



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS
Y NATURALES

ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE LA
UTILIZACIÓN DE CENIZAS DE
FILTRO COMO ADICIÓN EN
HORMIGONES

PRÁCTICA SUPERVISADA

AUTOR: MATIAS H. SANDANELLA

TUTORA: INGA. PATRICIA A. IRICO

Año 2015

1. AGRADECIMIENTOS.

Por su participación y colaboración en el desarrollo de este estudio, el autor desea agradecer a:

- Inga. Patricia Irico.
- Silvio De Cicco y la empresa Metal Veneta S.A.
- Personal del Laboratorio de Estructuras: Ing. Héctor Gattavara, Marcelo Tissera, Sebastián Nolasco, Pablo Díaz, Verónica Fuentes, Lisandra Ojeda, Leandro Cáceres, Carlos Cornelli, Franco Soffiatti, Lucas Cacciabue.
- Ing. Raúl López y la empresa Holcim Argentina S.A.
- Ing. Jorge Pagliero y la empresa Hormiblock S.A.

2. RESUMEN.

El hormigón, material vital para la industria de la construcción, surge de la mezcla de dos componentes: agregados (60 a 80 % del volumen total) y pasta cementicia (el resto).

Una adición mineral es todo aquel material fino que puede incorporarse al hormigón, ya sea en reemplazo del cemento portland o del agregado fino, y que presenta propiedades benéficas para el mismo. Estas adiciones son de orígenes muy variados, tanto naturales como artificiales, e incluso residuos y generalmente tienen muy bajo costo. La utilización de materiales suplementarios tiene una gran importancia económica, ecológica, y tecnológica.

En este trabajo se realizó el estudio de unas cenizas de filtro originadas en la producción de aluminio secundario. De acuerdo a lo exigido por el Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón CIRSOC 201 se analizaron las características de las mismas y las propiedades que le confieren a morteros y hormigones al ser incluidas en ellos.

La composición de las cenizas (con una importante cantidad de metales pesados) indica que se trata de un residuo peligroso a efectos de la legislación argentina, y que contienen un elevado porcentaje de sales solubles. Al mezclar cenizas y aguas se genera una reacción exotérmica con gran aumento de volumen. Luego de hidratadas y secadas, las cenizas no vuelven a reaccionar (se "apagan"). Al incluir cenizas sin apagar en morteros se producen importantes aumentos de volumen, de la porosidad y disminución de las resistencias mecánicas (respecto a un mortero sin adición). Al incluir cenizas apagadas, no se producen aumentos de volumen ni porosidad, pero si se observaron disminuciones de resistencias, aunque más cercanas a las de los patrones. Al incorporarlas en hormigones, se observaron bajas en la resistencia a compresión y desmejoramiento de los parámetros de durabilidad (resistencia a la penetración de agua, absorción capilar y reacción álcali – agregado).

De acuerdo a estos resultados, no se aconseja utilizar estas cenizas de filtro en forma directa o natural (tal como se obtienen del proceso industrial) en hormigones estructurales. Para incorporarlas, es importante pretratarlas para disminuir su reactividad (apagarlas), como así también tratar de extraer las sales solubles que contienen. Se aconseja estudiar la factibilidad de aplicar este residuo en la fabricación de hormigones no estructurales (de relleno), bloques y adoquines y la posibilidad de usar cenizas naturales para la fabricación de hormigones celulares, utilizándolas como agente espumígeno.

Éste y cada estudio de una posible aplicación de las cenizas deben complementarse con ensayos de lixiviación de acuerdo a la Ley de Residuos Peligrosos N° 24051, a fin de analizar la viabilidad ambiental del caso. Estudios anteriores sobre la inclusión de residuos con metales pesados en hormigones indican que este material tiene una alta eficiencia de retención de metales pesados en ensayos de lixiviación.

3. ÍNDICE.

3.1. ÍNDICE GENERAL

1. AGRADECIMIENTOS.....	1
2. RESUMEN.....	2
3. ÍNDICE.....	3
3.1. Índice general.....	3
3.2. Índice de tablas.....	6
3.3. Índice de figuras.....	8
4. INTRODUCCIÓN.....	10
4.1. Marco institucional. Origen del trabajo.....	10
4.2. Objetivos.....	10
4.2.1. Objetivos generales.....	10
4.2.2. Objetivos particulares.....	10
4.3. Tareas desarrolladas.....	11
5. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES.....	12
5.1. Origen de las cenizas.....	12
5.1.1. La empresa.....	12
5.1.2. El aluminio.....	12
5.1.3. Producción de aluminio secundario. Generación de cenizas de filtro.....	14
5.1.4. Información aportada por el cliente.....	15
5.2. Justificación del estudio.....	16
5.3. Investigación bibliográfica: antecedentes de estudios similares.....	17
5.3.1. Adiciones minerales en hormigones.....	17
5.3.2. Uso de residuos en cementos y hormigones.....	21
6. MARCO NORMATIVO. REGLAMENTO CIRSOC 201-2005.....	24
6.1. Adiciones permitidas.....	24
6.2. Requisitos de durabilidad.....	24
6.3. Requisitos de resistencia.....	24
6.4. Utilización de las cenizas en hormigones livianos.....	25
6.5. Utilización de las cenizas como áridos.....	25
6.6. Material pulverulento.....	25
7. CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS.....	26
7.1. Inspección visual.....	26
7.2. Muestreo.....	26
7.2.1. Muestreo en planta de Metal Veneta.....	26
7.2.2. Muestreo en Laboratorio de Estructuras.....	27

7.3. Composición.....	28
7.3.1. “Determinación de metales pesados totales en residuos sólidos”.....	29
7.3.2. “Estudio de composición de cenizas”.....	29
7.4. Granulometría.....	30
7.4.1. Procedimiento.....	30
7.4.2. Instrumental.....	30
7.4.3. Resultados.....	30
7.5. Contenido de sales solubles.....	31
7.5.1. Procedimiento.....	31
7.5.2. Instrumental.....	33
7.5.3. Resultados.....	33
7.6. Mezcla de cenizas con agua.....	33
7.6.1. Procedimiento.....	33
7.6.2. Instrumental.....	34
7.6.3. Resultados.....	34
7.6.4. Rehidratación de cenizas.....	35
7.7. Análisis de resultados.....	35
7.7.1. Composición.....	35
7.7.2. Granulometría.....	38
7.7.3. Contenido de sales solubles.....	38
7.7.4. Mezcla de cenizas con agua.....	38
8. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS. USO DE LAS CENIZAS EN MORTEROS.....	40
8.1.1. Materiales y procedimiento.....	40
8.1.2. Materiales.....	40
8.1.3. Procedimiento.....	40
8.2. Dosificaciones.....	41
8.3. Densidades y absorciones.....	43
8.3.1. Instrumental.....	43
8.3.2. Procedimiento.....	43
8.3.3. Resultados.....	43
8.4. Resistencias mecánicas.....	45
8.4.1. Instrumental.....	45
8.4.2. Procedimiento.....	45
8.4.3. Resultados.....	46
8.5. Análisis de resultados y selección de alternativas.....	47
8.5.1. Aumento de volumen, densidades y absorciones.....	47
8.5.2. Resistencias mecánicas.....	51
8.5.3. Selección de alternativas.....	56
9. HORMIGONES DEFINITIVOS.....	57

9.1. Materiales y procedimiento.....	57
9.1.1. Materiales.....	57
9.1.2. Procedimiento.....	59
9.2. Dosificaciones.....	60
9.3. Propiedades en estado fresco.....	60
9.3.1. Procedimiento.....	60
9.3.2. Instrumental.....	61
9.3.3. Resultados.....	61
9.4. Resistencia a compresión.....	62
9.4.1. Procedimiento.....	62
9.4.2. Instrumental.....	63
9.4.3. Resultados.....	63
9.5. Ensayos de durabilidad.....	63
9.5.1. Absorción capilar.....	64
9.5.2. Penetración de agua.....	66
9.5.3. Reacción álcali – agregado.....	69
9.6. Análisis de resultados.....	72
9.6.1. Propiedades en estado fresco.....	72
9.6.2. Resistencia a compresión.....	73
9.6.3. Ensayos de durabilidad.....	75
10. CONSIDERACIONES AMBIENTALES.....	77
10.1. Definición de residuo peligroso.....	77
10.2. Tratamientos posibles.....	78
10.3. Ensayos y estudios a realizar.....	79
11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	80
11.1. Conclusiones.....	80
11.1.1. Respecto a las características de las cenizas.....	80
11.1.2. Respecto al uso de las cenizas en morteros.....	80
11.1.3. Respecto al uso de cenizas apagadas en hormigones.....	81
11.1.4. Respecto a las consideraciones ambientales.....	82
11.2. Recomendaciones y estudios futuros.....	82
12. BIBLIOGRAFÍA.....	83

3.2. ÍNDICE DE TABLAS.

<i>Tabla 5.1: Comparación de los procesos primario y secundario en la producción de aluminio.</i>	13
<i>Tabla 5.2: Tipos de residuos generados en la producción secundaria de aluminio.</i>	15
<i>Tabla 7.1: Determinación de metales pesados totales en residuos sólidos.</i>	29
<i>Tabla 7.2: Estudio de composición de cenizas.</i>	29
<i>Tabla 7.3: Granulometría de las cenizas.</i>	31
<i>Tabla 7.4: Contenido de sales solubles de las cenizas.</i>	33
<i>Tabla 7.5: Temperatura en mezcla de cenizas y agua.</i>	34
<i>Tabla 7.6: Comparación de composición de cenizas en estado natural.</i>	35
<i>Tabla 7.7: Comparación de composición de cenizas en estado natural y apagado.</i>	37
<i>Tabla 8.1: Dosificación de morteros.</i>	42
<i>Tabla 8.2: Aspecto de las probetas prismáticas de los distintos pastones.</i>	43
<i>Tabla 8.3: Densidad y absorción de las probetas prismáticas de los distintos pastones.</i>	44
<i>Tabla 8.4: Resistencias de las probetas prismáticas de los distintos pastones.</i>	46
<i>Tabla 8.5: Volumen, densidad y absorción de morteros con igual cantidad de ceniza natural.</i>	48
<i>Tabla 8.6: Volumen, densidad y absorción de morteros con ceniza apagada.</i>	49
<i>Tabla 8.7: Comparación de morteros con cenizas naturales y apagadas en reemplazo de cemento, con agua agregada.</i>	50
<i>Tabla 8.8: Comparación de morteros con cenizas naturales y apagadas en reemplazo de cemento, sin agua agregada, con aditivo fluidificante.</i>	50
<i>Tabla 8.9: Comparación de morteros con cenizas naturales y apagadas en reemplazo de arena, sin agua agregada, con aditivo fluidificante.</i>	51
<i>Tabla 8.10: Comparación de morteros con cenizas naturales y apagadas en reemplazo de cemento, con reducción de agua, con aditivo fluidificante.</i>	51

<i>Tabla 8.11: Comparación de morteros con distintos porcentajes de ceniza natural.</i>	52
<i>Tabla 8.12: Comparación de morteros con igual porcentaje de ceniza natural.</i>	52
<i>Tabla 8.13: Resistencias teóricas de morteros con cenizas apagadas.</i>	53
<i>Tabla 8.14: Resistencias de morteros con cenizas en reemplazo de cemento, sin agua agregada, con aditivo fluidificante.</i>	54
<i>Tabla 8.15: Resistencias de morteros con cenizas en reemplazo de cemento, si agua agregada, con aditivo fluidificante.</i>	55
<i>Tabla 8.16: Resistencias de morteros con cenizas en reemplazo de arena.</i>	55
<i>Tabla 8.17: Resistencias de morteros con cenizas en reemplazo de cemento, con reducción de agua, con aditivo fluidificante.</i>	55
<i>Tabla 9.1: Características del árido grueso.</i>	57
<i>Tabla 9.2: Características del árido fino.</i>	58
<i>Tabla 9.3: Dosificaciones de los hormigones definitivos.</i>	60
<i>Tabla 9.4: Propiedades en estado fresco de los hormigones definitivos.</i>	62
<i>Tabla 9.5: Resistencia a compresión de hormigones definitivos.</i>	63
<i>Tabla 9.6: Capacidad de succión capilar de hormigones definitivos.</i>	66
<i>Tabla 9.7: Velocidad de succión capilar de hormigones definitivos.</i>	66
<i>Tabla 9.8: Penetración de agua en hormigones definitivos.</i>	68
<i>Tabla 9.9: Dosificación de morteros para ensayo de RAS.</i>	69
<i>Tabla 9.10: Reacción álcali – agregado.</i>	71
<i>Tabla 9.11: Resistencia a compresión de hormigones definitivos.</i>	73
<i>Tabla 9.12: Coeficientes de resistencia a distintas edades para hormigones definitivos.</i>	74

3.3. ÍNDICE DE FIGURAS.

<i>Figura 5.1: Esquema del proceso de segunda fusión del aluminio.....</i>	14
<i>Figura 7.1: Aspecto visual de las cenizas de filtro.....</i>	26
<i>Figura 7.2: Bolsas que componen la Muestra B.....</i>	27
<i>Figura 7.3: Mezcla y cuarteo de Muestra B.....</i>	27
<i>Figura 7.4: Apagado de cenizas con agua destilada.....</i>	28
<i>Figura 7.5: Cenizas apagadas, Muestra B.2.</i>	28
<i>Figura 7.6: Granulometría de las cenizas.....</i>	31
<i>Figura 7.7 Ensayo de sales solubles sobre cenizas en estado natural.....</i>	32
<i>Figura 7.8: Sales solubles de cenizas en estado natural.....</i>	32
<i>Figura 7.9: Formación y remoción de costra salina en la superficie de cenizas apagadas con agua destilada.</i>	32
<i>Figura 7.10: Ensayo de sales solubles sobre cenizas apagadas, sin costra.</i>	33
<i>Figura 7.11: Sales solubles de cenizas apagadas, sin costra.</i>	33
<i>Figura 7.12: Variación de la temperatura de la mezcla cenizas-agua en el tiempo.</i>	34
<i>Figura 7.13: Mezcla de cenizas con agua, apenas finalizado el mezclado.....</i>	34
<i>Figura 7.14: Aspecto de las cenizas al reaccionar con agua.....</i>	34
<i>Figura 8.1: Preparación de moldes y pesado de materiales.....</i>	40
<i>Figura 8.2: Llenado de probetas prismáticas</i>	41
<i>Figura 8.3: Dispositivo de ensayo de flexión en probetas prismáticas.....</i>	45
<i>Figura 8.4: Dispositivo de ensayo de compresión en probetas prismáticas.....</i>	46
<i>Figura 8.5: Densidad, absorción y aumento de volumen en probetas en función del contenido de cenizas naturales.</i>	47
<i>Figura 8.6: Densidad, absorción y aumento de volumen en probetas en función del contenido de agua, para probetas con cenizas naturales.....</i>	48
<i>Figura 8.7: Densidad, absorción y aumento de volumen en probetas en función del contenido de agua, para probetas con cenizas apagadas.....</i>	49
<i>Figura 8.8: Resistencia a compresión y a flexión en probetas en función del contenido de cenizas naturales.....</i>	52
<i>Figura 8.9: Resistencia de morteros con ceniza natural en función de la relación a/c.....</i>	53

<i>Figura 8.10: Resistencia respecto a la teórica, en función de la relación a/c, para morteros con cenizas apagadas.</i>	54
<i>Figura 9.1: Curva granulométrica del árido grueso.</i>	58
<i>Figura 9.2: Curva granulométrica del árido fino.</i>	58
<i>Figura 9.3: Pesado de materiales.</i>	59
<i>Figura 9.4: Probetas del Pastón A.</i>	59
<i>Figura 9.5: Probetas en piletas de curado.</i>	60
<i>Figura 9.6: Medición de asentamiento mediante cono de Abrams.</i>	61
<i>Figura 9.7: Determinación de la densidad en estado fresco.</i>	61
<i>Figura 9.8: Medición del contenido de aire.</i>	61
<i>Figura 9.9: Probeta encabezada y colocada en la prensa.</i>	62
<i>Figura 9.10: Rotura de probeta por compresión simple.</i>	62
<i>Figura 9.11: Discos de hormigón preparados para el ensayo de succión capilar.</i>	64
<i>Figura 9.12 Dispositivo de ensayo de succión capilar.</i>	65
<i>Figura 9.13: Capacidad de succión capilar de hormigones definitivos.</i>	65
<i>Figura 9.14: Velocidad de succión capilar de hormigones definitivos.</i>	66
<i>Figura 9.15: Probetas de hormigón preparados para el ensayo de penetración de agua.</i>	67
<i>Figura 9.16: Dispositivo de ensayo de penetración de agua.</i>	67
<i>Figura 9.17: Moldeo de probetas para ensayo de RAS.</i>	70
<i>Figura 9.18: Ensayo de RAS.</i>	70
<i>Figura 9.19: Reacción álcali – agregado.</i>	71
<i>Figura 9.20: Reacción álcali – agregado. Pastón patrón.</i>	71
<i>Figura 9.21: Reacción álcali – agregado. Pastón A.</i>	72
<i>Figura 9.22: Reacción álcali – agregado. Pastón B.</i>	72
<i>Figura 9.20: Resistencia a compresión de hormigones definitivos.</i>	74

4. INTRODUCCIÓN.

4.1. MARCO INSTITUCIONAL. ORIGEN DEL TRABAJO.

La Práctica Supervisada (PS) es un requisito para poder acceder al título de Ingeniero Civil en la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. El objetivo fundamental de esta asignatura es que el alumno tome contacto con el medio laboral antes de recibirse; es por ello que debe cumplir un mínimo de 200 horas de trabajo fuera de la Facultad. La práctica supervisada puede desarrollarse en una empresa privada o pública, en una institución educativa o bien en forma independiente, siempre bajo la tutoría de un profesional.

En ese marco, el Laboratorio de Estructuras de la Universidad Nacional de Córdoba se ofrece permanentemente como entidad receptora para que los alumnos puedan desarrollar allí su práctica supervisada. El Laboratorio es una entidad dependiente del Centro de Vinculación del departamento de Estructuras de la mencionada Facultad, que presta servicios (ensayos, asesoramiento, investigación) tanto a empresas privadas como públicas y también a organismos de la Universidad.

Como entidad receptora, el Laboratorio aceptó al autor para que pueda desarrollar allí esta asignatura, asignándole el trabajo "Estudio de factibilidad de utilización de cenizas de filtro como adición en hormigones".

Esta tarea fue encargada al Laboratorio por la empresa Metal Veneta S.A., dedicada principalmente a la refinación de aluminio. Esta empresa, producto del proceso industrial que desarrolla, genera una ceniza volante que es atrapada por filtros de gases; esta ceniza, por su composición, se constituye en un residuo peligroso al cual resulta difícil proveerle una disposición final segura. Por este motivo, contrataron a esta entidad para que estudie la posibilidad de incluirla en hormigones, como habitualmente se realiza con otros tipos de residuos, dando origen así a este trabajo.

4.2. OBJETIVOS.

De las anteriores consideraciones surgen los objetivos de esta Práctica Supervisada:

4.2.1. Objetivos generales.

- Tomar contacto con el medio laboral, aplicando y profundizando los conocimientos estudiados durante toda la carrera.
- Interactuar con profesionales afines a las áreas de la Tecnología del Hormigón y la Ingeniería Ambiental.
- Proveer al cliente una respuesta frente a su solicitud.

4.2.2. Objetivos particulares.

- Estudiar las características y el comportamiento de las cenizas de filtro.
- Analizar los efectos que surgen de incluir las cenizas en morteros y hormigones.
- Realizar una introducción al aspecto ambiental del uso de las cenizas, sentando las bases para estudios posteriores.
- Trabajar en base al Reglamento CIRSOC 201-2005, normas IRAM y la Ley Nacional 24051.

4.3. TAREAS DESARROLLADAS.

La factibilidad de la utilización de estas cenizas debe abarcarse desde dos perspectivas diferentes. Por un lado, desde el punto de vista de la tecnología del hormigón, se debe caracterizar a las cenizas, describir su comportamiento e intentar determinar los efectos que producen al ser incorporadas en hormigones. Por otro, desde un enfoque ambiental, es necesario estudiar la capacidad del hormigón de retener en su matriz a los constituyentes peligrosos que aportan las cenizas.

Como se verá en los capítulos siguientes, se trabajó principalmente en el área de la tecnología del hormigón, desarrollando las siguientes tareas:

1) Recopilación bibliográfica: Estudio del proceso que da origen a las cenizas, antecedentes de estudios similares y marcos normativo y legal.

2) Caracterización de las cenizas: estudio de la composición química, granulometría, contenido de sales solubles y de su comportamiento al mezclarlas con agua.

3) Comportamiento de morteros adicionados con cenizas: ensayos de resistencia a compresión y flexión y de densidad, absorción y variación de volumen en probetas prismáticas.

4) Comportamiento de hormigones con cenizas incorporadas: ensayos en hormigón fresco (asentamiento, densidad y contenido de aire) y en estado endurecido (resistencia a la compresión y durabilidad).

5) Análisis de resultados y conclusiones.

