceptable, como adición al clinker en la fabricación de cementos de mayor eficiencia y mejor comportamiento medio ambiental que el cemento portland. Lo cual representa actualmente una efectiva metodología de mejoramiento en los índices de huella de carbono y sustentabilidad de la construcción en hormigón, a nivel nacional.

La necesidad de abordar este estudio surge de la constatación de los altos contenidos de carbón residual presentes en la ceniza volante, proveniente de plantas termoeléctricas que operan a carbón, y específicamente, para el presente estudio, de la proveniente de la central termoeléctrica de AES Gener ubicada en Las Ventanas, cuyas cenizas presentan niveles de pérdidas por calcinación, que bordea el 22%, valor significativamente superior al límite de 6% establecido por las normas que rigen el uso de estas cenizas como adición.

En una primera etapa, este estudio contempla efectuar una recopilación de antecedentes sobre las centrales termoeléctricas que operan a carbón en el país, y sobre metodologías existentes para la reducción del contenido de carbón de las cenizas generadas en este tipo de plantas, con la finalidad de obtener un material compatible como reemplazo parcial de Clinker en el cemento permitiendo con ello mejorar la sustentabilidad de los hormigones.

En la etapa experimental, se procede a la puesta a punto de uno de los métodos de mejoramiento de ceniza volante, tratamiento de extracción del carbón residual por flotación, para finalmente, evaluar las propiedades mecánicas de morteros, por medio del ensayo de probetas Rilem, variando la composición del cemento (relación cemento/adición de ceniza), y la calidad de la ceniza en función del contenido de carbón residual (22%, 16%, 12% y 7%), con la finalidad de determinar el porcentaje óptimo de remplazo y pureza de la ceniza volante a utilizar como adición en cementos compuestos, técnica y económicamente factibles, teniendo como referencia su comportamiento mecánico a edades de 7, 28 y 56 días.

Agradecimientos

En primero lugar dar las gracias a mi familia, por el apoyo otorgado al comenzar este viaje, y su constante preocupación durante el desarrollo de este.

Agradezco a Don Federico Delfín por su constante preocupación, apoyo y disposición para poder completar esta memoria, gracias a él todo esto ha sido posible.

También doy las gracias a todos aquellos que de alguna u otra forma me ayudaron a completar este proceso, a quienes que con una pequeña palabra o llamado de atención (o simplemente reto) me lograron a ayudar a terminar este importante proceso en mi vida.

Finalmente y por sobre todas las cosas doy las gracias a mi Amor, Grey Parraguez, quien ha sido un pilar fundamental durante todo el desarrollo de este viaje, y que gracias a su apoyo incondicional finalmente he logrado terminar.

Muchas Gracias.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVOS	2
RESULTADOS ESPERADOS	3
CAPÍTULO 1: CENIZA VOLANTE Y HORMIGONES	4
1.1. COMPOSICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LA CENIZA VOLANTE.	4
1.1.1. Clasificación de la ceniza volante según ASTM C618.	6
1.2. MORFOLOGÍA Y PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CENIZA.	7
1.3. POTENCIALES USOS DE LA CENIZA VOLANTE.	8
1.3.1. Uso de la ceniza como absorbente	8
1.3.2. Uso de la ceniza en la agricultura	8
1.3.3. Recuperación de aluminio	9
1.3.4. Creación de ladrillos, cerámicos y vidrios.	9
1.3.5. Fabricación de geopolímeros.....	9
1.3.6. Hormigones con alto contenido de ceniza volante.	9
CAPÍTULO 2: CENTRALES TERMOELÉCTRICAS, DISTRIBUCIÓN Y PROYECCIONES EN CHILE.....	10
2.1. REGLAMENTACIÓN NACIONAL PARA LA OPERACIÓN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS.	14
2.2. PROYECCIONES DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA A TRAVÉS DE CARBÓN. ..	16
2.2.1. Proyectos de Generación Eléctrica en Construcción.	17
2.2.2. Proyectos energéticos en evaluación ambiental- Proyectos con RCA Aprobada.....	18
CAPÍTULO 3: MEJORAMIENTO DE LA CENIZA VOLANTE.	20
3.1. METODOLOGÍAS DE MEJORAMIENTO DE LA CENIZA VOLANTE.	20
3.1.1. Tamizado.	20
3.1.2. Activación mecánica de la ceniza volante (molido).....	23
3.1.3. Aglomeración por medio de aceite.....	25
3.1.4. Separación triboelectrostática.	26
3.1.5. Flotación.	28
3.2. SELECCIÓN DEL MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE CARBÓN.	32
CAPÍTULO 4: MEJORAMIENTO DE LA CENIZA VOLANTE.	33
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA VOLANTE	33
4.1.1. Determinación del contenido de óxidos.	33

4.1.2.	Contenido de carbón.	34
4.1.3.	Material retenido por el tamiz 325.	35
4.1.4.	Superficie específica (Método Blaine).	36
4.2.	CONSTRUCCIÓN DE CELDA DE FLOTACIÓN	37
4.2.1.	Diseño y construcción de la celda de flotación.....	37
4.2.2.	Selección de los reactivos.	41
4.2.3.	Determinación de la frecuencia de rotación y presión de aire.	41
4.2.4.	Determinación de la dosis de colector y espumante.	44
4.2.5.	Evaluación del reproceso de lotes de ceniza y la repetibilidad de la metodología.....	46
4.3.	PROPIEDADES DE LA CENIZA TRATADA, Y CARACTERIZACIÓN DE LA CENIZA VOLANTES MEJORADAS	47
4.3.1.	Contenido de Óxidos.	47
4.3.2.	Porcentaje de material retenido por tamiz 325, Superficie específica, y peso específico de las cenizas tratadas.....	48
4.4.	EXTRACCIÓN DEL CARBÓN DE LA CENIZA VOLANTE.	48
CAPÍTULO 5: CONFECCIÓN DE MORTEROS Y EVALUACIÓN DE ESTOS.		50
5.1.	METODOLOGÍA DE DOSIFICACIÓN DE CEMENTOS Y CONFECCIÓN DE PROBETAS.	50
5.1.1.	Homogenización de la ceniza volante.	50
5.1.2.	Confección y embalado de las dosis de cemento	51
5.1.3.	Confección de morteros con condiciones de laboratorio controlado.	52
5.2.	CONFECCIÓN DE LOS MORTEROS Y DETERMINACIÓN DE LA FLUIDEZ DE LA MEZCLA.	52
5.2.1.	Mezclado inicial de los morteros.	54
5.2.2.	Determinación de la consistencia de los morteros.	55
5.2.3.	Confección de las probetas y curado en laboratorio.....	57
5.3.	DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA DE LOS MORTEROS.	58
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.		70
BIBLIOGRAFÍA		72

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Tipos de carbón y propiedades.</i>	5
<i>Tabla 2: Composición química de cenizas en distintas zonas del mundo.</i>	5
<i>Tabla 3: Tipo de ceniza volante de acuerdo con norma ASTM C618.</i>	6
<i>Tabla 4: Tipo de ceniza volante de acuerdo con norma EN 450-1.</i>	6
<i>Tabla 5: Requisitos físicos de la ceniza volante de acuerdo con ASTM C618.</i>	8
<i>Tabla 6: Cantidad de Centrales de Energía por tipo de Combustible utilizado final, diferenciados por Sistemas de Energías.</i>	12
<i>Tabla 7: Centrales de Energía cuyo combustible es el Carbón.</i>	13
<i>Tabla 8: Composición química de cenizas volantes y pérdidas por calcinación</i>	23
<i>Tabla 9: Distribución del tamaño de partícula y superficie específica luego del proceso de activación mecánica.</i>	23
<i>Tabla 10: Evaluación de distintos colectores para la extracción de ceniza volante</i>	30
<i>Tabla 11: Contenido de óxidos para ceniza con un 22% de pérdidas por calcinación (LOI).</i>	34
<i>Tabla 12: Humedad y pérdida por calcinación de cenizas volante de central termoeléctrica Ventana.</i>	35
<i>Tabla 13: Material retenido por tamiz N°325.</i>	36
<i>Tabla 14: Superficie específica Blaine y peso específico de la ceniza (LOI 22%).</i>	36
<i>Tabla 15: LOI de cenizas según presión de aire utilizada.</i>	42
<i>Tabla 16: LOI de cenizas según frecuencia de rotación utilizada.</i>	42
<i>Tabla 17: LOI de cenizas según dosis de espumante.</i>	44
<i>Tabla 18: Pérdida por calcinación según dosis de colector para 0.3 [cm³/kg] de MIBC.</i>	45
<i>Tabla 19: Pérdida por calcinación según dosis de colector para 0.4 [cm³/kg] de MIBC.</i>	45
<i>Tabla 20: Parámetros seleccionado para extracción de carbón de la ceniza.</i>	46
<i>Tabla 21: Pérdidas por calcinación de lotes de ceniza reprocesado.</i>	46
<i>Tabla 22: Evaluación de la repetibilidad del proceso de extracción de carbón de la ceniza volante.</i>	47
<i>Tabla 23: Difracción de rayos x para ceniza con un 7% de pérdidas por calcinación.</i>	47
<i>Tabla 24: Material retenido por tamiz N°325 según pérdida por calcinación.</i>	48
<i>Tabla 25: Superficie y peso específico según pérdida por calcinación.</i>	48
<i>Tabla 26: LOI promedio por lote de ceniza utilizado</i>	49
<i>Tabla 27: Dosis de cemento utilizadas para evaluar la ceniza volante.</i>	51
<i>Tabla 28: Dosificación norma NCh 158.Of67.</i>	52
<i>Tabla 29: Granulometría de la arena normalizada.</i>	53
<i>Tabla 30: Consistencia de los morteros según adición y LOI de las cenizas.</i>	55
<i>Tabla 31: Resistencia a la tracción por flexión y compresión sin adición de ceniza.</i>	59
<i>Tabla 32: Resistencia a la tracción por flexión y compresión de la ceniza con LOI 22%.</i>	60
<i>Tabla 33: Resistencia a la tracción por flexión y compresión de la ceniza con LOI 16%.</i>	62
<i>Tabla 34: Resistencia a la tracción por flexión y compresión de la ceniza con LOI 12%.</i>	63
<i>Tabla 35: Resistencia a la tracción por flexión y compresión de la ceniza con LOI 7%</i>	65

Índice de figura

<i>Figura 1: Ceniza volante tipo F.</i>	4
<i>Figura 2: (a) Cenosferas, (b) Partículas de carbón.</i>	7
<i>Figura 3: Total Nacional de la Capacidad de Generación Eléctrica Neta Instalada por Tecnología en MW.</i>	11
<i>Figura 4: Cantidad de Centrales Termoeléctricas creadas por año</i>	12
<i>Figura 5: Límites de emisión para fuentes emisoras existentes (ppm)</i>	14
<i>Figura 6: Límites de emisión para fuentes emisoras nuevas.</i>	14
<i>Figura 7: ingreso esperado de operación de proyectos de generación eléctrica en construcción entre 2007 y 2017 en MW.</i>	17
<i>Figura 8: Total de proyectos generación eléctrica en construcción por tecnología en MW. ..</i>	18
<i>Figura 9: Evolución de proyectos de generación eléctrica con RCA aprobada en MW y MMUSD.</i>	19
<i>Figura 10: Microscopía óptica de fracción de ceniza de tamaño menor a 45 µm en ceniza tipo C (Partículas negras corresponden a carbón en la ceniza).</i>	21
<i>Figura 11: Perdidas por calcinación en diferentes lotes de ceniza clase F, según rango de tamaño.</i>	22
<i>Figura 12: Perdidas por calcinación en diferentes lotes de ceniza clase C según rango de tamaño.</i>	22
<i>Figura 13: Resistencia a la compresión y densidad de morteros con un 50% de remplazo de clinker a 28 días.</i>	25
<i>Figura 14: Diagrama de columna de aglomeración utilizada para mejorar ceniza volante. ..</i>	26
<i>Figura 15: Esquema de separador triboelectrostático.</i>	27
<i>Figura 16: Diagrama de celda de flotación industrial.</i>	28
<i>Figura 17: Evaluación de dosis de colector para la extracción de carbón de la ceniza volante</i>	31
<i>Figura 18: Evaluación de dosis de colector y velocidad de agitación en la extracción de carbón de la ceniza volante.</i>	31
<i>Figura 19: Etapas del proceso de construcción y evaluación de la celda de flotación.</i>	37
<i>Figura 20: Modelo de una celda de flotación.</i>	38
<i>Figura 21: Zonas en una celda de flotación (1) Zona de mezcla, (2) Zona de separación y (3) Zona de espuma.</i>	39
<i>Figura 22: Mecanismo de inyección de aire a celda de flotación.</i>	39
<i>Figura 23: Agitador de la celda de flotación.</i>	40
<i>Figura 24: Modelo de celda de flotación.</i>	40
<i>Figura 25: LOI de cenizas según la presión de aire utilizada.</i>	42
<i>Figura 26: LOI de cenizas según frecuencia de rotación utilizada.</i>	43
<i>Figura 27: Proceso de flotación a distintas velocidades de rotación (a) 2000 RPM. (b) 3000 RPM.</i>	43
<i>Figura 28: LOI de cenizas según dosis de espumante.</i>	44
<i>Figura 29: LOI según dosis de colector y espumante.</i>	45
<i>Figura 30: Metodología de dosificación confección de los morteros.</i>	50
<i>Figura 31: Bolsas de 1.500 g de arena normalizada según NCh 158 Of67.</i>	53
<i>Figura 32: Metodología de confección de probetas y determinación de la consistencia de los morteros.</i>	53

<i>Figura 33: (a) Contenedor con la mezcla de cemento y agua (b) equipo de mezcla automático para morteros.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 34: Metodología de confección del mortero.</i>	<i>54</i>
<i>Figura 35: Determinación de la consistencia en la mesa de sacudidas.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 36: Consistencia de los morteros según adición y LOI de las cenizas</i>	<i>56</i>
<i>Figura 37: Metodología de confección de las probetas.</i>	<i>57</i>
<i>Figura 38: (a) Fijación del molde a mesa de compactación, (b) primera capa de mortero antes de la compactación.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 39: (a) Insertando la segunda capa, (b) Muestra enrasada, y lista para ingresar a cámara de curado.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 40: Resistencia a la compresión y tracción por flexión sin adición de ceniza.</i>	<i>59</i>
<i>Figura 41: Resistencia a la compresión de la ceniza con LOI 22%</i>	<i>60</i>
<i>Figura 42: Resistencia a la tracción por flexión de la ceniza con LOI 22%</i>	<i>61</i>
<i>Figura 43: Resistencia a la compresión de la ceniza con LOI 16%</i>	<i>62</i>
<i>Figura 44: Resistencia a la tracción por flexión de la ceniza con LOI 16%</i>	<i>63</i>
<i>Figura 45: Resistencia a la compresión de la ceniza con LOI 12%</i>	<i>64</i>
<i>Figura 46: Resistencia a la tracción por flexión de la ceniza con LOI 12%</i>	<i>65</i>
<i>Figura 47: Resistencia a la compresión de la ceniza con LOI 7%</i>	<i>66</i>
<i>Figura 48: Resistencia a la tracción por flexión de la ceniza con LOI 7%</i>	<i>66</i>
<i>Figura 49: Resistencia a la compresión para una adición del 10% de ceniza.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 50: Resistencia a la compresión para una adición del 20% de ceniza.</i>	<i>67</i>
<i>Figura 51: Resistencia a la compresión para una adición del 30% de ceniza.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 52: Resistencia a la compresión para una adición del 40% de ceniza.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 53: Resistencia a la compresión para una adición del 50% de ceniza.</i>	<i>69</i>

Introducción

La evidencia científica del calentamiento global, como fenómeno antropogénico de consecuencias catastróficas para la humanidad, está motivando la búsqueda de tecnologías conducentes a la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero, la cual corresponde a una de las principales fuentes causantes de ese fenómeno. Actualmente la industria cementera se encuentra como uno de los mayores responsables individuales de las emisiones de CO₂, con un aporte de aproximadamente un 5% de estas emisiones a nivel global [1], esto debido a que el Clinker, principal componente del cemento Portland, involucra altos niveles de consumo de energía y altas emisiones de CO₂ a la atmósfera [2], lo cual lo convierte en un material con una de las mayores huellas de carbono al ser producido [2]. De aquí que exista, a nivel mundial, la necesidad de trabajar en la búsqueda y estudio de materiales que puedan ser utilizados como adición a los hormigones en reemplazo al Clinker para la producción cementos compuestos.

Entre estos materiales, la ceniza volante derivada de la combustión de carbón destaca por sus excelentes propiedades químicas, ideales para ser utilizada como adición al Clinker en la fabricación de cementos compuestos [3]. La provisión de estas cenizas ha sido mayoritariamente, la disponible en los grandes acopios asociados a Centrales termoeléctricas, debido al cambio de las tecnologías de combustión que impera en estas plantas, las cuales buscan disminuir la emisión de CO₂ al ambiente, que involucra menores temperaturas en el proceso de combustión y el consiguiente aumento en la concentración de carbón residual en la ceniza volante depositada [4]. Esto ha dado origen a la necesidad de investigar tecnologías de mejoramiento de la ceniza que permitan reducir el contenido de carbón, permitiendo su viabilidad como material cementiceo incorporable como adición a los hormigones en reemplazo de una proporción de cemento portland.

Objetivos

OBJETIVOS GENERALES

Mejoramiento y caracterización de una muestra de ceniza volante proveniente de la planta termoeléctrica de AES Gener, ubicada en Las Ventanas V Región, utilizando la metodología para la extracción del contenido de carbón residual que se derive del análisis de las metodologías existentes en la práctica internacional para estos efectos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

Los objetivos específicos de esta memoria son:

- Levantamiento del estado del arte para las tecnologías de mejoramiento de la ceniza volante.
- Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de mezclas cementantes con distintos porcentajes de adición de ceniza volante.
- Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de un mortero, con un mismo porcentaje de sustitución de cemento, para cenizas con iguales pérdidas por calcinación.
- Determinación de la adición óptima de ceniza y contenido de carbón de esta, para ser utilizada como en una viable fuente de remplazo del cemento portland para hormigones, por medio de la evaluación de morteros.

Resultados esperados

Los resultados que se esperan de esta memoria son:

- Encontrar metodologías factibles de implementar que permitan mejorar la ceniza obtenida de la combustión del carbón en las plantas termoeléctricas, para uso como adición al cemento portland.
- Obtener curvas que permitan caracterizar el comportamiento de las propiedades de los morteros en estudio, con diferentes proporciones de reemplazo de ceniza volante mejorada, y distintos porcentajes de carbón residual como adición al cemento portland.
- Encontrar el porcentaje de reemplazo de cemento óptimo que permita mejorar las propiedades físicas y mecánicas del mortero, y haga viable la implementación de esta tecnología en la industria cementera nacional.

Capítulo 1: Ceniza Volante y hormigones

La ceniza volante corresponde a los residuos sólidos que se obtienen por medio de la precipitación electrostática y/o por captación mecánica de los polvos que acompañan a los gases generados durante el proceso combustión de carbón pulverizado, en las centrales termoeléctricas, a temperaturas que rodean entre 1200 – 1700 °C. La ceniza volante se encuentra principalmente compuesta por óxidos de silicio (SiO_2), aluminio (Al_2O_3), fierro (Fe_2O_3) y Calcio (CaO), entre otros. Existe una gran variabilidad en su composición química, no solo entre la ceniza obtenida de distintas plantas, sino que también entre las de la misma [5]. Esta heterogeneidad, se encuentra principalmente dada por la variabilidad que existe entre los carbones que pueden ser utilizados.

Existen variadas maneras de clasificar la ceniza, las más utilizadas, se encuentran definidas por la composición química, lo cual provoca que sean de tipo prescriptivas, más que basadas en sus rendimientos.



Figura 1: Ceniza volante tipo F.

1.1. Composición y clasificación de la ceniza volante.

Como se comentó en un comienzo la ceniza volante se encuentra principalmente compuesta por óxidos de silicio, aluminio, fierro y calcio, los cuales en su suma comprenden sobre el 50% de su masa total. La composición química de la ceniza queda principalmente determinada por el tipo de carbón que se utiliza en el proceso de combustión, pudiendo este ser de tipo lignítico, subbituminoso, bituminoso o andracítico. Siendo el de tipo bituminoso, el más utilizado en las centrales termoeléctricas debido a su relación precio - capacidad calorífica. A continuación, se puede observar la Tabla 1, donde se muestran los tipos de carbón, su capacidad calorífica y el tipo de ceniza que pueden generar:

Tabla 1: Tipos de carbón y propiedades.

Tipo	Contenido de Carbono [%]	Capacidad Térmica [MJ/kg]	Ceniza Generada (ASTM C618)
Lignito	60-70	10-20	C
Sub Bituminoso	35-45	20-24	C
Bituminoso	60-80	24-35	F
Antracita	> 86	35	F

La ceniza volante posee una composición química muy variada, esto debido a que se obtiene como producto de la combustión de compuestos orgánicos, los cuales pueden diferir en sus propiedades y composición en distintas partes de un mismo lote, provocando así que independiente que se trate de cenizas obtenidas de plantas ubicadas una misma zona o región [6], estas pueden variar considerablemente entre ellas. A continuación, se presenta la composición química de ceniza de distintos países, donde se muestra la variabilidad existente:

Tabla 2: Composición química de cenizas en distintas zonas del mundo.

Componente	Rango de contenido [% de la masa total]				
	Europa	US	China	India	Australia
SiO ₂	28,5 - 59,7	37,8 - 58,5	35,6 - 57,2	50,2 - 59,7	48,8 - 66,0
Al ₂ O ₃	12,5 - 35,6	19,1 - 28,6	18,8 - 55,0	14,0 - 32,4	17,0 - 27,8
Fe ₂ O ₃	2,6 - 21,2	6,8 - 25,5	2,3 - 19,3	2,7 - 14,4	1,1 - 13,9
CaO	0,5 - 28,9	1,4 - 22,4	1,1 - 7,0	0,6 - 2,6	2,9 - 5,3
MgO	0,6 - 3,8	0,7 - 4,8	0,7 - 4,8	0,1 - 2,1	0,3 - 2,0
Na ₂ O	0,1 - 1,9	0,3 - 1,8	0,6 - 1,3	0,5 - 1,2	0,2 - 1,3
K ₂ O	0,4 - 4	0,9 - 2,6	0,8 - 0,9	0,8 - 4,7	1,1 - 2,9
P ₂ O ₅	0,1 - 1,7	0,1 - 0,3	1,1 - 1,5	0,1 - 0,6	0,2 - 3,9
TiO ₂	0,5 - 2,6	1,1 - 1,6	0,2 - 0,7	1,0 - 2,7	1,3 - 3,7
MnO	0,03 - 0,2	-	-	0,5 - 1,4	-
SO ₃	0,1 - 12,7	0,1 - 2,1	1,0 - 2,9	-	0,1 - 0,6
LOI	0,8 - 32,8	0,2 - 11	-	0,5 - 5,0	-

Fuente: [6]

Debido a la variabilidad existente entre los componentes de la ceniza, es que se han definido metodologías de clasificación basadas en la química de ésta, donde dos de las principales convenciones utilizadas, son las basadas en la norma Norte Americana ASTM y Europea EN, de acuerdo con las cuales se puede clasificar la ceniza en 2 o 3 tipos como se presenta en las tablas 3 y 4.

Tabla 3: Tipo de ceniza volante de acuerdo con norma ASTM C618.

Clase	Contenido SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ [%]	Contenido SO ₃ [%]	Humedad [%]	LOI [%]
C	> 50	< 5	< 3	<6
F	> 70	-	-	<12

Fuente: [7]

Tabla 4: Tipo de ceniza volante de acuerdo con norma EN 450-1.

Clase	Contenido SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ [%]	Contenido SO ₃ [%]	Silicio Reactivo [%]	LOI [%]
A	> 70	< 3	< 25	<5
B	> 50	-	-	2-7
C	-	-	-	4-9

Fuente: [8]

1.1.1. Clasificación de la ceniza volante según ASTM C618.

Dado el alto reconocimiento internacional que posee The American Society for Testing and Materials (ASTM), se utilizará la clasificación de la norma ASTM C618, para definir las propiedades y la característica de la ceniza. De acuerdo con esta norma las cenizas pueden clasificarse en dos tipos:

➤ Ceniza tipo C:

Corresponde a cenizas obtenidas generalmente por la combustión de carbones de tipo lignítico y sub bituminoso, con un contenido de óxidos de silicio (SiO₂), aluminio (Al₂O₃) y fierro (Fe₂O₃) superior al 50% en peso. Además, de tener una mayor presencia de óxido de calcio (CaO), lo cual le entrega propiedades cementantes.

➤ Ceniza tipo F:

Proviene de la combustión de carbones con una alta capacidad calorífica (bituminosos y andracíticos), debido a lo cual se obtienen cenizas con contenidos en masa de óxidos de silicio (SiO₂), aluminio (Al₂O₃) y fierro (Fe₂O₃) superiores al 70%, y bajo contenido de óxido de calcio (CaO), lo que se traduce en un material con propiedades puzolánicas.

Es por esto, que se puede decir que la clasificación de la ceniza, queda inicialmente definida por el tipo de carbón que se utiliza en el proceso de combustión, ahora se debe considerar que esta clasificación (ASTM) al igual que la Europea, son de tipo prescriptivos, es decir, se basan en sus compuestos y el porcentaje de cada uno de estos para clasificar la ceniza, lo cual significa que pueden existir cenizas de tipo C que puedan presentar resultados como adición en cementos muy similares a los de cenizas tipo F.

1.2. Morfología y propiedades físicas de la ceniza.

La ceniza volante se encuentra compuesta por 2 tipos de partículas, primero, y las de carácter predominante denominadas cenosferas, las cuales son de tipo esférico ya sean solidas o huecas y en su mayoría de tipo vítreas (amorfas), y segundo, partículas de carbón que posee una estructura angular sin consistencia definida.

El tamaño de las partículas de ceniza se encuentra principalmente entre 0.02 y 90 μm y posee una superficie específica que varía desde los 170 a los 1000 m^2/kg . A continuación, se presenta una imagen, obtenida a partir de un microscopio electrónico, de la forma de las partículas, donde primero se observan las cenosferas y luego las partículas de carbón:

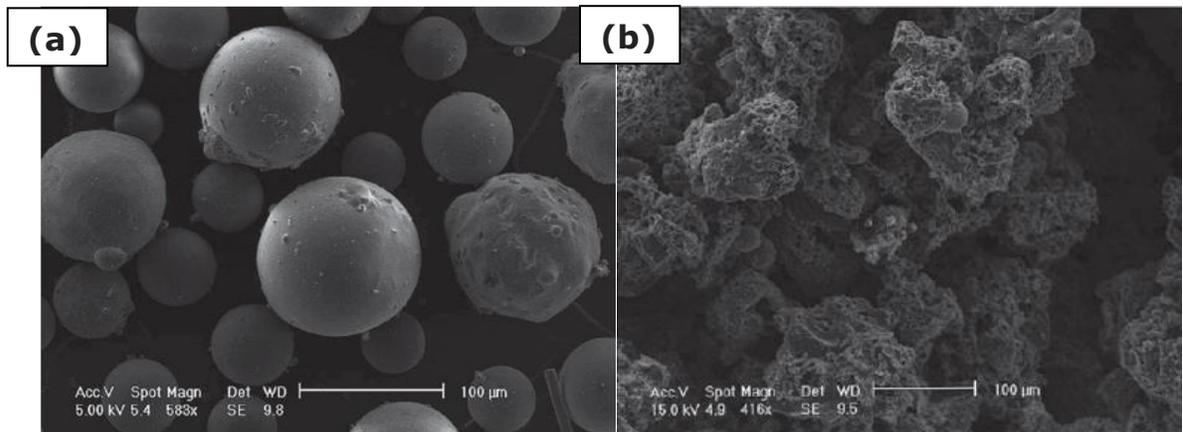


Figura 2: (a) Cenosferas, (b) Partículas de carbón.