6) Introducción al aspecto ambiental de la utilización de las cenizas: análisis de la legislación vigente y determinación de estudios a realizar.

Respecto al enfoque ambiental, no se desarrolló en detalle esta área de estudio por limitaciones técnicas y económicas que impiden llevar a cabo estos estudios dentro del laboratorio en la actualidad.

En este informe se presentarán el marco referencial teórico de la práctica profesional, los resultados de su aplicación y las conclusiones personales.

5. MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES.

5.1. ORIGEN DE LAS CENIZAS.

5.1.1. La empresa.

Metal Vaneta S.A. es una empresa que se dedica a la producción de aleaciones de aluminio para la fabricación de piezas fundidas por inyección, gravedad y bajo presión. Abastece de aleaciones primarias y secundarias al sector automotriz, autopartista y de electrodomésticos, entre otros.

La firma fue fundada en 1969 y está ubicada en Ferreyra, en la zona de Gran Córdoba. Su planta es de 7000 m² cubiertos (sobre un predio de 32000 m²), disponiendo de una capacidad instalada que le permite una producción de 30000 Tn por año de aleaciones para abastecer tanto al mercado interno como al externo bajo estricto cumplimiento de las normas de calidad. La actividad principal de la empresa es la refinera de aluminio, esto es, la fabricación de aleaciones de aluminio secundarias.

Las aleaciones secundarias se producen a partir de chatarra de aluminio (en reemplazo de aluminio puro o primario), lo cual trae aparejado beneficios económicos y ecológicos. Por un lado se reciclan desperdicios evitando que los mismos contaminen el ambiente y por otro se ahorra el 90% de la energía necesaria para producir igual cantidad de aluminio puro, logrando además proveer a las fundiciones industriales locales de su principal insumo a un costo inferior a lo que resultaría una aleación primaria, y competitivo a nivel internacional.

La planta cuenta con la tecnología necesaria para reciclar todo tipo de rezagos. Todas las emisiones producidas por los hornos son tratadas en una planta de filtros que cumple con las exigencias de control de polución vigentes en nuestro país. Metal Veneta S.A. es una de las empresas que busca caminos de crecimiento en armonía con el medio ambiente en el marco del Plan de Acción de Johannesburgo (2002) ya que reutiliza y recicla materiales. Actualmente está en un proceso de inversiones en producción limpia y eficiencia tecnológica, a través de la incorporación de nuevas tecnologías de fundición.

Los productos que ofrece esta empresa son:

- Aleaciones de aluminio en lingotes: para la fabricación de piezas fundidas por inyección, gravedad y baja presión.
- Aleación de aluminio en estado líquido: para la elaboración de piezas fundidas por inyección.
- Aluminio en medias esferas: utilizado por las acerías como desoxidantes.

5.1.2. El aluminio.

El aluminio (Al) es el tercer elemento químico más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno (O) y el silicio (Si), constituyendo aproximadamente el 8% de la masa de ésta. Es un metal no ferromagnético, de número atómico 13, que se encuentra presente en la mayoría de las rocas, la vegetación y los animales. En su forma natural, sólo existe en una combinación estable con otros materiales (particularmente sales y óxidos) y su existencia fue descubierta en 1808.

Actualmente, la producción de aluminio supera en cantidad a la suma de los restantes metales no ferrosos, como cobre, plomo y estaño. Es el segundo metal más utilizado después del acero, siendo empleado tanto solo como formando aleaciones. Las propiedades más destacables del aluminio que han favorecido su consumo en

diversos sectores son: superficie metálica clara y fácilmente coloreable, baja densidad ($2,70 \text{ g/cm}^3$), ligero y maleable, bajo punto de fusión ($660 \text{ }^\circ\text{C}$), resistente a la corrosión, no magnético y no combustible, impermeable al agua y a los olores, gran poder reductor, fácilmente aleable con otros metales (Mg, Si, Cu, Zn y Mn) y fácilmente reciclable. Las aplicaciones del aluminio incluyen:

- Construcción: cerramientos y estructuras livianas.
- Automotriz: carcasas, varias partes, accesorios y componentes del motor.
- Aeroespacial: compone alrededor del 80% del peso de una aeronave descargada, también se usa como combustible (aluminio en fino polvo).
 - Ferroviaria y marítima: vagones de tren y cascos, partes y accesorios de barcos (reducción considerable del peso total en comparación con el uso del acero).
- Envases: protección, almacenamiento y preparación de alimentos y bebidas.
- Eléctrica: cables de alta tensión.
- Tratamiento de aguas y medicina.

Aluminio primario.

El aluminio primario es el metal de aluminio obtenido a partir de alúmina. La denominación “primario” indica que es producido a partir de materiales no reciclados.

Se extrae de la bauxita, un mineral que por lo general se encuentra en la superficie de la corteza terrestre. Primero es llevada a molienda y lavado para extraerle el barro y las impurezas. Tras esa primera refinación se obtiene la alúmina u óxido de aluminio, materia prima en polvo que se somete a un proceso (usando soda cáustica) para convertirla en alúmina líquida, y luego volver a cristalizar el material en forma controlada, llevando a cabo así el denominado proceso Bayer. Por último se realiza una electrólisis (horneado utilizando corriente eléctrica) para calentar agua a 900°C , separando el oxígeno y quedando en el fondo el aluminio metálico: en ello consiste la segunda refinación.

De cuatro toneladas de bauxita se obtienen dos toneladas de óxido de aluminio o alúmina y, de allí, una tonelada de aluminio. El refinamiento del aluminio requiere gran cantidad de energía y por ello la producción primaria de aluminio está localizada cerca de fuentes de energía baratas. Dados los actuales niveles de producción, las reservas de bauxita durarán por cientos de años. Más del 50% de la producción mundial de aluminio (excluyendo la producción rusa y china) se realiza utilizando energía hidroeléctrica renovable.

Aluminio secundario.

El aluminio secundario es el metal de aluminio que se obtiene a partir de material de desecho reciclado. Casi la totalidad de los productos de aluminio pueden, desde un punto de vista técnico (factibilidad) y económico (rentabilidad), ser reciclados repetidamente para producir nuevos productos, sin perder el metal su calidad y propiedades. La utilización de metales reciclados ahorra energía y preserva las fuentes de recursos naturales, como se presenta en la tabla siguiente.

Tabla 5.1: Comparación de los procesos primario y secundario en la producción de aluminio. Fuente: [13].

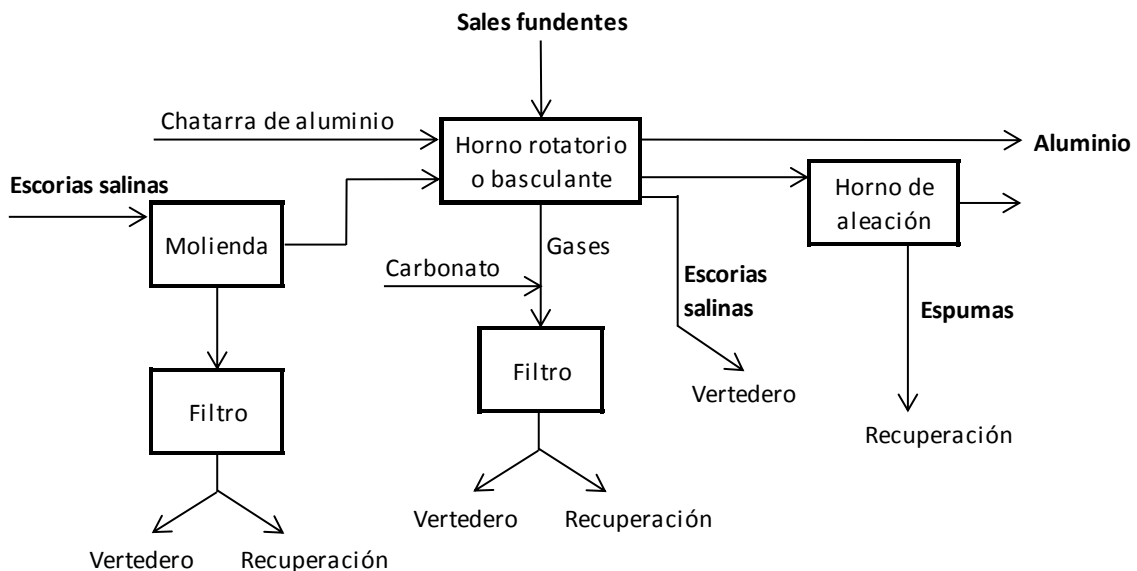
	Proceso primario	Proceso secundario
Consumo de energía primaria (GJ/Tn _{Al producido})	174	10
Emisiones a la atmósfera (kg/Tn _{Al producido})	204	12
Residuos sólidos (kg/Tn _{Al producido})	2100 - 3650	400
Consumo de agua (kg/Tn _{Al producido})	57	1,6

De cualquier modo, la producción de aluminio es responsable por aproximadamente el 3% del uso mundial de electricidad, siendo uno de los sectores económicos que más energía consumen en el mundo. La producción de aluminio a partir del reciclado de chatarra utiliza sólo entre el 5% y el 10% de la energía que se preciaría para obtener aluminio a partir de bauxita, sumado al hecho de que al reducir la necesidad de extraer este mineral se contribuye a evitar los residuos mineros tóxicos. Actualmente, un tercio del aluminio total consumido en el mundo corresponde a producción secundaria. A pesar de esto y de la gran importancia del aluminio por sus aplicaciones, el proceso de obtención produce un importante impacto ambiental. Los residuos y contaminantes generados deben ser minimizados y tratados.

5.1.3. Producción de aluminio secundario. Generación de cenizas de filtro.

El esquema siguiente representa el proceso de producción de aluminio secundario, el cual es desarrollado por Metal Veneta S.A. y da origen a las cenizas de filtro estudiadas.

Figura 5.1: Esquema del proceso de segunda fusión del aluminio. Fuente: [8].



El aluminio destinado al reciclaje se puede dividir en dos categorías: subproductos de la transformación del aluminio y chatarras de piezas usadas. Los subproductos tienen su origen en el proceso de fabricación de materiales de aluminio (virutas, recortes, piezas moldeadas, etc.), se conoce tanto su calidad como composición y pueden fundirse sin necesidad de realizar tratamientos previos. La chatarra es material de aluminio procedente de piezas ya producidas, usadas y desechados al final de su ciclo de vida (cables, cacharros, radiadores, etc.). Éstos van a los recicladores tras varios procesos de separación, dado que suele encontrarse unido a otros materiales, siendo necesarios su tratamiento y separación previa.

La principal característica de la producción de aluminio secundario es la diversidad de materias primas y la variedad de hornos que se pueden utilizar. El tipo de materia prima y su pretratamiento determinan la elección del tipo de horno, siendo el más utilizado el rotatorio, por ser el que mayor diversidad de materiales permite reciclar. En él la materia prima de aluminio se funde bajo una capa de sal (fundente), consistente de modo general en una mezcla de aproximadamente 30% de cloruro de potasio (KCl) y 70% de cloruro de sodio (NaCl). Sus funciones son:

- a) Permiten la transferencia de calor al metal y contribuyen a aislarlo de la atmósfera.
- b) Dispersan mecánicamente los óxidos y sustancias metálicas o no metálicas sólidas presentes en el horno.
- c) Algunos fundentes pueden reaccionar químicamente con los óxidos de aluminio, disolviéndolos.

La elección del tipo y cantidad de fundente usado depende del tipo de materia prima, del horno y de las características (impurezas) de la materia prima. Primero se funde la sal en el horno rotatorio y después se introduce la materia prima en el baño de sal. Una vez fundido, se extrae el metal y las escorias o mezcla de sustancias metálicas y no metálicas. La naturaleza y el enfriamiento que sufre en la extracción determinan su apariencia más inmediata (bloques, grandes trozos o polvo).

Durante el proceso de fundición a alta temperatura el aluminio puede reaccionar con diferentes gases dando origen a diferentes compuestos metálicos. Estos compuestos, en contacto con el agua, pueden a su vez generar emisiones gaseosas. En la segunda fusión del aluminio se pueden generar varios tipos de residuos, como se indica en la tabla siguiente.

Tabla 5.2: Tipos de residuos generados en la producción secundaria de aluminio.
Fuente: [13].

Residuo	Origen
Polvos filtro de molienda	Pretratamiento de escorias de aluminio
Polvos filtro de gases de horno	Horno de fundición
Espumas	Hornos que no utilizan sal
Escorias salinas	Fundición en horno rotatorio

Las cenizas que dan origen a este trabajo corresponden a las generadas en los gases de horno.

5.1.4. Información aportada por el cliente.

Los primeros datos relacionados con las características y el comportamiento de las cenizas provinieron de la experiencia del cliente y de estudios anteriores que la empresa había realizado. De allí surgió la siguiente información:

- El proceso productivo genera una cantidad aproximada de 100 tn anuales de este tipo de cenizas.
- Periódicamente se realizan estudios de la composición de las cenizas; éstos indican la presencia habitual de metales pesados, en concentraciones importantes, y restos de las sales que se utilizan como fundentes. Las cantidades de los componentes varían significativamente entre muestras de distintos períodos.
- Al mezclar la ceniza con agua se genera una reacción exotérmica (alcanzando temperaturas alrededor de 60°C), y aumento de volumen (formación de espuma).
- Con la mezcla de cenizas y agua, más la adición de cemento y áridos se pudo fabricar adoquines (en forma “casera”).

Esta información constituyó el punto de partida para realizar una investigación bibliográfica específica y definir el plan de trabajos que se realizaría.

5.2. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.

El hormigón es un componente vital de la industria de la construcción y ha llegado a convertirse en un material que, después del agua, es el de mayor consumo a nivel mundial (Fuente: [24]). Un hormigón normal se compone aproximadamente de 12% de cemento y 80% de agregados (en masa).

La industria del cemento tiene un alto impacto medioambiental, siendo responsable aproximadamente del 5% de la emisión de dióxido de carbono de todo el planeta. Además es el material de construcción cuya producción consume la mayor cantidad de energía (4GJ/Tn) (Fuente: [16]). Teniendo en cuenta que la producción de cemento en Argentina durante el año 2013 fue de casi 11900000 toneladas (Fuente: [2]), se puede visualizar el importante gasto energético que esta industria significa. Además, la principal materia prima para la fabricación del cemento es la piedra caliza, un material natural, cuya obtención implica también un importante impacto en el ambiente por ser un recurso limitado y tratarse de una actividad extractiva.

La extracción de los áridos tiene también grandes consecuencias negativas, como una deforestación extensiva, pérdida de suelo superficial y la afectación negativa de la ecología en las áreas forestadas y lechos de los ríos, a la vez que consume cantidades considerables de energía. La industria del hormigón también emplea grandes cantidades de agua y emite, en promedio, 1/9 de la cantidad de gases de efecto invernadero correspondientes a la fabricación del cemento (Fuente: [1]).

Dado que el hormigón es un material casi inerte, es ideal para el reciclado de residuos y subproductos industriales. La escoria granulada de alto horno, el poliestireno reciclado, y las cenizas volantes se encuentran se pueden incluir en la mezcla sin crear ningún tipo de problemas. Otros residuos, como los neumáticos usados, pueden ser empleados como combustible en el horno de cemento.

Las adiciones minerales activas son materiales que pueden incorporarse al hormigón para sustituir una parte del cemento o del árido fino, a la vez que se modifican algunas propiedades en estado fresco y endurecido. Estos materiales en general tienen bajos costos, por ser residuos de algún proceso industrial, y en principio se incorporan simplemente como reciclaje de desechos, sin tener en cuenta los beneficios que pudieran aportar a las propiedades del hormigón, especialmente en relación con su resistencia en algunos medios agresivos.

La elaboración de un hormigón tradicional (utilizando solo cemento portland y áridos naturales) implica la generación de aproximadamente 520kg de CO₂ por m³ de hormigón, considerando la extracción y fabricación de materias primas y la confección propia del mismo. Ésta se reduce a aproximadamente 390kg cuando se elabora un hormigón sustentable, reemplazando una parte (50%) del cemento por diversas adiciones minerales y una fracción de áridos por agregados reciclados de procesos industriales (Fuente: [17]). Además, con la utilización de estas adiciones se logra el empleo de subproductos industriales y otros materiales que de otra manera serían dispuestos como residuos, la reducción de la explotación de canteras y la disminución del consumo de energía.

De lo anterior se desprende la importancia, tanto económica como ambiental, de utilizar materiales alternativos en la producción de cementos y hormigones. Aun así, es necesario resaltar que esta sustitución no es la única vía para el desarrollo de una construcción sustentable, donde también entran en juego factores como el diseño arquitectónico y estructural, la durabilidad, el reciclado de materiales y la eficiencia energética de la misma.

5.3. INVESTIGACIÓN BIBLIOGRÁFICA: ANTECEDENTES DE ESTUDIOS SIMILARES.

5.3.1. Adiciones minerales en hormigones.

El hormigón.

El hormigón es un material compuesto, que básicamente surge de la mezcla de dos componentes: agregados y pasta cementicia. Los agregados constituyen aproximadamente entre el 60% y el 80% del volumen total del hormigón, en tanto la matriz cementicia ocupa el resto.

Generalmente los agregados, también llamados áridos, se dividen en dos grupos: finos y gruesos. Los agregados finos pueden ser arena natural o artificial (de trituración). Los agregados gruesos tradicionales corresponden a cantos rodado, obtenidos en yacimiento, o piedras partidas que surgen de la explotación de canteras. Los áridos tienen composiciones mineralógicas muy variables; la principal condición que deben presentar es no reaccionar con el cemento. Dado que son el material que ocupa la mayor fracción de volumen del hormigón, su selección es de vital importancia: sus partículas deben tener resistencia mecánica adecuada y no deben contener materiales que puedan causar deterioro del hormigón.

La matriz o pasta cementicia se forma tradicionalmente por la mezcla de cemento portland y agua. Tiene la característica de presentar inicialmente una consistencia plástica (necesaria para colocar el hormigón en el molde o encofrado), y pasar luego a un estado endurecido, producto de la hidratación del cemento. También se considera como parte de la pasta a las burbujas de aire atrapado o de aire incluido intencionalmente. El cemento ocupa generalmente entre el 7% y el 15% del volumen absoluto del hormigón, y el agua ocupa entre el 14% y 21%.

El cemento portland es una mezcla de compuestos complejos, principalmente (más del 90% en peso del cemento) silicato tricálcico, silicato dicálcico aluminato tricálcico y ferroaluminato tetracálcico. Se encuentra dentro de los denominados cementos hidráulicos, caracterizados por fraguar y endurecer al reaccionar químicamente con agua. La reacción, llamada hidratación, da origen a nuevos compuestos; el producto más importante, por la proporción y por sus propiedades cementicias, es el silicato de calcio hidratado; el segundo producto es el hidróxido de calcio, un compuesto débil.

La calidad del hormigón depende de la calidad de la matriz cementicia, de la calidad de los agregados y de la unión entre ambos. Las características y propiedades del hormigón quedarán definidas por los materiales componentes, especialmente por las proporciones relativas entre éstos. La principal relación que define el comportamiento del hormigón es la razón agua / cemento (a/c) o, en algunos casos, la razón agua / materiales cementantes (a/mc).

En estado fresco el hormigón debe tener cohesión y trabajabilidad (debe poder colocarse y compactarse sin que se produzca segregación que reduzca la homogeneidad del material), y en estado endurecido se requiere que tenga resistencia a compresión (que tiene importancia por sí misma y por determinar otras propiedades deseables del hormigón).

Además de estos componentes básicos, el hormigón también puede contener aditivos químicos y/o adiciones minerales pulverulentas. Estos materiales se utilizan para mejorar alguna propiedad del hormigón, ya sea en estado fresco o endurecido, y también pueden actuar sobre la durabilidad.

Adiciones minerales.

En el libro *Ese material llamado hormigón*, editado por la Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón (AATH), se hace referencia a *adiciones minerales activas* como “*materiales (en general de bajo costo), algunos de los cuales son desechos industriales que pueden incorporarse al hormigón como reemplazo del cemento o del agregado fino, dando lugar a la modificación de las propiedades de los mismos*”.

Otra publicación de la AATH, el libro *Durabilidad del hormigón estructural*, también contiene conceptos referidos a *adiciones minerales*. En el mismo se expresa: “*Las adiciones minerales, también llamadas materiales suplementarios, incluyen la escoria granulada de alto horno, las puzolanas naturales, la ceniza volante, el humo de sílice, el filler calcáreo, el metacaolín, y otros subproductos o sustancias finamente divididas. Las adiciones minerales se pueden introducir directamente en el hormigón o pueden molerse en forma conjunta con el Clinker portland para dar lugar a los cementos mezcla. Actualmente también se realiza la combinación de adiciones en plantas de mezclado para lograr cementos a medida. (...) Las adiciones minerales presentan amplias variaciones en sus características químicas y físicas*”.