Fuente: [6]

Para que la ceniza volante pueda ser utilizada como una adición al cemento portland, y ser clasificada como una ceniza de tipo F o C, también debe de cumplir con ciertas propiedades físicas que se encuentran definidas en la norma ASTM C618, las cuales se presentan a continuación, en la tabla 5.

Tabla 5: Requisitos físicos de la ceniza volante de acuerdo con ASTM C618.

Propiedad	Tipo F	Tipo C
Módulo de finura (Porcentaje máx. retenido por la malla N° 325)	34%	34%
Índice de actividad puzolánica (Mín. a 7 días)	75%	75%
Índice de actividad puzolánica (Mín. a 28 días)	75%	75%
Requerimiento de agua (Máximo porcentaje de control)	105%	105%
Firmeza (Máx. porcentaje de expansión o contracción)	0.8%	0.8%
Uniformidad densidad (Máx. porcentaje de variación el promedio)	5%	5%
Uniformidad material retenido (Máx. porcentaje de variación el promedio)	5%	5%

Fuente: [7]

1.3. Potenciales usos de la ceniza volante.

No obstante, que en la actualidad uno de los principales y más conocidos usos de la ceniza volante sea la adición puzolánica en hormigones, esta posee un amplio espectro de posibles aplicaciones, que van desde materia prima para geopolímeros hasta fillers, minerales para hormigones y morteros especiales, materiales de gran interés entre otros que a continuación se detallan.

1.3.1. Uso de la ceniza como absorbente

Actualmente existen un gran número de investigaciones relacionadas a la aplicación de la ceniza como un agente absorbente tanto en condiciones líquidas como gaseosas. Dentro de las aplicaciones se encuentran:

- Extracción de iones de metal (cobre, plomo, Magnecio, zinc, Cadmio, Cromo y Niquel, entre otros) de agua de desechos industriales [9].
- Remplazo del carbón activado, como absorbente de fenol, 2-clorofenol y 2,4 diclorofenol [10].
- Solvente para la desulfuración de gases de combustión [11].

1.3.2. Uso de la ceniza en la agricultura

Se han realizado pruebas por medio de las cuales se ha determinado que la ceniza puede ser utilizada como agente de mejoramiento para el suelo [12]. Además, existen algunas investigaciones que avalan el uso de la ceniza como modificador del pH de suelos ácidos, debido a su condición alcalina [13].

Algunos de los potenciales usos que se le puede dar a la ceniza en la agricultura son:

- mejoramiento de la textura de suelo.
- Reducción de la densidad aparente.
- Aumento de la aireación y filtración.
- Aumento de la capacidad de retención de aguas.
- Reducción de consumo de otros productos como fertilizante y cales.

1.3.3. Recuperación de aluminio

Por medio de distintas metodologías de extracción, se ha logrado separar los componentes de la ceniza volante, obteniendo aleaciones de alto contenido de aluminio 99 a 99.9% [14]. Esto es debido al alto contenido de dióxido de aluminio (Al_2O_3) de la ceniza, lo que la convierte en una potencial fuente de extracción de aluminio de alta pureza.

1.3.4. Creación de ladrillos, cerámicos y vidrios.

Debido al alto contenido de SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 y CaO , que posee la ceniza volante, ha llamado la atención como materia prima de bajo costo para la producción de productos cerámicos y vidrios [15] [16].

1.3.5. Fabricación de geopolímeros

Por medio de una reacción química generada entre los aluminosilicatos de la ceniza volante, y una solución alcalina, se generan estructuras simples denominadas polisilicatos, los cuales al reorganizarse generan cadenas que se denominan geopolímeros. Estos elementos presentan excelentes propiedades físicas, químicas y mecánicas, lo cual les permite ser consideradas como materiales alternativos para la industria de la construcción, transporte, minería y metalurgia entre otros [17].

1.3.6. Hormigones con alto contenido de ceniza volante.

Debido al alto aporte de CO_2 que genera la industria de la construcción, se ha determinado que el 80% de las emisiones generadas se producen durante el proceso de fabricación del Clinker que es el principal compuesto del cemento portland, utilizado para la fabricación del concreto, es que se han buscado sustitutos para este material, obteniéndose excelentes resultados en los hormigones que reemplazan una proporción de cemento por ceniza volante en sus propiedades físicas y mecánicas [3].

Capítulo 2: Centrales Termoeléctricas, distribución y proyecciones en Chile.

En el país se pueden identificar dos grandes sistemas de generación eléctrica, el Sistema Interconectado Central (SIC) y el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING). A su vez, podemos encontrar Sistemas medianos (SSMM) en algunas zonas como las regiones de Aysén y Magallanes. Según lo informado por la Comisión Nacional de Energía, en su Anuario del año 2017, a partir del mes de noviembre de 2017, los dos primeros sistemas se interconectaron tras la energización y sincronización de las líneas eléctricas comprendidas por Kapatur, Los Changos, en la zona de Mejillones; Los Changos- Cumbres, Cumbres-Nueva Cardones y Nueva Cardones y Cardones, en la zona de Copiapó [18]. El objetivo de esta acción es aprovechar las energías limpias que se generan en diversas zonas del país, asegurando seguridad en la entrega del suministro eléctrico y fomentar el ingreso de nuevos actores al sistema.

Según la Comisión Nacional de Energía, la capacidad instalada de generación eléctrica neta al año 2017 ascendía a 22.580 MW, de los cuales el 75,8% corresponde a energía emitida por el sistema SIC, 23,4% a emisiones del sistema SING y 0,8% se reparte entre los Sistemas Eléctricos Medianos. El total de capacidad instalada al 2017 se categoriza en un 55% de termoelectricidad, 27% de hidroelectricidad convencional y 18% de Energías Renovables no Convencionales (ERNC) (Anuario CNE, 2017; 26).

La figura 3 muestra la capacidad de generación eléctrica neta instalada por Tecnología, de donde se puede observar que la principal fuente de combustible utilizado para la generación eléctrica es el carbón con 21%, seguido por el gas natural con un 20% y por debajo se encuentra hidráulica de embalse con un 15%.

Al realizar el análisis por sistema de generación de energía, el Sistema SIC utiliza principalmente hidráulica de embalse e hidráulica de pasada, 20% y 16% respectivamente. Este sistema solo utiliza un 14% de carbón para su generación de energía. El Sistema SING utiliza un 46% de carbón y un 37% de gas natural para la producción de energía. Mientras el Sistema SSMM no utiliza el carbón como fuente de combustible, siendo su principal insumo para la producción el gas natural y el petróleo diésel.

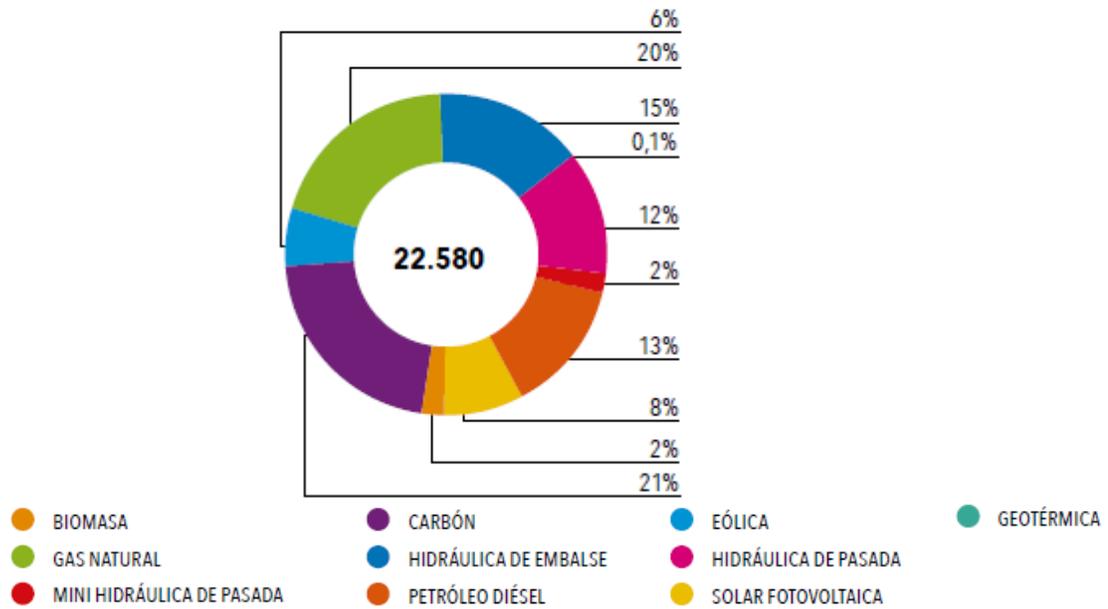


Figura 3: Total Nacional de la Capacidad de Generación Eléctrica Neta Instalada por Tecnología en MW.

Fuente: [18]

Lo anterior se relaciona con la generación eléctrica bruta, donde el SIC alcanzó un total de 54.894 GWh, el que se compone de un 46,2% termoelectricidad, 36% hidráulica convencional y un 17,8% ERNC. El SING generó 19.242 GWh categorizados en un 88,9% termoelectricidad y un 11,1% ERNC. Pudiendo concluir, al revisar los datos, que el sistema que genera más energía a través de termoeléctricas es el SING, por ello presenta un alto uso de carbón como fuente de combustible (46%).

Según información de Energía Abierta, organización dependiente de la Comisión Nacional de Energía, en el país existen 662 Centrales que producen Energía Eléctrica, de las cuales 641 se encuentran en operación y 21 aún están en pruebas. De las centrales que se encuentran en operación 454 componen el sistema SIC, 71 componen el sistema SING y 116 componen el sistema SSMM.

La Tabla 6, muestra la cantidad de Centrales de Energía por tipo de combustible en cada sistema de energía, del total de capacidad instalada para la generación de energía en el país, incluyendo las centrales que se encuentran en pruebas. Se puede observar, que el Sistema SIC tiene 108 centrales que producen energía a través de petróleo diésel, seguido por 106 centrales que producen a través de mini hidráulica de pasada y solo 13 centrales que producen energía a través de carbón. Mientras que el sistema SING, posee 24 centrales que producen a través de petróleo diésel y 15 centrales que producen a por medio de carbón.

Tabla 6: Cantidad de Centrales de Energía por tipo de Combustible utilizado final, diferenciados por Sistemas de Energías.

Sistema Energía	Biomasa	Carbón	Eólica	Gas Natural	Geotérmica	Hidráulica de Embalse	Hidráulica de Pasada	Minihidráulica de Pasada	Petróleo Diesel	Solar Fotovoltaica	Total general
SIC	38	13	27	20		10	60	106	108	91	473
SING		15	2	8	1			5	24	18	73
SSMM			8	18				13	77		116
Total general	38	28	37	46	1	10	60	124	209	109	662

El gráfico 1, muestra la progresión en la creación de Centrales Termoeléctricas por año desde 1964, encontrando que en los años en que se crearon más centrales fue en 1995 (4 centrales), 1999 (5 centrales) y 2011 (5 centrales).

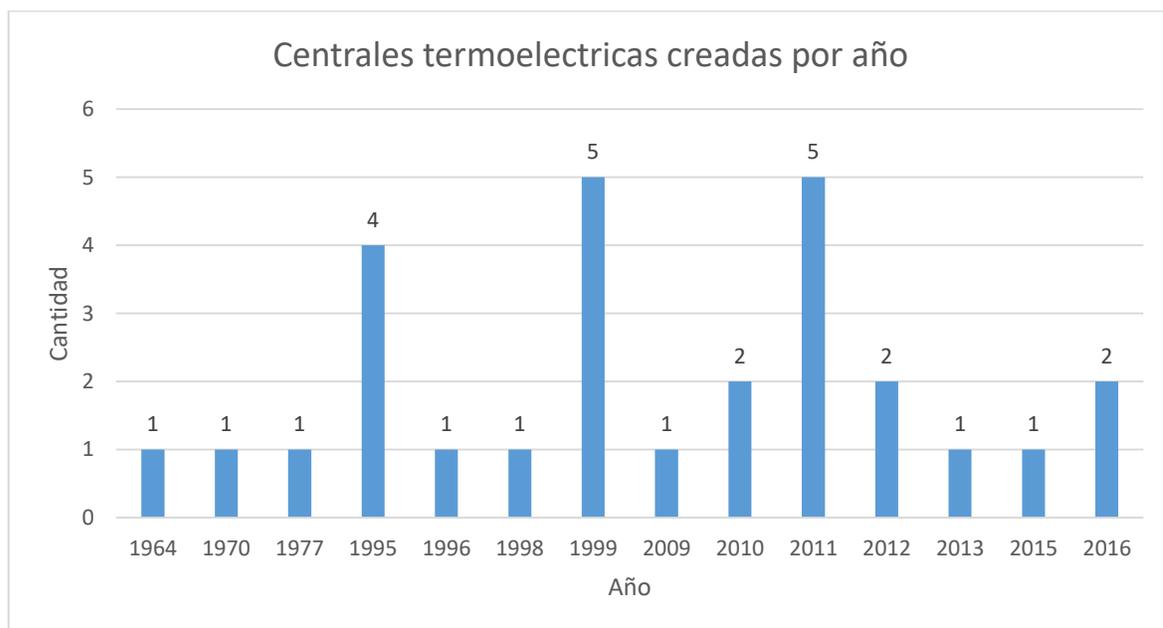


Figura 4: Cantidad de Centrales Termoeléctricas creadas por año

Actualmente, según datos de Energía Abierta, se encuentran en operación 28 Centrales Termoeléctricas, cuyo combustible principal es el Carbón. La Tabla 7 muestra los nombres de las Centrales, el año de comienzo de su servicio, comuna en las que se encuentran emplazadas y la potencia bruta en MW que emiten:

Tabla 7: Centrales de Energía cuyo combustible es el Carbón

Año de Comienza Servicio	Sistema de Energía	Nombre de Central Termoeléctrica	Comuna	Potencia bruta MW
1964	SIC	Ventanas 1	Puchuncaví	120,
1970	SIC	Bocamina	Coronel	130,
1977	SIC	Ventanas 2	Puchuncaví	207,99
1995	SING	TERMOELÉCTRICA MEJILLONES (CTM2)	Mejillones	173,84
1995	SING	TERMOELÉCTRICA MEJILLONES (CTM1)	Mejillones	159,63
1995	SIC	Guacolda U1	Huasco	152,
1995	SING	TERMOELÉCTRICA NORGENER (NTO1)	Tocopilla	140,59
1996	SIC	Guacolda U2	Huasco	152,
1998	SIC	Petropower	Hualpén	75,
1999	SING	TERMOELÉCTRICA TARAPACÁ (CTTAR)	Iquique	158,
1999	SING	TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U15)	Tocopilla	132,4
1999	SING	TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U14)	Tocopilla	136,4
1999	SING	TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U13)	Tocopilla	85,67
1999	SING	TERMOELÉCTRICA TOCOPILLA (U12)	Tocopilla	86,94
2009	SIC	Guacolda U3	Huasco	152,
2010	SIC	Nueva Ventanas	Puchuncaví	272,
2010	SIC	Guacolda U4	Huasco	152,
2011	SING	TERMOELÉCTRICA HORNITOS (CTH)	Mejillones	177,54
2011	SING	TERMOELÉCTRICA ANGAMOS 1 (ANG1)	Mejillones	276,9
2011	SING	TERMOELÉCTRICA ANGAMOS 2 (ANG2)	Mejillones	281,3
2011	SING	CENTRAL TERMOELÉCTRICA ANDINA (CTA)	Mejillones	177,
2011	SING	TERMOELÉCTRICA NORGENER (NTO2)	Tocopilla	135,8
2012	SIC	Bocamina II	Coronel	350,
2012	SIC	Santa María	Coronel	370,
2013	SIC	Campiche	Puchuncaví	272,
2015	SIC	Guacolda U5	Huasco	156,22

2016	SING	COCHRANE (CCH2)	Mejillones	274,8
2016	SING	COCHRANE (CCH1)	Mejillones	274,92

Se puede observar que los lugares que concentran más centrales termoeléctricas son: Mejillones (8 Centrales), Tocopilla (6 Centrales), Huasco (5 Centrales) y Puchuncaví (4 Centrales).

2.1. Reglamentación Nacional para la Operación Centrales Termoeléctricas.

La operación de centrales termoeléctricas está sujeta a las definiciones establecidas por la Norma técnica de Seguridad y Calidad de Servicio definidas por la Comisión Nacional de Energía, en lo indicado en sus Anexos Técnicos, y al cumplimiento de requerimientos de Normas de Calidad Ambiental y Normas de Emisión, según lo establecido por el Ministerio de Medio Ambiente.

En el año 2011, el Ministerio de Medio Ambiente emitió el Decreto N° 13, él que regula la emisión de Centrales Termoeléctricas, con el objetivo de controlar las emisiones al aire de material particulado (MP), óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de azufre (SO₂) y Mercurio (HG), a fin de prevenir y proteger la salud de las personas y el medio ambiente [19]. Este decreto aplica a unidades de generación eléctrica, conformadas por calderas o turbinas, con una potencia térmica mayor igual a 50 MWt. A continuación, se presentan los límites máximos de emisión para fuentes emisiones existentes:

Combustible	Material Particulado (MP)	Dióxido de Azufre (SO ₂)	Óxidos de Nitrógeno (NO _x)
Sólido	50	400	500
Líquido	30	30	200
Gas	N/A	N/A	50

Figura 5: Límites de emisión para fuentes emisoras existentes (ppm)

Combustible	Material Particulado (MP)	Dióxido de Azufre (SO ₂)	Óxidos de Nitrógeno (NO _x)
Sólido	30	200	200
Líquido	30	10	120
Gas	N/A	N/A	50

Figura 6: Límites de emisión para fuentes emisoras nuevas.

Según establece la normativa, corresponderá el control y fiscalización del cumplimiento del presente decreto a la Superintendencia del Medio Ambiente. Las fuentes emisoras deberán instalar y certificar un sistema de monitoreo continuo de emisiones para lo establecido en la normativa.

Con respecto a normativa que regula la acumulación de ceniza volante, en la revisión de la regulación y bibliografía relacionada no se pudo encontrar un reglamento específico que regule esta materia.

Los residuos sólidos que generan estas Centrales serían normados por la D.S. N° 594/ 1999 del Ministerio de Salud, Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo, en lo relacionado con el tratamiento y/o disposición final de los residuos industriales que se realicen fuera o dentro del predio industrial, en particular, las cenizas. Al respecto el D.S N° 594 indica que: "la acumulación, tratamiento y disposición final de residuos industriales dentro del predio industrial, local o lugar de trabajo, deberá contar con la autorización sanitaria" [19]. Se entiende por residuos industrial todo aquel residuo sólido o líquido, o combinaciones de éstos, provenientes de los procesos industriales y que por sus características físicas, químicas o microbiológicas no puedan asimilarse a los residuos domésticos.

Otra de las normativas que interviene en el manejo de cenizas volantes es la D.S. N° 148/2003 del Ministerio de Salud, Reglamento Sanitario sobre manejo de Residuos Peligrosos, donde se indica que un residuo o una mezcla de residuos es peligrosa si presenta riesgo para la salud pública y/o efectos adversos al medio ambiente ya sea directamente o debido a su manejo actual o previsto, como consecuencia de presentar alguna de estas características de peligrosidad: toxicidad aguda, toxicidad crónica, toxicidad extrínseca, inflamabilidad, reactividad y corrosividad. Revisado el documento, si bien las cenizas de combustión pueden contener una amplia gama de compuestos químicos (óxidos de sílice, aluminio, hierro y calcio), no son considerados residuos peligrosos.

Según lo establecido en la Guía de aspectos ambientales relevantes para Centrales Termoeléctrica de la Superintendencia del Medio Ambiente (2014), el principal impacto asociado a la generación de cenizas y yeso es el volumen resultante, para lo cual se requiere habilitar sitios para su disposición final. Se indica que las medidas más utilizadas para prevenir, minimizar y controlar el impacto de los residuos sólidos de las plantas de energía térmica son: disposición final de residuos en depósitos y/o rellenos autorizados, reciclar los residuos de la combustión del carbón (cenizas, yeso, etc.) para diversos usos (materiales de construcción, fertilizantes agrícolas, entre otros), reutilizar el lodo resultante del tratamiento de las aguas asociadas a la desulfuración de gases de combustión en el mismo proceso de desulfuración.

Según este documento, los aspectos ambientales relevantes mínimos que debiesen ser evaluados en una actividad de inspección para residuos sólidos son: comprobar que la generación de residuos corresponde a lo comprometido, tanto en tipo, como en magnitud, verificar que el almacenamiento de residuos sólidos peligrosos cumple con lo establecidos en

el D.S. N° 148/2013, verifica que la disposición final de residuos sólidos (yeso o sulfato de calcio, mangas saturadas con partículas, cenizas, entre otros) se realiza en un lugar autorizado (para depósitos de ceniza se debe verificar su manejo, características y localización) y analizar resultados de monitoreos asociados a depósitos de cenizas, cuando corresponda (Superintendencia de Medio Ambiente, 2014; 23).

2.2. Proyecciones de la generación de Energía a través de Carbón.

En el año 2008 el Ministerio de Economía ingreso modificaciones a la Ley 20.257, Ley General de Servicios Eléctricos respecto de la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales. Estableciendo que cada empresa eléctrica que efectúe retiros de energía desde los sistemas eléctricos con capacidad instalada superior a 200 MWt para comercializarla con distribuidoras o con clientes finales, estén o no sujetos a regulación de precios, deberá acreditar ante la Dirección de Peajes del CDEC, que una cantidad de energía equivalente al 10% de sus retiros en cada año calendario haya sido inyectada a cualquiera de dichos sistemas, por medios de generación renovables no convencionales (biomasa, hidráulica, geotérmica, solar, eólica, energía mecánica producida por el movimiento de las mareas, olas y de las corrientes, entre otros), propios o contratados.

Esta obligación será del 5% para los años 2010 y 2014, aumentándose en el 0,5% anual a partir del año 2015, hasta alcanzar 10% para el año 2024, para los contratos celebrados con posterioridad al 31 de agosto de 2007 y con anterioridad al 01 de julio de 2013. Para los contratos firmados con posterioridad a estas fechas, la obligación aludida será del 5% al año 2013, con incrementos del 1% a partir del año 2014 hasta llegar al 12% el año 2020, e incrementos del 1,5% a partir del año 2021 hasta llegar al 18% el año 2024, y un incremento del 2% al año 2025 para llegar al 20% el año 2025 [19].

En esta misma línea, el 30 de diciembre de 2015, la presidenta Michelle Bachelet firmo el Decreto Supremo que aprueba la nueva estrategia a largo plazo para el sector energético, denominada "Energía 2050, Política Energética de Chile". En este documento se establece en el lineamiento 21 la promoción de una alta penetración de energías renovables en la matriz eléctrica, para lo que en el periodo 2016-2015 se reducirán barreras para mejorar la competitividad de las fuentes priorizadas, sin contemplar subsidios con efectos que distorsionen el mercado eléctrico y se estudiarán mecanismos que incrementen la flexibilidad del sistema eléctrico a estándares internacionales. Se han establecido como metas para el año 2035 que más del 60% de la generación eléctrica nacional provenga de energías renovables, la que deberá utilizar al máximo la infraestructura de generación que contribuya a un

desempeño eficiente del sistema, privilegiando los nuevos desarrollos con tecnologías bajas en emisiones y que sean costo-eficientes [20].

En este contexto, se puede proyectar que se producirá un aumento de las energías renovables no convencionales en la producción de energía, en desmedro de la utilización de carbón como combustible para la generación de energía eléctrica. A continuación, se revisarán los proyectos de generación eléctrica en construcción y proyectos energéticos en evaluación ambiental, para comprobar si existe un aumento en las construcciones de plantas de energías no convencionales.

2.2.1. Proyectos de Generación Eléctrica en Construcción.

Según el Anuario Estadístico de Energía 2017, al 31 de diciembre de 2017, se encuentran 81 proyectos en construcción que en conjunto alcanzan una capacidad instalada de generación eléctrica de 3.140 MW. La Figura 6, muestra el ingreso esperado de operación de proyectos de generación eléctrica en construcción entre 2007 y 2017 en MW:

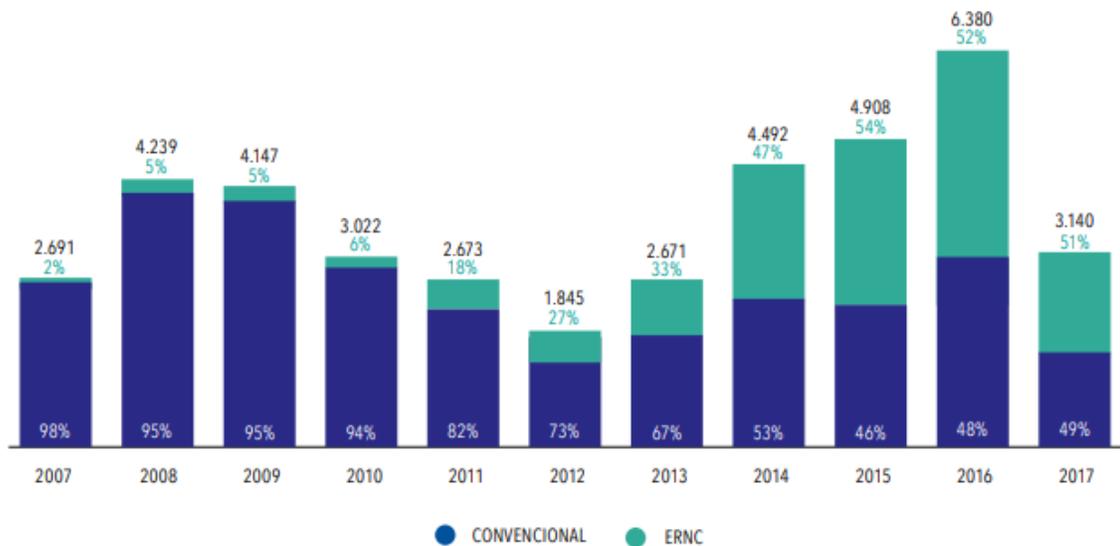


Figura 7: ingreso esperado de operación de proyectos de generación eléctrica en construcción entre 2007 y 2017 en MW.

Fuente: [18]

Resulta interesante observar el aumento de la construcción de proyectos de Energías Renovables no Convencionales, pasando de un 2% en el año 2007 a 51% en el año 2017. En la Figura 7 se puede observar el Total de proyectos generación eléctrica en construcción por tecnología en MW:

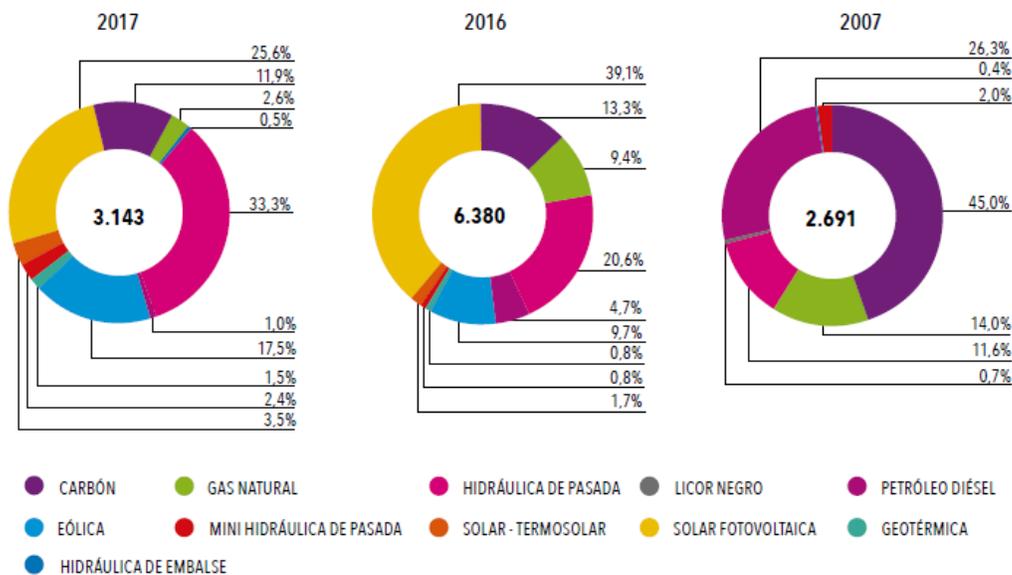


Figura 8: Total de proyectos generación eléctrica en construcción por tecnología en MW.

Fuente:

[18]

Se puede observar, para el año 2017, que el 33,3% de los proyectos en construcción tienen como fuente de combustible Minihidráulica de Pasada, el 25,6% utiliza Solar Fotovoltaica, el 17,5% corresponde a Eólica, dejando al carbón en el 11,9%. Un panorama muy distinto al año 2007, donde el 45% de los proyectos en construcción utilizaba el carbón como combustible para su producción de energía.

2.2.2. Proyectos energéticos en evaluación ambiental- Proyectos con RCA Aprobada.

Según la información entregada por CNE (2017), durante el 2017, 86 proyectos energéticos obtuvieron la Resolución de Calificación Ambiental (RCA), de los cuales 50 proyectos son de generación eléctrica, 20 proyectos de transmisión eléctrica de alto voltaje y 16 proyectos de desarrollo minero de petróleo y gas. La Figura 8 muestra la evolución de proyectos de generación eléctrica con RCA aprobada en MW y MMUSD:

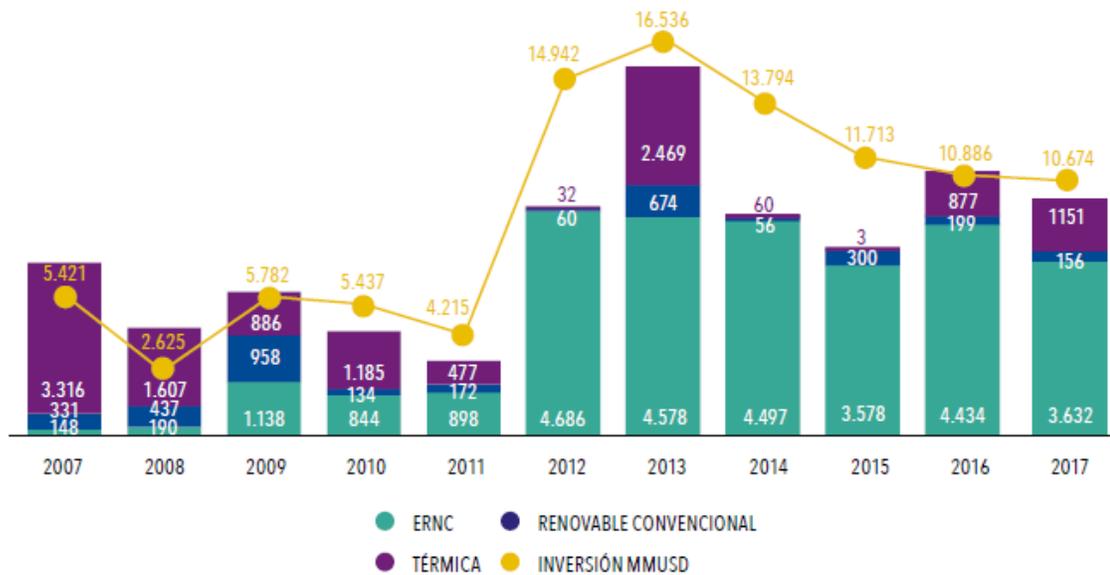


Figura 9: Evolución de proyectos de generación eléctrica con RCA aprobada en MW y MMUSD.

Fuente: [18]

Al igual que en los proyectos en construcción, podemos observar un aumento en la participación de Energías Renovables no Convencionales, para el año 2017 estas representan una generación de 3.622 MW, seguida por Térmica con 1.151 MW. Mientras que, en 2007, las Energías Renovables no Convencionales aportaban 148 MW, siendo los proyectos térmicos los que representaban gran parte de las solicitudes con 3.316 MW.

En este contexto, revisada la normativa vigente, la que promueve el uso de energías renovables no convencionales, y la progresión de los proyectos de energía eléctrica en construcción o con aprobación RCA, los que muestran una tendencia al aumento de la construcción de proyectos que utilizan energías renovables no convencionales, especialmente hidráulica, solar y eólica. Se puede concluir que, la participación de carbón como combustible principal para la generación de energía eléctrica tiende a disminuir su participación en los sistemas de energía del país.

Capítulo 3: Mejoramiento de la ceniza volante.

La implementación de nuevas tecnologías de combustión que buscan la reducción de los gases que producen el smog y la lluvia ácida NO_x (Óxido Nitrítico) [1], ha producido un aumento en el contenido de carbón de la ceniza volante obtenida de las centrales termoeléctricas, pasando de un 8% a un 20%, lo que se traduce en la pérdida de los beneficios que otorga la adición de cenizas a los hormigones.

Es por esto, que se buscaron tecnologías que permitieran mejorar las propiedades de la ceniza volante, y en particular- además- reducir el contenido de carbón de éstas, con la finalidad de alcanzar los rangos permitidos por la ASTM C618, y así mejorar los beneficios que otorga la adición de ceniza a los hormigones.

3.1. Metodologías de mejoramiento de la ceniza volante.

Existen distintas metodologías de mejoramiento de la ceniza, las cuales pueden ser clasificadas en dos grupos: las que buscan mejorar la reactividad de la ceniza y las que reducen el contenido de carbón. Algunas de las metodologías actualmente existentes son:

3.1.1. Tamizado.

El tamizado, consisten en la extracción de ciertas fracciones de material de la ceniza, dependiendo del tamaño de partícula, al ser puestas en tamices de distinto tamaño. Para determinar la factibilidad de esta metodología, se realizaron pruebas, en las cuales se evaluó el mejoramiento de lotes de 150 g de ceniza, las cuales fueron tamizadas en tamices n° 45, 75, 140 y 325, respectivamente, de acuerdo con la ASTM [30].

De estos ensayos, primero se observó que, al comparar resultados de distintos lotes ensayados en diferentes días, se podían generar variaciones de hasta un 40% en el retenido total obtenido en los tamices n° 140 y 325, lo cual era atribuible a la aglomeración de las partículas finas de la mezcla debido a la humedad y cargas electrostáticas de las partículas finas, lo cual no permitía realizar una extracción adecuada en cada uno de los ensayos.

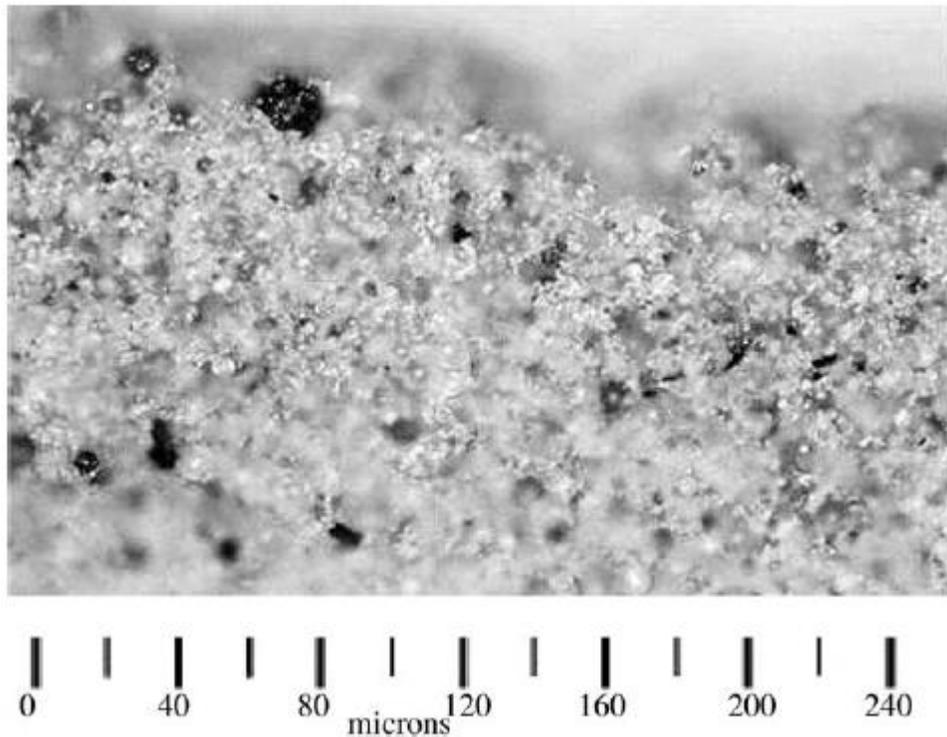


Figura 10: Microscopía óptica de fracción de ceniza de tamaño menor a 45 μm en ceniza tipo C (Partículas negras corresponden a carbón en la ceniza).

De los resultados, se puede obtener que existe una amplia distribución de tamaños en las partículas de ceniza volante, en la figura 10 se aprecia la distribución de las partículas de carbón en una fracción de tamaño menor a 45 μm para una muestra de ceniza tipo C, donde se aprecia que existe un bajo porcentaje de partículas cuyo tamaño supera los 100 μm de diámetro.

Al comparar los resultados obtenidos, se determinó que dependiendo del tipo de carbón con el que se trabaja, existe una diferencia en las bandas granulométricas en las cuales se encuentra la mayor concentración de carbón, determinándose que para cenizas de tipo F, el carbón se encuentra principalmente distribuido en el rango de tamaños menores a 100 μm , mientras que la ceniza tipo C el mayor porcentaje de carbón se encuentra ubicado en el rango de tamaño superior a los 100 μm , como se muestra en la figuras 11 y 12.

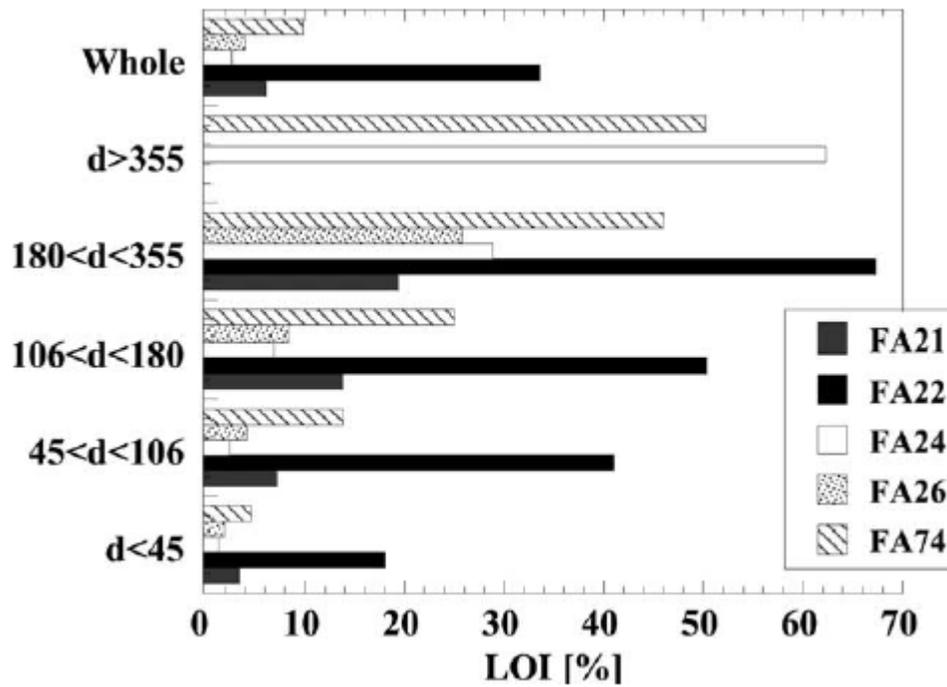


Figura 11: Perdidas por calcinación en diferentes lotes de ceniza clase F, según rango de tamaño.

Fuente: [30]

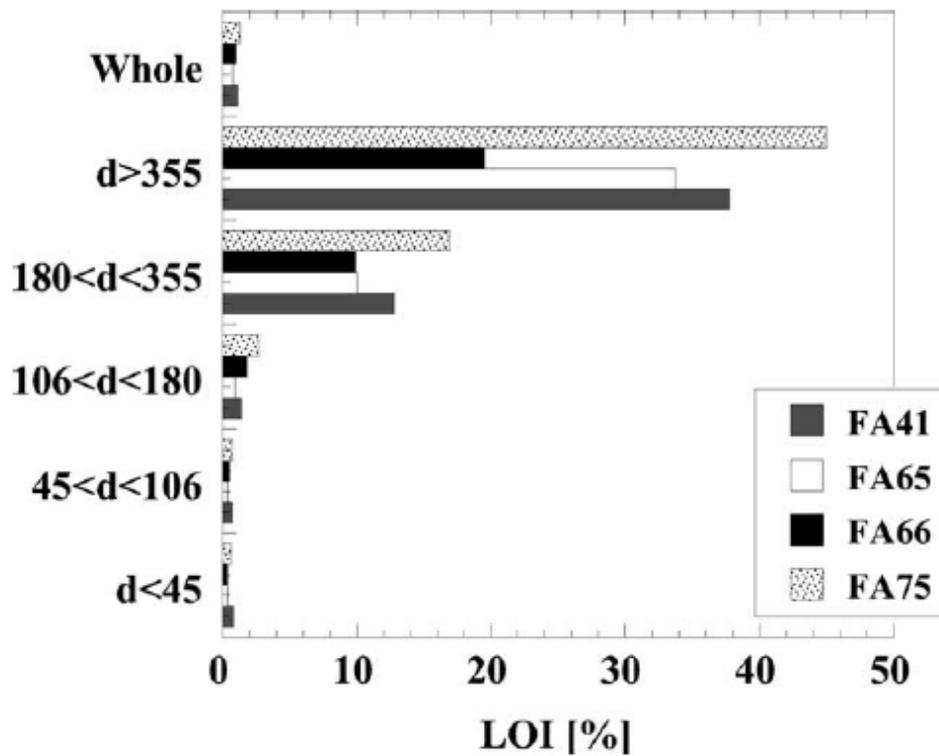


Figura 12: Perdidas por calcinación en diferentes lotes de ceniza clase C según rango de tamaño.

Fuente: [30]

De esta experiencia, se logró determinar, que es una posibilidad la aplicación del tamizado mecánico en seco para la extracción del carbón de las cenizas de clase C, debido a la distribución de tamaño de partículas que posee el carbón en este tipo de cenizas, mientras que esta metodología no es útil para las cenizas tipo F, debido a la homogénea distribución del tamaño de partículas del carbón en este tipo de cenizas.

3.1.2. Activación mecánica de la ceniza volante (molido).

De acuerdo a la literatura, es conocido el hecho de que los materiales puzolánicos, mejoran su reactividad, y con esto aumenta la resistencia mecánica a la compresión, por medio de la activación mecánica, la cual consiste en a la disminución del tamaño de partículas y por consiguiente aumento de la superficie específica de las partículas, lo cual puede obtenerse por ejemplo por medio de un proceso de molienda.

Para evaluar esta posibilidad se realizó una prueba a 4 muestras de ceniza, de distinta procedencia y composición química, como se muestra en la tabla 8, para determinar el beneficio de realizar una activación mecánica de la ceniza [31].

Tabla 8: Composición química de cenizas volantes y perdidas por calcinación

Fly ash	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	Cr ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Mn ₃ O ₄	LOI
A	42.56	26.76	9.67	1.14	6.59	3.54	0.01	1.26	0.88	7.04	0.11	0.33
B	43.38	18.54	15.29	0.77	12.20	5.43	0.02	1.32	1.05	1.43	0.14	2.12
C	44.51	22.44	15.95	1.19	8.98	1.91	0.05	2.05	0.63	1.55	0.11	28.66
D	39.71	16.38	26.15	0.83	8.86	5.12	0.02	0.87	0.89	0.58	0.35	23.83

Fuente: [31]

Cada muestra fue sometida a un proceso de molienda en un molino rotatorio de tipo cilíndrico, por un tiempo de 8 horas. Proceso del cual se obtuvieron los resultados presentes en la tabla 9, para la superficie específica de cada muestra.

Tabla 9: Distribución del tamaño de partícula y superficie específica luego del proceso de activación mecánica.

Fly Ash	Milling Time (hour)	D10 (μ m)	D50 (μ m)	D90 (μ m)	D100 (μ m)	SSA (m ² /kg)
A	0	1.79	9.15	39.78	142.53	1338
	8	1.77	9.96	34.84	97.87	1286
B	0	1.31	8.55	36.91	162.38	1538
	8	1.91	9.19	33.94	109.47	1324
C	0	8.66	46.76	152.89	660.35	462
	8	1.45	9.01	43.33	141.07	1506
D	0	8.06	42.50	168.00	664.00	521
	8	1.41	9.85	49.10	349.00	1515

Fly Ash	Milling Time (hour)	LOI (% by mass)	Specific Gravity	Increase of Specific Gravity
A	0	0.33	2.75	0.44
	8	0.01	3.19	
B	0	2.12	2.06	0.12
	8	0.87	2.18	
C	0	28.66	1.64	0.18
	8	22.71	1.82	
D	0	23.83	1.83	0.77
	8	19.23	2.60	

Fuente: [31]

Finalmente, para determinar los beneficios que se pueden obtener, se confeccionaron morteros de prueba con un remplazo de Clinker de un 50%, y una fluidez constante de 18 ± 1 mm, para lo cual fue necesario agregar un súper plastificante a las mezclas.

De estas pruebas se obtuvo que los morteros en los cuales se utilizó ceniza tratada, con un mayor contenido de carbón fue necesario adicionar un mayor porcentaje de súper plastificante para mantener la misma fluidez que los morteros que poseían el mismo tipo de ceniza, pero no tratada, lo cual es principalmente atribuible a la variación en la estructura de las partículas, las que al ser rotas toman formas irregulares, lo cual afecta la trabajabilidad de la mezcla.

Respecto a la resistencia a compresión de los morteros, se obtuvo que en la totalidad de las mezclas existe un aumento de la resistencia a la compresión, en particular, los hormigones que fueron confeccionadas con ceniza con un alto contenido de carbón presentaron un mayor aumento en la resistencia. Como se muestra en la en la figura 13.

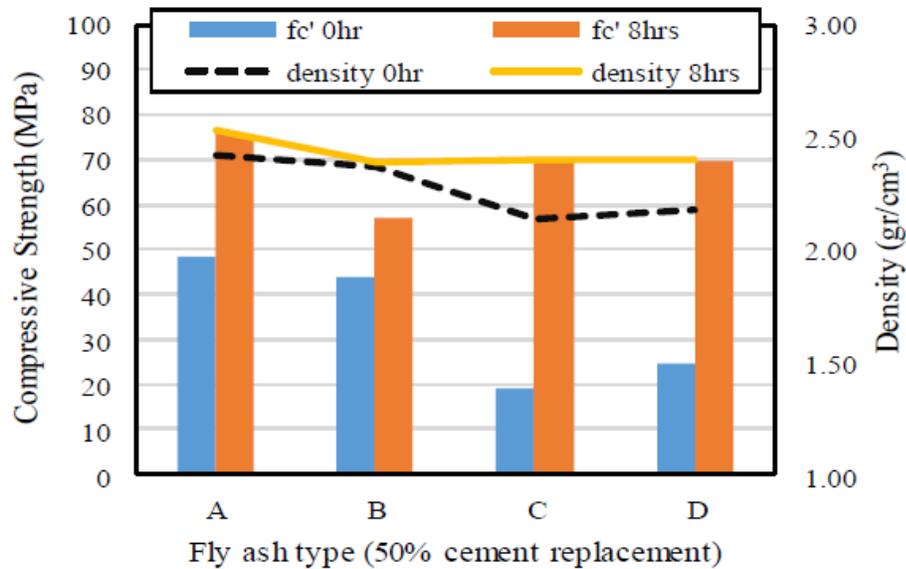


Figura 13: Resistencia a la compresión y densidad de morteros con un 50% de remplazo de clinker a 28 días.

Fuente: [31]

De esto se puede concluir que, la activación mecánica de las cenizas mejora significativamente la resistencia de los morteros con adiciones de este material, y su vez, que el cambio de forma y tamaño de partículas genera variaciones en las propiedades reológicas de la suspensión, lo cual se traduce en una disminución de la trabajabilidad, lo que puede derivar en la necesidad de adición de plastificantes para asegurar la homogenización de la masada y la trabajabilidad de está.

3.1.3. Aglomeración por medio de aceite.

Esta técnica es habitualmente utilizada para la limpieza de combustibles fósiles, dada la importancia de las últimas décadas respecto al tratamiento de los desechos de la combustión y el medio ambiente.

La aglomeración por medio de aceite consiste en la agitación de una suspensión de carbón y agua junto a algún aceite (agente aglomerante), el cual aprovechando las propiedades hidrofóbicas del carbón provoca que sus partículas se reúnan alrededor del aceite, generando aglomeraciones, las cuales pueden ser extraídas de la suspensión por medio de tamizado u otras herramientas [32].

Se realizaron pruebas sobre cenizas con un contenido de carbón de 9,5%, por medio de un sistema compuesto por un ducto de 1.8 m de alto y 10 cm de diámetro, equipada con un agitador interno, y adición de aire, el cual depositaba la suspensión sobre un tamiz n°60 para extraer las aglomeraciones [4] como se muestra en el diagrama de la figura 14.

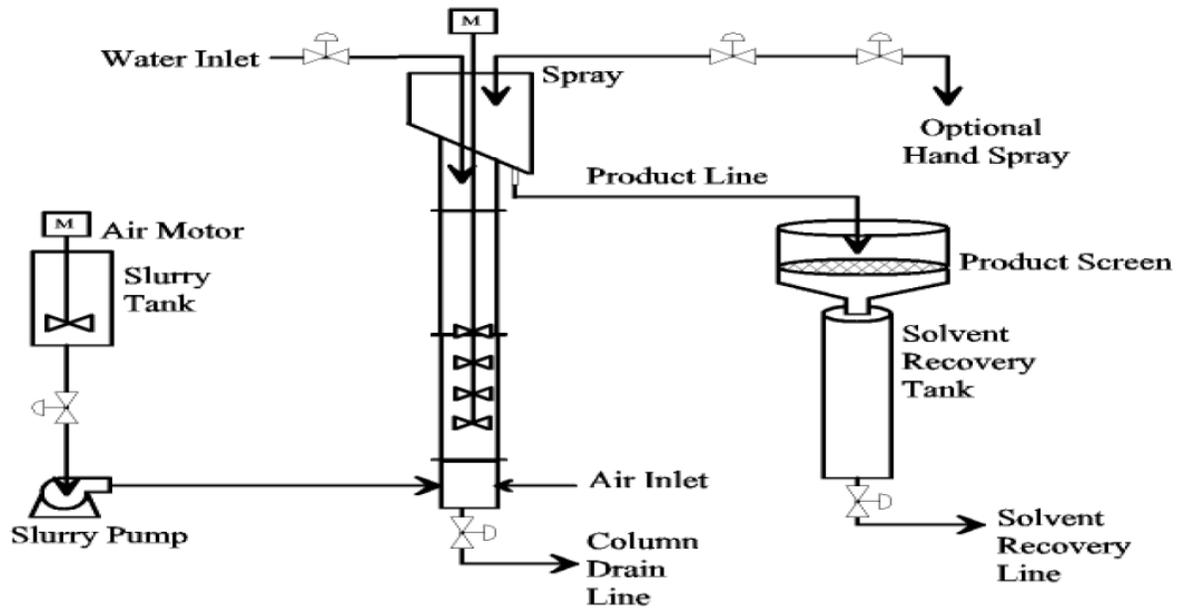


Figura 14: Diagrama de columna de aglomeración utilizada para mejorar ceniza volante.
Fuente: [4]

Por medio de esta metodología, es factible obtener porcentajes de extracción entre 70% a un 90%, dependiendo de las variables utilizadas, pero a un costo muy elevado [33].

3.1.4. Separación triboelectrostática.

Esta técnica se basa en la capacidad de las partículas de ser estáticamente cargadas por medio del roce y contacto entre estas mismas y otros materiales (ej: láminas de cobre), para hacerlas pasar por un separador compuesto de dos electrodos cargados eléctricamente, los cuales atraen las partículas dependiendo del signo de la carga eléctrica [34] [35] como se muestra en la figura 15.

Al aplicar esta metodología a la ceniza volante, las partículas de carbón adquieren cargas positivas, los cuales son atraídos por el electrodo positivo, mientras que los minerales son atraídos por el electrodo negativo.