Por su parte, la Portland Cement Association (PCA), en el boletín *Diseño y Control de Mezclas de Hormigón*, indica que el término *adición*, en Latinoamérica, hace referencia a cualquier material cementante suplementario. En este mismo boletín, el concepto de *material cementante suplementario* incluye a “*material cementante que no sea el cemento portland o el cemento mezclado*”. Finalmente, allí se define a *material cementante* como “*cualquier material que presente propiedades cementantes o que contribuya para la formación de compuestos hidratados de silicato de calcio. En el proporcionamiento del concreto se consideran como materiales cementantes: cemento portland, cemento hidráulico mezclado, ceniza volante, escoria granulada de alto horno molida, humo de sílice, arcilla calcinada, metacaolinita, esquistos calcinados y ceniza de cáscara de arroz*”.

Por último, el *Reglamento CIRSOC 201: Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón*, en el *Capítulo 3: Materiales*, apartado 3.5: *Adiciones minerales pulverulentas*, presenta los siguientes artículos que definen los requisitos generales a los cuales se deben adecuar este tipo de materiales:

3.5.1.1. *Las adiciones normalizadas deben cumplir las especificaciones incluidas en la:*

Norma IRAM 1593: Material calcáreo para cemento portland con filler calcáreo.

Norma IRAM 1667: Escorias granuladas de alto horno, para cemento.

Norma IRAM 1668: Puzolanas, características y muestreo.

3.5.1.2. *Se pueden incorporar otras adiciones como cenizas volantes, microsílíce, polvo de piedra, pigmentos, etc. En todos los casos se debe demostrar mediante ensayos de laboratorio que el empleo de la adición beneficia las características deseadas del hormigón. También se debe demostrar que la adición a incorporar no produce reacciones desfavorables, no altera la protección de las armaduras y no afecta la estabilidad volumétrica del hormigón endurecido.*

Este Reglamento define al *material pulverulento* como “*la suma, en masa, de las partículas del cemento, las adiciones minerales pulverulentas, ya sean activas o no, y la fracción de los agregados que pasan por el tamiz IRAM 300 μ m (N° 50)*”.

En resumen, se puede decir que por adiciones minerales se entiende todo aquel material fino que puede incorporarse al hormigón, ya sea en reemplazo del cemento portland o del agregado fino, y que presenta propiedades benéficas para el

mismo. Las propiedades que pueden mejorar en el hormigón son diversas y dependen de las características físicas y químicas de cada adición en particular. Estas adiciones son de orígenes muy variados, tanto naturales como artificiales, e incluso residuos. La utilización de materiales suplementarios tiene una gran importancia económica, ecológica y tecnológica, aspectos que ya fueron discutidos anteriormente.

Al incorporar adiciones minerales a un hormigón, se producirán modificaciones en el comportamiento físico y químico del mismo, afectando al comportamiento tanto en estado fresco como endurecido. En estado fresco alteradas la trabajabilidad (mejora), la exudación (reducción), el tiempo de fragüe (retardo, en algunos casos) y el calor de hidratación (reducción). En estado endurecido, en general producen una disminución de las resistencias a temprana edad y un aumento de las resistencias a edades avanzadas. Respecto a la durabilidad, los materiales puzolánicos, al refinar el tamaño del poro y el tamaño del grano, proveen al hormigón de una matriz más densa e impermeable, por lo que impiden el ingreso de agentes agresivos.

Existen variadas formas de clasificar a las adiciones minerales, siendo las más habituales:

- Por su forma de producción: en naturales o artificiales.
- Por su origen: en orgánicas o inorgánicas.
- Por su procesamiento: en sin tratar o tratadas térmicamente.
- Por su interacción con el cemento portland: según el tipo de actividad.
- Por su carácter: en silícicas, silícico - alumínicas, alumínico - silícicas o alumínicas.

A continuación se presenta una clasificación (*Fuente: [5]*) según la interacción de la adición con el cemento portland, y se describen brevemente las adiciones más utilizadas en la actualidad, junto con las propiedades que le confieren al hormigón.

Adiciones minerales físicamente activas.

Todas las adiciones minerales activas son materiales sólidos, con un tamaño de partícula en general menor a $75\mu\text{m}$; por lo tanto el primer efecto que producen es el de dispersión de los granos de cementos. Esto contribuye a la accesibilidad del agua hacia los granos de cemento, mejorando sus condiciones de hidratación; además, sirven de sitios de nucleación de los productos de hidratación del cemento portland, especialmente del hidróxido de calcio liberado durante las reacciones de hidratación del cemento. Este efecto lo ejercen todas las adiciones, en mayor o menor medida, por más inertes que se consideren (por inertes se entiende a materiales que no reaccionan químicamente con el medio).

Adiciones minerales físico –químicamente activas.

Estas adiciones, además del efecto físico anterior, originan reacciones químicas cuyos productos de reacción por si solos no aportan propiedades hidráulicas a las mezclas. Dentro de este grupo se encuentra:

Caliza molida o filler calcáreo.

Los fillers son materiales inorgánicos, naturales o artificiales, especialmente seleccionados que proceden de rocas silíceas, calcáreas o sílico – calcáreas. Se trata de una adición mineral activa no hidráulica porque no presenta actividad puzolánica, pero reacciona con la fase aluminato del cemento dando lugar a la formación de carboaluminatos de calcio hidratados. Los efectos del filler son principalmente de naturaleza física y se pueden agrupar en la mejora del empaquetamiento de granos, la aceleración de la hidratación y el efecto de dilución por sustitución. También se usa como reemplazo parcial de la arena en las mezclas de hormigón para obtener una

mayor densidad de empaquetamiento granular o para mejorar la cohesión de las mezclas de hormigón autonivelante.

Adiciones minerales físico – químicamente activas (hidráulicas / puzolánicas).

Las adiciones hidráulicas son aquellas cuyos productos tienen propiedades hidráulicas y constituyen las denominadas puzolanas. Tienen la capacidad de reaccionar con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento y producir silicato de calcio hidratado de características similares al originado en la hidratación del cemento portland. Las adiciones hidráulicamente activas están constituidas principalmente por silicatos y aluminatos; la reactividad de las adiciones está íntimamente relacionada con la condición vítrea de su estructura y con su superficie de reacción (finura). A este grupo pertenecen:

Puzolanas naturales.

Las puzolanas naturales son rocas de origen volcánico, como tobas y cenizas volcánicas, o de origen sedimentario y naturaleza orgánica, como las diatomitas y radiolaritas. Están constituidas por minerales de composición sílico – aluminosa, estructura vítrea o pobremente cristalina y textura de grano fino.

Los materiales activados térmicamente, que se calcinan a altas temperaturas en hornos y luego se muelen hasta transformarlo en polvo fino, son las puzolanas naturales más empleadas en la actualidad. Incluyen arcillas calcinadas, esquisto calcinado y metacaolinita. Se utilizan para controlar el aumento de la temperatura en el hormigón masivo, actuar como material cementante, mejorar la resistencia a los sulfatos y controlar la reacción álcali – agregado.

Cenizas volantes.

Las cenizas volantes son un subproducto (residuo) de la combustión del carbón pulverizado en las plantas generadoras de electricidad. En las usinas de carbón, bajo la combustión en el horno, la mayor parte de la materia volátil y el carbono del carbón se quema; las impurezas minerales del carbón (arcilla, feldespato, cuarzo, esquisto) se funden en suspensión y se transportan hacia afuera de la cámara por los gases de escape. En el proceso, el material fundido se enfría y se solidifica como pequeñas esferas vítreas denominadas cenizas volantes. Éstas se colectan a través de precipitadores electrostáticos o filtros de manga.

La ceniza volante es un polvo muy fino y suave al tacto; la mayoría de las partículas son esferas, y algunas son cenosferas huecas. La composición química varía según el carbón del que proceda y las características del proceso, pero en general prevalecen los óxidos de silicio, aluminio, hierro y calcio; en menor proporción se presentan óxidos alcalinos, de magnesio y sulfatos cálcicos. Las cenizas volantes, en general, reducen el calor de hidratación, mejoran la trabajabilidad y la durabilidad y aumentan la resistencia a largo plazo de los hormigones.

Humo de sílice o microsíllice.

Es un subproducto que resulta de la reducción a altas temperaturas de cuarzo de alta pureza con carbón en hornos eléctricos durante la producción de silicio y aleaciones ferrosilicias. Está compuesto principalmente por dióxido de silicio amorfo, extremadamente fino, con partículas de forma esférica, que cuando es liberado a la atmósfera constituye una fuente importante de contaminación. Entre los efectos sobre el hormigón, se utiliza para lograr altos grados de impermeabilidad y altas resistencias.

Cenizas de cáscara de arroz.

Son un subproducto de la industria arrocería que proviene de la quema de la cáscara del arroz. Mediante técnicas de combustión controlada se pueden obtener

cenizas muy reactivas, con alto contenido de sílice amorfa y estructura alveolar. El análisis químico indica alto contenido de sílice y escasa cantidad de óxidos de aluminio, hierro, calcio, magnesio y álcalis. La composición química de las cenizas depende, en parte, de la composición de la cáscara de la cual proviene.

Adiciones minerales físico – químicamente activas (hidráulicas / autopuzolánicas).

Son aquellas en las cuales parte del hidróxido de calcio para la reacción puzolánica lo aportan ellas mismas a partir del óxido de calcio libre que contienen. A este grupo pertenecen:

Escorias granuladas de alto horno.

Es un subproducto resultante de la separación de la ganga en el hierro durante el proceso de producción de arrabio en el alto horno. La composición depende de si se trata de una escoria ácida o una básica; las escorias ácidas tienen alto tenor de sílice y un contenido más reducido de óxido de calcio. Las escorias salen del horno a altas temperaturas (1400 a 1500 °C) y se enfrían rápidamente, lo que dificulta la cristalización y produce la formación de granos con estructuras vítreas. La actividad de las escorias, que es la causa de sus propiedades hidráulicas, depende de la medida en que se hayan logrado vitrificar por el enfriamiento brusco.

Cenizas volantes cálcicas.

Son cenizas volantes que presentan alto contenido de calcio (mayor al 10% de CaO, hasta el 30%) y contenido de carbón menor al 2%. Muchas de estas cenizas, cuando se hidratan, endurecen en menos de 45 minutos.

5.3.2. Uso de residuos en cementos y hormigones.

Debido a las razones expresadas anteriormente, en la actualidad existe una importante apertura hacia la evaluación de las características de una gran variedad de residuos. En lo siguiente se presentan diversos casos en los cuales se estudia la posible utilización de subproductos de procesos industriales u otros desperdicios como adiciones activas o material inerte dentro del hormigón. Los materiales presentados a continuación son distintos a los comúnmente aplicados (descritos en el apartado anterior), siendo más asimilables a las cenizas en estudio, por lo que resultan de especial interés los resultados obtenidos con ellos.

Cenizas volantes de residuos sólidos urbanos (RSU).

Estas cenizas surgen de incinerar los residuos sólidos urbanos (RSU), reteniéndose en filtros de mangas y tienen en su composición importantes cantidades de metales pesados, por lo que son residuos peligrosos. Estos subproductos retrasan considerablemente el fraguado al inhibir la hidratación del cemento y no poseen carácter puzolánico debido a que no tienen sílice reactiva. Los ácidos y las sales metálicas en el largo plazo destruyen el hormigón, por lo que se debe controlar su presencia. La única alternativa viable para su tratamiento, cada vez que no presentan lixiviación apreciable de metales, es la inclusión en matrices cementicias (solidificación/estabilización). Es posible y aconsejable realizar pretratamientos para la extracción y separación de sales solubles y metales pesados.

Mezclando las cenizas de RSU con cemento, cal, yeso, arena y agua se pueden fabricar hormigones celulares con cenizas de RSU, caracterizados por una razonable resistencia a la compresión (3 a 10 MPa), reducida densidad (400 a 800kg/m³) y elevada porosidad. Estas propiedades se consiguen mediante la reacción del aluminio con cal, desprendiendo hidrógeno que genera un gran volumen de huecos. Añadiendo cenizas volantes de incineración de RSU en detrimento de las cantidades de cemento y cal, se observa un efecto expansivo superior (Fuente: [25]).

Catalizador agotado

El trabajo *Valor agregado de un residuo contaminante al resolver un problema tecnológico* fue realizado por J.D. Sota y M. Barreda en la Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Plata. En el mismo se estudió un residuo contaminante (catalizador agotado del proceso de cracking catalítico) generado en la destilación de petróleo, disponiéndolo en hormigones de cemento portland. Respecto al comportamiento de este desecho, el cual contiene varios metales pesados, se extrajeron las siguientes conclusiones:

- *El catalizador agotado puede ser incorporado en el hormigón de cemento portland comportándose como una adición física.*
- *El residuo debe incorporarse al hormigón en estado saturado superficie seca para evitar la pérdida rápida de asentamiento de la mezcla.*
- *La adición del catalizador no disminuye la resistencia del hormigón.*
- *Desde el punto de vista ambiental las mezclas propuestas cumplen con los límites exigidos habitualmente, tanto para cationes como para los contenidos lixiviados de hidrocarburos totales.*
- *(...) el residuo inhibió el desarrollo de la RAS.*

Cenizas de residuos patogénicos.

Este trabajo, denominado *Estudios de lixiviación de larga duración sobre morteros que incorporan cenizas de residuos patogénicos*, fue realizado en la Universidad Nacional de La Plata por C. Genazzi, G. Ciaccio, A. Ronco y L. Zerbino.

Para ello realizaron ensayos de lixiviación a largo plazo sobre morteros con cenizas, modificando las el medio para representar distintas condiciones ambientales: agua destilada en constante burbujeo (agua de lluvia), agua destilada con sales (agua de mar) y agua destilada (blanco). Luego determinaron el contenido de metales pesados en el agua de extracción y las propiedades físico-mecánicas de los morteros.

Los resultados que obtuvieron en los ensayos de lixiviación a largo plazo alientan la realización de estudios de materiales para la construcción elaborados con cemento portland que incorporen cenizas de residuos patogénicos. Resaltan además que los resultados obtenidos se refieren exclusivamente a las cenizas estudiadas y no pueden hacerse generalizaciones debido a la variabilidad en la composición de las mismas de acuerdo a sus fuentes y orígenes.

Residuos de arenas de fundición (RAF).

En el trabajo denominado *Hormigones de cemento portland elaborados con RAF obtenidos en diferentes procesos de fundición*, J.D. Sota y M.F. Barreda (Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Plata) junto a R.E. Miguel y R.B. Banda Noriega (Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires), estudiaron residuos de arenas de moldeo generados en diversos procesos productivos.

Estos desechos, con una importante concentración de metales pesados e hidrocarburos, tienen su origen en fundiciones de aluminio y de hierro y se utilizaron en reemplazo de los agregados. Los autores llegaron a las siguientes conclusiones:

- *“(...) independientemente del origen de los RAF, si se tiene conocimiento apropiado del residuo se pueden lograr hormigones que cumplen con las especificaciones de las normas de medio ambiente y no modifiquen su prestación en las obras para las que fueron diseñados”.*
- *“En el caso de los RAF procedentes de fundiciones de hierro, los hormigones con aditivos superfluidificantes, utilizados para mantener la trabajabilidad,*

favorecen su fijación manteniendo las características del hormigón patrón, no viéndose afectada la resistencia y manteniendo los valores de succión capilar”.

- “Todos los hormigones se comportan satisfactoriamente como medio de fijación estable de los compuestos de los RAF que pueden ser contaminantes al medio ambiente”.

- “Los valores de lixiviados contaminantes en todos los hormigones analizados están por debajo de lo especificado en las normas de control del medio ambiente”

- “Si bien en las experiencias ejecutadas hay un buen comportamiento de los hormigones comparativamente ante la presencia de los RAF, resulta necesario tener en cuenta variaciones en su composición en función del residuo fijado.”

Escorias salinas de la segunda fusión de aluminio.

En el informe *Gestión de las escorias salinas de los procesos de segunda fusión del aluminio*, Antonio Gil Bravo y Luis Gandía Pascual, de la Universidad Pública de Navarra, concluyeron que: “(...) los procesos de valorización de estos residuos (...) no son económicamente viables, no existiendo un mercado real para los subproductos que se obtienen. La mejor alternativa para la escoria salina es maximizar la recuperación del aluminio presente en la misma, disponiendo el material remanente, las sales y la fracción no metálica, en vertedero autorizado”.

Polvo de aluminio.

La única referencia bibliográfica encontrada respecto a un producto similar a las cenizas en estudio fue el artículo publicado en la Revista de Metalurgia, *Tratamiento del polvo de aluminio mediante disolución acuosa*, de F.A. López y otros. En el mismo se hace referencia al polvo de aluminio como un residuo generado en la metalurgia secundaria del aluminio y considerado peligroso como consecuencia de su elevada reactividad en presencia de humedad. Este polvo está compuesto principalmente por aluminio, con importantes concentraciones de metales pesados, y elementos componentes de sales (Na, K, Ca, Cl).

En este trabajo se analizó la influencia de la temperatura, el tiempo y el pH de reacción en su hidrólisis. Las conclusiones a las que arribaron fueron que el polvo de aluminio es un residuo peligroso que requiere de un pretratamiento para su almacenamiento en vertedero, que en el proceso de hidrólisis se generan compuestos gaseosos (fundamentalmente NH_3 , CH_4 y H_2S) y que la reactividad de los sólidos hidrolizados es mucho menor que la del polvo de aluminio inicial. Por lo tanto, puede considerarse a la hidrólisis como un método de pretratamiento de este residuo.

Por otro lado, también se denomina polvo de aluminio al material fabricado a partir de granos de aluminio, o bien de materiales residuales de láminas reciclados, mediante la trituration en húmedo o en seco en molinos de bolas. Se utiliza para la elaboración de hormigones celulares, el cual se caracteriza por densidades muy bajas debido a la incorporación de una importante cantidad de burbujas gaseosas en su matriz. El polvo de aluminio forma aluminatos con los compuestos alcalinos del cemento, liberando hidrógeno, lo cual da origen a las burbujas mencionadas.

6. MARCO NORMATIVO. REGLAMENTO CIRSOC 201-2005.

En Argentina, los materiales que se utilizan como materias primas para la elaboración de hormigón son contemplados y normalizados a través del Reglamento CIRSOC 201: Reglamento Argentino de Estructuras de Hormigón. Por lo tanto, al tratarse de un material que pretende ser utilizado como adición en hormigones de cemento Portland, las cenizas deben adecuarse al mismo. Esta normativa es de aplicación específica a las estructuras de edificios destinados a viviendas, cocheras, locales públicos, depósitos e industrias y de aplicación básica para otros tipos de estructuras como chimeneas, muros de contención, silos, pilas de vertedero, casas de máquinas, etc.

6.1. Adiciones permitidas.

Como se indicó en el Capítulo 5, el Reglamento permite incorporar cualquier adición (no normalizada) siempre que se demuestre mediante ensayos de laboratorio que su empleo beneficia las características deseadas del hormigón y que la adición a incorporar no produce reacciones desfavorables, no altera la protección de las armaduras y no afecta la estabilidad volumétrica del hormigón endurecido.

Además, los contenidos máximos de cloruros para las adiciones minerales deben cumplir con los requisitos establecidos para un árido fino.

Para ello se debe verificar que los hormigones con cenizas incorporadas cumplan con los requisitos de durabilidad y de resistencia exigidos por el Reglamento para cada tipo de medio ambiente.

Cuando se use cemento pórtland más una adición mineral activa incorporada en el momento del mezclado, se debe reemplazar la razón agua/cemento (a/c) por la razón agua / material cementicio [$a/(c+x)$], que tenga en cuenta la suma del cemento pórtland (c) y la cantidad y eficiencia de la adición (x). Esta equivalencia deberá ser respaldada con experiencias de laboratorio.

6.2. Requisitos de durabilidad.

El Reglamento, en las Tablas 2.1 y 2.2 del mismo, especifica los tipos de ambientes o las clases de exposición para las cuales se deben aplicar medidas preventivas de protección. Luego, en la Tabla 2.5, indica los requisitos de durabilidad a cumplir por los hormigones, en función del tipo de exposición de la estructura. Estos requisitos son la razón a/c máxima, la resistencia característica a compresión mínima y si deben o no cumplir las especificaciones relacionadas a la penetración de agua y succión capilar.

Respecto a la relación álcali – sílice, esta normativa expresa que las estructuras de hormigón que durante su vida en servicio pudieran estar, en forma permanente o periódica, en contacto con agua, suelos o atmósferas con humedad relativa superior al 80%, deben ser construidas con un conjunto de materiales componentes (cemento, agregados, aditivos, adiciones minerales y agua) para los cuales esté comprobado que no se producen expansiones y/o deterioros como consecuencia de esta reacción (RAS).

6.3. Requisitos de resistencia.

El CIRSOC 201 especifica que, cuando los documentos del proyecto no establezcan una edad de diseño diferente, ella se debe adoptar igual a 28 días y que, cuando el hormigón se elabore con aditivos y/o adiciones minerales activas que

modifiquen el desarrollo de la resistencia del cemento utilizado, dichos documentos también deben indicar la edad de diseño.

La resistencia a compresión se debe determinar mediante ensayos de rotura, utilizando probetas cilíndricas, siendo la edad de ensayo igual a la de diseño.

6.4. Utilización de las cenizas en hormigones livianos.

Como se mencionó en el Capítulo 5, una de las posibles aplicaciones del polvo de aluminio es la fabricación de hormigones celulares o livianos. Como se verá en el Capítulo 7, estas cenizas reaccionan en forma expansiva frente a la presencia de agua, por lo cual una posible aplicación sería similar a la del polvo de aluminio puro. El Reglamento CIRSOC 201-2005 es de aplicación a estructuras de hormigón sin armar, armado y pretensado, cuya masa por unidad de volumen del material seco a masa constante se encuentre comprendida entre 2000 y 2800 kg/m³, no siendo válido para estructuras que se construyan con hormigones livianos. Por lo tanto, esta posible utilización de las cenizas cae fuera del alcance de esta reglamentación.

6.5. Utilización de las cenizas como áridos.

La bibliografía consultada sugiere que las adiciones minerales pueden utilizarse para reemplazar cemento o el agregado fino. De acuerdo al Reglamento las cenizas no pueden considerarse un árido, ya que excluye a los agregados artificiales obtenidos como subproductos industriales o por fabricación y a los empleados en la elaboración de hormigones con características especiales. Aun así, como se verá en los Capítulos 8 y 9, se estudiará la posibilidad de utilizar las cenizas como sustituto de arena y, a modo de guía, se considerarán las cantidades máximas de sustancias que afecten la resistencia y durabilidad del hormigón o que ataque al acero que un agregado puede contener.

En cuanto a las sustancias nocivas, esta normativa establece que la presencia de sustancias que perjudican algunas de las propiedades del hormigón, expresadas en porcentaje de la masa de la muestra, no deben exceder los límites que se indican en la Tabla 3.4 de la misma.

6.6. Material pulverulento.

También se debe determinar qué porción de las cenizas califica como material pulverulento, ya que el Reglamento especifica que se debe computar como tal a la suma, en masa, de las partículas del cemento, las adiciones minerales pulverulentas (ya sean activas o no) y la fracción de los agregados que pasan por el tamiz IRAM 300 µm (N° 50). El contenido de este tipo de material es indispensable para permitir que el hormigón fresco tenga adecuada cohesión que impida su segregación y excesiva exudación.

7. CARACTERIZACIÓN DE LAS CENIZAS.

Teniendo en cuenta la información aportada por el cliente, el Reglamento CIRSOC 201 y los antecedentes bibliográficos consultados, se decidió realizar, en primera instancia, una caracterización de las cenizas de filtro. Con esto se pretendió evaluar el comportamiento de las mismas, analizar su composición y determinar la existencia de sustancias que pudieran afectar a la resistencia y/o durabilidad de los hormigones. De acuerdo a estas consideraciones, se llevaron a cabo los ensayos que se describen a continuación.

7.1. INSPECCIÓN VISUAL.

La primera tarea desarrollada fue una inspección visual de las muestras de cenizas que aportó el cliente. En la misma se pudo determinar que el residuo está compuesto por un polvo muy fino, de color gris oscuro, opaco. Dentro de la matriz de polvo oscuro se observan algunos puntos de color plateado, brillantes, que corresponderían a partículas de aluminio (según lo indicado por el cliente). Además, presenta un fuerte olor a carbón.

Figura 7.1: Aspecto visual de las cenizas de filtro.



7.2. MUESTREO.

7.2.1. Muestreo en planta de Metal Veneta.

El muestreo en la planta de Metal Veneta estuvo a cargo de la empresa. En primera instancia entregó una muestra de aproximadamente 2kg, la cual se denominó "Muestra A" y fue utilizada para analizar la composición. Luego entregó otra muestra, denominada "Muestra B", compuesta por 2 bolsas de aproximadamente 10 kg cada una (20 kg en total); ésta muestra se utilizó para llevar a cabo todos los estudios y pastones previstos.

Figura 7.2: Bolsas que componen la Muestra B.



7.2.2. Muestreo en Laboratorio de Estructuras.

Para la realización de los ensayos sobre cenizas y la elaboración de morteros y hormigones se utilizó la Muestra B aportada por el cliente. El procedimiento de preparación de la Muestra B para su utilización fue el siguiente:

1) Se colocaron en una misma bolsa los contenidos de las 2 bolsas que aportó el cliente. Luego de mezclaron ambas muestras para obtener una única muestra homogénea.

2) Se dividió en cuartos la muestra resultante; se colocó uno de los cuartos en otro recipiente, separándolo para ser utilizado. Los tres cuartos restantes se conservaron en la bolsa, cerrándola herméticamente para que no se produjeran alteraciones ni contaminación de las cenizas.

Figura 7.3: Mezcla y cuarteo de Muestra B.



3) La porción de cenizas seleccionada se mezcló y se la volvió a cuartear. Dos de estos cuartos se colocaron en estufa para obtener la “Muestra B.1”, compuesta por ceniza “natural” seca. Sobre esta muestra se realizó análisis de la composición, granulometría, contenido de sales solubles y mezcla de cenizas con agua. Además se confeccionaron probetas cilíndricas y prismáticas.

4) Los dos cuartos restantes se colocaron en una bandeja metálica, se los mezcló con agua destilada y se dejó reaccionar. Luego de 24hs de hidratación se colocó en estufa. Una vez seca esta ceniza se la molió para volverla a su estado inicial de polvo fino, obteniendo así la “Muestra B.2” compuesta por ceniza “apagada” seca. Sobre esta muestra se realizó análisis de la composición, contenido de sales solubles y mezcla de cenizas con agua. Además se confeccionaron probetas prismáticas y los pastones definitivos (probetas cilíndricas y cubos para ensayo de lixiviación).

Figura 7.4: Apagado de cenizas con agua destilada.



Figura 7.5: Cenizas apagadas, Muestra B.2.



7.3. COMPOSICIÓN.

El cliente proveyó de un estudio de composición de las cenizas realizado en el año 2013 por el Centro de Investigación y Transferencia en Ingeniería Química Ambiental (CIQA) de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN – FRC). Este estudio sirvió para contar con un panorama general del tipo de residuo con el cual se trabajaría. Adicionalmente, se enviaron a analizar las muestras A, B.1 y B.2 al Centro Tecnológico de Holcim a fin de determinar la composición específica de las cenizas que se utilizarían para desarrollar las tareas.

7.3.1. “Determinación de metales pesados totales en residuos sólidos”.

Técnica: “Espectrometría de fluorescencia de rayos X”.

Fecha: 29/05/2013.

Resultados obtenidos: se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7.1: Determinación de metales pesados totales en residuos sólidos.

Parámetro		Concentración	
		mg/kg	%
Cromo	Cr	1068	0,1068
Cobre	Cu	9631	0,9631
Cinc	Zn	7034	0,7034
Arsénico	As	N.D.	N.D.
Selenio	Se	28	0,0028
Cadmio	Cd	95	0,0095
Bario	Ba	707	0,0707
Mercurio	Hg	N.D.	N.D.
Níquel	Ni	95	0,0095
Plomo	Pb	1201	0,1201
Plata	Ag	N.D.	N.D.

N.D.: No se detecta (Menor al límite de cuantificación del método).

7.3.2. “Estudio de composición de cenizas”.

Técnica: “ICP - Masa”.

Fecha: 23/01/2015 (Muestra A) y 22/05/2015 (Muestra B).

Resultados obtenidos: se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7.2: Estudio de composición de cenizas.

Parámetro		Muestra A		Muestra B.1		Muestra B.2	
		Concentración		Concentración		Concentración	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Plata	Ag	N.D.	N.D.	61,38	0,006	53,63	0,005
Arsénico	As	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bario	Ba	28,45	0,003	135,47	0,014	120,27	0,012
Berilio	Be	N.D.	N.D.	1,52	0,000	1,52	0,000
Cadmio	Cd	18,94	0,002	129,99	0,013	115,54	0,012
Cobalto	Co	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cromo	Cr	31,03	0,003	290,99	0,029	285,12	0,029
Mercurio	Hg	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Níquel	Ni	N.D.	N.D.	166,64	0,017	169,93	0,017
Plomo	Pb	N.D.	N.D.	457,26	0,046	382,17	0,038
Antimonio	Sb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Selenio	Se	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Talio	Tl	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Vanadio	V	N.D.	N.D.	51,8	0,005	51,67	0,005

Parámetro		Muestra A		Muestra B.1		Muestra B.2	
		Concentración		Concentración		Concentración	
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Cinc	Zn	1351,92	0,135	3886,81	0,389	3710,20	0,371
Aluminio	Al	3212,2	0,321	111800,00	11,180	111700,00	11,170
Calcio	Ca	816,63	0,082	20300,00	2,030	16800,00	1,680
Hierro	Fe	1890,3	0,189	7900,00	0,790	7100,00	0,710
Cobre	Cu	93,54	0,009	0,79	0,000	0,77	0,000
Litio	Li	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Manganeso	Mn	N.D.	N.D.	2360,63	0,236	2210,2	0,221
Potasio	K	4828,14	0,483	52100,00	5,210	36900,00	3,690
Sodio	Na	2236,42	0,224	42500,00	4,250	28800,00	2,880
Magnesio	Mg	4479,51	0,448	14100,00	1,410	13800,00	1,380
Estroncio	Sr	N.D.	N.D.	87,79	0,009	73,58	0,007
Azufre	S	N.D.	N.D.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Boro	B	114,81	0,011	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Molibdeno	Mo	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Fósforo	P	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Estaño	Sn	N.D.	N.D.	229,12	0,023	211,29	0,021
Titanio	Ti	411,37	0,041	1754,05	0,175	1810	0,181
Cloro	Cl	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Silicio	Si	0,08	0,000	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.

N.D.: No se detecta (Menor al límite de cuantificación del método).

N.A.: No aplica.

7.4. GRANULOMETRÍA.

7.4.1. Procedimiento.

Este ensayo consistió en tamizar mecánicamente 200,1g de cenizas en estado natural, previamente secadas en estufa a 80°C hasta peso constante. El procedimiento corresponde a la "Norma IRAM 1505: Agregados. Análisis granulométrico".

7.4.2. Instrumental.

Para este ensayo se utilizaron los siguientes dispositivos:

- Estufa.
- Balanza (Precisión: 0,1g)
- Tamices de aberturas cuadradas y tela de alambre tejido (Aberturas de malla: 4,75mm; 2,36mm; 1,18mm; 600µm; 300µm; 150µm).
- Tamizadora mecánica.

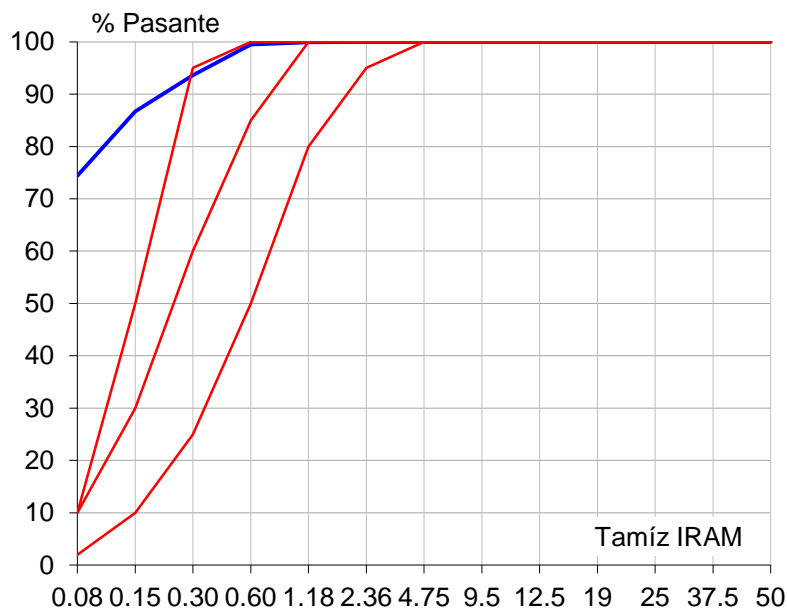
7.4.3. Resultados.

Los resultados obtenidos en este ensayo se indican en la siguiente tabla y gráfico, donde también se presentan las curvas límites indicadas por la Norma.

Tabla 7.3: Granulometría de las cenizas.

Tamiz IRAM [mm]	Pasante [%]
9,5	100,0
4,75	100,0
2,36	100,0
1,18	99,9
0,6	99,5
0,3	93,6
0,15	86,7
0,75	74,4
Módulo de fineza	0,20

Figura 7.6: Granulometría de las cenizas



7.5. CONTENIDO DE SALES SOLUBLES.

Dado que en el proceso de refinamiento de aluminio se incorporan diversas sales como fundentes y que en el análisis de composición de las cenizas se detectaron importantes cantidades de elementos que presumiblemente se encuentran formando sales, se decidió determinar la cantidad de sales solubles en agua contenida en las cenizas.

Como indica el Reglamento CIRSOC 201 estas sales afectan a la durabilidad del hormigón y pueden producir corrosión de las armaduras (en caso de hormigón armado). Por lo tanto, el contenido máximo de las mismas se encuentra regulado por dicho Reglamento.

7.5.1. Procedimiento.

Los ensayos se realizaron según la "Norma IRAM 1647: Agregados para hormigón de cemento portland. Métodos de ensayo". El procedimiento fue el siguiente:

- 1) Mezclar 100,0g de la muestra a analizar con 100,0g de agua destilada.
- 2) Calentarlos en anafe hasta la ebullición; en ese momento retirar del fuego y filtrar con papel de filtro.
- 3) Colocar el extracto en estufa a 80°C hasta eliminar toda el agua (esto es, hasta obtener peso constante).
- 4) Registrar la masa final de sales.

En primer término se trabajó sobre cenizas en estado natural, las cuales se mezclaron manualmente durante 5 minutos con agua destilada y se dejaron reaccionar 24 horas antes de proceder a realizar el ensayo. Una particularidad observada durante el proceso fue que las cenizas no decantaron hacia el fondo del recipiente, tal como ocurre con un árido tradicional, sino que se ubicaron en la superficie (flotando). Por ello resultó dificultoso extraer la parte líquida donde se encuentran las sales solubilizadas para proceder a su filtrado.

Figura 7.7 Ensayo de sales solubles sobre cenizas en estado natural.



Figura 7.8: Sales solubles de cenizas en estado natural.



Posteriormente se observó que al apagar las cenizas con agua destilada y secarlas en estufa, se forma una costra sobre la superficie; la misma es de color blanco y está formada en gran parte por sales. Dado que resulta muy fácil remover dicha costra se procedió a realizar un análisis de sales solubles en cenizas apagadas, secadas en estufa, en las cuales se había removido la costra salina.

Figura 7.9: Formación y remoción de costra salina en la superficie de cenizas apagadas con agua destilada.



Figura 7.10: Ensayo de sales solubles sobre cenizas apagadas, sin costra.



Figura 7.11: Sales solubles de cenizas apagadas, sin costra.



7.5.2. Instrumental.

Para este ensayo se utilizaron los siguientes dispositivos:

- Balanza (Precisión: 0,1g).
- Anafe.
- Vasos de precipitados y papel de filtro.
- Balanza (Precisión 0,0001g).

7.5.3. Resultados.

Los resultados obtenidos en este ensayo se indican en la siguiente tabla.

Tabla 7.4: Contenido de sales solubles de las cenizas.

Muestra	1	2
Descripción	Cenizas naturales	Cenizas apagadas sin costra
Contenido de sales solubles en la muestra [%]	15,12	12,39

7.6. MEZCLA DE CENIZAS CON AGUA.

La experiencia del cliente indicaba que al mezclar las cenizas con agua se producía una reacción con aumentos importantes de temperatura y volumen. Por tal motivo se procedió a mezclar agua y cenizas, midiendo la variación de temperatura en función del tiempo, para distintas cantidades de ceniza y relaciones agua/ceniza.

7.6.1. Procedimiento.

El procedimiento fue similar en las cuatro pruebas realizadas:

- 1) Se pesó cierta cantidad de cenizas dentro de un vaso de precipitados
- 2) Se incorporó agua (medida también en peso) y se agitó con una cuchara plástica hasta alcanzar una mezcla homogénea (aproximadamente 3 minutos).
- 3) Se colocó el sistema sobre una mesada en reposo, midiendo la temperatura y el tiempo; el tiempo inicial (00:00) se consideró desde el momento que se dejó de mezclar y se colocó el sistema en reposo.

7.6.2. Instrumental.

Para este ensayo se utilizaron los siguientes dispositivos:

- Balanza (Precisión: 0,1g)
- Termómetro (Precisión: 0,1°C)
- Vasos de precipitados.

7.6.3. Resultados.

Las pruebas realizadas y los resultados obtenidos fueron que se indican en la tabla y gráfico siguientes.

Tabla 7.5: Temperatura en mezcla de cenizas y agua.

Prueba	A	B	C	D
Ceniza	25,00 g	60,00 g	100,00 g	200,00 g
Agua	35,00 g	110,00 g	225,00 g	350,00 g
Relación a/cen.	1,40	1,83	2,25	1,75
Temperatura inicial	19,0 °C	20,2 °C	19,2 °C	19,0 °C
Temperatura máxima	29,0 °C	29,4 °C	29,0 °C	29,9 °C

Figura 7.12: Variación de la temperatura de la mezcla cenizas-agua en el tiempo.

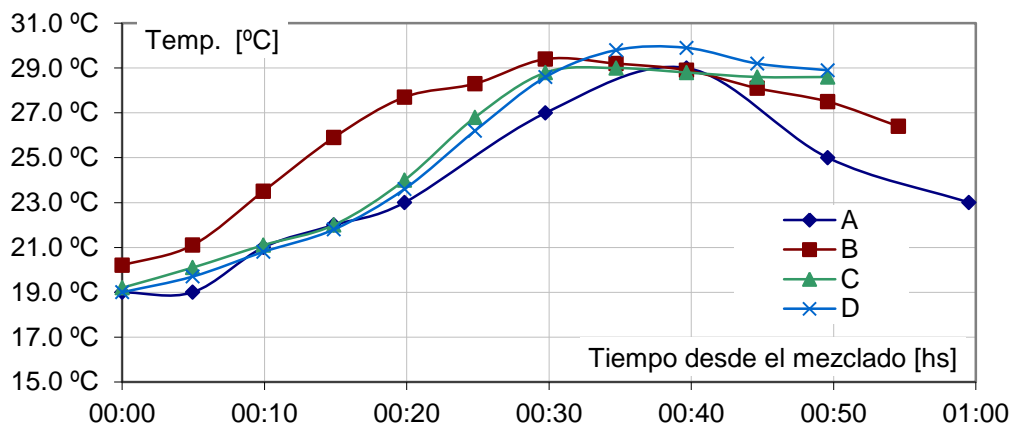


Figura 7.13: Mezcla de cenizas con agua, apenas finalizado el mezclado.



Figura 7.14: Aspecto de las cenizas al reaccionar con agua.



7.6.4. Rehidratación de cenizas.

Posteriormente se procedió a secar en una de las muestras que habían sido hidratadas; el secado se realizó en estufa a 80°C hasta peso constante. Una vez eliminada la humedad, se molió la muestra para reducirla a su estado de polvo fino original y se la volvió a mezclar con agua. El resultado obtenido fue una reacción mucho menor que en la primera hidratación, sin aumento de temperatura ni volumen y sólo perceptible por la formación de algunas pocas burbujas superficiales.

A partir de estos resultados se definieron dos términos para referenciar el estado de las cenizas, los cuales se utilizarán en el resto del presente informe.

- Cenizas en estado “natural”: cenizas sin hidratar, tal como las provee Metal Veneta desde su planta industrial.
- Cenizas “apagadas”: cenizas que han sido hidratadas y se produjo la reacción exotérmica expansiva, luego fueron secadas y molidas. No vuelven a reaccionar al rehidratarlas (o producen una reacción apenas perceptible).

7.7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

7.7.1. Composición.

En lo siguiente se comparan las composiciones de las distintas muestras.

Análisis realizados sobre cenizas en estado “natural”:

Tabla 7.6: Comparación de composición de cenizas en estado natural.