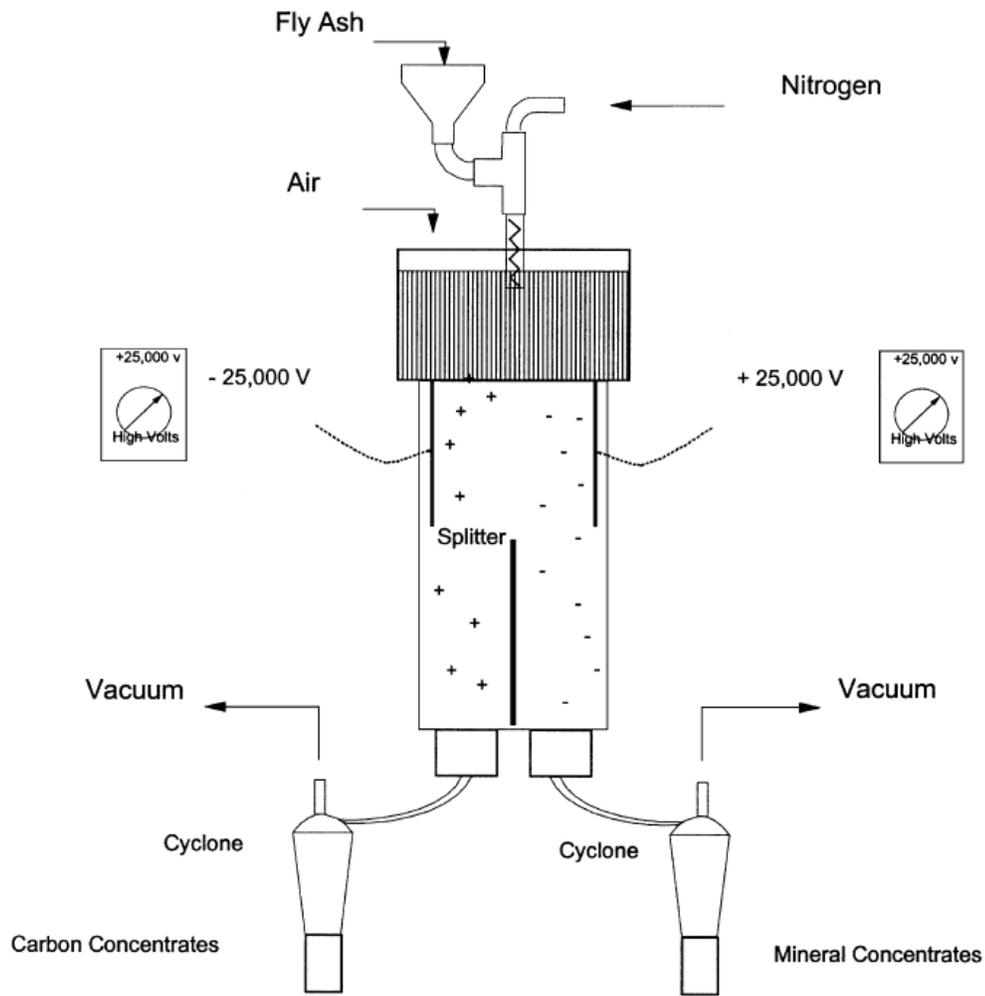


Figura 15: Esquema de separador triboelectrostático.

Fuente: [36]

Existen estudios que han evaluado la capacidad de extracción del carbón de la ceniza volante, obteniéndose cenizas con un contenido de carbón de 17,3%, con un porcentaje de recuperación de carbón de 49,95 % [36].

Actualmente se trabaja, en obtener la mejor configuración del sistema, con la finalidad de mejorar el porcentaje de extracción de esta metodología, de los cuales se han obtenido resultados los cuales pueden variar entre un 20 a un 80%. Esto deja el campo abierto, para la investigación y aplicación de nuevas mejoras a la metodología para obtener mayores rendimientos [34] [35].

3.1.5. Flotación.

Es un proceso físico-químico, que se basa en el tratamiento químico de una suspensión de algún compuesto (en este caso ceniza) con agua, del cual se pretende extraer los componentes no deseables de este, aprovechando las propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas de los materiales, por medio de la generación de espuma en la superficie, gracias a la adición de agentes químicos que promueven la generación de esta, y la inyección de aire, para atraer las partículas hidrofóbicas y lograr que se mantengan en flotación [37] [38].

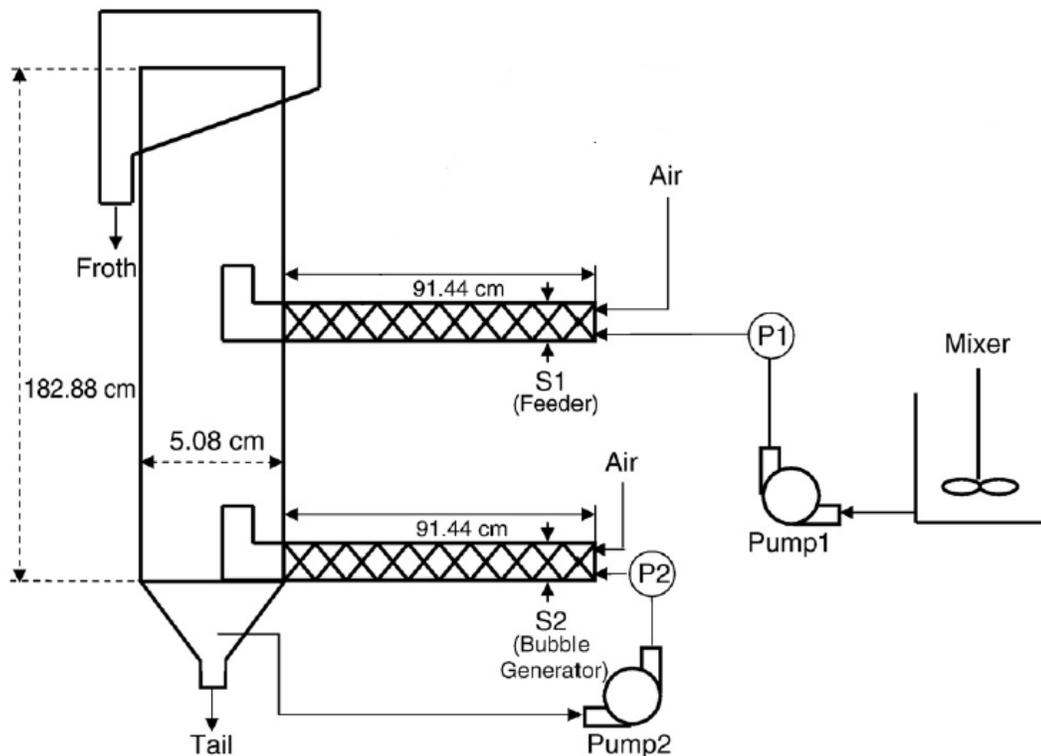


Figura 16: Diagrama de celda de flotación industrial.

Fuente: [39]

Los materiales hidrofílicos, están generalmente constituidos por óxidos, silicatos, carbonatos entre otros, estos materiales poseen una afinidad al agua, lo cual permite que las partículas se mojen y se mantengan en la solución acuosa. Mientras que los hidrofóbicos son todos aquellos materiales que no poseen afinidad con el agua, y generalmente son aeróbicos lo que significa que poseen afinidad con el aire, por lo cual tienen tendencia a unirse a él, en este grupo encontramos los metales nativos, sulfuros y especies como el carbón y talco. Estas características convierten a esta metodología en una potencial herramienta para la extracción del carbón de la ceniza volante [38].

Dado que la flotación es una metodología fisicoquímica, las variables que controlan este proceso son de tipo químicas donde se encuentran los reactivos,

los cuales a su vez se clasifican en agentes espumantes y colectores, y por otra parte las variables físicas, en las cuales tenemos el flujo de aire y la velocidad de agitación de la suspensión. Estas 4 variables, se encuentran fuertemente relacionadas en la eficiencia del proceso, por lo cual las detallaremos más a continuación.

- **Agente espumante:** Corresponde a sustancias químicas, que permiten y facilitan la creación de espuma en la suspensión y la capacidad de mantenerse hasta el proceso de extracción, lo cual facilita y permite la separación de las partículas en base a sus propiedades hidrofóbicas e hidrofílicas. Dentro de este grupo se encuentran, por ejemplo: el aceite de pino, frother 70, MIBC, propilenglicol metil éter, etc.
- **Colectores:** Son compuestos químicos de tipo orgánicos, que poseen características dipolares, lo cual permite que una de las fases del agente se una a la superficie polar del mineral, mientras que la otra se oriente hacia el agua, provocando que se acentúen las propiedades hidrofóbicas de los compuestos, ayudando a que estas se adhieran a las burbujas de aire, para luego ser extraídas junto a la espuma. Dentro de este grupo se encuentran, por ejemplo: Diesel, kerosene, ácido oleico, ditiofosfatos, etc.
- **Flujo de aire:** Esta variable junto a la agitación de la suspensión permite la generación de burbujas de aire, que tienen por objetivo transportar las partículas hidrofílicas a la superficie, para formar la espuma que luego es extraída de la celda. Esta variable es sumamente importante, porque el uso de mucho aire puede provocar espumas inestables que causan que el material vuelva a la solución, sin tiempo para poder extraer los agentes deseados, mientras que un bajo flujo de aire provoca que no se genera la espuma necesaria, provocando que no se pueda extraer el material de acuerdo con lo esperado.
- **Agitación:** La agitación juega un papel importante en el proceso de flotación, controlando que la suspensión se mantenga uniforme durante el proceso de extracción, por otra parte, ayuda a controlar el tamaño de burbuja que hay en el estanque de flotación, además de facilitar la formación de espuma, y finalmente permite mantener las partículas en suspensión en la solución evitando el asentamiento de estas en el fondo del contenedor.

Esta metodología es una de las principales herramientas utilizadas para la separación de materiales a nivel mundial, principalmente en la extracción de metales en la minería [38] [40], lo cual se traduce en una técnica que ha sido ampliamente estudiada durante las últimas décadas. En paralelo, debido a su amplio uso a nivel industrial, se han realizado un gran número de

experimentos tanto para la extracción de carbón de la ceniza volante como para la limpieza del carbón de agentes no deseados para su uso como combustible.

Dentro de las investigaciones, se encuentran estudios que evalúan el comportamiento de distintas cenizas manteniendo las variables de control constantes, así como experiencias donde se busca determinar los agentes de flotación y colectores óptimos para lograr extraer de forma eficiente y eficaz el carbón de la ceniza. Obteniéndose excelentes resultados como se muestra en la tabla 10 y las figuras 17 y 18 [41] [42] [43] [44].

Tabla 10: Evaluación de distintos colectores para la extracción de ceniza volante

Collector type	Collector dosage (Kg/mt)	Prod.	% Wt.	% LOI	% Carbon removal
#2 fuel oil	4.1	Froth	22.22	25.31	79.2
		Sinks	77.78	1.82	
#2 fuel oil	0.4	Froth	17.70	18.50	46.9
		Sinks	82.30	4.38	
#2 fuel oil	0.2	Froth	18.23	18.15	46.5
		Sinks	81.77	4.44	
#2 fuel oil 1% oleic acid	0.2	Froth	16.45	20.41	48.1
		Sinks	83.55	4.22	
80% #2 fuel oil 20% M210	0.2	Froth	19.62	23.33	66.7
		Sinks	80.38	2.81	
80% #2 fuel oil 20% M210	0.4	Froth	18.18	29.33	77.8
		Sinks	81.82	1.84	

Fuente: [41]

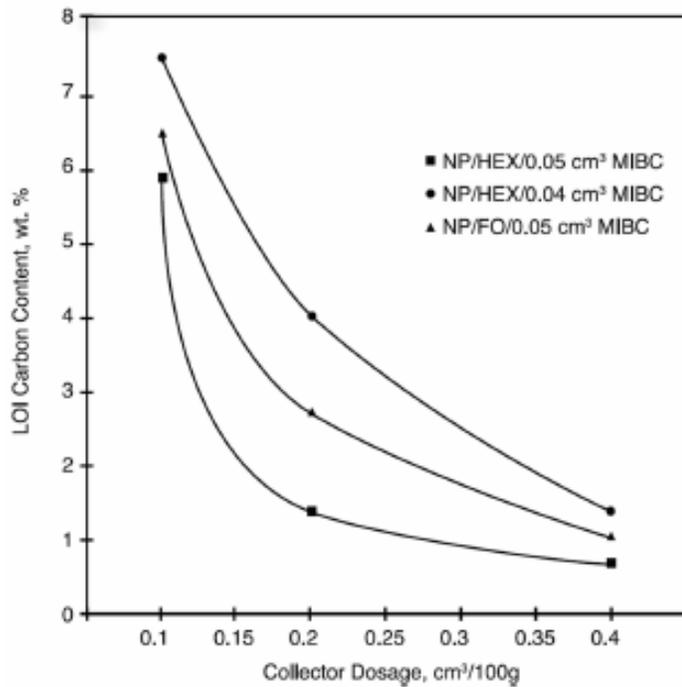


Figura 17: Evaluación de dosis de colector para la extracción de carbón de la ceniza volante
Fuente: [42]

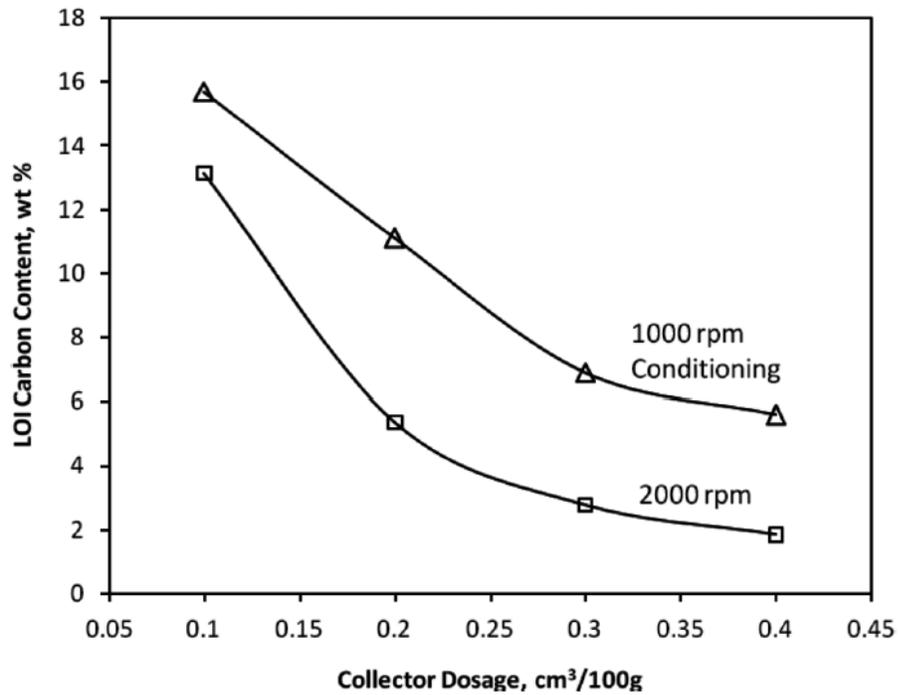


Figura 18: Evaluación de dosis de colector y velocidad de agitación en la extracción de carbón de la ceniza volante.
Fuente: [43]

3.2. Selección del método de extracción de carbón.

Dadas las investigaciones actuales, y el estado de las tecnologías existentes en el mercado para el mejoramiento de la ceniza volante, se debe seleccionar cuales se utilizarán para su aplicación.

Lo primero a considerar, es que, debido al alto contenido de carbón de las cenizas, estas no pueden ser utilizadas como adición al hormigón, de acuerdo a la ASTM C618, por lo cual la metodología seleccionada debe considerar reducir las pérdidas por calcinación del material, motivo por el que la activación mecánica de la ceniza y el tamizado, independiente de los beneficios que entrega para la resistencia no serán consideradas.

Al evaluar las metodologías de mejoramiento de la ceniza que buscan disminuir el contenido de carbón residual para volverlo un material apto como adición al cemento portland, sobresale sobre todas las técnicas existentes la flotación por espuma, dado sus altos porcentajes de extracción de carbón, y su factibilidad de ser implementado a nivel industrial, por su aplicación en el mundo de la minera para la separación de minerales.

Es debido a esto, que se construirá un modelo de celda de flotación, y se evaluarán cenizas tratadas con este mecanismo para ver su efecto en morteros con distintos porcentajes de remplazo de cemento por adición de cenizas mejoradas.

Capítulo 4: Mejoramiento de la ceniza volante.

4.1. Caracterización de la ceniza volante

Para esta memoria se utilizará ceniza obtenida de la planta termoeléctrica perteneciente a AES Gener, ubicada en Las Ventanas, la cual fue evaluada inicialmente con los fines de establecer las propiedades iniciales del material, y así determinar si por medio de la aplicación del mejoramiento por flotación, es factible obtener cenizas viables para su uso como adición al cemento, las cuales posean propiedades acordes a las solicitadas por la norma ASTM C618-18. Para estos efectos, se midieron las siguientes propiedades.

- Determinación de la composición química (contenido de óxidos).
- Determinación del contenido de carbón residual.
- Finura por medio de la determinación del material retenido por tamiz N°325.
- Superficie específica y Peso específico.

A continuación, se detalla la metodología utilizada para determinar cada una de estas propiedades y los resultados obtenidos de estos ensayos.

4.1.1. Determinación del contenido de óxidos.

Este es uno de los ensayos más importantes a realizar, dado que por medio de esto se determina el porcentaje de óxidos que posee la ceniza y permite clasificar el material de acuerdo a la tabla 3, de la ASTM C618.

Para determinar la composición química (Óxidos) se utiliza el método químico expuesto en la norma ASTM C114 o la NCh147.Of69, pero en particular para este estudio se determinará el contenido de óxidos por medio de la fluorescencia de rayos x, método que por medio de la emisión de rayos x excita los elementos característicos de la muestra, permitiendo determinar el contenido de óxidos de la muestra. Este ensayo fue realizado por el Departamento de Geología de la Universidad de Chile, y permitió determinar la distribución de óxidos, que se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11: Contenido de óxidos para ceniza con un 22% de pérdidas por calcinación (LOI).

Oxido	Contenido [%]
SiO ₂	46,23
Al ₂ O ₃	23,38
Fe ₂ O ₃	4,38
CaO	0,84
K ₂ O	1,31
TiO ₂	0,57
SO ₃	0,57

Debido a su composición química esta ceniza cumple con los requisitos para ser clasificada como tipo F según la ASTM C618, dado que la suma SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃ es superior al 70%, y el contenido de SO₃ es inferior al 5%, Aun así, no sería apta para uso en hormigones por sus altas pérdidas por calcinación que superan el 6% que establece la norma para ser clasificada como tipo F.

4.1.2. Contenido de carbón.

Uno de los parámetros más importantes a corregir para esta muestra de ceniza volante que se procesara en la presente investigación es el contenido de carbón, esto debido a los elevados valores de pérdidas por calcinación que se obtienen en las evaluaciones iniciales realizadas, las cuales alcanzan un 22 %.

Para determinar el contenido de carbón de la ceniza, se utilizó la metodología de la norma ASTM C311/C311M, de acuerdo con la cual primero se determina el contenido de humedad de la muestra, por medio del secado en un horno a temperatura de 110 +/- 5 °C, para obtener masa constante (lo cual implica luego de dos mediciones consecutivas tener una variación en la pesada inferior al 0,1%).

Una vez determinado el contenido de humedad, y utilizando una muestra representativa del material al cual se le determino la humedad se establece la pérdida por calcinación de la ceniza por medio de la siguiente metodología:

1. Se determina la masa del crisol de porcelana (molde) limpio y frío con una precisión de 0.0001 g.
2. Se agrega al molde una muestra de material que se encuentre e 0,5 a 4 g.

3. Se inserta el crisol con material a una mufla con una temperatura que fluctúa entre los 700 a 800 °C. Hasta obtener una masa constante por medio de cualquiera de los siguientes métodos:
 - a. Manteniendo la muestra en la mufla por 45 minutos.
 - b. Determinando masa constante entre dos mediciones, consecutivas donde la primera calcinación se debe desarrollar por 15 min, y luego las siguientes por lo menos con una duración de 5 minutos entre cada una.
4. Finalmente se deja enfriar el molde a un desecador a temperatura ambiente, y se determina la masa final a la misma temperatura a la cual se realizó la primera medición.

Finalmente, la humedad es determinada por la siguiente ecuación:

$$\text{Perdida por calcinaación [\%]} = \frac{(B - C)}{(B - A)} \times 100$$

A: Masa del molde

B: Masa de la muestra libre de humedad

C: Masa de la muestra incinerada luego de ser enfriada

Metodología por medio de la cual, al aplicarlo a dos muestras en paralelo de la ceniza de AES Gener Ventana, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 12: Humedad y pérdida por calcinación de cenizas volante de central termoeléctrica Ventana.

Ceniza	Humedad [%]	LOI [%]
Muestra A	0,55	22,27
Muestra B	0,45	22,03

Se puede concluir que la muestra posee un contenido de carbón superior al 20% y por ende es una ceniza no apta para uso como adición al hormigón sin ser adecuadamente procesada para reducir el contenido de carbón a límites compatibles con lo permitido por la norma ASTM C618.

4.1.3. Material retenido por el tamiz 325.

Por medio de la determinación del material retenido por el tamiz 325 es factible obtener una primera aproximación a su actividad puzolánica, y para lograr determinar este parámetro, se aplica la metodología de la norma ASTM C430, el cual se describe a continuación:

1. Se posiciona 1 gramo de muestra de ceniza en un tamiz N°325 limpio.
2. Se humedece la muestra con un suave flujo de agua.

3. Luego se realiza un lavado de la muestra bajo un flujo de agua que se encuentra regulado por un adaptador con 17 perforaciones de 0.51 mm, y una inyección de aire que debe tener una presión de 10+/- 5 psi.
4. Se realiza el lavado de la muestra con movimientos circulares horizontales sobre un mismo plano con una frecuencia de 1 Hz, durante 60 segundos.
5. Una vez terminado el proceso, se procede a limpiar el tamiz con 50 cm³ de agua destilada o desionizada, y la parte posterior o inferior se limpia con un paño.
6. Finalmente se deja secando la muestra en un horno por 24 horas, o hasta obtener masa constante luego de dos mediciones consecutivas.

De los ensayos realizados utilizando la metodología de la ASTM C430 se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 13: Material retenido por tamiz N°325.

Ceniza	Porcentaje de material retenido [%]
A	48,54

Dado que el porcentaje retenido por el tamiz 325 corresponde a un 48.54% el cual supera el 34% recomendado por la ASTM C618, la ceniza tampoco cumple con este requisito.

4.1.4. Superficie específica (Método Blaine).

Para determinar la superficie específica según método Blaine, se utiliza la metodología de la norma ASTM C204, para la cual se debe determinar inicialmente, el peso específico de la ceniza según el procedimiento de la norma ASTM C188. Obteniéndose los siguientes resultados para estas propiedades:

Tabla 14: Superficie específica Blaine y peso específico de la ceniza (LOI 22%).

Propiedad	Valor
Superficie específica	3.400 [cm ² /g]
Peso específico	2,05 [g/mL]

De estos resultados se puede apreciar que la ceniza presenta una relativamente baja superficie específica, y bajo peso específico.

4.2. Construcción de celda de flotación

La construcción de la celda de flotación requerida para efectuar el mejoramiento de la ceniza volante disponible para este estudio debió partir de algunas consideraciones y supuestos iniciales a fin de determinar el proceso óptimo de extracción de carbón compatible con la escala reducida de la metodología experimental a realizar. A continuación, se presenta el procedimiento utilizado para caracterizar y optimizar el proceso.

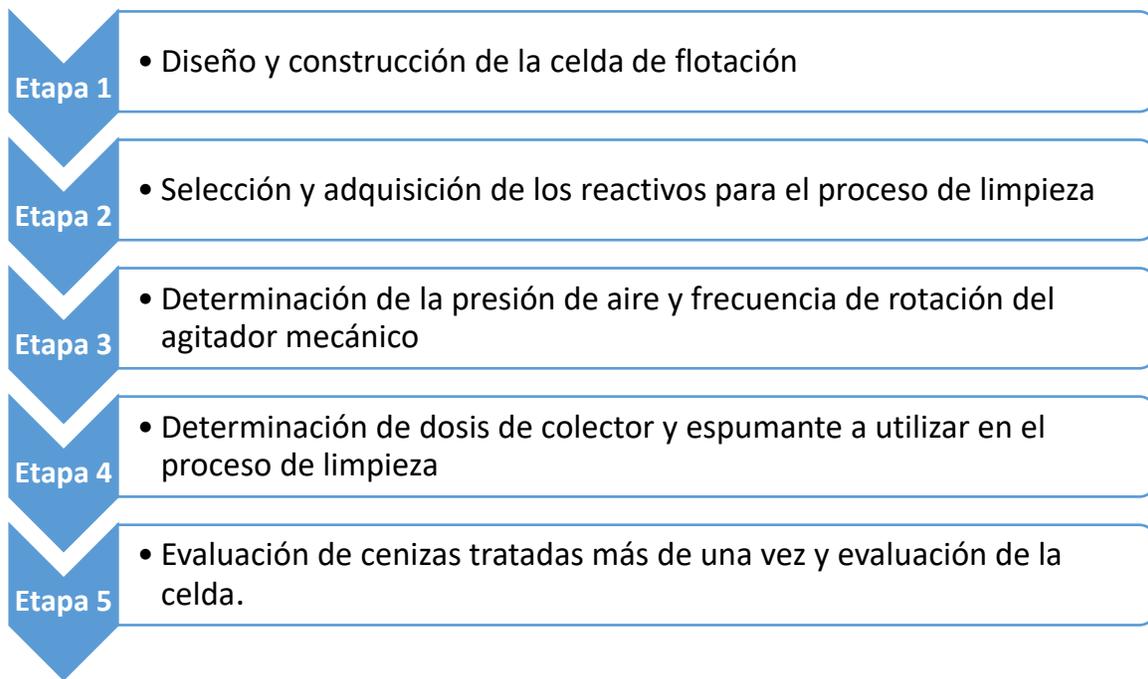


Figura 19: Etapas del proceso de construcción y evaluación de la celda de flotación.

4.2.1. Diseño y construcción de la celda de flotación.

Los procesos de flotación son controlados por medio de 5 variables: el flujo de aire, la velocidad de rotación dentro del recipiente, el pH de la pulpa, y las dosis de colector y espumante [43].

Por otra parte, la estructura de una celda de flotación está dada por los siguientes elementos:

1. Recipiente, donde se produce el proceso de separación de las partículas dependiendo de su tamaño y densidad.
2. Tubo de alimentación: Por donde ingresa el material (ceniza volante) que será tratado.
3. Tubo de desechos: Ubicado en la sección inferior de la celda, y se encarga de eliminar la ganga (Material que se descarta del proceso).

4. Agitador mecánico: Se encarga de facilitar mantener la suspensión de las partículas (ceniza y carbón) en agua con agente espumante y colector, permitiendo que las partículas hidrofóbicas (carbón) sean arrastradas por las burbujas de aire hacia la superficie.
5. Sistema de inyección de aire: Se encarga de alimentar la celda de aire, para generar espuma (burbujas de aire) que se encargaran de extraer las partículas de carbón.

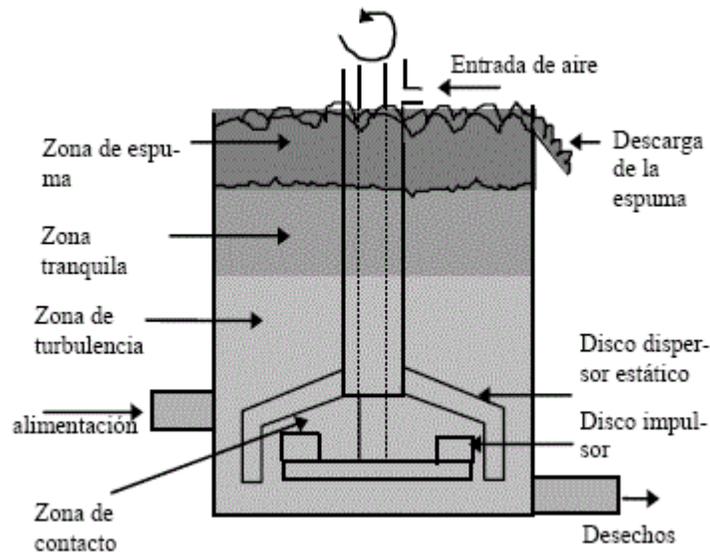


Figura 20: Modelo de una celda de flotación.