Parámetro		Muestra 0		Muestra A		Muestra B.1		Variación máxima	
		Concentración		Concentración		Concentración			
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Plata	Ag	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	61,38	0,006	61,4	-
Arsénico	As	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0	-
Bario	Ba	707,00	0,07	28,45	0,003	135,47	0,014	678,6	2385,1
Berilio	Be	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	1,52	0,000	1,5	-
Cadmio	Cd	95,00	0,01	18,94	0,002	129,99	0,013	111,1	586,3
Cobalto	Co	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0	-
Cromo	Cr	1068,00	0,11	31,03	0,003	290,99	0,029	1037,0	3341,8
Mercurio	Hg	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0	-
Níquel	Ni	95,00	0,01	N.D.	N.D.	166,64	0,017	166,6	-
Plomo	Pb	1201,00	0,12	N.D.	N.D.	457,26	0,046	1201,0	-
Antimonio	Sb	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0	-
Selenio	Se	28,00	0,00	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	28,0	-
Talio	Tl	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0	-
Vanadio	V	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	51,80	0,005	51,8	-
Cinc	Zn	7034,00	0,70	1351,92	0,135	3886,81	0,389	5682,1	420,3
Aluminio	Al	N.A.	N.A.	3212,20	0,321	111800,00	11,180	108587,8	3380,5
Calcio	Ca	N.A.	N.A.	816,63	0,082	20300,00	2,030	19483,4	2385,8
Hierro	Fe	N.A.	N.A.	1890,30	0,189	7900,00	0,790	6009,7	317,9
Cobre	Cu	9631,00	0,96	93,54	0,009	0,79	0,000	9630,2	1219013,9
Litio	Li	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0	-

Parámetro		Muestra 0		Muestra A		Muestra B.1		Variación máxima	
		Concentración		Concentración		Concentración			
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Manganeso	Mn	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	2360,63	0,236	2360,6	-
Potasio	K	N.A.	N.A.	4828,14	0,483	52100,00	5,210	47271,9	979,1
Sodio	Na	N.A.	N.A.	2236,42	0,224	42500,00	4,250	40263,6	1800,4
Magnesio	Mg	N.A.	N.A.	4479,51	0,448	14100,00	1,410	9620,5	214,8
Estroncio	Sr	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	87,79	0,009	87,8	-
Azufre	S	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	N.A.	N.A.	0,0	-
Boro	B	N.A.	N.A.	114,81	0,011	N.A.	N.A.	0,0	0,0
Molibdeno	Mo	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0	-
Fósforo	P	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0,0	-
Estaño	Sn	N.A.	N.A.	N.D.	N.D.	229,12	0,023	229,1	-
Titanio	Ti	N.A.	N.A.	411,37	0,041	1754,05	0,175	1342,7	326,4
Cloro	Cl	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	0,0	-
Silicio	Si	N.A.	N.A.	0,08	0,000	N.A.	N.A.	0,0	0,0
TOTAL		19859,00	1,99	19513,34	1,95	258314,24	25,83		

N.D.: No se detecta (Menor al límite de cuantificación del método)

N.A.: No aplica



Elementos no detectados en ninguno de los análisis.



Elementos no detectados en alguno de los análisis, pero sí en otros.



Elementos detectados en todos los análisis.

Nota: en el caso de que la detección de un elemento no se aplique al análisis realizado, ese análisis no se tiene en cuenta en la comparación.

Los resultados obtenidos muestran que la composición química de las cenizas de filtro es muy variable según el período al que corresponde la muestra analizada. Esta variación está asociada al proceso de obtención del aluminio secundario, donde la materia prima tiene orígenes muy diversos y cambiantes en el tiempo. Así, los residuos en cada período dependerán directamente de la materia prima que se esté fundiendo en ese momento específico.

Algunos elementos aparecen en todas las muestras (bario, cadmio, cromo, cinc, aluminio, calcio, hierro, cobre, potasio, sodio, magnesio, boro, titanio, cloro y silicio), aunque con concentraciones que varían enormemente entre muestras. Otros elementos no se detectaron en ninguna de las muestras: arsénico, cobalto, mercurio, antimonio, selenio, talio, litio, azufre, molibdeno y fósforo. Por último, hay componentes que aparecen presentes en algunas muestras, pero no en otras: plata, berilio, níquel, plomo, selenio, vanadio, manganeso, estroncio y estaño.



Las concentraciones son muy variables, por lo que es imposible establecer una composición promedio de las cenizas. Por este motivo resulta aconsejable realizar un análisis de composición cada vez que se utilice una nueva muestra del polvo.

Análisis realizados sobre cenizas en estado “natural” y en estado “apagado”:

En la tabla siguiente se comparan las composiciones de las cenizas en estado natural y apagado.

Tabla 7.7: Comparación de composición de cenizas en estado natural y apagado.

Parámetro		Muestra B.1		Muestra B.2		Variación	
		Concentración		Concentración			
		mg/kg	%	mg/kg	%	mg/kg	%
Plata	Ag	61,38	0,006	53,63	0,005	7,75	14,45
Arsénico	As	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Bario	Ba	135,47	0,014	120,27	0,012	15,20	12,64
Berilio	Be	1,52	0,000	1,52	0,000	0,00	0,00
Cadmio	Cd	129,99	0,013	115,54	0,012	14,45	12,51
Cobalto	Co	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Cromo	Cr	290,99	0,029	285,12	0,029	5,87	2,06
Mercurio	Hg	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Níquel	Ni	166,64	0,017	169,93	0,017	-3,29	-1,94
Plomo	Pb	457,26	0,046	382,17	0,038	75,09	19,65
Antimonio	Sb	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Selenio	Se	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Talio	Tl	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Vanadio	V	51,80	0,005	51,67	0,005	0,13	0,25
Cinc	Zn	3886,81	0,389	3710,20	0,371	176,61	4,76
Aluminio	Al	111800,00	11,180	111700,00	11,170	100,00	0,09
Calcio	Ca	20300,00	2,030	16800,00	1,680	3500,00	20,83
Hierro	Fe	7900,00	0,790	7100,00	0,710	800,00	11,27
Cobre	Cu	0,79	0,000	0,77	0,000	0,02	2,60
Litio	Li	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Manganeso	Mn	2360,63	0,236	2210,20	0,221	150,43	6,81
Potasio	K	52100,00	5,210	36900,00	3,690	15200,00	41,19
Sodio	Na	42500,00	4,250	28800,00	2,880	13700,00	47,57
Magnesio	Mg	14100,00	1,410	13800,00	1,380	300,00	2,17
Estroncio	Sr	87,79	0,009	73,58	0,007	14,21	19,31
Azufre	S	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Boro	B	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Molibdeno	Mo	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Fósforo	P	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
Estaño	Sn	229,12	0,023	211,29	0,021	17,83	8,44
Titanio	Ti	1754,05	0,175	1810,00	0,181	-55,95	-3,09
Cloro	Cl	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
Silicio	Si	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.	N.A.
TOTAL		258314,24	25,83	224295,89	22,43		

 Variaciones mayores al 10% y menores al 20%.
 Variaciones mayores al 20%.

Nuevamente se observan algunas variaciones en las concentraciones de los elementos, pero menores que en la comparación entre muestras de distintos períodos.

El principal fenómeno que se detecta es la disminución de la concentración de muchas especies luego de que las cenizas se hidrataron. Las mayores alteraciones se dan en calcio, potasio y magnesio (componentes de las sales fundentes que se agregan en el proceso de refinación del aluminio); también se manifiestan cambios significativos, aunque de un orden menor, en plata, bario, cadmio, plomo, hierro y estroncio. En el resto de los elementos se observan pequeñas disminuciones en las concentraciones e incluso (en níquel y titanio) un leve aumento de las mismas.

7.7.2. Granulometría.

El análisis granulométrico sobre cenizas en estado natural indica que se trata de un material muy fino, con un módulo de fineza de 0,20. Más del 90% de las cenizas pasan a través del tamiz N° 50 y por lo tanto se considera a esa porción como material pulverulento de acuerdo al Reglamento CIRSOC 201. Además, más del 70% es pasante por el tamiz N° 200 (75 μ m).

7.7.3. Contenido de sales solubles.

Los ensayos realizados arrojan que el contenido de sales solubles de las cenizas de filtro es muy alto. Respecto a la idea de retirar la costra salina para disminuir el contenido de las mismas, se observa que la eficiencia es muy baja (solo se logra eliminar el 18%); por lo tanto, se descarta este procedimiento.

El contenido máximo de sales solubles permitido para un árido fino por el Reglamento es de 1,5% del peso del agregado. Por lo que las cenizas, si se las considera con un árido, no cumplen esta restricción.

Un hormigón normal está constituido aproximadamente por un 80% (en peso) de áridos, lo cual implica 1900 kg de áridos por m³ de hormigón. El contenido máximo de sales solubles permitido por el Reglamento se traduce en 28 kg de dichas sales por m³ de hormigón. Por su parte, como se verá en el Capítulo 6, en los hormigones elaborados para este trabajo se trabajó con una cantidad de cenizas igual al 3% del peso de cemento, resultando un contenido de 11,5 kg de cenizas por m³ de hormigón. Siendo que el contenido de sales solubles de las cenizas es del 15%, esto llevaría a un aporte de 1,725kg de sales por m³ de hormigón.

Por lo tanto, si bien el contenido de sales solubles de las cenizas supera el valor permitido por el Reglamento CIRSOC 201 para cada uno de los agregados, se demuestra que el aporte total de sales por parte de las cenizas resulta prácticamente insignificante con respecto a las cantidades máximas que suponen el conjunto de los áridos. De acuerdo a este análisis, resulta justificable utilizar las cenizas dentro de hormigones aunque no cumplan con el requisito indicado por el Reglamento, especialmente para el caso en el que los áridos contengan bajos porcentajes de sales.

7.7.4. Mezcla de cenizas con agua.

La evolución de la temperatura de la mezcla de cenizas y agua presenta un comportamiento similar para todos los casos. Siendo la temperatura inicial muy parecida en las cuatro mezclas, las curvas se caracterizan por una rama ascendente hasta un valor máximo. A partir de este punto la temperatura comienza a descender con un gradiente similar al del aumento. El pico de máxima temperatura se da siempre entre los 30 y los 40 minutos después de finalizado el mezclado; la máxima temperatura está en todos los casos entre 29°C y 30°C. No se observa que haya una relación definida entre la cantidad de cenizas y la temperatura máxima, como tampoco entre esta última y la relación agua/cenizas. Tampoco se corresponde la máxima temperatura final con la muestra que presentaba mayor temperatura inicial.

El aumento de volumen puede explicarse considerando que las cenizas tienen como componentes aluminio, cinc, magnesio, calcio y bario. Estos elementos, en forma de óxidos, son utilizados habitualmente en forma de polvo como aditivos para la producción de hormigones celulares; su función es precisamente reaccionar con el agua y desprender gases que le dan al hormigón o mortero una estructura esponjosa.

En las cenizas en estado "natural" los metales se encuentran formando óxidos. Éstos, luego de hidratarse, pasan a formar hidróxidos, compuestos que ya no tienen esa capacidad de reaccionar frente a la presencia de agua. De esta manera se logra explicar por qué las cenizas se "apagan" y ya no vuelven a mostrar una expansión al rehidratarlas.

8. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS. USO DE LAS CENIZAS EN MORTEROS.

Una vez conocido el comportamiento de las cenizas, y teniendo en cuenta las condiciones que impone el Reglamento CIRSCOC 201 para las adiciones minerales que no se encuentran consideradas en las normas IRAM allí citadas, se decidió evaluar las características que las cenizas le confieren al hormigón cuando se las incorpora al mismo.

En primera instancia se analizaron once alternativas en las que se varió el porcentaje de cenizas incorporados, el propósito de las incorporación (como reemplazo de cemento o de árido fino), el estado de las cenizas (apagadas o naturales), y la inclusión o no de aditivos químicos. Las alternativas se compararon mediante la confección de probetas prismáticas, a las cuales se les determinó su densidad y posteriormente fueron ensayadas a flexión y a compresión.

8.1.1. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO.

Para cada una de las once alternativas se elaboró un mortero de cemento portland según la "Norma IRAM 1622. Cemento portland. Determinación de resistencias mecánicas". Con cada pastón se llenaron 3 probetas prismáticas de 4 cm de ancho, 4 cm de alto y 16 cm de longitud.

8.1.2. Materiales.

Los materiales utilizados fueron los siguientes:

- Cemento Portland Compuesto CPC 40 Loma Negra.
- Arena silícea natural, con granulometría según la citada norma.
- Agua, de red.
- Cenizas de filtro, en estado natural y en estado apagado.
- Aditivo Sikament S-Plus, reductor de agua de alto rango.

8.1.3. Procedimiento.

Los ensayos se realizaron según la norma, con variaciones en el orden de mezclado y las dosificaciones, debido a la incorporación de las cenizas y los aditivos.

- 1) Preparación de los moldes y pesado de materiales.

Figura 8.1: Preparación de moldes y pesado de materiales.



- 2) Incorporación a la mezcladora del agua, el cemento y las cenizas. Mezclado durante 30s en velocidad lenta.
- 3) Incorporación de la arena durante 30s, período durante el cual se continúa mezclando en velocidad lenta.
- 4) Incorporación de los aditivos, cuando los hubo, o de agua agregada (por fuera de la dosificación teórica).
- 5) Mezclado de todos los materiales durante 30s en velocidad rápida.
- 6) Reposo de la mezcla durante 90, removiendo el mortero pegado en el fondo y en los laterales del recipiente.
- 7) Mezclado durante 60s en velocidad rápida.
- 8) Llenado de probetas prismáticas. Compactación mediante 15 caídas en el dispositivo que indica la norma. Luego de 24 hs, las probetas se desmoldan y se sumergen en agua a 23 ± 2 °C hasta la edad de ensayo.

Figura 8.2: Llenado de probetas prismáticas



8.2. DOSIFICACIONES.

La dosificación del hormigón patrón corresponde a la indicada en la norma IRAM 1622 (Pastón 1). A partir de ésta se produjeron diez alternativas con la incorporación de cenizas con el objetivo de determinar los efectos de esta adición y, una vez identificadas ciertas consecuencias indeseadas, tratar de reducir o eliminar las mismas. Las cenizas se dosifican en porcentaje (%) del peso de cemento. Los porcentajes de incorporación se determinaron en base a la bibliografía consultada. Se trabajó con tres porcentajes que barrieran el rango desde el 3% hasta el 10%.

En primer lugar se trabajó con tres morteros a los cuales se les adicionó cenizas en estado natural, en diferentes porcentajes, en reemplazo del cemento (Pastones 2, 3, 4). Requirieron el agregado de agua por sobre la establecida en la dosificación teórica para poder lograr una trabajabilidad óptima. Además, tal como ocurría en la mezcla de cenizas y agua, se observó un aumento de volumen que sobrepasó la capacidad de los moldes. También, como se presentará en lo siguiente, se presentaron importantes disminuciones en las resistencias mecánicas.

Una vez observados los efectos que producía la incorporación de las cenizas naturales se decidió trabajar con el menor porcentaje de adición y tratar de contrarrestar estas secuelas. Con los objetivos de obtener valores de resistencias más

cercanos al patrón y lograr adecuada fluidez para realizar el llenado de probetas sin inconvenientes, se propusieron las siguientes opciones:

- Pastón 5: Utilizar cenizas naturales en reemplazo de cemento, mantener la relación a/c original (no incorporar agua por sobre el valor teórico) y aumentar la fluidez del mortero añadiendo un aditivo fluidificante.
- Pastón 6: Utilizar cenizas naturales en reemplazo de arena (y no del cemento) y aumentar la fluidez del mortero con aditivo fluidificante.
- Pastón 7: Utilizar cenizas naturales en reemplazo de cemento, reducir la relación a/c (no incorporar agua por sobre la dosificación teórica) y aumentar la fluidez incorporando mayor cantidad de aditivo fluidificante.
- Pastón 8: Utilizar cenizas apagadas en reemplazo del cemento.
- Pastón 9: Utilizar cenizas apagadas en reemplazo de cemento, mantener la relación a/c original (no incorporar agua por sobre el valor teórico) y aumentar la fluidez del mortero añadiendo un aditivo fluidificante.
- Pastón 10: Utilizar cenizas apagadas en reemplazo de arena (y no del cemento) y aumentar la fluidez del mortero con aditivo fluidificante.
- Pastón 11: Utilizar cenizas apagadas en reemplazo de cemento, reducir la relación a/c (no incorporar agua por sobre la dosificación teórica) y aumentar la fluidez incorporando mayor cantidad de aditivo fluidificante.

En la tabla siguiente se resumen los once pastones realizados:

Tabla 8.1: Dosificación de morteros.

Pastón	Descripción	Dosificación						Dens. teórica [kg/m ³]	Observaciones
		Arena [g]	Cem. [g]	Agua [g]	Cenizas		Adit. [g]		
					%	[g]			
1	Patrón	1617,0	449,0	250,0	0,0	0,0	0,0	2316	---
2	3% Ceniza natural Reemplazo cemento	1617,0	436,0	250,0	3,0	13,1	0,0	2316	Agua agregada: 39 g
3	5% Ceniza natural Reemplazo cemento	1617,0	427,0	250,0	5,0	21,3	0,0	2315	Agua agregada: 63 g
4	10% Ceniza natural Reemplazo cemento	1617,0	404,0	250,0	10,0	40,4	0,0	2311	Agua agregada: 120 g
5	3% Ceniza natural Reemplazo cemento Con aditivo	1617,0	436,0	250,0	3,0	13,1	5,0	2321	---
6	3% Ceniza natural Reemplazo arena Con aditivo	1591,0	449,0	250,0	3,0	13,1	5,0	2308	---
7	3% Ceniza natural Reemplazo cemento Con aditivo Reducción razón a/c	1617,0	436,0	225,0	3,0	13,1	10,0	2301	12% de reducción de agua respecto al patrón
8	3% Ceniza apagada Reemplazo cemento	1617,0	436,0	250,0	3,0	13,1	0,0	2316	Agua agregada: 39 g
9	3% Ceniza apagada Reemplazo cemento Con aditivo	1617,0	436,0	250,0	3,0	13,1	5,0	2321	---

Pastón	Dosificación							Dens. teórica [kg/m ³]	Observaciones
	Descripción	Arena	Cem.	Agua	Cenizas		Adit.		
		[g]	[g]	[g]	%	[g]	[g]		
10	3% Ceniza apagada Reemplazo arena Con aditivo	1591,0	449,0	250,0	3,0	13,1	5,0	2308	---
11	3% Ceniza apagada Reemplazo cemento Con aditivo Reducción razón a/c	1617,0	436,0	225,0	3,0	13,1	10,0	2301	12% de reducción de agua respecto al patrón

8.3. DENSIDADES Y ABSORCIONES.

8.3.1. Instrumental.

Los materiales utilizados para determinar las densidades y las absorciones de agua por parte de cada una de las probetas confeccionadas fueron los siguientes:

- Balanza hidrostática.
- Balanza (Precisión: 0,1g).

8.3.2. Procedimiento.




El procedimiento para la determinación de los citados parámetros, para cada una de las probetas, fue el indicado a continuación.








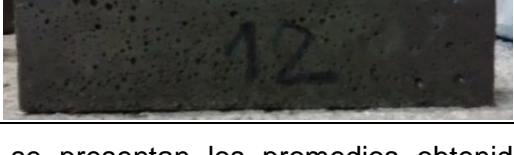
- 1) Se retiraron las probetas de la cámara de curado (luego de 27 días) y se las pesó sumergidas, con la balanza hidrostática. Se determinó la masa sumergida "m_{sum}".
- 2) Con el paño se secó la superficie, llevando la probeta al estado de "saturada superficie seca" y se pesó. Se determinó así la masa saturada superficie seca "m_{sss}".
- 3) Se colocó la probeta en estufa a 80°C hasta peso constante y se pesó en esta condición, obteniendo la masa seca "m_{seca}".

8.3.3. Resultados.

Los aspectos que presentó cada una de las probetas pueden observarse en las siguientes imágenes.

Tabla 8.2: Aspecto de las probetas prismáticas de los distintos pastones.

Pastón	Descripción	Imagen	Observaciones
1	Patrón		---
2	3% Ceniza natural Reemplazo cemento		Requirió agua agregada. Aumento de volumen y de la porosidad.
3	5% Ceniza natural Reemplazo cemento		Requirió agua agregada. Aumento de volumen y de la porosidad.

Pastón	Descripción	Imagen	Observaciones
4	10% Ceniza natural Reemplazo cemento		Requirió agua agregada. Aumento de volumen y de la porosidad.
5	3% Ceniza natural Reemplazo cemento Con aditivo		Menor aumento de volumen.
6	3% Ceniza natural Reemplazo arena Con aditivo		Menor aumento de volumen.
7	3% Ceniza natural Reemplazo cemento Con aditivo Reducción razón a/c		Menor aumento de volumen.
8	3% Ceniza apagada Reemplazo cemento		Requirió agua agregada.
9	3% Ceniza apagada Reemplazo cemento Con aditivo		---
10	3% Ceniza apagada Reemplazo arena Con aditivo		---
11	3% Ceniza apagada Reemplazo cemento Con aditivo Reducción razón a/c		---

En la siguiente tabla se presentan los promedios obtenidos para las tres probetas de cada uno de los once pastones realizados.

Tabla 8.3: Densidad y absorción de las probetas prismáticas de los distintos pastones.

Pastón	Descripción	Volumen [cm ³]	Densidad relativa real	Absorción [%]
1	Patrón	256,1	2,472	11,2
2	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento	281,0	2,193	13,2
3	5% Ceniza natural - Reemplazo cemento	292,0	2,057	14,0
4	10% Ceniza natural - Reemplazo cemento	283,9	1,990	15,4
5	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento - Con aditivo	265,6	2,302	11,4

Pastón	Descripción	Volumen [cm ³]	Densidad relativa real	Absorción [%]
6	3% Ceniza natural - Reemplazo arena - Con aditivo	268,1	2,286	10,5
7	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento - Con aditivo -Reducción razón a/c	260,7	2,108	9,6
8	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento	253,6	2,495	12,6
9	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento - Con aditivo	252,7	2,443	11,2
10	3% Ceniza apagada - Reemplazo arena - Con aditivo	254,1	2,414	11,2
11	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento - Con aditivo - Reducción razón a/c	257,8	2,292	9,6

8.4. RESISTENCIAS MECÁNICAS.

Luego de determinadas las características anteriores se procedió a los ensayos destructivos, a fin de conocer las resistencias mecánicas de los morteros. Para ello, a las respectivas edades de 28 días, se sometió a cada una de las probetas a las pruebas que indica la norma IRAM 1622.