Al momento de encontrarse en operación una celda de flotación como la de la figura 21, se pueden diferenciar 3 zonas claramente definidas, en donde en cada una de ellas suceden distintos procesos, que ayudan a generar la separación de las distintas partículas en el seno de la suspensión, como a continuación se indica:

1. Zona de mezcla: En este sector de la celda es donde las partículas toman contacto con los reactivos y las burbujas de aire debido a la rotación provocada por el agitador.
2. Zona de separación: Sector donde no existe tanto movimiento de la suspensión, y las burbujas se condensan y se encargan de atrapar las partículas hidrofóbicas arrastrándolas hacia la superficie
3. Zona de espuma: donde las burbujas de aire que suben generan un estrato de espuma, debido al agente espumógeno incorporado, capaz de mantener en la superficie las partículas hidrofóbicas y permitir su remoción, en forma manual.

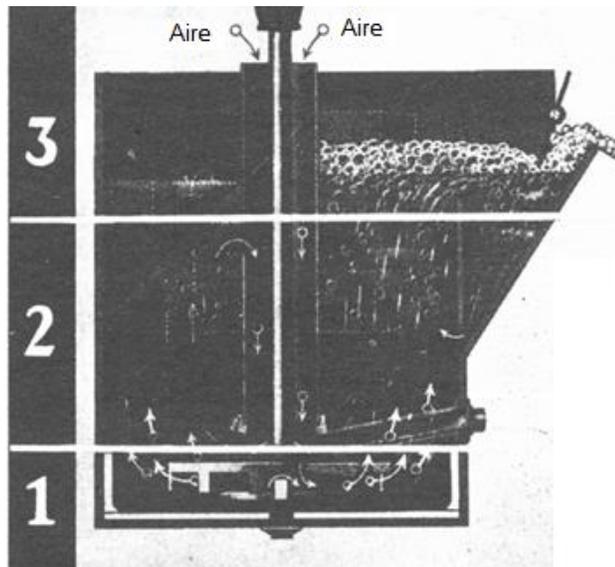


Figura 21: Zonas en una celda de flotación (1) Zona de mezcla, (2) Zona de separación y (3) Zona de espuma.

Teniendo en consideración esto, para la construcción de la celda de flotación, se definió que se utilizaría como recipiente un estanque el cual dispone del sistema de inyección de aire en el fondo, y un sistema de agitación separado para generar la suspensión con el aire, esto dada la mayor dificultad que implicaba construir un sistema que realice la agitación e inyección de aire por una misma sección.

Como estanque se seleccionó un contenedor cilíndrico de plástico de 20 litros, al cual se fijó un tubo flexible de 6 mm de diámetro enroscado en el fondo, el cual a su vez en su otro extremo se encuentra conectado a un compresor de aire de 100 litros, el que es regulado por una válvula que conectada a un manómetro permite controlar el flujo y la presión del aire que se inyecta.

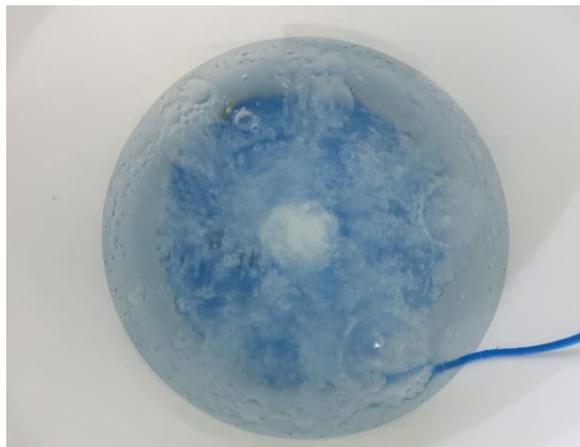


Figura 22: Mecanismo de inyección de aire a celda de flotación.

El sistema de agitación está conformado por un agitador mecánico, como el que se ve en la figura 23, el cual se conecta a un motor de 350 watts de potencia, que ofrece una frecuencia de rotación máxima de 3.000 RPM, el que a su vez es conectado a un regulador de voltaje, con la intención de controlar la velocidad de rotación.



Figura 23: Agitador de la celda de flotación.



Figura 24: Modelo de celda de flotación.

4.2.2. Selección de los reactivos.

Para obtener cenizas con bajos contenidos de carbón determinado por sus pérdidas por calcinación (LOI), se decidió utilizar como espumantes MIBC (Metil Isobutil Carbinol) y Frother200 reactivos que fueron evaluados en [41], [42] [43] entregando excelentes resultados durante sus pruebas, se debe tener en cuenta que en estas pruebas no se controló el pH de la suspensión debido a lo cual para esta experiencia tampoco se consideró.

Como colector se decidió utilizar aceite diésel, dado los resultados obtenidos en [41] y [43], los cuales muestran lograr perdidas por calcinación o LOI de aquí en adelante inferiores al 6%.

Durante este proceso de selección, en primera instancia se utilizó como espumante aceite de pino el cual había sido utilizado en [43], pero al comenzar las pruebas en la celda éste no generó espuma estable que permitiera la extracción del carbón, por lo cual se procedió luego a la utilización de alcohol Metil Isobutil Carbinol (MIBC) y Frother200, como se indicó en un comienzo.

4.2.3. Determinación de la frecuencia de rotación y presión de aire.

Una vez seleccionados los reactivos a utilizar para el proceso de limpieza de la ceniza, se procedió a determinar la frecuencia de rotación del agitador y la presión de aire que debían utilizarse para maximizar la extracción de carbón de la ceniza

Primero se buscó determinar la presión de aire que debía ser utilizada, para esto se mantuvo una frecuencia de rotación de 2.000 RPM, además de utilizar como colector el aceite diésel en una dosis de 4 cm³ por kg de ceniza y el espumante MIBC en una dosis de 0,4 cm³ por kg de ceniza, la selección de estos parámetros fue por los resultados obtenidos en [43].

Finalmente se determinó que se evaluaría la presión de aire a 1, 3, 5 y 7 psi, realizando 2 extracciones por cada presión para asegurar tener resultados consistentes y eliminar cualquier variabilidad del proceso. De esta experiencia se obtuvieron los siguientes resultados, Tabla 15:

Tabla 15: LOI de cenizas según presión de aire utilizada.

Presión de aire [PSI]	LOI prueba 1 [%]	LOI prueba 2 [%]	LOI medio [%]
1	22,37	21,93	22,2
3	18,56	18,92	18,7
5	16,81	17,06	16,9
7	16,56	16,32	16,4

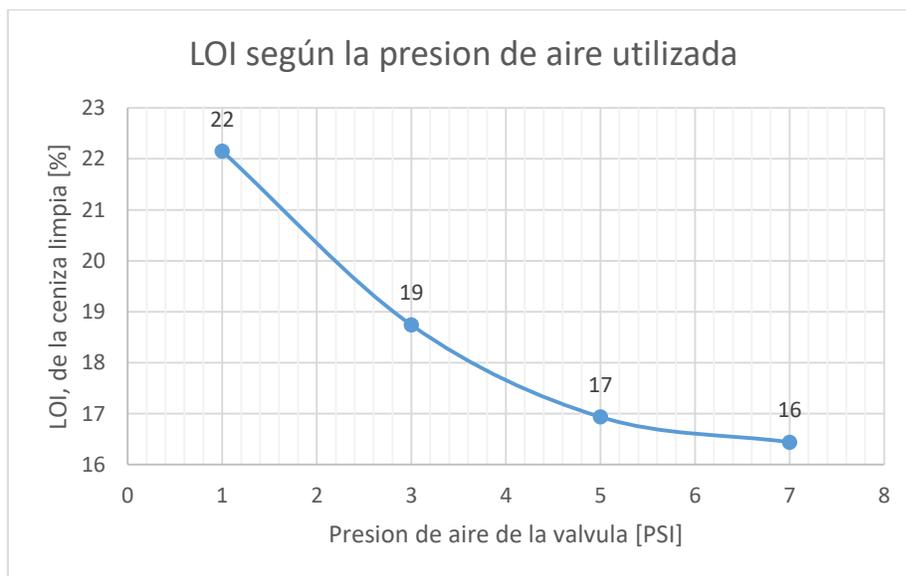


Figura 25: LOI de cenizas según la presión de aire utilizada.

De los resultados obtenidos, podemos determinar que, utilizando una presión de aire de 7 PSI, se obtienen las menores pérdidas por calcinación para las cenizas mejoradas.

Determinada la presión de aire óptima para la extracción del carbón, se procedió a determinar la velocidad de rotación que permitiera maximizar la extracción de carbón de la ceniza, para esto, se utilizó el valor recién obtenido para la presión de aire (7 PSI), y se evaluaron las frecuencias de 1.000, 1.500, 2.000, 2.500 y 3.000 RPM, realizándose al igual que la vez anterior dos pruebas para cada velocidad seleccionada, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 16: LOI de cenizas según frecuencia de rotación utilizada.

Velocidad de rotación [RPM]	LOI prueba 1 [%]	LOI prueba 2 [%]	LOI medio [%]
1.000	22,37	21,89	22,1
1.500	20,14	20,18	20,2
2.000	16,55	16,13	16,3
2.500	17,49	17,21	17,4
3.000	22,15	22,55	22,4

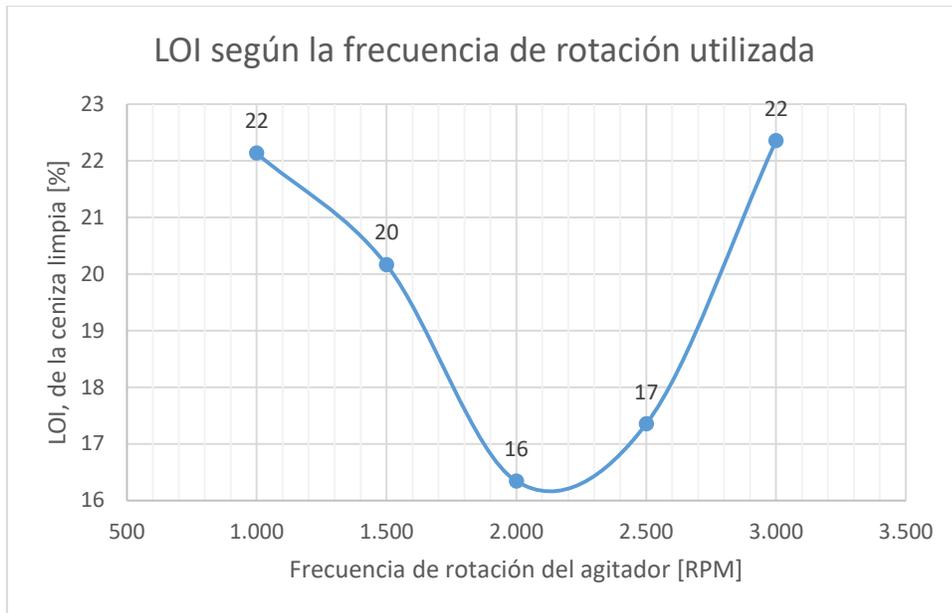


Figura 26: LOI de cenizas según frecuencia de rotación utilizada.

Al realizar esta experiencia, se detecta que al aumentar la frecuencia por sobre las 2.500 RPM desaparece la zona de espuma, esto debido a la agitación que se produce en la celda lo que causa que la capa de espuma se rompa y pierda en el vórtice generado en la celda, lo cual no permite la extracción del carbón, lo mismo sucede al operar la celda con frecuencias menores a 2.000 RPM produciéndose desde bajo a nula espuma causando una disminución en la extracción de carbón de la ceniza. Por lo cual, se decidió utilizar una presión de 7 PSI y una frecuencia de rotación de 2.000 RPM para el proceso de extracción.

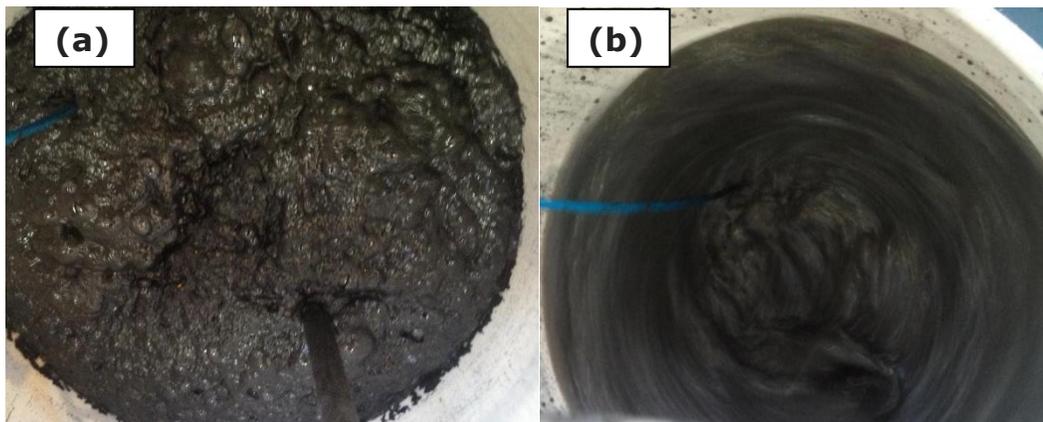


Figura 27: Proceso de flotación a distintas velocidades de rotación (a) 2000 RPM. (b) 3000 RPM.

4.2.4. Determinación de la dosis de colector y espumante.

Obtenidas la frecuencia de rotación y presión de aire óptimos para el proceso de extracción, se procedió a determinar la dosis de colector y espumante necesarios para optimizar la extracción de carbón de la ceniza.

En primera instancia, se determinó la dosis de espumante necesario para optimizar las perdidas por calcinación, para lo cual se utilizó una dosis de colector de 4 cm³ de aceite diésel por kg de ceniza, mientras se variaba la dosis de MIBC entre 0,1 a 0,75 cm³ por kg de ceniza.

Tabla 17: LOI de cenizas según dosis de espumante.

Dosis de MIBC [cm ³]	LOI prueba 1 [%]	L prueba 2 [%]	L medio [%]
0,00	22,29	21,98	22,1
0,15	21,14	20,97	21,1
0,30	18,27	18,15	18,2
0,45	16,45	16,23	16,3
0,60	16,17	16,37	16,3
0,75	16,45	16,32	16,4

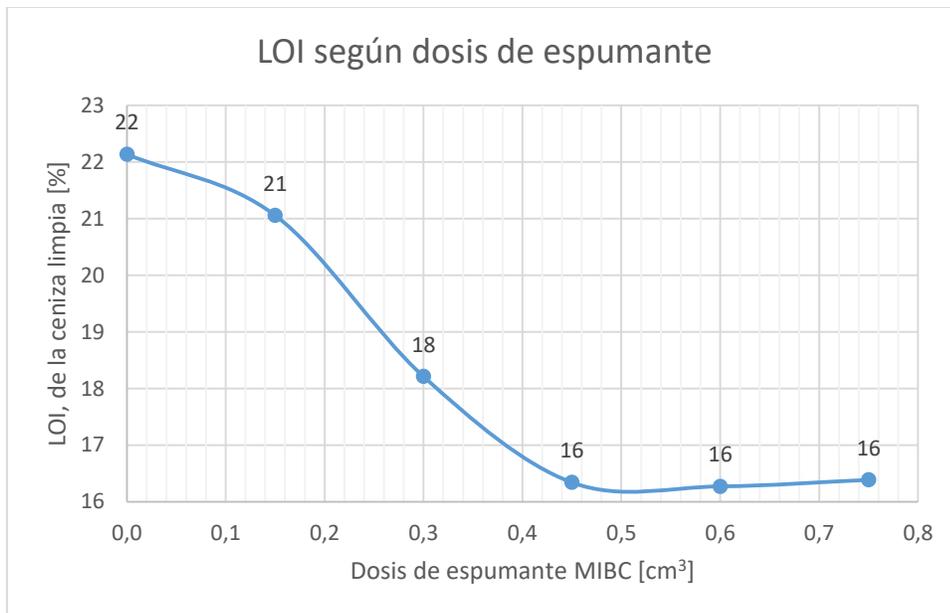


Figura 28: LOI de cenizas según dosis de espumante.

Determinado el comportamiento del proceso de limpieza según la dosis de espumante, se buscó obtener la dosis de colector, para lo cual se evaluaron dosis de 1 y 5 g por kg de ceniza para dosis de espumante de 0,3 y 0,4 cm³ por kg de ceniza.

Tabla 18: Perdida por calcinación según dosis de colector para 0.3 [cm³/kg] de MIBC.

Dosis de Colector [cm ³]	LOI prueba 1 [%]	LOI prueba 2 [%]	LOI medio [%]
1,0	22,17	22,23	22,2
2,0	21,46	21,67	21,6
3,0	19,95	19,53	19,7
4,0	18,23	18,35	18,3
5,0	17,65	17,98	17,8

Tabla 19: Perdida por calcinación según dosis de colector para 0.4 [cm³/kg] de MIBC.

Dosis de Colector [cm ³]	LOI prueba 1 [%]	LOI prueba 2 [%]	LOI media [%]
1,0	21,65	21,95	21,8
2,0	20,75	20,83	20,8
3,0	18,35	18,16	18,3
4,0	16,43	16,34	16,4
5,0	16,37	16,23	16,3

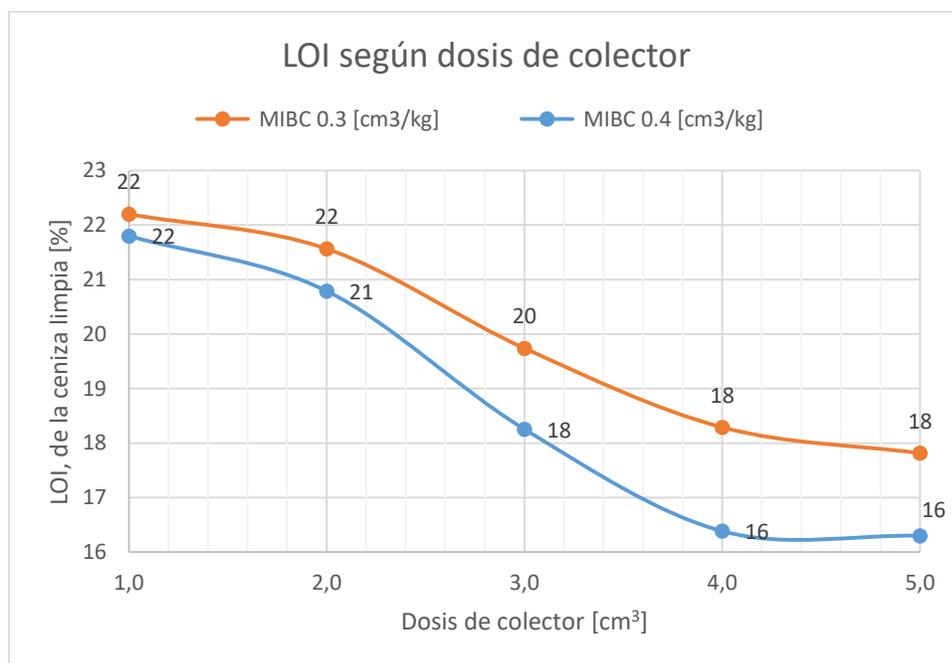


Figura 29: LOI según dosis de colector y espumante.

De esta experiencia, podemos determinar que la dosis para determinar la inyección de aire, la frecuencia de rotación y la dosis de espumante, fue la adecuada, dado que sobre los 4 g/cm³ se obtienen disminuciones marginalmente en los resultados de pérdidas por calcinación.

Finalmente, luego de evaluar cada una de las variables por separado, se seleccionaron los siguientes parámetros para el proceso de limpieza de la ceniza volante en la celda de flotación utilizada en el presente estudio.

Tabla 20: Parámetros seleccionados para extracción de carbón de la ceniza.

Variable	Dosis [Unidad de medida]
Presión de aire	7 [PSI]
Velocidad de rotación	2.000 [RPM]
Dosis de Colector	4 [cm ³ /kg]
Dosis de Espumante	0,4 [cm ³ /kg]

4.2.5. Evaluación del reproceso de lotes de ceniza y la repetibilidad de la metodología.

Debido a los resultados obtenidos, y a que es necesario que las pérdidas por calcinación de las cenizas sean menores al 6%, o al menos inferiores al 12% recomendado por la ASTM, es que se evaluara el reproceso de los lotes de ceniza, lo que implica que la ceniza obtenida de cada limpieza volverá a ser tratada, para disminuir el porcentaje de las pérdidas por calcinación hasta alcanzar un valor cercano al 6% solicitado por la norma ASTM C618.

Para esto, se trataron inicialmente 8 lotes de ceniza, de los cuales se generaron luego 4 lotes que fueron procesados una segunda vez, y así sucesivamente hasta que un lote fue tratado 4 veces. A continuación, se presentan los promedios de LOI obtenidos de para las cenizas de acuerdo a la cantidad de veces que fueron tratadas.

Tabla 21: Pérdidas por calcinación de lotes de ceniza reprocesado.

Nº de ciclos de limpieza aplicados	LOI Promedio [%]
1	16,4
2	11,5
3	7,4
4	4,4

Finalmente, se utilizó los resultados de los primeros 8 lotes de ceniza procesados para evaluar la repetibilidad del reproceso de extracción por medio de la celda de flotación, de los cuales se obtuvo, que el proceso desarrollado permite obtener de forma continua lotes de ceniza similares al mantener fijas las variables de control, como se muestra en la tabla 22.

Tabla 22: Evaluación de la repetibilidad del proceso de extracción de carbón de la ceniza volante.

Lote	LOI inicial [%]	LOI final [%]
1	21,95	16,62
2	21,83	16,43
3	22,45	16,15
4	22,37	16,17
5	22,23	16,54
6	21,89	16,27
7	22,07	16,39
8	22,15	16,23
Promedio	22,12	16,35
Desviación Estándar	0,224	0,173

4.3. Propiedades de la ceniza tratada, y Caracterización de la ceniza volantes mejoradas

Determinadas las variables de control del proceso de flotación, y obtenidas las perdidas por calcinación necesarias, del orden de 6%, para evaluar la adición de ceniza a morteros de cemento, se procedió a evaluar las propiedades que se habían determinado inicialmente, para ver si existe alguna modificación en estos campos.

4.3.1. Contenido de Óxidos.

Al igual que la vez anterior, por medio de la difracción de rayos x se determinó el contenido de óxidos de la ceniza tratada con un 7 % de contenido de carbón, la cual corresponde al material tratado 4 veces, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 23: Difracción de rayos x para ceniza con un 7% de pérdidas por calcinación.

Oxido	Contenido [%]
SiO ₂	56,67
Al ₂ O ₃	26,76
Fe ₂ O ₃	6,19
CaO	1,17
K ₂ O	1,59
TiO ₂	0,82
SO ₃	0,95

Dado los resultados obtenidos, se observa que la suma $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ es 95, lo cual superior al 70%, y el contenido de SO_3 es inferior al 5%, al igual que la vez anterior, pero en esta instancia se tienen cenizas con y su contenido de carbón es menor al 12% permitido y muy cercano al 6% recomendado por la norma, por lo cual se tiene una ceniza de tipo F.

4.3.2. Porcentaje de material retenido por tamiz 325, Superficie específica, y peso específico de las cenizas tratadas.

Se determinaron las propiedades físicas de las cenizas al igual que la vez anterior, solo que en esta instancia para las cenizas que fueron tratadas, obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 24: Material retenido por tamiz N°325 según perdida por calcinación.

Perdida por calcinación	Porcentaje de material retenido [%]
22 %	48,54
16 %	36,77
12 %	26,75
7 %	22,09

Tabla 25: Superficie y peso específico según perdida por calcinación.

Perdida por calcinación	Superficie específica [cm ² /g]	Peso específico [g/mL]
22 %	3.400	2,05
16 %	3.700	2,13
12 %	3.950	2,22
7 %	4.050	2,24

De los resultados obtenidos de estos ensayos, se aprecia que la extracción del carbón de la ceniza, causo mejoras significativas en el porcentaje de material que pasa por el tamiz 325 y un aumento de la superficie específica de la ceniza, lo que posteriormente podrá verse reflejado en un aumento de la resistencia mecánica de los morteros y hormigones.

4.4. Extracción del carbón de la ceniza volante.

Obtenidos los resultados de las perdidas por calcinación de las cenizas, y de las propiedades de estas, se procedió a limpiar el material que se utilizará para la evaluación de la resistencia mecánica de los morteros.

Para asegurar que se trabaje con cenizas que posean propiedades, se determinó la perdida por calcinación de 1 muestra por cada 10 lotes de cenizas

tratadas, de lo cual se obtuvieron los siguientes resultados promedios dependiendo de la cantidad de ciclos aplicados.

Tabla 26: LOI promedio por lote de ceniza utilizado

Lote	N° de Ciclos	LOI Promedio [%]
1	0	22,31
2	1	16,37
3	2	11,53
4	3	7,17

Por lo cual se considerará que las pérdidas por calcinación de las cenizas por cada lote serán 22%, 16%, 12% y 7%.

Capítulo 5: Confección de morteros y evaluación de estos.

Para la evaluación de las cenizas, se confeccionarán morteros de prueba los cuales tendrán la misma dosis de cemento, la que estará compuesta por una mezcla de Cemento Melón Super (portland puro) y un adición de ceniza (10%, 20%, 30%, 40% y 50%), y además de esto, se utilizarán cenizas con distintos porcentajes de pérdida por calcinación (22%, 16%, 12%, 7%), lo que generará un total de 19 dosificaciones, a las cuales se agregará una mezcla patrón correspondiente a un mortero sin adición de ceniza, lo que da un total de 20 morteros, para los cuales se confeccionarán probetas para evaluar la resistencia mecánica a 7, 28 y 56 días.

Para asegurar los mejores resultados posibles, es que se consideró una metodología de dosificación y almacenamiento de las dosis de cemento que permita disminuir a su mínima expresión la variabilidad de los resultados, y la adición de fuentes de incertidumbre a los ensayos debido a sus confecciones en diferentes días.

5.1. Metodología de dosificación de cementos y confección de probetas.

Con la finalidad de disminuir en lo máximo posible las variabilidades introducidas por el hecho de confeccionar los morteros por distintos lotes y días, se diseñó una metodología de dosificación y confección de bolsas de cemento, la cual se presenta a continuación en la figura 30.

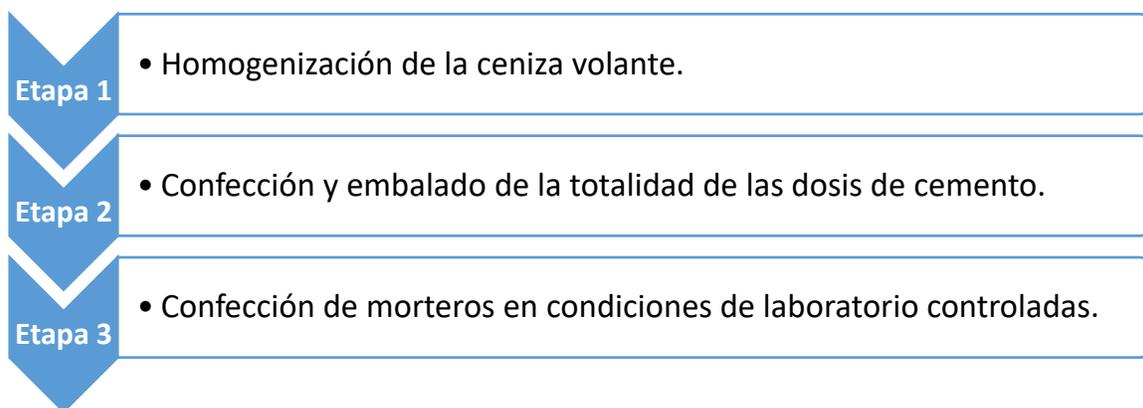


Figura 30: Metodología de dosificación confección de los morteros.

5.1.1. Homogenización de la ceniza volante.

Para asegurar que todos los lotes de cemento contaran con las mismas cenizas, y dosis, lo primero que se hizo fue reunir la totalidad de lotes de material tratado con la misma cantidad de ciclos de limpieza (es decir similares valores de LOI), se insertaron en una bolsa de plástico de alta densidad la cual fue sellada, y agitada mecánicamente por una persona 3 veces por un periodo de tiempo de 7 minutos en cada ocasión, luego se aplicó el mismo proceso al cemento Melón Super.

5.1.2. Confección y envasado de las dosis de cemento

Con la mezcla ceniza y cemento homogenizados, se confeccionaron la totalidad de las dosis de cemento en forma de bolsas de 550 gramos de cemento, esto se realizó para cada una de las mezclas de cemento y en forma de triplicado (3 bolsas por dosis) para cubrir cada una de las edades que sería ensayada.

Este proceso se realizó de forma manual, pesando cada uno de los componentes y sellando a bolsa para impedir el ingreso de humedad u otros agentes, lo que finalmente entrego un total de 60 bolsas de cemento detalladas como se muestra en la tabla 27.

Tabla 27: Dosis de cemento utilizadas para evaluar la ceniza volante.

N°	LOI de la ceniza [%]	Porcentaje de cemento "Melón Super"	Porcentaje de adición de ceniza
1	22%	90%	10%
2	22%	80%	20%
3	22%	70%	30%
4	22%	60%	40%
5	22%	50%	50%
6	16%	90%	10%
7	16%	80%	20%
8	16%	70%	30%
9	16%	60%	40%
10	16%	50%	50%
11	12%	90%	10%
12	12%	80%	20%
13	12%	70%	30%
14	12%	60%	40%
15	12%	50%	50%
16	7%	90%	10%
17	7%	80%	20%
18	7%	70%	30%
19	7%	60%	40%
20	-	100%	0%

La dosis n°20 corresponde a la dosis patrón, la cual solo contiene cemento Melón Super.

5.1.3. Confección de morteros con condiciones de laboratorio controlado.

Para la confección de los morteros se utilizaron condiciones de laboratorio controlado, lo que implica utilizar los mismos equipos los cuales se encuentran a su vez calibrados y verificados para asegurar su incertidumbre, además de controlar la temperatura ambiental y del agua, con lo que se busca repetir las condiciones en cada uno de los ensayos realizados, y con esto obtener resultados comparables que no posean fuentes extra de incertidumbre.

5.2. Confección de los morteros y determinación de la fluidez de la mezcla.

Para la evaluación de la resistencia mecánica, se confeccionarán probetas prismáticas que serán ensayadas de acuerdo con la metodología de la norma NCh 158.Of67, lo que implica que se utilizarán moldes prismáticos que primero serán ensayados a tracción por flexión y luego a compresión, a las edades especificadas (7, 28 y 56 días), dosis de cemento.

Para la confección de los morteros se utilizó la dosificación especificada en la NCh 158, para cada uno de los lotes, lo que permite evaluar la variación directa de la adición de distintas cantidades de ceniza y pureza de esta, a continuación, se presenta la dosificación utilizada en la tabla 28.

Tabla 28: Dosificación norma NCh 158.Of67.

Material	Partes de la mezcla	Peso [g]
Arena normalizada	6	1.500
Cemento	2	500
Agua	1	250

Debido a que se utilizó la dosificación de la NCh158, es necesario usar arena normalizada con la curva granulométrica exigida por la norma, motivo por el cual se utilizó Arena Normalizada Idiem, la cual cuenta con la cura granulométrica especificada por la NCh 158 que corresponde a la presente en la tabla 29, Esta arena viene envasada en bolsas de 1.500 g, para poder confeccionar de manera directa cada masada de mortero.

Tabla 29: Granulometría de la arena normalizada.

Abertura tamiz [mm]	Retención acumulada [%]
0,074	98 ± 2
0,149	88 ± 2
0,5	68 ± 2
1	38 ± 2
1,68	5 ± 2
2	0



Figura 31: Bolsas de 1.500 g de arena normalizada según NCh 158 Of67.

Para confeccionar los morteros se utilizó la metodología de la NCh 158, adicionando un proceso extra al final del proceso para lograr determinar la consistencia de las mezclas, la cual corresponde a la mostrada en la figura 32.

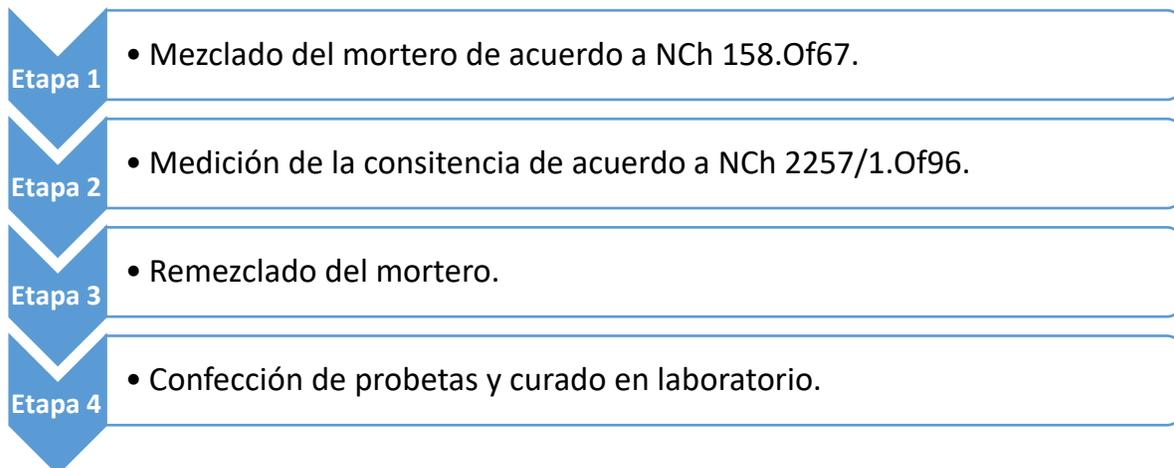


Figura 32: Metodología de confección de probetas y determinación de la consistencia de los morteros.

5.2.1. Mezclado inicial de los morteros.

Esta etapa se desarrolló de acuerdo a lo especificado por la norma NCh 158.Of67, lo cual fue sencillo gracias a la utilización del equipo de mezcla automático del laboratorio de cementos de Idiem, el cual tiene configurada la secuencia de mezclado de la norma.

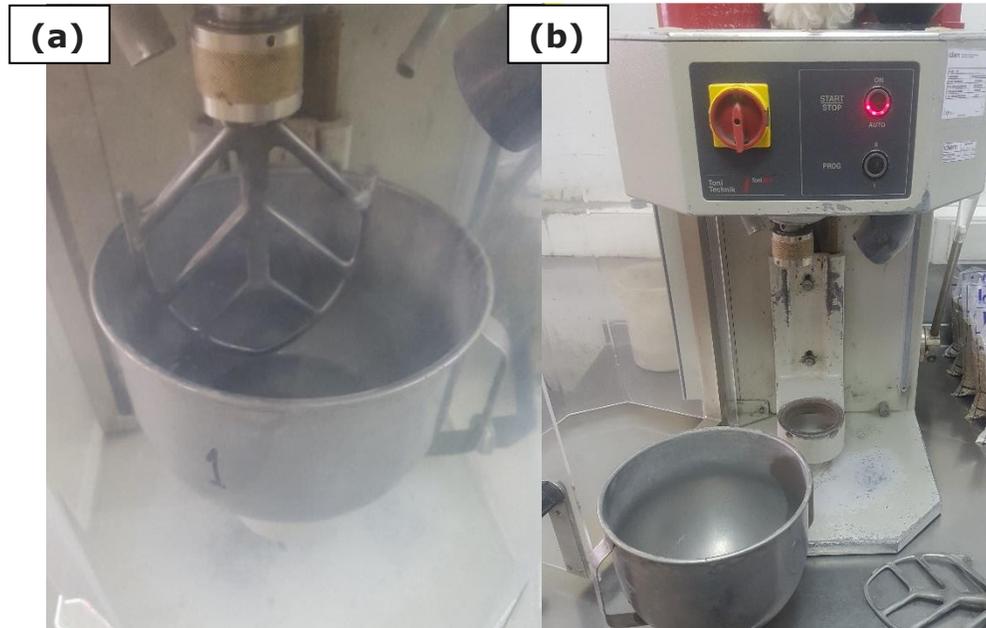


Figura 33: (a) Contenedor con la mezcla de cemento y agua (b) equipo de mezcla automático para morteros.

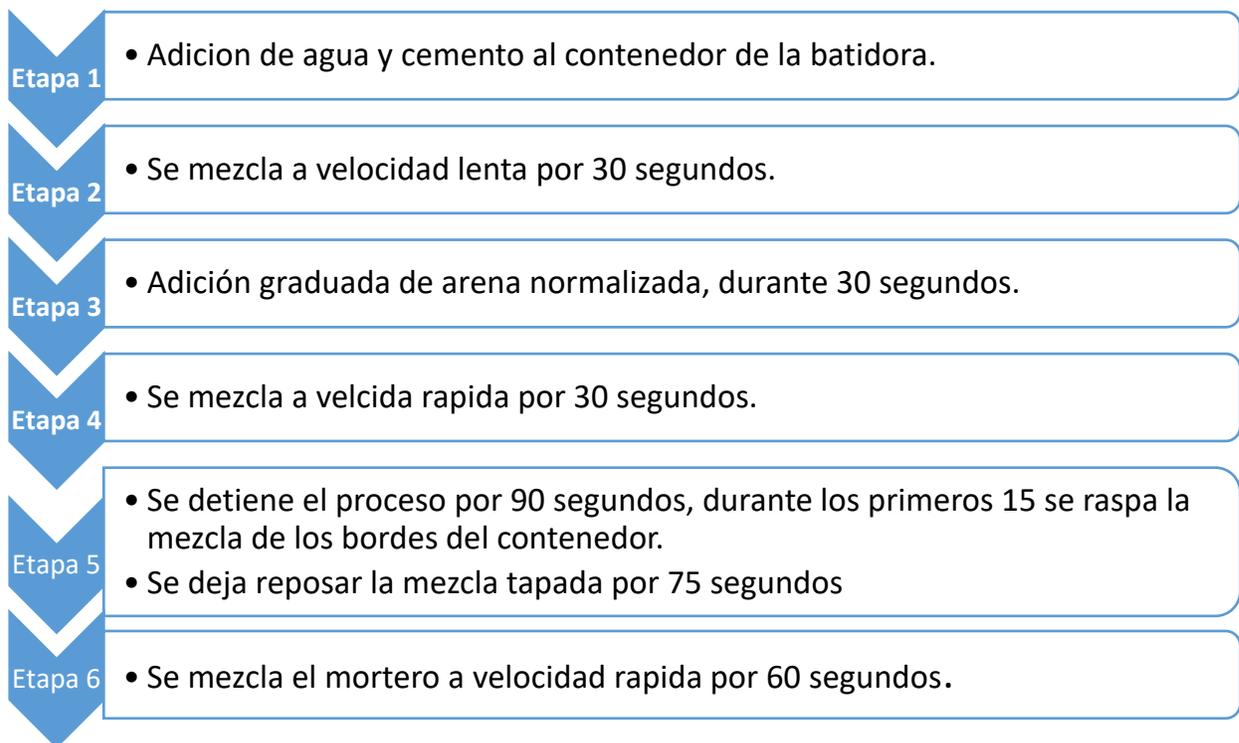


Figura 34: Metodología de confección del mortero.

5.2.2. Determinación de la consistencia de los morteros.

De acuerdo a la metodología utilizada, una vez terminado el proceso de confección del mortero, y antes de confeccionar las probetas, se procedió determinar la consistencia de cada lote de cemento de acuerdo a la metodología de la norma NCh 2257/1.Of96. Obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 30: Consistencia de los morteros según adición y LOI de las cenizas.

LOI [%]	Dosis (%Cemento- %Ceniza)	Consistencia Promedio [mm]
22%	90%-10%	185
22%	80%-20%	180
22%	70%-30%	149
22%	60%-40%	S/C
22%	50%-50%	S/C
16%	90%-10%	198
16%	80%-20%	194
16%	70%-30%	183
16%	60%-40%	171
16%	50%-50%	142
12%	90%-10%	202
12%	80%-20%	200
12%	70%-30%	198
12%	60%-40%	191
12%	50%-50%	183
7%	90%-10%	211
7%	80%-20%	212
7%	70%-30%	212
7%	60%-40%	203
Melón Super	100%-0%	209



Figura 35: Determinación de la consistencia en la mesa de sacudidas.

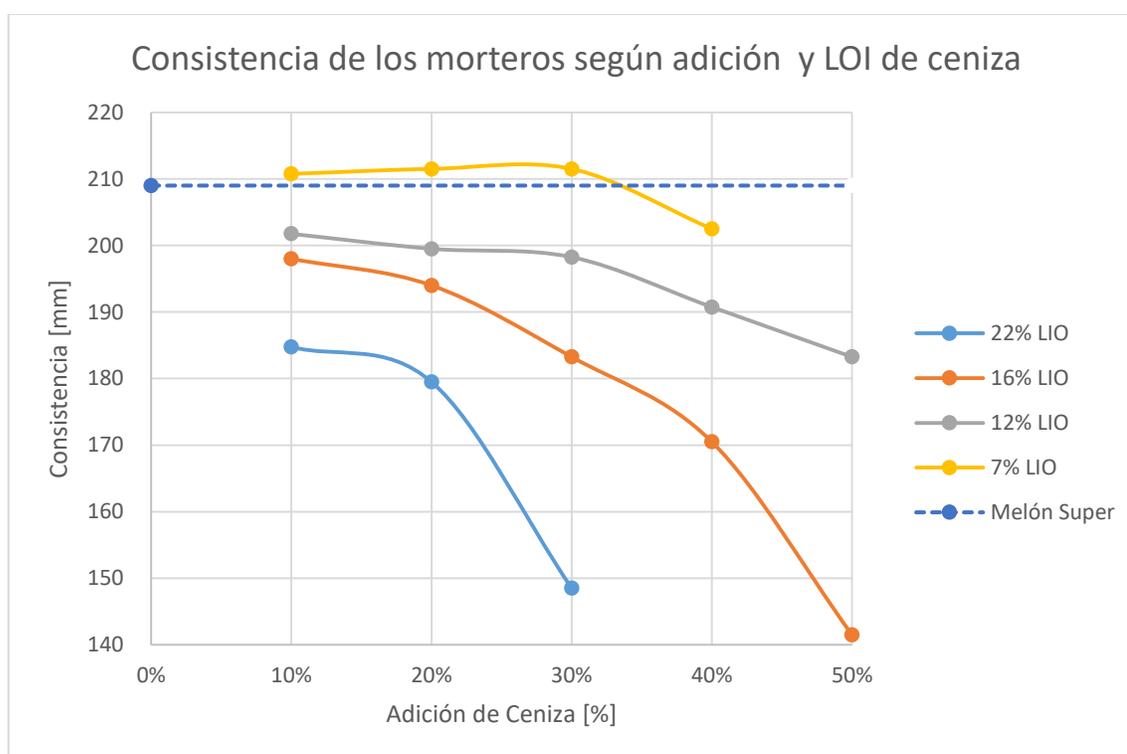


Figura 36: Consistencia de los morteros según adición y LOI de las cenizas

De la evaluación de la consistencia se puede obtener la siguiente información:

- Para la ceniza con LOI de 22%, se aprecia que al aumentar la adición de ceniza por sobre el 20%, su consistencia se reduce considerablemente hasta el punto donde no es posible medirla.
- Al Disminuir la pérdida por calcinación, se aprecia una mejora en la consistencia de la mezcla, lo cual podría considerarse a su vez un aumento en la trabajabilidad, lo cual puede deberse dado que al

disminuir el contenido de carbón de las cenizas esté absorbe menos agua lo que mejora la propiedad.

- Al aumentar la dosis de ceniza, que posee las mismas perdidas por calcinación, se aprecia que la consistencia se reduce y con ello su trabajabilidad, esto puede deberse a que al aumentar la dosis de ceniza primero que todo aumenta el contenido de carbón adicionado a la mezcla y con ello la cantidad de agua que es absorbida por este.

5.2.3. Confección de las probetas y curado en laboratorio.

Determinada la consistencia de los morteros, y de acuerdo a la metodología especificada, se mezcló el mortero por 30 segundos a velocidad rápida, para posteriormente confeccionar las probetas en la mesa de compactación, de acuerdo a la metodología de la figura 36.

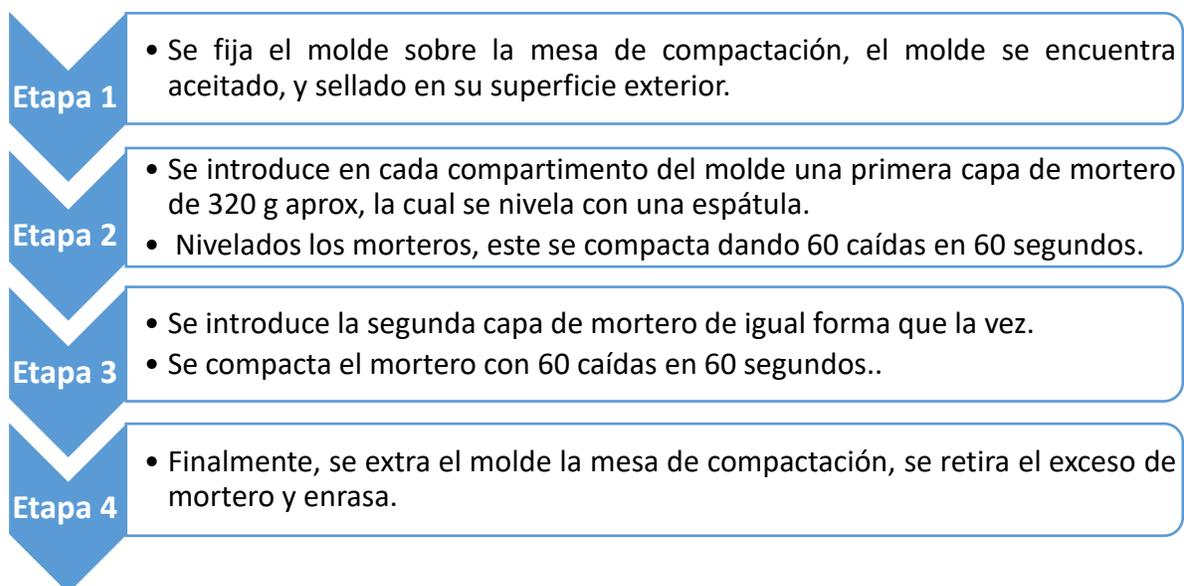


Figura 37: Metodología de confección de las probetas.

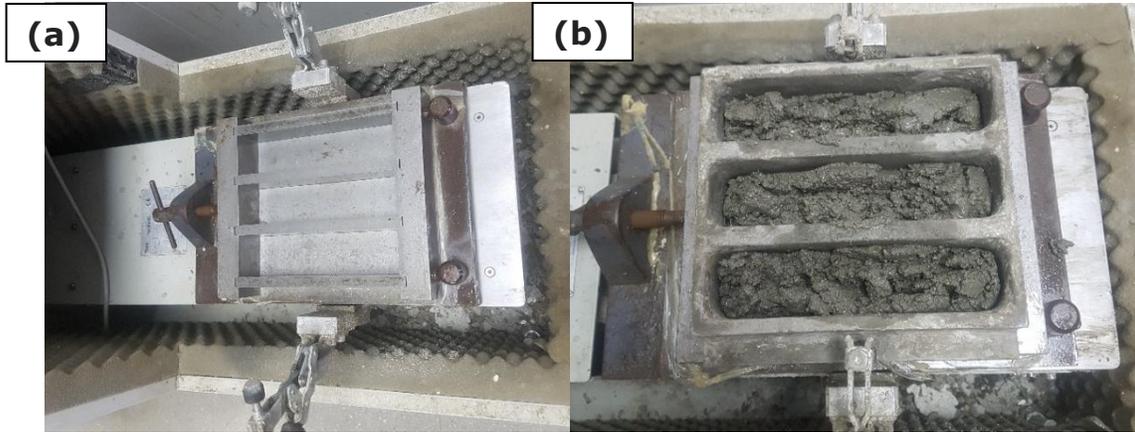


Figura 38: (a) Fijación del molde a mesa de compactación, (b) primera capa de mortero antes de la compactación.

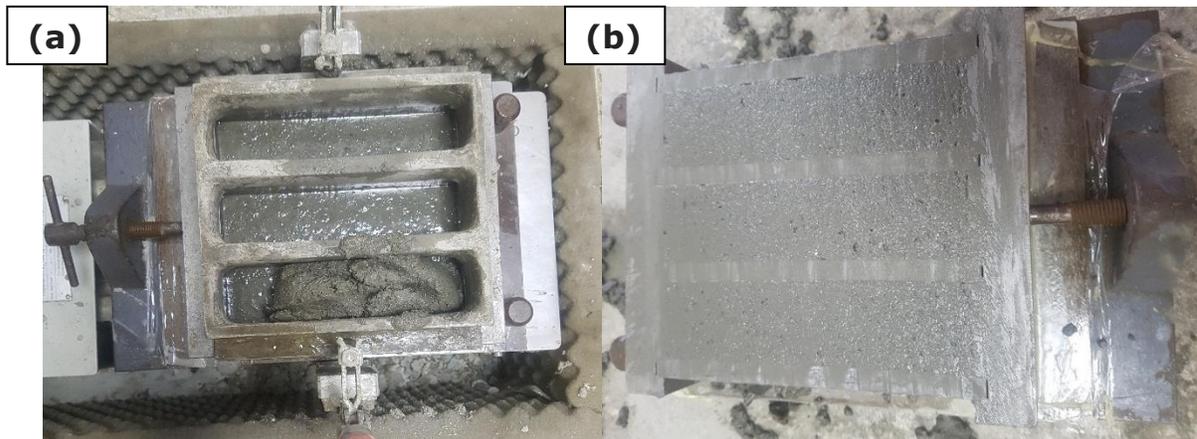


Figura 39: (a) Insertando la segunda capa, (b) Muestra enrasada, y lista para ingresar a cámara de curado.

Una vez enrasadas las probetas, estas son llevadas a la cámara humedad del laboratorio de cementos. Donde la muestra permanecerá por 24 horas, para posteriormente ser desmoldada, y finalmente almacenar las probetas en una piscina de curado con condiciones controladas hasta cumplir la edad de ensayo.

5.3. Determinación de la resistencia mecánica de los morteros.

Cumplidas las edades de ensayo de cada mortero, se procedió a ensayar las probetas, las cuales inicialmente se someten a un ensayo de tracción por flexión, para posteriormente evaluar su resistencia a la compresión.

Como patrón se determinó la resistencia de un mortero sin adiciones de ceniza volante, es decir solo Melón Super, obteniéndose los siguientes resultados de la tabla 31.

A continuación, además se presentarán los resultados obtenidos para cada dosis de cemento utilizada según su contenido de ceniza.

Tabla 31: Resistencia a la tracción por flexión y compresión sin adición de ceniza.

Edad	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a tracción por flexión [MPa]
7	45,4	7,3
28	55,4	8,5
56	58,5	8,6

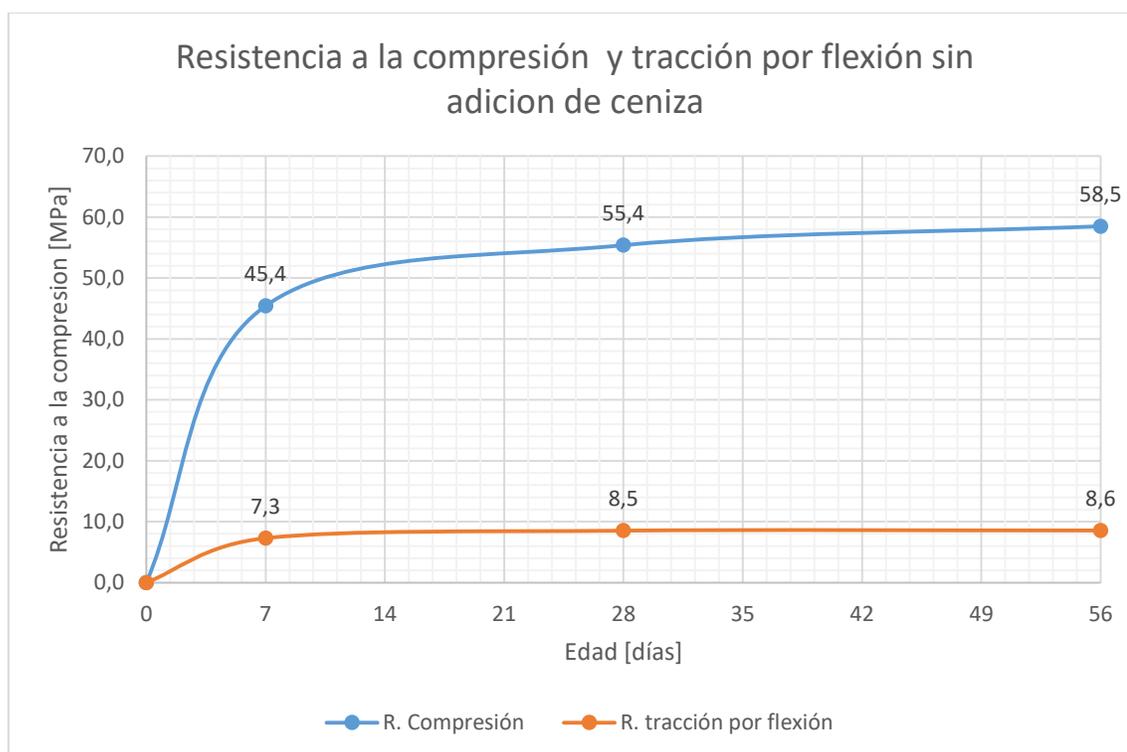


Figura 40: Resistencia a la compresión y tracción por flexión sin adición de ceniza.