8.4.1. Instrumental.

Para este ensayo se utilizó una prensa universal Ibertest.

8.4.2. Procedimiento.

Ensayo de flexión.

Se aplica una carga puntual en la parte central superior de la probeta, estando ésta apoyada en dos puntos de la cara inferior cercanos a los extremos.

Figura 8.3: Dispositivo de ensayo de flexión en probetas prismáticas.



Ensayo de compresión.

Las dos mitades de cada probeta que resultan del ensayo de flexión se someten a una compresión simple, aplicándose una carga distribuida sobre las caras superior e inferior.

Figura 8.4: Dispositivo de ensayo de compresión en probetas prismáticas.



8.4.3. Resultados.

En la tabla siguiente se encuentran indicados los resultados que se obtuvieron como promedio de las tres probetas individuales de cada mortero ensayado.

Tabla 8.4: Resistencias de las probetas prismáticas de los distintos pastones.

Pastón	Descripción	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a flexión [MPa]
1	Patrón	18,4	5,1
2	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento	12,6	3,4
3	5% Ceniza natural - Reemplazo cemento	9,2	2,9
4	10% Ceniza natural - Reemplazo cemento	5,4	1,6
5	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento - Con aditivo	14,6	4,5
6	3% Ceniza natural - Reemplazo arena - Con aditivo	14,0	4,1
7	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento - Con aditivo - Reducción razón a/c	13,6	3,3
8	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento	13,7	3,8
9	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento - Con aditivo	14,0	3,7
10	3% Ceniza apagada - Reemplazo arena - Con aditivo	16,9	4,2
11	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento - Con aditivo - Reducción razón a/c	17,1	3,6

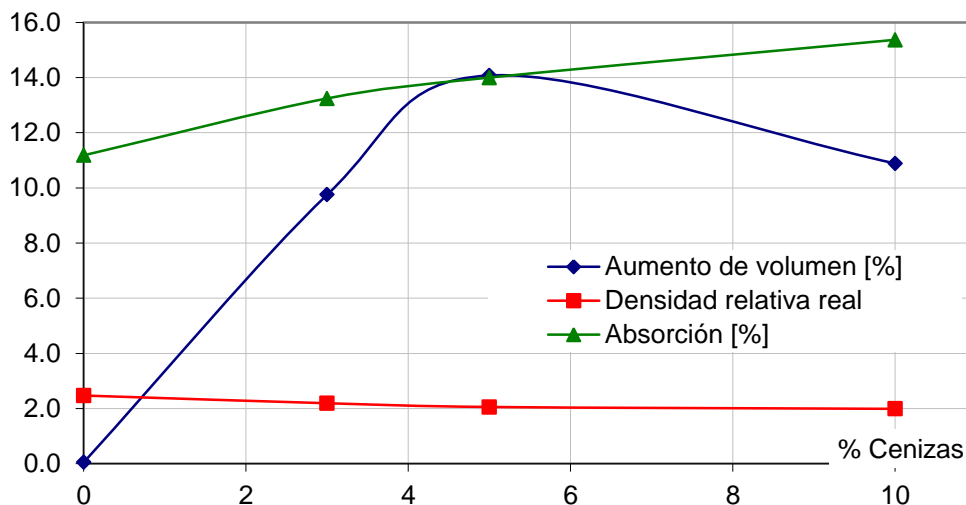
8.5. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS.

8.5.1. Aumento de volumen, densidades y absorciones.

Comparación de pastones 1, 2, 3 y 4: Alternativas con distinto porcentaje de ceniza natural.

Se comparan aquí los tres pastones que tienen cenizas en estado natural como reemplazo del cemento, en distintos porcentajes, con el pastón patrón (sin ceniza). La influencia de la cantidad de adición sobre las propiedades mencionadas se resume en el gráfico siguiente.

Figura 8.5: Densidad, absorción y aumento de volumen en probetas en función del contenido de cenizas naturales.



Como se puede observar en el gráfico, existe una relación definida entre el porcentaje de cenizas naturales que se incorporan un hormigón y la absorción y la densidad que éste presenta. Por un lado, la absorción de agua por parte de las probetas aumenta mientras mayor es el contenido de cenizas. Por otro, la densidad relativa real del hormigón resultante disminuye a medida que se incrementa el porcentaje de cenizas añadido. Ambos fenómenos están íntimamente relacionados, y es posible asociarlos a las burbujas de aire que resultan de la reacción de la adición con el agua, lo cual se traduce en porosidad del hormigón endurecido.

También se presenta, mediante la curva de color azul, el aumento de volumen (expresado en porcentaje, respecto al volumen del hormigón patrón) en función del contenido de cenizas. En este caso, a diferencia de los anteriores, se presenta una tendencia variable. Para los porcentajes más bajos de adición (3% y 5%) se observa un aumento de volumen acompañando la suba de la cantidad de cenizas; para el porcentaje mayor (10%), el aumento de volumen no acompaña la curva anterior, sino que presenta un valor menor que el máximo.

Comparación de pastones 1, 2, 5, 6 y 7: Alternativas que contienen igual cantidad de ceniza en estado natural.

En la siguiente tabla se presenta la comparación de los pastones que contienen ceniza natural en reemplazo de cemento, con sus distintas variaciones: con agregado de agua, con agregado de aditivo fluidificante (sin agregado ni quita de agua), y con reducción de agua (junto a agregado de aditivo fluidificante), con ceniza. También se presenta la alternativa que contiene cenizas en reemplazo de arena, y el mortero patrón.

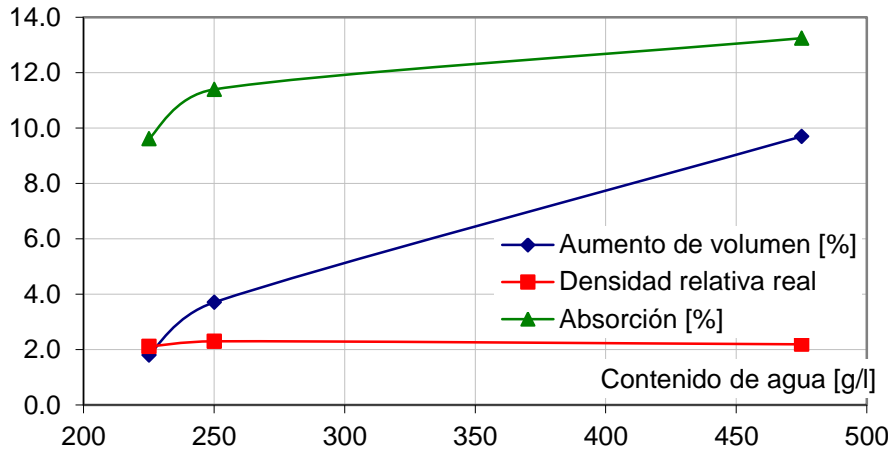
Tabla 8.5: Volumen, densidad y absorción de morteros con igual cantidad de ceniza natural.

Pastón	Descripción	Volumen		Densidad relativa real		Absorción
		[cm ³]	Δ [%]		Δ [%]	[%]
1	Patrón	256,1	0,0	2,472	0,0	11,2
2	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento	281,0	9,7	2,193	-11,3	13,2
5	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento - Con aditivo	265,6	3,7	2,302	-6,9	11,4
6	3% Ceniza natural - Reemplazo arena - Con aditivo	268,1	4,7	2,286	-7,5	10,5
7	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento - Con aditivo - Reducción razón a/c	260,7	1,8	2,108	-14,7	9,6

Las variaciones de volumen y densidad (Δ) se expresan en relación al mortero patrón, y como porcentajes de éste. Todos los casos presentan un importante aumento de volumen y la absorción junto a una disminución de la densidad respecto al patrón, lo cual se puede asociar a la reacción de las cenizas con el agua.

Para los casos de ceniza natural en reemplazo de cemento (2, 5 y 7) se ha confeccionado el siguiente gráfico, expresando los parámetros medidos en función del contenido de agua (en g/l) del mortero. Para las tres alternativas la cantidad de cemento, cenizas y arena fue la misma, logrando la trabajabilidad requerida mediante la adición de agua (pastón 2) o distintas dosis de aditivos (5 y 7).

Figura 8.6: Densidad, absorción y aumento de volumen en probetas en función del contenido de agua, para probetas con cenizas naturales.



Los aumentos de volumen y de absorción acompañan al contenido de agua del mortero, esto es, hay una relación directa entre ambos. Este comportamiento puede asociarse a que al disminuir el contenido total de agua queda menor cantidad de ésta disponible para que las cenizas reaccionen con ella, lo que permite suponer que quedará algún porcentaje de adición sin reaccionar. No se observa una relación definida entre el contenido de agua y la densidad de las probetas.

Por otro lado, se comparan las alternativas con igual cantidad de agua y de cenizas pero distintas cantidades de cemento y arena. Estos son los pastones 5 y 6, donde la inclusión de cenizas se hace en reemplazo de cemento y de arena respectivamente. Los parámetros analizados arrojan valores muy similares, sin una tendencia definida, permitiendo suponer que el modo en el que se empleen las cenizas naturales no influye de manera significativa respecto a estas variables.

Comparación de pastones 1, 8, 9, 10 y 11: Alternativas que contienen cenizas apagadas.

En forma similar al apartado anterior, se comparan entre sí aquellas alternativas que solo contienen cenizas apagadas, con todas las variantes indicadas. Los resultados se resumen en la tabla siguiente.

Tabla 8.6: Volumen, densidad y absorción de morteros con ceniza apagada.

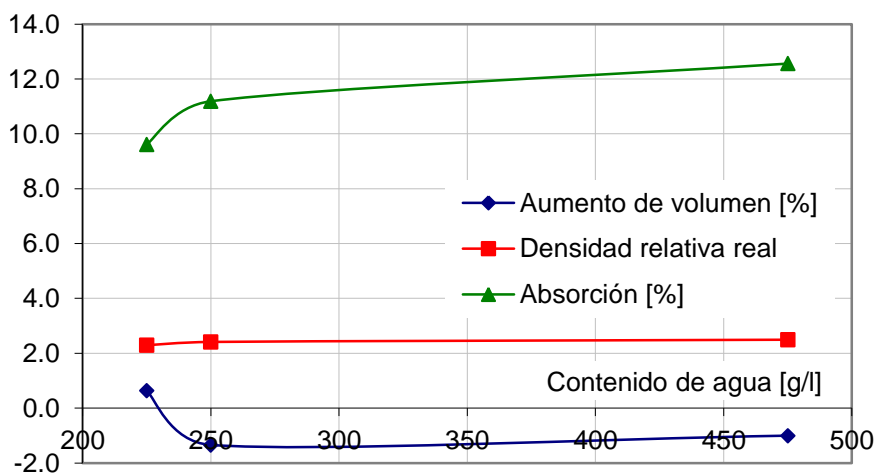
Pastón	Descripción	Volumen		Densidad relativa real		Absorción
		[cm ³]	Δ [%]		Δ [%]	[%]
1	Patrón	256,1	0,0	2,472	0,0	11,2
8	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento	253,6	-1,0	2,495	0,9	12,6
9	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento - Con aditivo	252,7	-1,3	2,443	-1,2	11,2
10	3% Ceniza apagada - Reemplazo arena - Con aditivo	254,1	-0,8	2,414	-2,4	11,2
11	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento - Con aditivo - Reducción razón a/c	257,8	0,6	2,292	-7,3	9,6

Solo el pastón 11 presenta un leve aumento de volumen; el resto, por el contrario, muestra pequeñas retracciones volumétricas. No se puede asociar este fenómeno directamente al uso de cenizas apagadas, ya que son cambios muy pequeños que pueden deberse incluso a defectos en el llenado de los moldes. Lo que si puede determinarse con seguridad es que al utilizar cenizas que habían reaccionado previamente con agua, se logra eliminar el inconveniente del aumento de volumen.

En cuanto a la densidad, se observan valores muy similares a los del hormigón patrón, siendo el pastón 11 el de mayor variación pero aún dentro de valores normales. Respecto la absorción, los valores de las alternativas son prácticamente iguales al hormigón patrón; nuevamente el que mayor variación presenta es el 11.

En el siguiente gráfico se representan los valores indicados en la tabla anterior, en función del contenido de agua del mortero (para iguales cantidades de cemento, ceniza apagada y arena).

Figura 8.7: Densidad, absorción y aumento de volumen en probetas en función del contenido de agua, para probetas con cenizas apagadas.



A diferencia de la comparación anterior, para el caso de cenizas apagadas no se observa una tendencia respecto al aumento de volumen de las probetas en relación al contenido de agua del mortero. También en contraposición al caso de las cenizas naturales, en este caso si hay una correlación entre la densidad y el contenido de agua, presentándose un leve aumento de la primera en función a la segunda.

Además, similarmente a lo observado para cenizas en estado natural, también existe una tendencia de aumento de la absorción de agua por parte de las probetas a medida que se incrementa la cantidad de agua con la que se elaboró el mortero.

Nuevamente, se contrastan las alternativas con igual cantidad de agua y de cenizas pero distintas cantidades de cemento y arena, 9 y 10, donde la inclusión de la adición corresponde a reemplazo de cemento y de arena respectivamente. En concordancia con las cenizas naturales, para el caso de las apagadas no hay diferencias significativas entre emplear las cenizas como reemplazo del cemento o reemplazo de la arena, para los parámetros aquí analizadas.

Comparación de pastones 2 y 8, 5 y 9, 6 y 10, 7 y 11: Alternativas con cenizas naturales y alternativas con cenizas apagadas.

Se compararán aquí alternativas con dosificaciones iguales, siendo una de ellas con cenizas naturales y otra con cenizas apagadas, junto a las variaciones respecto al hormigón patrón.

Pastones 2 y 8: Cenizas en reemplazo de cemento, con agua agregada.

Los resultados para estos morteros se indican en la siguiente tabla.

Tabla 8.7: Comparación de morteros con cenizas naturales y apagadas en reemplazo de cemento, con agua agregada.

Pastón	Descripción	Volumen		Densidad relativa real		Absorción
		[cm ³]	Δ [%]		Δ [%]	[%]
1	Patrón	256,1	0,0	2,472	0,0	11,2
2	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento	281,0	9,7	2,193	-11,3	13,2
8	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento	253,6	-1,0	2,495	0,9	12,6

Estas probetas presentan absorciones similares y las otras dos características con grandes diferencias. Las probetas con ceniza natural, como ya se mencionó anteriormente, muestran un gran aumento de volumen y una importante disminución de la densidad respecto al patrón; las probetas con ceniza apagada tienen un comportamiento más cercano al mortero testigo.

Pastones 5 y 9: Cenizas en reemplazo de cemento, sin agua agregada, con aditivo fluidificante

Los resultados para estos morteros se indican en la siguiente tabla.

Tabla 8.8: Comparación de morteros con cenizas naturales y apagadas en reemplazo de cemento, sin agua agregada, con aditivo fluidificante.

Pastón	Descripción	Volumen		Densidad relativa real		Absorción
		[cm ³]	Δ [%]		Δ [%]	[%]
1	Patrón	256,1	0,0	2,472	0,0	11,2
5	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento - Con aditivo	265,6	3,7	2,302	-6,9	11,4
9	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento - Con aditivo	252,7	-1,3	2,443	-1,2	11,2

De manera similar a lo anterior, las probetas con ceniza natural difieren significativamente respecto del patrón, en tanto que las probetas con ceniza apagada se acercan más a las características de éste. Aun así, las diferencias entre las alternativas 5 y 9 son menores que las que hay entre los pastones 2 y 8.

Pastones 6 y 10: Cenizas en reemplazo de arena, sin agua agregada, con aditivo fluidificante

Los resultados para estos morteros se indican en la siguiente tabla.

Tabla 8.9: Comparación de morteros con cenizas naturales y apagadas en reemplazo de arena, sin agua agregada, con aditivo fluidificante.

Pastón	Descripción	Volumen		Densidad relativa real		Absorción
		[cm ³]	Δ [%]		Δ [%]	[%]
1	Patrón	256,1	0,0	2,472	0,0	11,2
6	3% Ceniza natural - Reemplazo arena - Con aditivo	268,1	4,7	2,286	-7,5	10,5
10	3% Ceniza apagada - Reemplazo arena - Con aditivo	254,1	-0,8	2,414	-2,4	11,2

Nuevamente, las probetas con ceniza natural difieren en mayor medida respecto del patrón que las probetas con ceniza apagada. Los valores son muy parecidos a los de los pastones 6 y 10 respectivamente.

Pastones 7 y 11: Cenizas en reemplazo de cemento, con reducción de agua, con aditivo fluidificante

Los resultados para estos morteros se indican en la siguiente tabla.

Tabla 8.10: Comparación de morteros con cenizas naturales y apagadas en reemplazo de cemento, con reducción de agua, con aditivo fluidificante.

Pastón	Descripción	Volumen		Densidad relativa real		Absorción
		[cm ³]	Δ [%]		Δ [%]	[%]
1	Patrón	256,1	0,0	2,472	0,0	11,2
7	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento - Con aditivo - Reducción razón a/c	260,7	1,8	2,108	-14,7	9,6
11	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento - Con aditivo - Reducción razón a/c	257,8	0,6	2,292	-7,3	9,6

Resumen

Los resultados indican que las alternativas con cenizas apagadas tienen siempre un comportamiento bastante parecido al hormigón sin adiciones, mientras que las cenizas naturales tienen variaciones significativas. A mayor contenido de agua, los morteros con cenizas naturales se alejan más del caso patrón; a menor contenido de agua, los comportamientos se aproximan, para los parámetros hasta aquí descriptos.

8.5.2. Resistencias mecánicas.

Comparación de pastones 1, 2, 3 y 4: Alternativas con distinto porcentaje de ceniza natural.

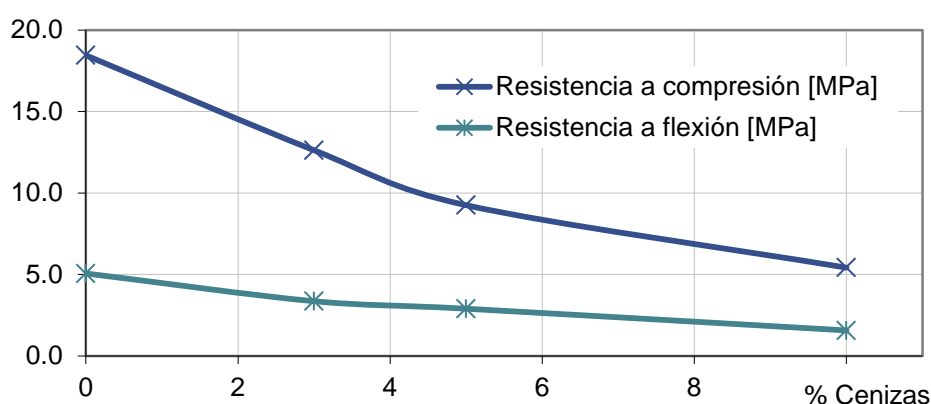
En la tabla siguiente se indican los resultados obtenidos para resistencia a compresión y a flexión en los pastones 1, 2, 3 y 4, donde se utilizó ceniza natural en reemplazo de cementos, en distintas dosis.

Tabla 8.11: Comparación de morteros con distintos porcentajes de ceniza natural.

Pastón	Descripción	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a flexión [MPa]
1	Patrón	18,4	5,1
2	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento	12,6	3,4
3	5% Ceniza natural - Reemplazo cemento	9,2	2,9
4	10% Ceniza natural - Reemplazo cemento	5,4	1,6

Organizando estos datos en forma de gráfico se pueden obtener las dos curvas siguientes, que representan los valores de las resistencias mecánicas en función del contenido de cenizas.

Figura 8.8: Resistencia a compresión y a flexión en probetas en función del contenido de cenizas naturales.



Resultan dos curvas descendentes, las cuales muestran que a medida que se incrementa el porcentaje de cenizas añadido disminuye la resistencia del mortero.

La incorporación de cenizas se hace a costas de una quita de cemento a la vez que implica un mayor requerimiento de agua (para obtener la trabajabilidad necesaria). Por este motivo, el hecho de incorporar cenizas lleva a un aumento de la razón agua/cemento (a/c), lo cual trae como consecuencia disminuciones en la resistencia. Por otro lado, como se explicó anteriormente, al incluir cenizas en estado natural se produce una reacción que da origen a morteros muy porosos. La incorporación de burbujas de aire implica una disminución de la resistencia, al sustituir éstas (que no resisten esfuerzos mecánicos) al material resistente (mortero). Por lo tanto, en principio no se puede atribuir directamente la disminución de la resistencia a la incorporación de las cenizas, determinar si es un efecto indirecto de este reemplazo, o una combinación de ambos.