Tabla 32: Resistencia a la tracción por flexión y compresión de la ceniza con LOI 22%

Contenido de ceniza [%]	Edad	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a tracción por flexión [MPa]
10	7	40.7	6.5
	28	53.8	7.8
	56	56.7	8.3
20	7	33.7	5.3
	28	44.9	6.9
	56	49.4	7.4
30	7	24.5	4.3
	28	34.0	5.1
	56	38.8	5.8
40	7	17.6	3.1
	28	18.7	3.6
	56	23.6	3.8
50	7	8.7	2.0
	28	10.6	2.4
	56	13.7	2.5

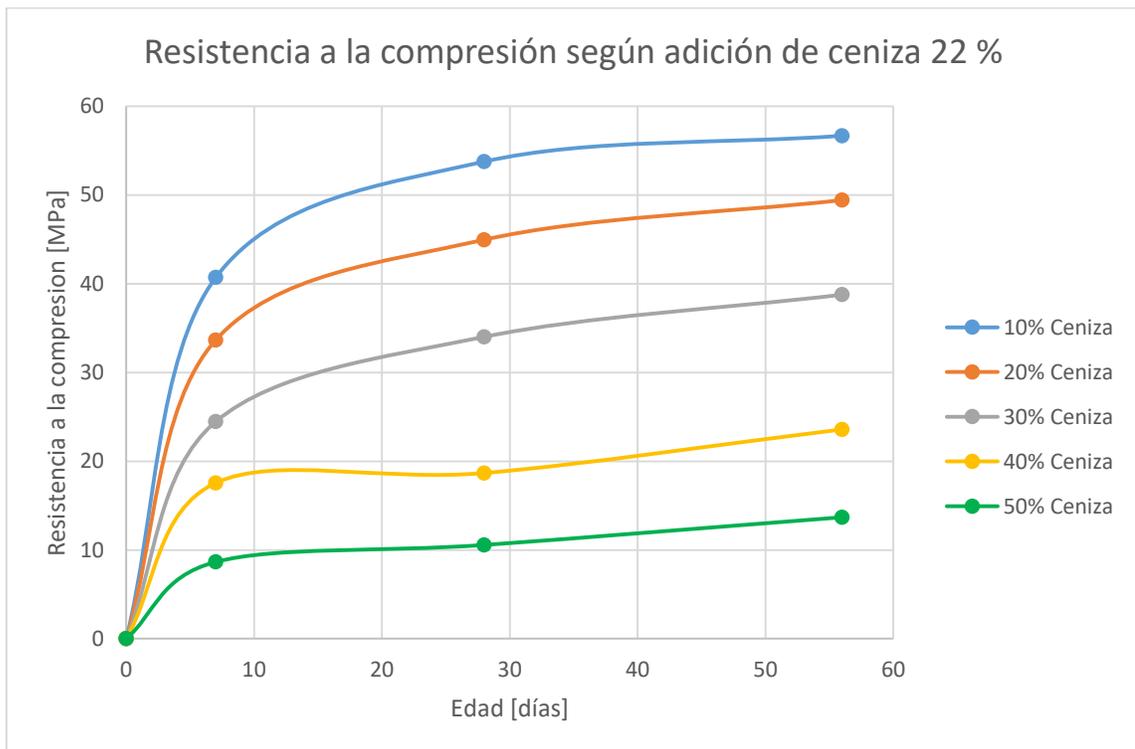


Figura 41: Resistencia a la compresión de la ceniza con LOI 22%

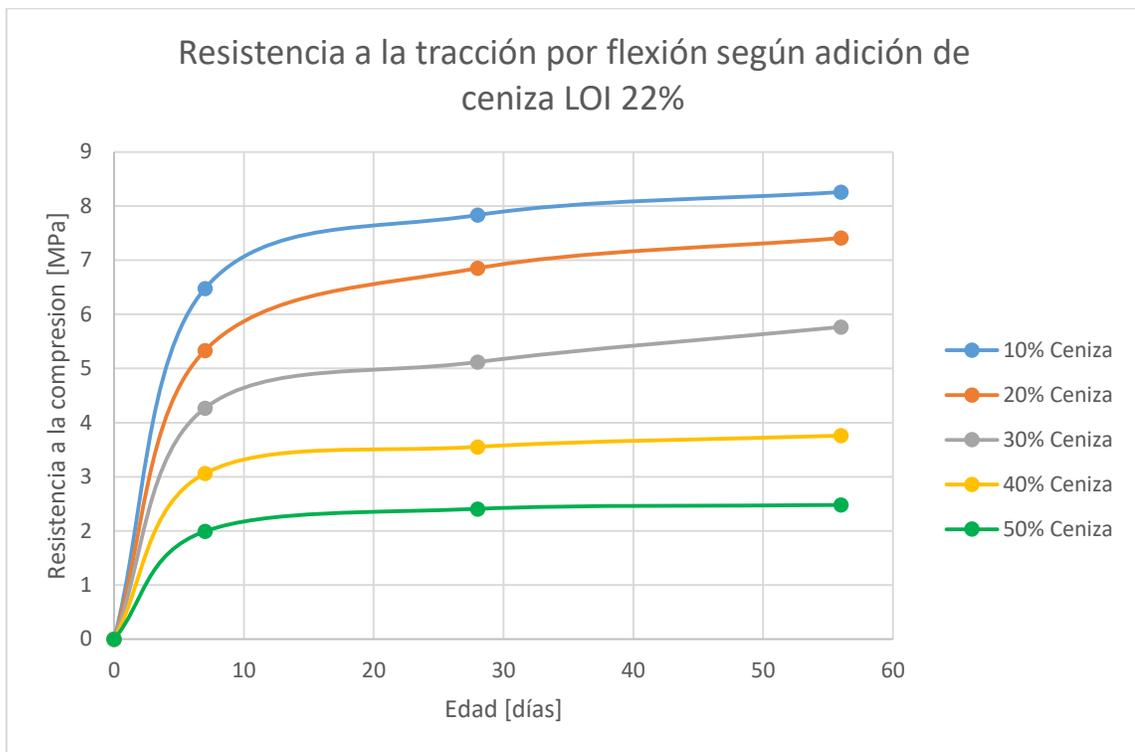


Figura 42: Resistencia a la tracción por flexión de la ceniza con LOI 22%

Primero, al evaluar los resultados obtenidos se aprecia que, al aumentar el porcentaje de adición de ceniza independiente de su contenido de carbón, las resistencias disminuyen, esto tanto para la resistencia a compresión como a la tracción por flexión, además se aprecia que la diferencia entre los morteros que tienen adiciones del 10 al 30 % su diferencia para similares edades es similar, mientras que para las que poseen una adición superior al 30% posee una mayor disminución en su resistencia mecánica. Por otra parte, se observa que para estas mismas series existe un mayor crecimiento entre 28 y 56 (78% promedio) que entre 7 y 28 (88% promedio).

Al analizar las resistencias a tracción con flexión de los morteros con una adición de cenizas con LOI de 16% se ve un comportamiento similar al de los morteros cenizas de LOI del 22%, como se aprecia en la figura 44.

En el caso de las resistencias a compresión, se aprecia un comportamiento estable en la disminución de las resistencias al aumentar la adición de ceniza, excepto en el mortero con un remplazo del 50%, en el cual presenta una disminución de la resistencia de hasta un 33% respecto a la dosis con un 40% de remplazo, lo cual es casi el doble del 16% presente entre las curvas del 30 y 40%.

Tabla 33: Resistencia a la tracción por flexión y compresión de la ceniza con LOI 16%

Contenido de ceniza [%]	Edad	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a tracción por flexión [MPa]
10	7	43.8	6.9
	28	54.9	8.2
	56	58.9	8.6
20	7	36.4	5.9
	28	46.0	7.2
	56	53.4	8.0
30	7	28.9	4.9
	28	38.6	6.3
	56	46.7	6.8
40	7	22.7	3.7
	28	32.0	5.1
	56	39.1	6.5
50	7	16.1	3.2
	28	20.9	3.6
	56	26.2	4.7

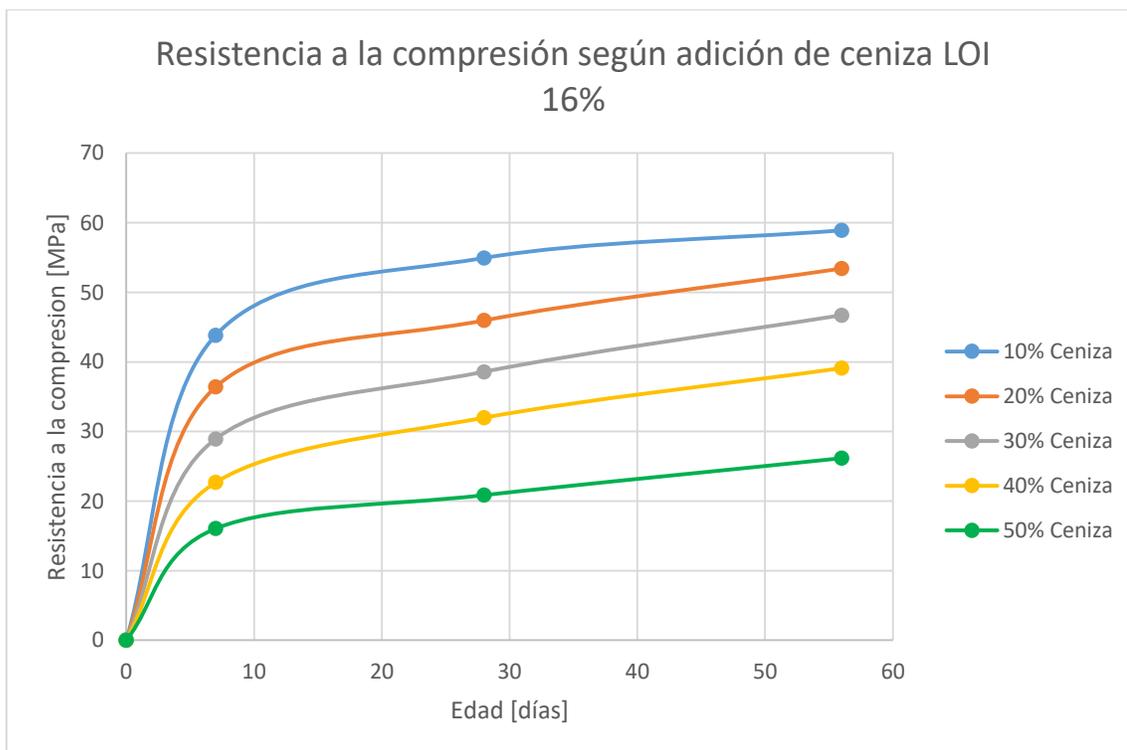


Figura 43: Resistencia a la compresión de la ceniza con LOI 16%

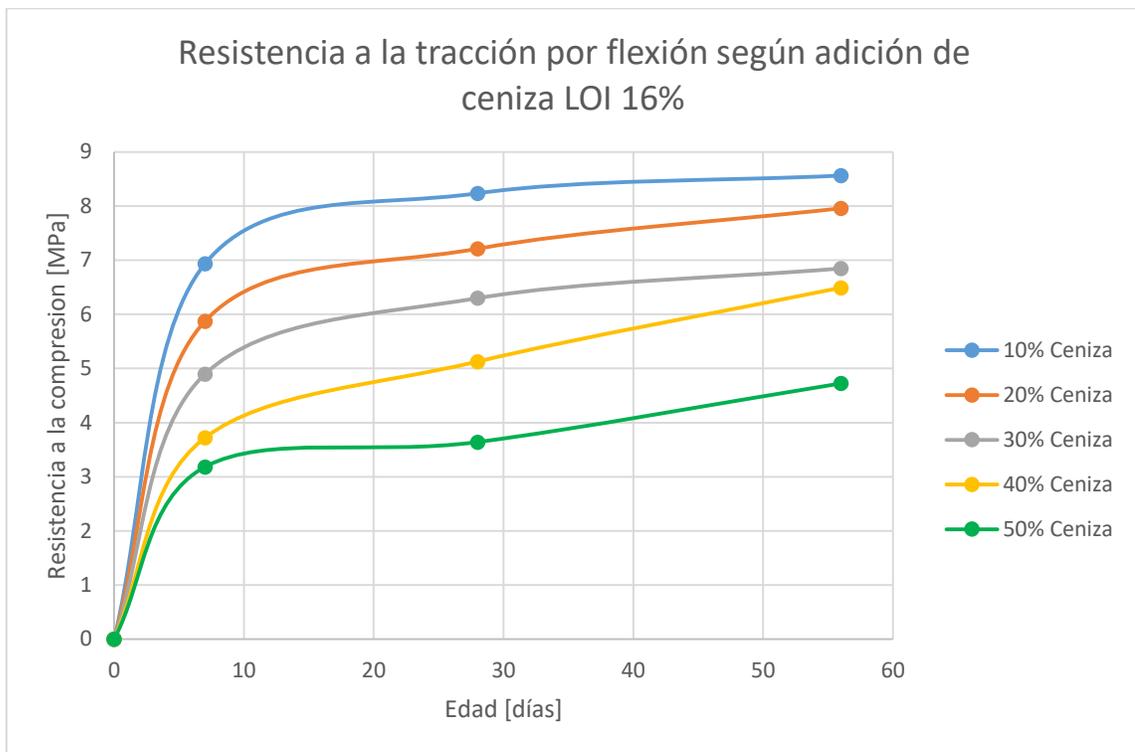


Figura 44: Resistencia a la tracción por flexión de la ceniza con LOI 16%

Tabla 34: Resistencia a la tracción por flexión y compresión de la ceniza con LOI 12%

Contenido de ceniza [%]	Edad	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a tracción por flexión [MPa]
10	7	44.7	7.3
	28	54.9	8.3
	56	59.6	8.7
20	7	38.4	6.5
	28	49.4	7.8
	56	54.6	8.2
30	7	30.8	5.5
	28	43.8	7.4
	56	49.9	7.8
40	7	25.1	4.6
	28	36.8	6.3
	56	43.3	7.2
50	7	21.3	3.9
	28	29.9	5.5
	56	35.3	5.6

Al revisar los resultados de los morteros con adición de cenizas con LOI del 12%, se aprecia un comportamiento estable en la disminución de las resistencias a compresión y tracción (81% promedio), aunque si se puede ver que el crecimiento entre 28 y 56 días (90% promedio para adiciones menores o iguales al 30%, y 80% para adiciones superiores al 30%) en el caso de los morteros con adición de cemento es considerablemente superior al obtenido del mortero sin adición de ceniza, lo que indica que la adición de ceniza ocasiona un mayor desarrollo de resistencia a medida que pasa el tiempo.

Cabe destacar que las curvas de resistencia a la tracción por flexión, en el caso de los morteros con adición de ceniza con LOI del 12% tienen un comportamiento similar al de los morteros que tenían ceniza del 22%.

Finalmente, los morteros con adición de ceniza con un LOI del 7%, presentan un comportamiento similar a los de los morteros con adición de ceniza con LOI del 12%.

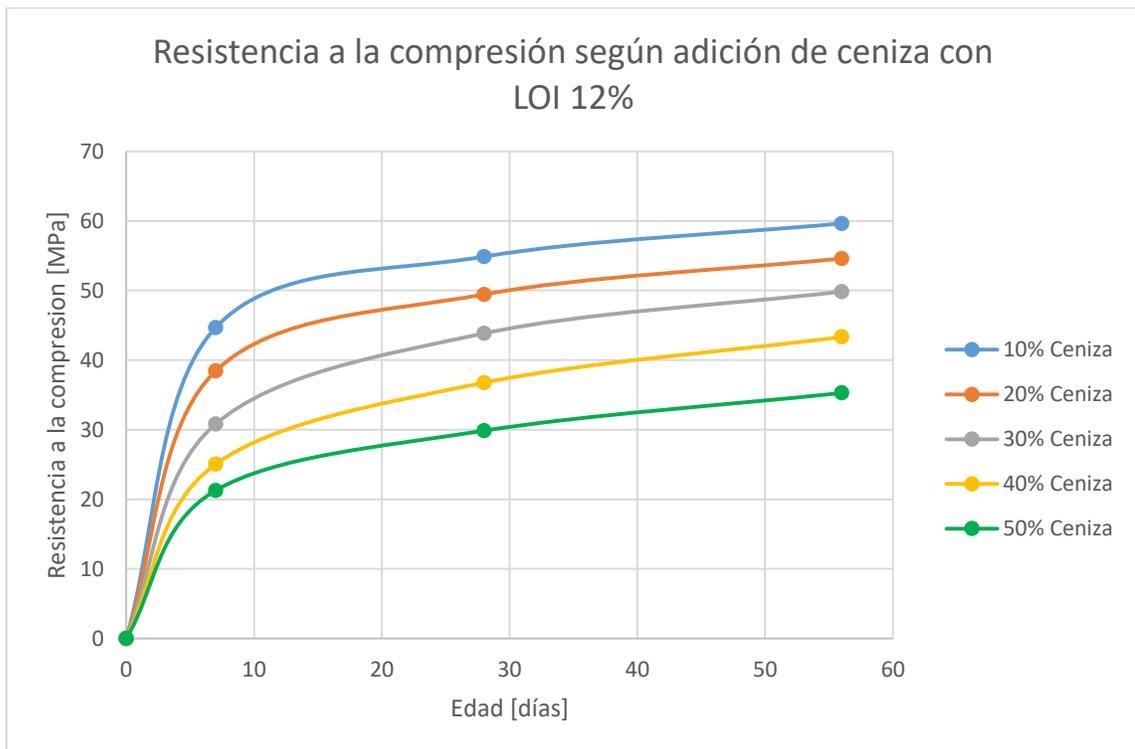


Figura 45: Resistencia a la compresión de la ceniza con LOI 12%

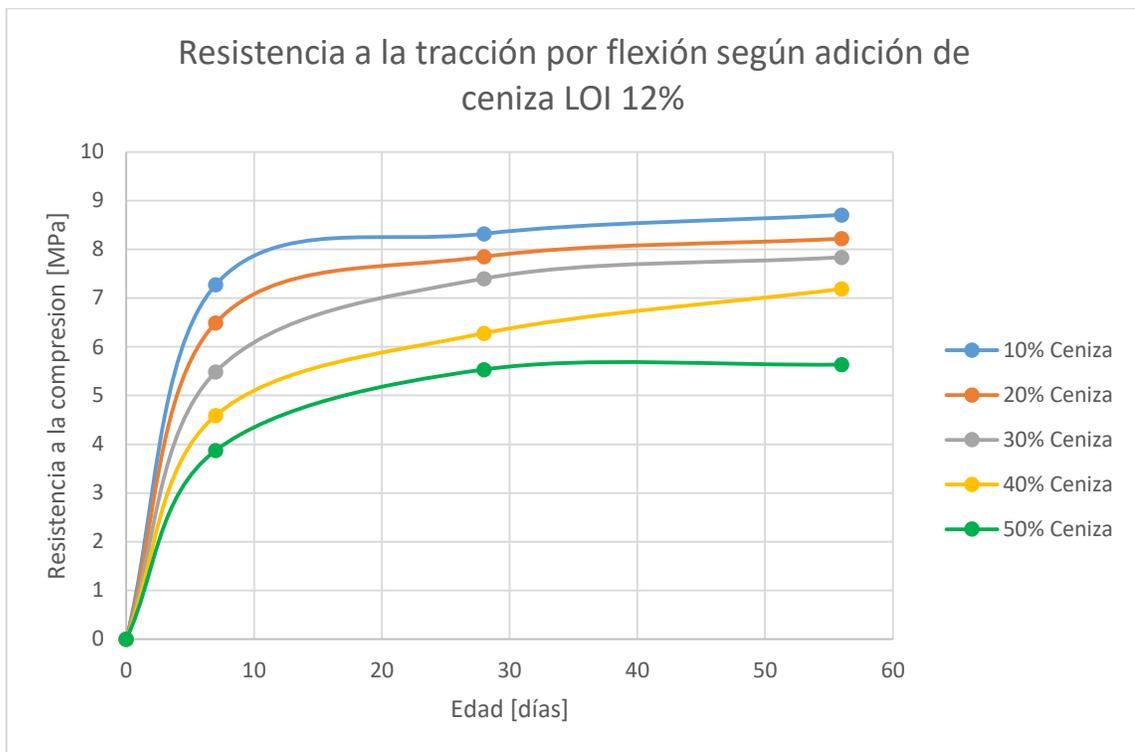


Figura 46: Resistencia a la tracción por flexión de la ceniza con LOI 12%

Tabla 35: Resistencia a la tracción por flexión y compresión de la ceniza con LOI 7%

Contenido de ceniza [%]	Edad	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a tracción por flexión [MPa]
10	7	46.1	7.6
	28	56.7	8.7
	56	60.7	9.0
20	7	40.3	6.9
	28	51.0	8.0
	56	56.6	8.4
30	7	34.8	6.5
	28	45.5	7.5
	56	51.1	8.0
40	7	28.3	5.1
	28	39.1	6.5
	56	46.7	7.4
50	7	45.4	7.3
	28	55.4	8.5
	56	58.5	8.6

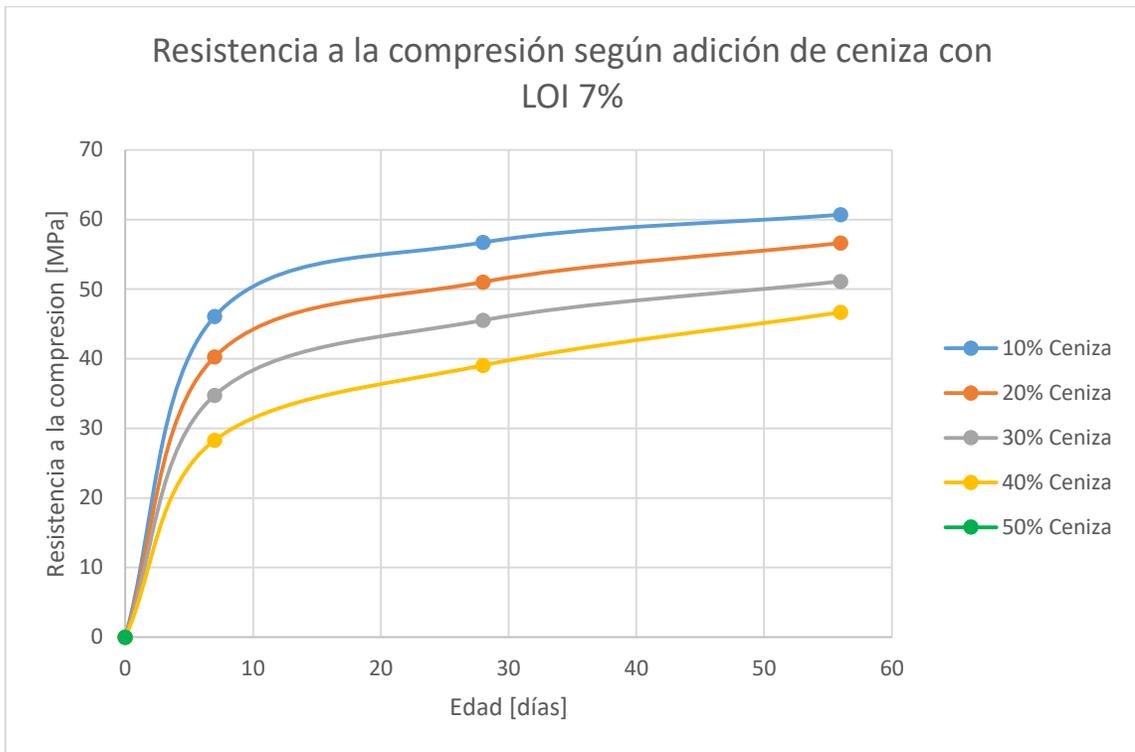


Figura 47: Resistencia a la compresión de la ceniza con LOI 7%

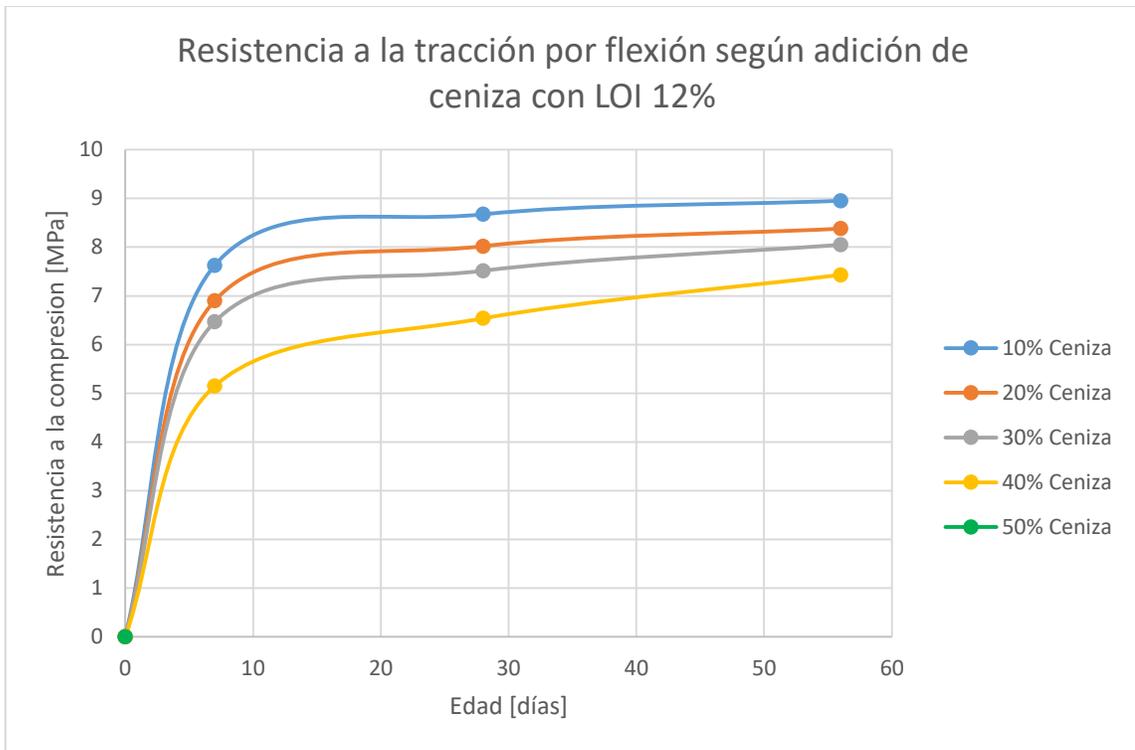


Figura 48: Resistencia a la tracción por flexión de la ceniza con LOI 7%

De estos resultados, resulta interesante analizar el comportamiento de los morteros según su adición de ceniza, además del contenido de carbón. De esto se obtuvieron las siguientes figuras:

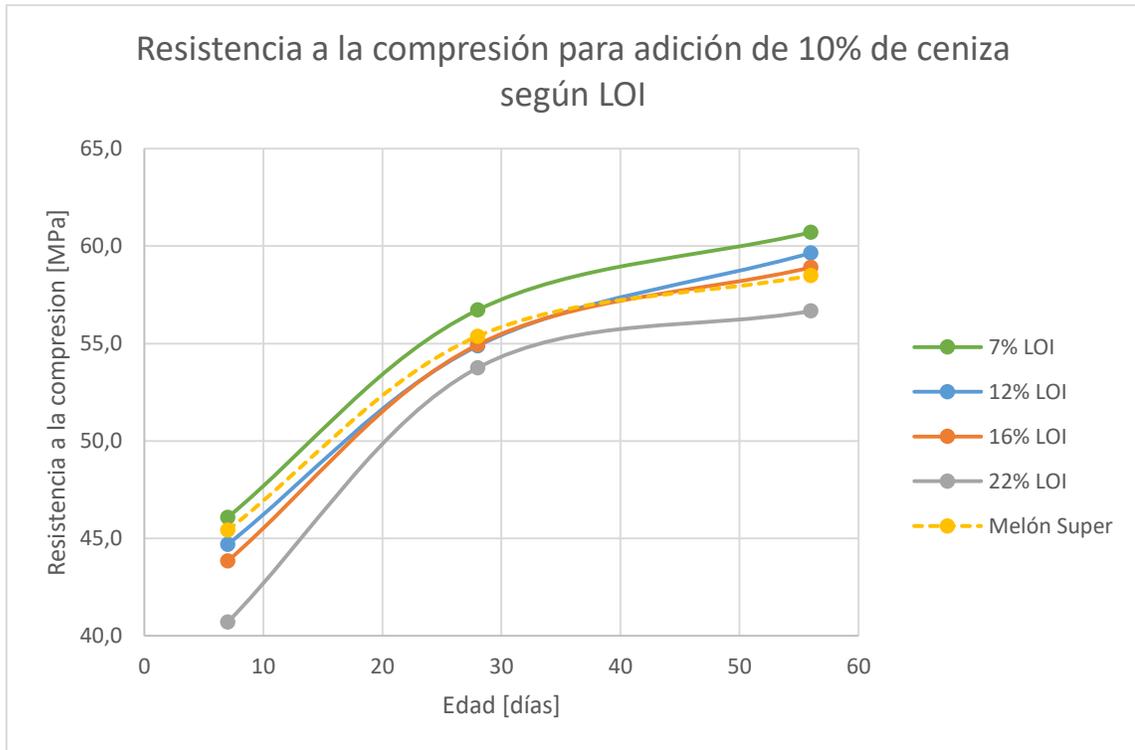


Figura 49: Resistencia a la compresión para una adición del 10% de ceniza.