Comparación de pastones 1, 2, 5, 6 y 7: Alternativas que contienen igual cantidad de ceniza en estado natural.

En lo siguiente se comparan aquellos morteros que contienen 3% de cenizas en estado natural en reemplazo de cemento, con distintas cantidades de agua y aditivo, y la alternativa que contiene igual cantidad de adición en reemplazo de arena.

Tabla 8.12: Comparación de morteros con igual porcentaje de ceniza natural.

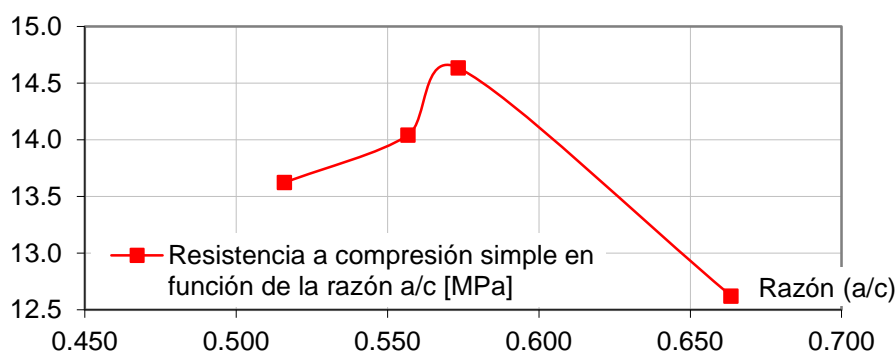
Pastón	Descripción	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a flexión [MPa]
1	Patrón	18,4	5,1
2	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento	12,6	3,4

5	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento - Con aditivo	14,6	4,5
6	3% Ceniza natural - Reemplazo arena - Con aditivo	14,0	4,1
7	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento - Con aditivo - Reducción razón a/c	13,6	3,3

En todos los casos hay importantes disminuciones de la resistencia con respecto al mortero patrón, incluso cuando se reduce la cantidad de agua (y por lo tanto la relación a/c).

En el gráfico presentado a continuación se expresa la resistencia obtenida en los ensayos en función de la razón a/c del mortero.

Figura 8.9: Resistencia de morteros con ceniza natural en función de la relación a/c.



Los resultados indican que al incorporar un 3% de cenizas en forma natural la resistencia a la compresión no sigue la tradicional ley de variación, que supone mayor resistencia mientras menor es la razón a/c. En este caso se presentan valores erráticos, sin una tendencia definida.

Comparando las alternativas con igual cantidad de cenizas y de agua, pero distinta cantidad de cemento, se tiene que la alternativa que emplea ceniza natural en reemplazo de cemento resultó con una resistencia mayor a la que usa ceniza natural en reemplazo de arena.

Comparación de pastones 1, 8, 9, 10 y 11: Alternativas que contienen cenizas apagadas.

Se comparan las alternativas que contienen 3% de cenizas apagadas, en reemplazo de cemento, con distintas cantidades de agua y aditivo, y la alternativa que contiene igual cantidad de adición en reemplazo de arena.

Tabla 8.13: Resistencias teóricas de morteros con cenizas apagadas.

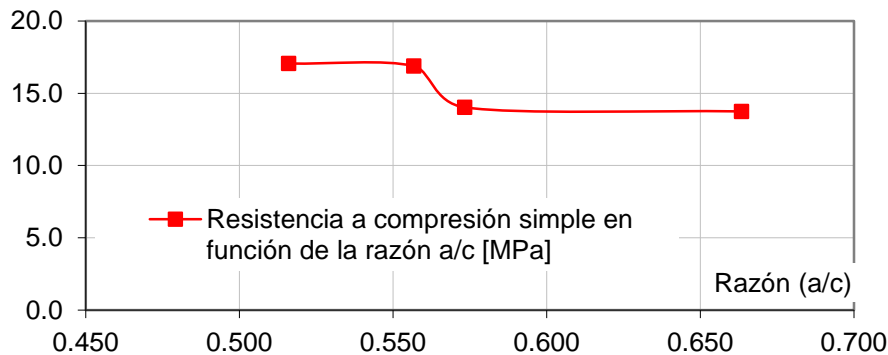
Pastón	Descripción	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a flexión [MPa]
1	Patrón	18,4	5,1
8	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento	13,7	3,8
9	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento - Con aditivo	14,0	3,7
10	3% Ceniza apagada - Reemplazo arena - Con aditivo	16,9	4,2
11	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento - Con aditivo - Reducción razón a/c	17,1	3,6

En todos los casos hay disminuciones de la resistencia con respecto al mortero patrón aunque, a diferencia de las alternativas con cenizas naturales, se logra alcanzar

resistencias cercanas a la del pastón 1. Las alternativas con mejor desempeño fueron la 10 (ceniza en reemplazo de arena), que arrojó una disminución de resistencia a la compresión de 8,5% respecto al patrón, y la 11 (ceniza en reemplazo de cemento, con reducción de agua), cuya disminución respecto al pastón 1 fue de 7,5%. Vale destacar que la alternativa con ceniza en reemplazo de arena presentó una resistencia a flexión bastante mayor al resto de los morteros adicionados.

En el gráfico presentado a continuación se expresa la resistencia obtenida en los ensayos en función de la razón a/c del mortero.

Figura 8.10: Resistencia respecto a la teórica, en función de la relación a/c, para morteros con cenizas apagadas.



Se observa una relación entre la razón a/c y la resistencia a la compresión desarrollada por los morteros, obteniéndose un aumento de esta última a medida que disminuye la relación indicada. Aun así, la curva que representa esta tendencia no tiene la misma forma que la tradicional ley de variación, representada por el ábaco antes incluido.

Con respecto a las alternativas 9 y 10, que contienen igual cantidad de agua y cenizas, pero distintas cantidades de cemento, los resultados muestran que la alternativa que emplea ceniza apagada en reemplazo de cemento resultó con una resistencia menor a la que usa ceniza natural en reemplazo de arena.

Comparación de pastones 2 y 8, 5 y 9, 6 y 10, 7 y 11: Alternativas con cenizas naturales y alternativas con cenizas apagadas.

Estas alternativas tienen dosificaciones iguales, siendo una de ellas con cenizas naturales y otra con cenizas apagadas.

Pastones 2 y 8: Cenizas en reemplazo de cemento, con agua agregada.

Los resultados para estos morteros se indican en la siguiente tabla.

Tabla 8.14: Resistencias de morteros con cenizas en reemplazo de cemento, sin agua agregada, con aditivo fluidificante.

Pastón	Descripción	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a flexión [MPa]
1	Patrón	18,4	5,1
2	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento	12,6	3,4
8	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento	13,7	3,8

Si bien ambas alternativas presentan una importante disminución de las resistencias con respecto al mortero patrón, la alternativa con ceniza apagada presenta una resistencia a compresión 8,0% mayor a la que contiene ceniza natural y una resistencia a flexión 10,5% por encima de esta última.

Pastones 5 y 9: Cenizas en reemplazo de cemento, sin agua agregada, con aditivo fluidificante.

Los resultados para estos morteros se indican en la siguiente tabla.

Tabla 8.15: Resistencias de morteros con cenizas en reemplazo de cemento, si agua agregada, con aditivo fluidificante.

Pastón	Descripción	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a flexión [MPa]
1	Patrón	18,4	5,1
5	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento – Con aditivo	14,6	4,5
9	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento – Con aditivo	14,0	3,7

Contrariamente a la comparación anterior, en este caso la alternativa con ceniza natural arroja resistencias mayores a la que contiene ceniza apagada, si bien la diferencia es sólo del 4,1% a compresión y 17,8% para flexión. Nuevamente, ambas se distancian del patrón en porcentajes considerables.

Pastones 6 y 10: Cenizas en reemplazo de arena, sin agua agregada, con aditivo fluidificante.

Los resultados para estos morteros se indican en la siguiente tabla.

Tabla 8.16: Resistencias de morteros con cenizas en reemplazo de arena.

Pastón	Descripción	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a flexión [MPa]
1	Patrón	18,4	5,1
6	3% Ceniza natural - Reemplazo arena – Con aditivo	14,0	4,1
10	3% Ceniza apagada - Reemplazo arena – Con aditivo	16,9	4,2

La resistencia a compresión de las probetas con ceniza apagada supera en 17,2% a las de ceniza natural y están apenas por debajo del patrón. Respecto a flexión, ambas alternativas arrojan el mismo valor, lo que implica una mayor relación entre resistencia a flexión y a compresión por parte de las probetas con ceniza natural.

Pastones 7 y 11: Cenizas en reemplazo de cemento, con reducción de agua, con aditivo fluidificante.

Los resultados para estos morteros se indican en la siguiente tabla.

Tabla 8.17: Resistencias de morteros con cenizas en reemplazo de cemento, con reducción de agua, con aditivo fluidificante.

Pastón	Descripción	Resistencia a compresión [MPa]	Resistencia a flexión [MPa]
1	Patrón	18,4	5,1
7	3% Ceniza natural - Reemplazo cemento - Con aditivo - Reducción razón a/c	13,6	3,3
11	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento - Con aditivo - Reducción razón a/c	17,1	3,6

Este último caso es el que presenta mayor disparidad entre los pastones con ceniza natural y con ceniza apagada. Además es el que presenta una alternativa, la 11, con mayor cercanía a la resistencia a compresión desarrollada por el patrón.

Resumen

Los resultados indican que las alternativas con cenizas apagadas presentan un mejor comportamiento, respecto a la resistencia a compresión, que las probetas con cenizas naturales. Esto se entiende como la existencia de cierta relación entre la razón a/c y dicha resistencia y, en general, mayores valores para dosificaciones similares. Por el contrario, las alternativas con ceniza en estado natural arrojan resistencias a flexión mayores a las que contienen cenizas apagadas, lo cual se traduce en mejores relaciones entre resistencia a compresión y resistencia a flexión. Todas las alternativas resultaron con resistencias considerablemente menores que la del patrón, siendo los pastones 10 y 11 los que presentaron resistencias a compresión más cercanas al 1.

8.5.3. Selección de alternativas.

Atendiendo a los resultados obtenidos y las observaciones antes realizadas, se puede decir que las alternativas con cenizas apagadas presentan comportamientos más parecidos al patrón que las alternativas con cenizas naturales. Esto se da tanto para las variaciones volumétricas, densidades y absorciones como para las resistencias a compresión, presentando mayores diferencias para flexión.

Dentro de las alternativas con cenizas apagadas, las que más permiten acercarse al patrón, en cuanto a los parámetros medidos, son las alternativas 10 (cenizas en reemplazo de arena, sin agua agregada y con aditivo fluidificante) y 11 (cenizas en reemplazo de cemento, con disminución de agua y aditivo fluidificante).

Por estos motivos se decidió desarrollar dos nuevas alternativas en forma de hormigones, basadas en los morteros 10 y 11, para medir los parámetros de resistencia y durabilidad que exige el Reglamento CIRSOC 201.

9. HORMIGONES DEFINITIVOS.

Vistos los efectos negativos de la inclusión de las cenizas en los morteros se planteó la idea de lograr, mediante hormigones adicionados, prestaciones similares a un hormigón estructural estándar.

Este hormigón de referencia se consideró con una resistencia a la compresión de 25 MPa (medida a los 28 días de edad), esto es, tipo H-25 y con un asentamiento de 10 cm en el cono de Abrams. Se lo denominó "Hormigón Patrón 1".

En este capítulo se describirán los ensayos realizados y los resultados obtenidos sobre hormigones dosificados en base a la selección de alternativas antes indicadas. Las premisas con las que se elaboraron éstos fueron:

- Hormigón A: 3% de cenizas apagadas en reemplazo de cemento, con reducción de la relación a/c (12% de reducción de agua respecto al Patrón 1) e incorporación de aditivo fluidificante.
- Hormigón B: 3% de cenizas apagadas en reemplazo de arena, con reducción de la relación a/c (12% de reducción de agua respecto al Patrón 1) e incorporación de aditivo fluidificante.

Además se elaboró un "Hormigón Patrón 2" con 12% de reducción de agua respecto al Patrón 1 e incorporación de aditivo fluidificante, pero sin la inclusión de cenizas. El objetivo de éste fue medir las variaciones que implicaban la incorporación de las cenizas respecto a un hormigón de similar dosificación, pero sin adición.

9.1. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO.

9.1.1. Materiales.

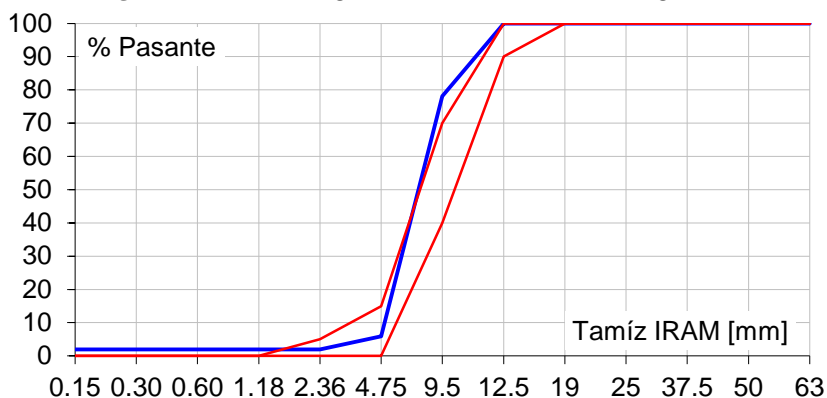
A continuación se detallan los materiales utilizados para la elaboración de los hormigones, junto a sus características principales.

- Cemento Portland Compuesto CPC 40 Loma Negra.
- Árido grueso: Binder, cuyas características se presentan en la tabla y gráfico siguientes.

Tabla 9.1: Características del árido grueso.

Granulometría	
Tamiz IRAM [mm]	Pasante [%]
63	100,0
50	100,0
37,5	100,0
25	100,0
19	100,0
12,5	100,0
9,5	78,1
4,75	5,9
2,36	2,0
Módulo de fineza	6,06
Densidad relativa real	2,67
Absorción [%]	0,88

Figura 9.1: Curva granulométrica del árido grueso.

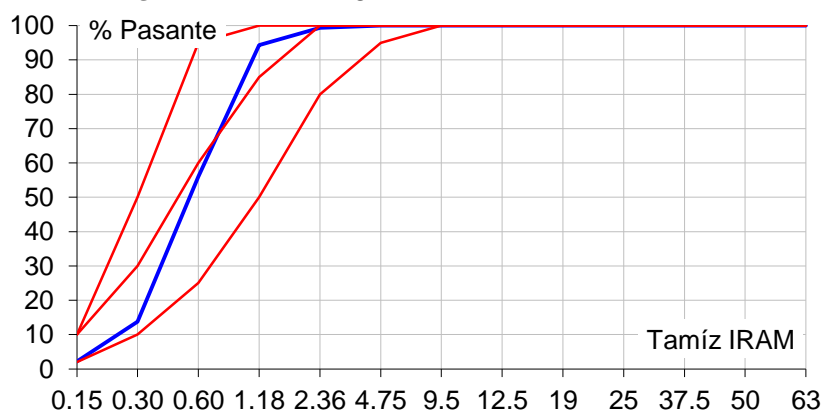


- Árido fino: Arena silíceo natural, cuyas características se presentan en la tabla y gráfico siguientes.

Tabla 9.2: Características del árido fino.

Granulometría	
Tamiz IRAM [mm]	Pasante [%]
63	100,0
50	100,0
37,5	99,3
25	94,3
19	56,0
12,5	13,7
9,5	2,2
4,75	2,34
2,36	2,66
Módulo de fineza	0,40
Densidad relativa real	100,0
Absorción [%]	100,0

Figura 9.2: Curva granulométrica del árido fino.



- Agua, de red.
- Cenizas de filtro, en estado apagado. Origen: Metal Veneta S.A.
- Aditivo Sikament S-Plus, reductor de agua de alto rango.

9.1.2. Procedimiento.

La elaboración de los hormigones comenzó la dosificación teórica racional. Luego, antes de la realización de cada pastón se procedió a determinar la humedad de los áridos que se utilizarían y corregir la dosificación teórica. Posteriormente, el procedimiento de trabajo fue el siguiente:

- 1) Preparación de los moldes de probetas y pesaje de materiales.

Figura 9.3: Pesado de materiales.



- 2) Incorporación a la mezcladora de una parte de agua, el árido grueso y el árido fino. Mezclado durante 1 min.
- 3) Incorporación del cemento y del agua restante. Mezclado durante 1 min.
- 4) Incorporación de las cenizas, cuando correspondió. Mezclado durante 1 min.
- 5) Incorporación del aditivo, cuando correspondió. Mezclado durante 1 min.
- 6) Volcado del hormigón sobre la bandeja metálica. Homogeneización mediante mezclado manual.
- 7) Medición de asentamiento, densidad en estado fresco y contenido de aire.
- 8) Moldeo de probetas cilíndricas (8 probetas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura y 3 probetas de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura), y de bloques cúbicos (para extracción de testigos para ensayo de lixiviación) cuando fuera requerido.

Figura 9.4: Probetas del Pastón A.



Las probetas y bloques se dispusieron en ambiente a 23°C y cubiertos con nylon para evitar la pérdida de agua hasta 24 hs luego del moldeo. Luego se desmoldaron e identificaron según el procedimiento interno del Laboratorio y se colocaron en cámara húmeda hasta el momento de los ensayos en estado endurecido.

Figura 9.5: Probetas en piletas de curado.



9.2. DOSIFICACIONES.

Se presentan las dosificaciones de los cuatro pastones realizados. Como se mencionó anteriormente, dos de ellos corresponden a las alternativas a evaluar, con contenido de cenizas, y los otros dos corresponden a patrones, sin cenizas.

Tabla 9.3: Dosificaciones de los hormigones definitivos.

Pastón	A	B	Patrón 1	Patrón 2
Descripción	3% de cenizas apagadas Reemplazo cemento Reducción razón a/c Con aditivo fluidificante	3% de cenizas apagadas Reemplazo arena Reducción razón a/c Con aditivo fluidificante	Hormigón H-25	Reducción razón a/c Con aditivo fluidificante
Binder [kg/m ³]	1028,6	1028,6	1053,2	1046,3
Arena Paraná [kg/m ³]	742,1	742,1	759,8	754,8
Cemento CPC 40 Loma Negra [kg/m ³]	370,6	382,1	382,1	382,1
Agua [kg/m ³]	172,5	172,5	196,0	172,5
Cenizas Metal Veneta [kg/m ³]	11,5	11,5	0,0	0,0
Aditivo Sikament Plus [kg/m ³]	3,7	4,0	0,0	5,0
Relación a/c	0,465	0,451	0,513	0,451
Relación a/mc	0,451	0,438	0,513	0,451
Asentamiento teórico [cm]	10,0	10,0	10,0	10,0
Densidad teórica [kg/m ³]	2329,0	2340,8	2391,1	2360,7

9.3. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO.

9.3.1. Procedimiento.

Se midieron el asentamiento mediante, según "Norma IRAM: Hormigón fresco de cemento portland. Método de ensayo de la consistencia utilizando el tronco de cono"; la densidad en estado fresco, según "Norma IRAM 1562: Hormigón fresco de cemento. Método para la determinación de la densidad (masa de la unidad de

volumen) y el cálculo del rendimiento y del contenido de aire (gravimétrico)”; y el contenido de aire utilizando el aparato de Washington, según “Norma IRAM 1602-1: Hormigón de cemento portland. Método por presión para la determinación del contenido de aire en mezclas frescas de hormigones y morteros - Método A”).

Figura 9.6: Medición de asentamiento mediante cono de Abrams.



Figura 9.7: Determinación de la densidad en estado fresco.



Figura 9.8: Medición del contenido de aire.



9.3.2. Instrumental.

Para el desarrollo de estos ensayos se utilizaron los siguientes dispositivos:

- Cono de Abrams y varilla de punta roma.
- Cinta métrica.
- Aparato de Washington.

9.3.3. Resultados.

Los resultados obtenidos se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 9.4: Propiedades en estado fresco de los hormigones definitivos.

Pastón	A	B	Patrón 1	Patrón 2
Descripción	3% de cenizas apagadas Reemplazo cemento Reducción razón a/c Con aditivo fluidificante	3% de cenizas apagadas Reemplazo arena Reducción razón a/c Con aditivo fluidificante	Hormigón H-25	Reducción razón a/c Con aditivo fluidificante
Densidad [kg/m ³]	2323,1	2307,0	2329,4	2375,8
Asentamiento [cm]	10,0	13,0	9,0	10,0
Contenido de aire [%]	4,0%	3,0%	3,5%	3,5%

9.4. RESISTENCIA A COMPRESIÓN.

La resistencia a compresión simple ha sido históricamente el parámetro de mayor importancia del hormigón, interviniendo en todos los cálculos de estructuras compuestas de este material. Se la define como la máxima carga de compresión por unidad de área que puede soportar un material sin romperse. Las investigaciones de D.A. Abrams le permitieron concluir que, para un determinado agregado y tipo de cemento, la resistencia depende solo de la relación agua/cemento (a/c) de la mezcla.