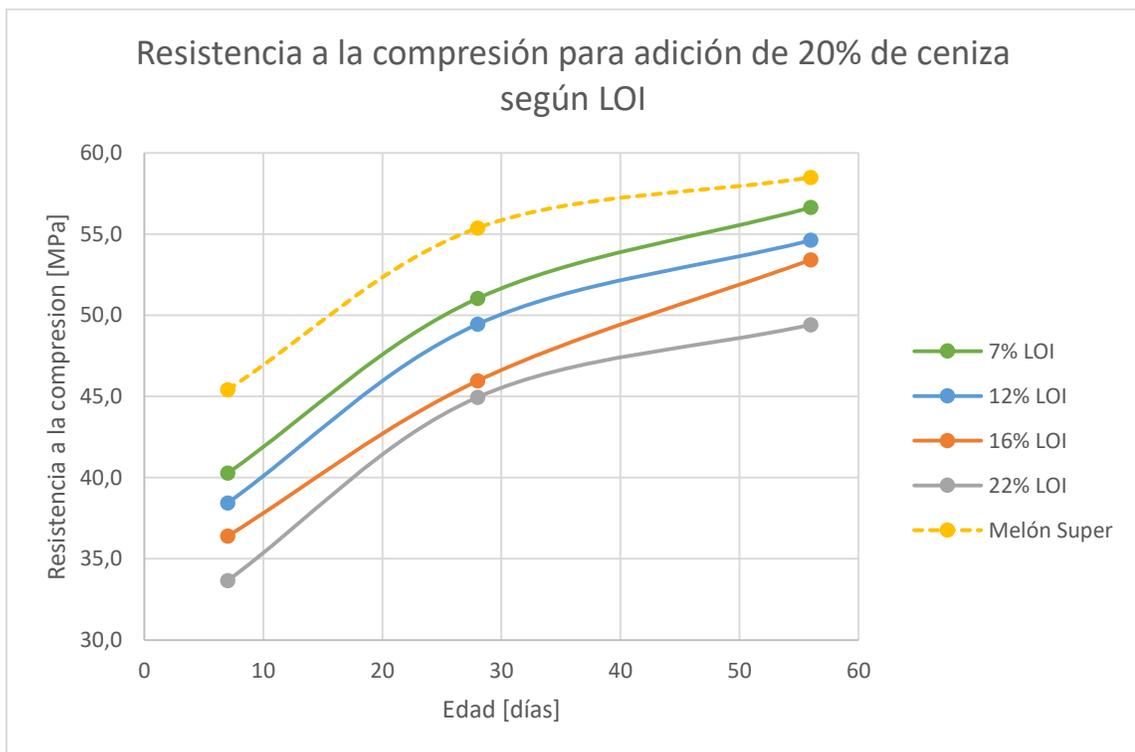


Figura 50: Resistencia a la compresión para una adición del 20% de ceniza.

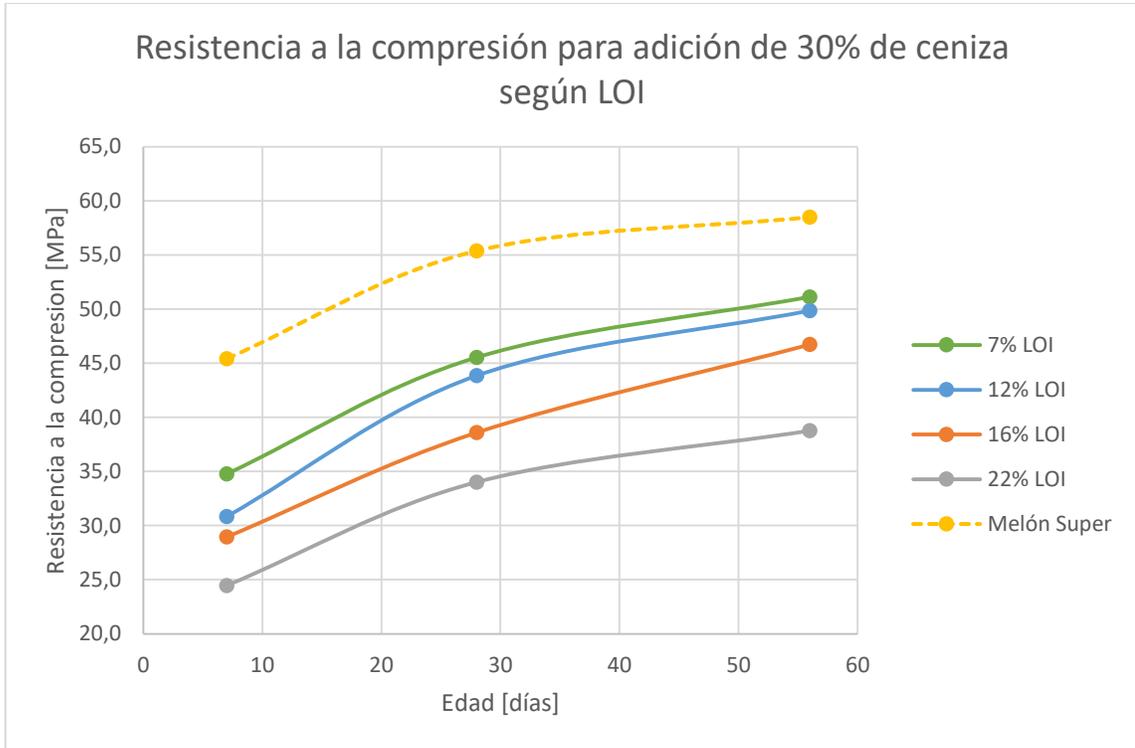


Figura 51: Resistencia a la compresión para una adición del 30% de ceniza.

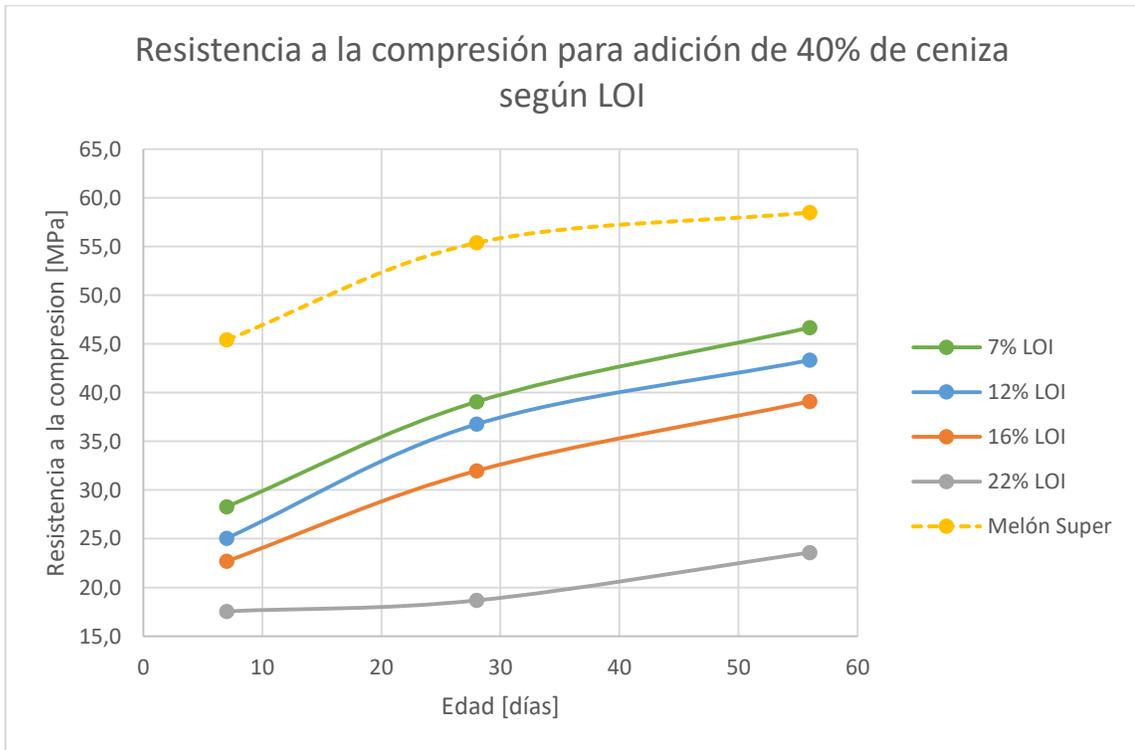


Figura 52: Resistencia a la compresión para una adición del 40% de ceniza.

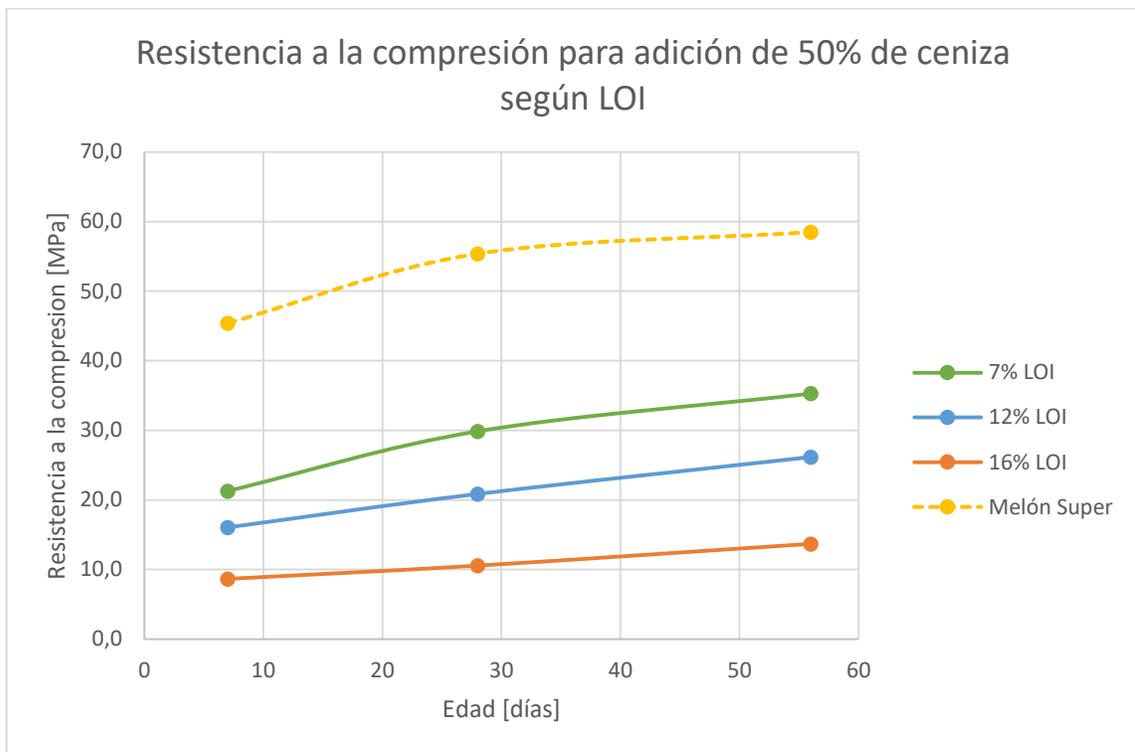


Figura 53: Resistencia a la compresión para una adición del 50% de ceniza.

De estos resultados, y en particular de la figura 49, se puede apreciar que la resistencia de los morteros con ceniza de LOI del 7%, supera en todas las edades la resistencia mecánica del mortero sin adición de ceniza, y que además los morteros con adición de ceniza con LOI del 12 y 16% dado que presentan un mayor crecimiento entre 28 y 56 días también supera la resistencia del mortero sin adición de ceniza.

También resulta interesante observar en detalle la comparación entre las resistencias de los morteros con una adición de un 20% de ceniza, dado que presentan un alto crecimiento a edades posteriores a 28 días, lo que implica que estos morteros superaran la resistencia mecánica a 90 días del mortero sin adición de ceniza. Lo cual habla de la viabilidad de usar ceniza tratada como adición al cemento.

Finalmente, se ha de destacar la comparación entre las resistencias de los morteros con una adición de un 40% de ceniza, dado que presentan un crecimiento del orden del 80% a 56 días, lo que podría implicar a que a 90 días las curvas se intersectarán o incluso se obtuviesen resistencias menores para los morteros con un LOI inferior al 7%.

Capítulo 6: Análisis y Conclusiones.

De la investigación y los resultados obtenidos experimentalmente, se pueden generar las siguientes conclusiones:

1. De aquí y en adelante la producción de ceniza volante tanto a nivel mundial como nacional comenzara a disminuir dado que se dejaran de utilizar progresivamente materiales de combustión como el carbón en la producción de energía eléctrica y se busca utilizar energías de carácter limpio, dada la actual preocupación por los gases de efecto invernadero que generan el calentamiento global.

Aun así, cabe destacar, que dada la alta demanda y producción de energías eléctricas por medio de centrales termoeléctricas en base a carbón desde 1962, existe una gran cantidad de ceniza almacenada a la espera de poder ser utilizada como adición a los hormigones.

2. Actualmente existe un gran número de metodologías de extracción de carbón para la ceniza volante, las cuales pueden ser aplicables a escala industrial, pero dado el gran impacto que posee la industria de la minería sobre la investigación de tecnologías de separación de materiales, el mejor proceso de mejoramiento actualmente disponible para el tratamiento de la ceniza volante es la flotación por espuma.
3. Al aplicar el proceso de extracción del carbón residual a la ceniza volante, se obtienen, además, de una reducción en las perdidas por calcinación una considerable mejora en el contenido de material retenido por el tamiz 325 reduciéndose desde un 48,5% a un 22,1%, y además un aumento de la superficie específica de 3400 a 4050 cm²/g, lo cual implica una mejora significativa en las propiedades de la ceniza, lo que luego se traduce en una mayor resistencia a la compresión, durabilidad y consistencia para los morteros donde se aplique.
4. De los resultados experimentales, se puede apreciar un cambio en la curvas de resistencia v/s edad, la cual se observa por medio de la obtención de mayores crecimientos a edades más tardías (56 y potencialmente 90 días) en los morteros con adición de ceniza, generando que hasta en algunos casos donde inicialmente los morteros que poseen menores resistencias a 7 y 28 días superen la resistencia de las muestras sin adición de ceniza a 56 y potencialmente 90 días, como es el caso para las probetas con adiciones de 10% y 20% de ceniza.

Dado estos resultados, es altamente recomendable utilizar adiciones de ceniza de hasta un 20%, la cuales a 90 días podrán alcanzar resistencias

superiores a un mortero con cemento portland puro, además de obtener otros beneficios como mejoras considerables en su durabilidad, permeabilidad. Entre otros. Además de la reducción en la huella de carbono que significara el uso de las cenizas.

5. Por otro lado, de los resultados obtenidos en esta experiencia se puede concluir que el uso de cenizas con pérdidas por calcinación superiores al 16 % no debe ser considerada como una opción viable para adicionar al cemento portland de forma directa, a menos que esta se debidamente tratada.

Todo esto considerando los valores obtenidos para propiedades tales como la superficie específica, porcentaje de material retenido por tamiz 325, consistencia y resistencias mecánicas de los morteros.

6. Finalmente se puede concluir que el proceso de mejoramiento de la ceniza por medio de la extracción del carbón residual por flotación por espuma, es una viable metodología de tratamiento de la ceniza, la que permite obtener materias primas confiables que pueden desempeñarse según lo esperado para cenizas con bajos LOI.

Bibliografía

- [1] Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile. 2019. Hoja de Ruta Chile Industria del Cemento- Hacia una Economía baja en carbono. Santiago, Chile: FICEM Hoja de Ruta CO2.
- [2] Andrew, R. M. 2018. Global CO2 emissions from cement production, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 195-217, <https://doi.org/10.5194/essd-10-195>.
- [3] Bentz, D. P., Ferraris, C. F., & Snyder, K. A. 2013. Best Practices Guide for High- Volume Fly Ash Concretes: Assuring Properties and Performance. National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce.
- [4] McMahan, G. L., Kenneth, C. J., Soong, Y., & Finseth, D. H. 1999. Parametric Study of the Column Oil Agglomeration of Fly Ash. International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, University of Kentucky (pág. Paper number 6.) <http://www.flyash.info>.
- [5] Baltrus, J. P., Wells, A. W., Fauth, D. J., Diehl, J. R., & White, C. M. 2001. Characterization of Carbon Concentrates from Coal- Combustion Fly Ash. *Energy Fuels - American Chemical Society*, 455-462.
- [6] Blissett, R. S., & Rowson, N. A. 2012. A review of the multi-component utilisation of coal fly ash. Elsevier, 1-23.
- [7] ASTM International. 2019. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete (ASTM C618-19). West Conshocken, PA, www.astm.org.
- [8] Unión Europea, CTN, C. T. 2013. Norma EN 450-1 Norma Europea - Cenizas Volantes para Hormigón. Madrid, España: AENOR.
- [9] Itskos G, Koukouzas N, Vasilatos C, Megremi I, Moutsatsou A. 2010. Comparative uptake study of toxic elements from aqueous media by the different particlesize-fractions of fly ash. *J Hazard Mater*; 183(1-3):787-92.
- [10] Aksu Z, Yener J. 1999. The usage of dried activated sludge and fly ash wastes in phenol biosorption/adsorption: comparison with granular activated carbon. *J Environ Sci Health, Part A*; 34(9):1777-96.

- [11] Davini P. 1995. Investigation of flue gas desulphurization by fly ash and calcium hydroxide mixtures. *Resour Conserv Recycl*; 15(3-4):193-201.
- [12] Pandey VC, Singh N. 2010. Impact of fly ash incorporation in soil systems. *Agric Ecosyst Environ*; 136(1-2):16-27.
- [13] Manoharan V, Yunusa IAM, Loganathan P, Lawrie R, Skilbeck CG, Burchett MD, et al. Assessments of class F fly ashes for amelioration of soil acidity and their influence on growth and uptake of Mo and Se by canola. *Fuel* 2010; 89(11):3498-504.
- [14] Park HC, Park YJ, Stevens R. Synthesis of alumina from high purity alum derived from coal fly ash. *Mater Sci Eng A* 2004;367(1-2):166-70.
- [15] Erol M, Küçükbayrak S, Ersoy-Meriçboyu A. Comparison of the properties of glass, glass-ceramic and ceramic materials produced from coal fly ash. *J Hazard Mater* 2008;153(1-2):418-25.
- [16] Chaulia, P. K., & Das, R. 2008. Process Parameter Optimization for Fly Ash Brick by Taguchi Method. *Materials Research*, Vol. 11, No. 2, 159-164.
- [17] Loayza, N. D. 2017. Utilización de Ceniza de Central Termoeléctrica Ventanas como Fuente de Aluminosilicatos para la Fabricación de Hormigón Geopolimérico. Santiago: Memoria para optar al Título de Ingeniería Civil- Universidad de Chile.
- [18] Comisión Nacional de Energía. 2017. Anuario Estadístico de Energía 2017. Santiago: Ministerio de Energía-Gobierno de Chile.
- [19] Chile. Ministerio de Energía. 2013. Ley Núm. 20.257 Introduce modificaciones a la Ley General de Servicios Eléctricos respecto de la generación de Energía Eléctrica con fuentes de energías renovables no convencionales. (05 de Noviembre de 2018) Obtenido de [https://www.leychile.cl/N?i=270212&f=2013-10-22&p=.](https://www.leychile.cl/N?i=270212&f=2013-10-22&p=)
- [20] Chile. Ministerio de Energía. 2015. Política Energética de Chile 2050. Santiago.
- [21] INODÚ. 2017. Informe Final- Licitación ID: 584105-28-LE17-Flexibilidad de Operación de Centrales Termoeléctricas Chilenas con los Instrumentos de Gestión Ambiental vigentes. Santiago: Ministerio de Energía.

- [22] González, G. 2016. Proyectos Eléctricos y Catastro de Termoeléctricas en Chile. Publicaciones Fundación TERRAM , APP N° 63, 3-36.
- [23] Programa Chile Sustentable. 2017. Catastro de las Centrales en Operación en el SIC y Sing- año 2016. Santiago.
- [24] Chile. Ministerio de Energía. 2015. Decreto 13 Establece Norma de Emisión para Centrales Termoeléctricas. (05 de Noviembre de 2018) Obtenido de <https://www.leychile.cl/N?i=1026808&f=2015-02-25&p=>.
- [25] Chile. Ministerio de Salud. 2004. Decreto 148 Aprueba Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos. (05 de Noviembre de 2018) Obtenido de <https://www.leychile.cl/N?i=226458&f=2004-06-16&p=>.
- [26] Chile. Ministerio de Salud. 2018. Decreto 594 Aprueba Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo. (05 de Noviembre de 2018). Obtenido de <https://www.leychile.cl/N?i=167766&f=2018-02-14&p=>.
- [27] Chile. Superintendencia del Medio Ambiente Gobierno de Chile. 2014. Guía de aspectos ambientales relevantes para centrales termoeléctricas. Santiago.
- [28] Chile. Superintendencia del Medio Ambiente Gobierno de Chile. 2014. Catastro de Titulares de Centrales Termoeléctricas y su Caracterización. Santiago: Departamento de Planificación, Control y Estudios.
- [29] Chile. Coordinador Eléctrico Nacional. 2018. Reporte Energético Mensual. Santiago, mayo 2018.
- [30] Külaots, I., Hurt, R. H., & Suuberg, E. M. 2004. Size distribution of unburned carbon in coal fly ash and its implications. Elsevier, Fuel 83, 223-230.
- [31] Antoni, Satrya, V., & Hardjito, D. 2015. Simple Mechanical Beneficiation Method of Coarse Fly Ash with High LOI for Making HVFA Mortar. Civil Engineering Dimension, Vol 17, N° 1, 38-43.
- [32] Capes, C., & Darcovich, K. 1984. A Survey of Oil Agglomeration in Wet Fine Coal Processing. Powder Technology, 40, 43-52.
- [33] Chile. Instituto Nacional de Normalización. 1999. Norma Chilena Oficial Cementos- Ensayo de Flexión y compresión de morteros de cemento. Santiago.

- [34] Bada, S., Tao, D., Honaker, R., Falcon, L., & Falcon, M. 2010. A Study of Rotary Tribo-Electrostatic Separation of South African Fine Coal. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, Taylor & Francis Group, 30, 154-172.
- [35] Dwari, R., & Hanumantha, K. 2007. Dry Beneficiation of Coal- A Review. *Mineral Processing & Extractive Metall. Taylor & Francis, Rev.*, 28, 177-234.
- [36] McMahan, L. G., Champagne, K. J., Soong, Y., Killmeyer, R. P., Maroto-Valer, M. M., Andrésen, J. M., Zandhuis, P. H. 2002. Physical Cleaning of High carbon fly ash. *Elsevier, Fuel Processing Technology*, 76, 11-21.
- [37] Figueroa, A., Vega, V., Dionisio, E., Caballero, M., Villacorta, H., & Moreno, L. 2008. Consutrucción de un prototipo de celda de flotación a escala piloto. *Revista del Instituto de Investigaciones FIGMMG*, Vol. 11, N° 22, 7-12.
- [38] Pezo, R. J. 2014. Diseño y Construcción a nivel de laboratorio de una celda de flotación por aire forzado aplicado a minerales sulfurados de cobre. Tesis para optar al Título Profesional Ingeniero Metalúrgico - Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco- UNSAAC.
- [39] Altun, N., Xiao, C., & Hwang, J.-Y. 2009. Separation of unburned carbon from fly ash using a concurrent flotation column. *Elsevier, Fuel processing Technology*, 90, 1464-1470.
- [40] METSO. 2012. Manual de Instrucciones Celdas de Flotación METSO RCS. Cliente Compañía Administradora Chungar S.A.C, Serie 30104.
- [41] Eisele, T., & Kawatra, S. K. 2002. Use of Froth Flotation to Remove Unburned Carbon from Fly Ash. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, Taylor & Francis Group, 23, 1-10.
- [42] Walker, A., & Wheelock, T. 2006. Separation of Carbon from fly ash using froth flotation. *Coal Preparation*, Taylor & Francis, 26, 235-250.
- [43] Harris, T., & Wheelock, T. D. 2008. Process Conditions for the Separation of Carbon from Fly Ash by Froth Flotation. *International Journal of Coal Preparation and Utilization*, 28, Taylor & Francis Group, 133-152.
- [44] ASTM International. 2019. Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement (ASTM C114-18). West Conshocken, PA, www.astm.org.

- [45] ASTM International. 2019. Standard Test Methods for sampling and testing fly ash or natural pozzolans for use in Portland Cement Concrete (ASTM C311). West Conshocken, PA, www.astm.org.
- [46] ASTM International. 2019. Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μm (N° 325) Sieve (ASTM C430-17). West Conshocken, PA, www.astm.org.
- [47] ASTM International. 2019. Standard Test Methods for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus (ASTM C204-18e1). West Conshocken, PA, www.astm.org.
- [48] ASTM International. 2019. Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement (ASTM C188-17). West Conshocken, PA, www.astm.org.