De acuerdo al Reglamento CIRSOC 201 se deben realizar ensayos de resistencia de rotura a la compresión utilizando probetas cilíndricas normales de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. La edad de ensayo debe ser la misma de diseño. Si todas las partículas del agregado grueso que se utiliza para elaborar el hormigón pasan por el tamiz de 26,5 mm, se puede determinar su resistencia de rotura a la compresión por ensayo de probetas cilíndricas normales de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura y no se debe efectuar corrección de los resultados por tamaño de la probeta.

9.4.1. Procedimiento.

Para este ensayo se confeccionaron, con cada pastón, 8 probetas cilíndricas de 10cm de diámetro y 20cm de altura. Se ensayaron a 7 días (2 probetas por pastón), a 28 días (4 probetas por pastón) y a 90 días (2 probetas por pastón). Las probetas se llenaron según “Norma IRAM 1534: Hormigón. Preparación y curado de probetas en laboratorio para ensayos de compresión y de tracción por compresión diametral”.

Figura 9.9: Probeta encabezada y colocada en la prensa.



Figura 9.10: Rotura de probeta por compresión simple.



Para cada probeta, el ensayo de compresión simple se realizó de acuerdo “Norma IRAM 1546: Hormigón de cemento. Método de ensayo de compresión”. El procedimiento fue el siguiente:

- 1) Se encabezaron las probetas.
- 2) Se midieron las dimensiones geométricas: Diámetro y altura de cada una.
- 3) Se aplicó carga de compresión hasta la rotura de cada probeta.

9.4.2. Instrumental.

Para el desarrollo de estos ensayos se utilizaron los siguientes dispositivos:

- Calibre (Precisión: 0,1mm).
- Prensa Ibertest (Capacidad máxima: 2000kN; Precisión: 0,1kN).

9.4.3. Resultados.

Los promedios de los resultados de las probetas individuales, para cada uno de los casos mencionados, se indican en la tabla presentada a continuación.

Tabla 9.5: Resistencia a compresión de hormigones definitivos.

Pastón	A	B	Patrón 1	Patrón 2
Descripción	3% de cenizas apagadas Reemplazo cemento Reducción razón a/c Con aditivo fluidificante	3% de cenizas apagadas Reemplazo arena Reducción razón a/c Con aditivo fluidificante	Hormigón H-25	Reducción razón a/c Con aditivo fluidificante
Resistencia a compresión (7 días) [MPa]	20,5	24,6	20,4	26,3
Resistencia a compresión (28 días) [MPa]	21,3	25,0	26,2	32,4
Resistencia a compresión (90 días) [MPa]	20,2	28,2	30,8	33,0

9.5. ENSAYOS DE DURABILIDAD.

Se entiende por durabilidad del hormigón a la capacidad del mismo de soportar la acción de agentes físicos y químicos sin deteriorarse. Los ensayos de durabilidad intentan simular las condiciones ambientales agresivas que pudieran sufrir los hormigones durante su vida útil y producirle daños.

Actualmente, ensayos que se realizan en forma más habitual son el de absorción capilar y el de penetración de agua por presión. Éstos se basan en el concepto de que las sustancias agresivas ingresan a la matriz del hormigón a través de sus poros, utilizando como medio el agua. Por lo tanto se establecen ciertas restricciones respecto al ingreso de agua, especialmente cuando el medio al que está sometida una estructura contiene sustancias potencialmente perjudiciales para el material. Por otro lado, tal como se expresó en el Capítulo 5, una de las aplicaciones que suelen tener algunas adiciones minerales (especialmente las puzolanas) es como inhibidores de la reacción álcali – árido.

En base a lo expresado, se realizaron los ensayos de absorción capilar y de penetración de agua en probetas cilíndricas de los pastones A, B, Patrón 1 y Patrón 2 y se confeccionaron probetas prismáticas para la realización del ensayo álcali – árido.

9.5.1. Absorción capilar.

La succión capilar es el fenómeno por el cual un líquido, a presión menor que la atmosférica, es absorbido por un medio poroso, esto es, asciende a través de su red de poros. Este ensayo se llevó a cabo de acuerdo a la "Norma IRAM 1871: Hormigón. Método de ensayo para determinar la capacidad y la velocidad de succión capilar de agua del hormigón endurecido". La metodología de esta norma permite calcular éstos parámetros a través del incremento de peso de una probeta en contacto con agua a través de su base.

Procedimiento.

El ensayo se realizó sobre probetas cilíndricas de 15cm de diámetro y 5cm de altura, de acuerdo al procedimiento que indica la citada Norma, el cual se describe a continuación. La edad de los hormigones al momento del ensayo era de 28 días. De cada pastón (Patrón 1, Patrón 2, A y B) se ensayaron tres probetas.

1) De cada probeta cilíndrica de 15cm de diámetro, cuya altura original era 30cm, se extrajo una feta de 5cm de alto, cortándola con un disco diamantado. Se aseguró que las caras superior e inferior quedaran lisas y paralelas.

2) Se colocaron los discos en estufa a 50°C hasta peso constante, proceso que implicó aproximadamente 7 días.

3) Una vez retiradas las probetas de la estufa, se colocaron en bolsas plásticas (para evitar el ingreso de humedad) y se dejaron enfriar. Luego se impermeabilizó toda la superficie lateral de cada una, cubriéndola con pintura impermeable. Se volvieron a resguardar de la humedad colocándolas en bolsas plásticas.

Figura 9.11: Discos de hormigón preparados para el ensayo de succión capilar.



4) Una vez seca la pintura se pesaron, obteniéndose el peso seco inicial.

5) Luego colocaron en la bandeja plástica de ensayo, distancias 3mm del fondo de la misma a través de un separador de vidrio y controlando el nivel de la superficie superior. Se colocó agua destilada hasta alcanzar la mitad de la altura de las probetas y se colocó la tapa de la bandeja. Se dio comienzo al tiempo de ensayo.

6) Se registraron los pesos de cada probeta a los tiempos de 30 minutos, 1 hora, 2, 3, 4, 5, 6 y 24 horas, y luego cada 24 horas hasta obtener peso constante (aproximadamente a los 5 días de iniciado).

Figura 9.12 Dispositivo de ensayo de succión capilar.



Instrumental.

El instrumental utilizado para desarrollar este ensayo fue el siguiente:

- Calibre (Precisión: 0,1mm).
- Estufa .
- Balanza (Precisión: 0,1g).

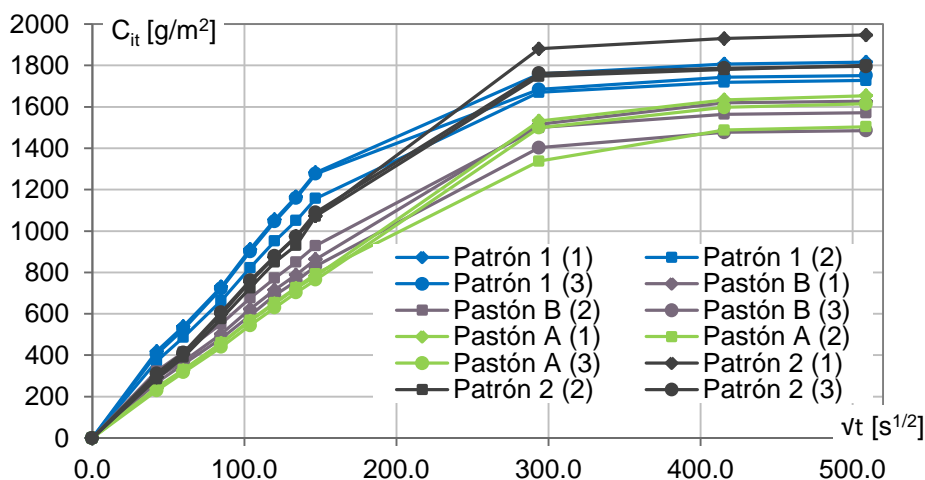
Resultados.

La norma de este ensayo indica que se deben calcular dos parámetros, los cuales se describen a continuación junto a los resultados obtenidos.

Capacidad de succión capilar (C_i).

Es la máxima cantidad de agua que puede absorber una probeta. Se calcula para cada probeta individual y luego, para cada pastón, como el promedio de los resultados de las tres probetas correspondientes. La absorción capilar, para cada probeta en cada instante de tiempo, denominada C_{it} , se calcula como el peso de agua absorbida sobre el área de la probeta, resultando en gramos por metro cuadrado. En el gráfico siguiente se presenta la absorción capilar en función del tiempo, indicando todas las mediciones realizadas para cada probeta individual.

Figura 9.13: Capacidad de succión capilar de hormigones definitivos.



En la tabla siguiente se expresan los resultados de la capacidad de succión de cada una de las probetas y luego de cada uno de los hormigones.

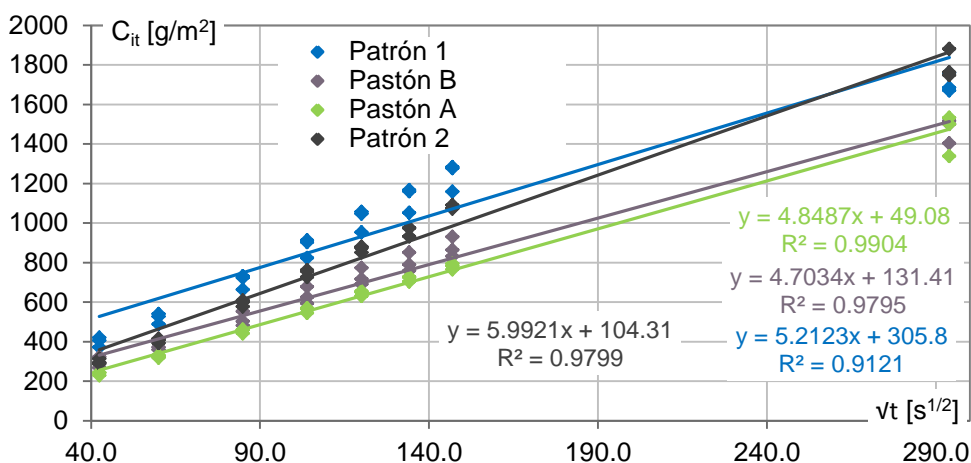
Tabla 9.6: Capacidad de succión capilar de hormigones definitivos.

Pastón	A			B		
Probeta	1	2	3	1	2	3
C_i [g/m ²]	1654,0	1504,1	1614,4	1627,2	1571,5	1485,3
C [g/m ²]	1590,8			1561,3		
Pastón	Patrón 1			Patrón 2		
Probeta	1	2	3	1	2	3
C_i [g/m ²]	1816,8	1727,8	1751,2	1947,1	1800,8	1795,9
C [g/m ²]	1765,2			1847,9		

Velocidad de succión capilar (S).

Es la tasa a la cual se absorbe el líquido. Se calcula como la pendiente de la recta de ajuste que surge de graficar, para cada pastón, todos los puntos medidos que estén comprendidos entre el 10% y el 90% de la capacidad de succión capilar. En el gráfico siguiente se presentan las absorciones capilares en función de la raíz cuadrada del tiempo, para el grupo de las tres probetas que componen cada pastón, y se agrega la recta de ajuste junto a su ecuación.

Figura 9.14: Velocidad de succión capilar de hormigones definitivos.



De las ecuaciones de las rectas se obtienen las pendientes, las cuales, de acuerdo a la norma del ensayo, corresponden a la velocidad de succión capilar de cada hormigón. Los resultados se indican en la tabla mostrada a continuación.

Tabla 9.7: Velocidad de succión capilar de hormigones definitivos.

Pastón	A	B	Patrón 1	Patrón 2
S [g/s ^{1/2} m ²]	4,8	4,7	5,2	6,0

9.5.2. Penetración de agua.

Este ensayo se realizó según la “Norma IRAM 1554: Hormigón de cemento portland. Método de determinación de la penetración de agua a presión en el hormigón endurecido”.

Procedimiento.

El ensayo se realizó sobre probetas cilíndricas de 15cm de diámetro y 15cm de altura, de acuerdo al procedimiento que indica la citada Norma. La edad de los hormigones al momento del ensayo era de 28 días. De cada pastón (Patrón 1, Patrón 2, A y B) se ensayaron tres probetas.

1) De cada probeta cilíndrica de 15cm de diámetro, cuya altura original era 30cm, se extrajo una porción de 15cm de alto, cortándola con un disco diamantado. Se aseguró que las caras superior e inferior quedaran lisas y paralelas.

2) En la cara de ensayo (cara superior) se marcó un círculo de 7,5cm concéntrico con el eje de la probeta y se impermeabilizó la superficie externa al mismo.

Figura 9.15: Probetas de hormigón preparados para el ensayo de penetración de agua.



3) Se colocaron las probetas en el dispositivo de ensayo, donde se les colocó una tapa metálica inferior y otra superior conectada a una manguera por donde se transmitiría el agua a presión.

Figura 9.16: Dispositivo de ensayo de penetración de agua.



4) Se inyectó agua a una presión de 0,1MPa durante las primeras 48hs de ensayo. Luego, durante otras 24hs se aumentó la presión a 0,3MPa y durante las siguientes y últimas 24hs se introdujo el líquido a una presión de 0,7MPa.

5) Al finalizar el último ciclo se retiraron las probetas del equipo y se las partió aplicando una carga en dirección radial. Se tomó una fotografía de las dos mitades de cada probeta.

6) Mediante una herramienta gráfica (AutoCAD) se analizaron las imágenes de las probetas, determinando y midiendo el frente de penetración de agua.





Instrumental.

- Prensa Ibertest (Capacidad máxima: 2000kN; Precisión: 0,1kN).
- Dispositivo de ensayo: compresor de aire, tubo con agua, juego de mangueras y llaves de paso, manómetro, tapas y fondos.

Resultados.

Se midieron las dos mitades de cada una de las tres probetas que componían cada pastón. En cada una de éstas se midió el frente de penetración en el ancho de la zona no impermeabilizada, en ordenadas separadas 5mm. Para cada pastón se calculó el promedio de las mediciones y se determinó el valor máximo de penetración. En la siguiente tabla se presenta el aspecto de una probeta de cada pastón, el valor máximo medido para dicho pastón, y el promedio de penetraciones de todas las probetas que componían al mismo.

Tabla 9.8: Penetración de agua en hormigones definitivos.

Pastón	Imagen	Promedio de las penetraciones [mm]	Penetración máxima [mm]
A		55,0	99,8
B		27,0	51,9
Patrón 1		15,4	27,5
Patrón 2		11,2	21,2

9.5.3. Reacción álcali – agregado.

La reacción álcali – agregado o álcali – sílice, conocida con las siglas RAS, se produce entre ciertos tipos de áridos y los álcalis del cemento. Para que ocurra esta reacción es necesario que el agregado (fino o grueso) contenga cierto porcentaje de sílice potencialmente reactiva y que ocurra la presencia de agua. La RAS se caracteriza por generar un gel expansivo en el interior de los hormigones. Éstos, en su proceso de expansión, generan fuerzas de tracción que el hormigón no puede resistir y llevan a una fisuración importante del material.

Para determinar si un árido es potencialmente reactivo se debe realizar un análisis petrográfico. De obtener resultados positivos, esto es, detectar minerales perjudiciales, se debe proceder a ensayar una muestra del agregado mediante el método acelerado de la barra de mortero. Cuando se prevea que pueda presentarse este tipo de situaciones existen cinco soluciones posibles:

- Cambiar el árido, por uno no reactivo.
- Utilizar cemento resistente a la RAS.
- Utilizar un cemento de uso general que demuestre ser efectivo para inhibir la RAS con los agregados en estudio.
 - Utilizar alguna adición mineral que demuestre ser efectiva para inhibir la RAS con los agregados en estudio.
 - Utilizar un inhibidor químico de la RAS de probada eficacia.

Para el caso del presente estudio se intentará determinar si las cenizas de filtro pueden enmarcarse dentro de la cuarta solución posible, estos es, si actúan como adición mineral activa frente a la RAS. Para ello se trabajó con un árido fino de conocida reactividad, estudiando anteriormente en el Laboratorio de Estructuras. Los ensayos se realizaron según la “Norma IRAM 1674. Agregados. Determinación de la reactividad alcalina potencial. Método acelerado de la barra de mortero”.

Materiales.

Los materiales utilizados fueron:

- Cemento Portland Compuesto CPC 40 Loma Negra.
- Arena silíceo natural reactiva, con granulometría según la citada norma.
- Agua, de red.
- Cenizas de filtro, en estado apagado.
- Solución de hidróxido de sodio.

Dosificaciones.

Se prepararon tres morteros con diferentes características: un mortero patrón, sin cenizas, otro con cenizas en reemplazo de cemento y el último cenizas en reemplazo de arena. Con cada mortero se confeccionaron tres probetas prismáticas. Las dosificaciones se basaron en la Norma y se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 9.9: Dosificación de morteros para ensayo de RAS.

Pastón	Descripción	Dosificación					Relación a/c
		Arena	Cemento	Agua	Cenizas		
		[g]	[g]	[g]	%	[g]	
1	Patrón	990,0	440,0	206,8	0,0	0,0	0,47
A	3% Ceniza apagada - Reemplazo cemento	990,0	426,8	206,8	3,0	13,2	0,47
B	3% Ceniza apagada - Reemplazo arena	976,8	440,0	213,0	3,0	13,2	0,47

Instrumental.

El instrumental utilizado para realizar el ensayo de RAS fue el siguiente:

- Balanza (Precisión: 0,1g).
- Tamices de aberturas cuadradas y tela de alambre tejido (Aberturas de malla: 4,75mm; 2,36mm; 1,18mm; 600 μ m; 300 μ m; 150 μ m).
- Mezcladora eléctrica (Capacidad: 5 litros).
- Comparador de longitudes (Precisión: 0,0025mm).
- Estufa.

Procedimiento.

El procedimiento fue el siguiente:

- 1) Se tamizó y pesó la arena para obtener la granulometría dada por la Norma.
- 2) Se pesaron el resto de los materiales y se mezclaron de la forma y en el tiempo indicados por la Norma.
- 3) Se moldearon las probetas, llenado en dos capas y compactando con pisón. Se conservaron a 25°C resguardadas de la pérdida de humedad hasta el desmolde.

Figura 9.17: Moldeo de probetas para ensayo de RAS.



- 4) Luego de 24hs se desmoldaron y midió su longitud preliminar. Se las colocó en un recipiente con agua, dentro de la estufa a 80°C durante 24hs.
- 5) Cumplido este plazo se retiraron del agua y se realizó la medición de la longitud inicial. Acto seguido se colocaron las probetas en un recipiente con solución de hidróxido de sodio, dentro de la estufa, a 80°C.

Figura 9.18: Ensayo de RAS.

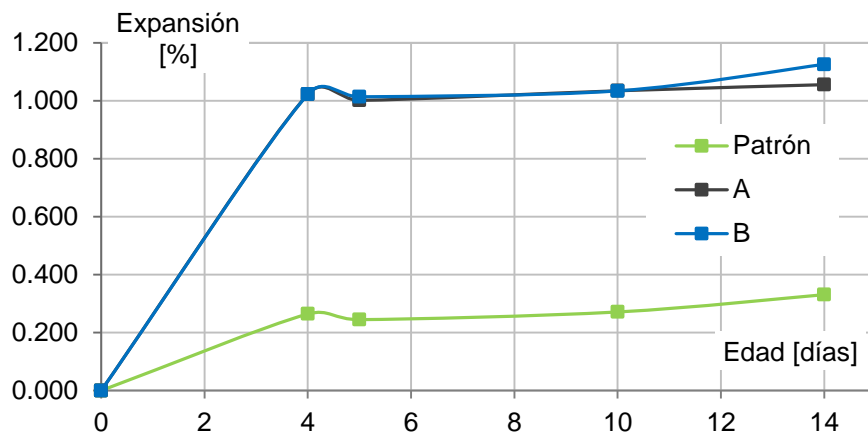


6) Hasta 14 días luego de la lectura inicial, se realizaron medidas de la longitud de cada probeta en forma periódica.

Resultados.

En el siguiente gráfico se presentan los resultados de las expansiones para los distintos pastones; se muestran los promedios de las tres probetas, en función de la edad de las mismas.

Figura 9.19: Reacción álcali – agregado.



La expansión a los 16 días de edad (esto es, 14 días después de colocadas las probetas en la solución de hidróxido de sodio) resultó:

Tabla 9.10: Reacción álcali – agregado.

Pastón	Descripción	Expansión a 16 días [%]
Patrón	Sin ceniza, con arena reactiva.	0,331
A	3% de ceniza apagada en reemplazo de cemento, con arena reactiva.	1,056
B	3% de ceniza apagada en reemplazo de arena, con arena reactiva.	1,126

Las probetas de los tres pastones presentaron fisuras al finalizar el ensayo. Las fisuras en los elementos de los pastones A y B fueron de mayor longitud y apertura que las observadas en las probetas del patrón, como puede observarse en las imágenes siguientes.

Figura 9.20: Reacción álcali – agregado. Pastón patrón.

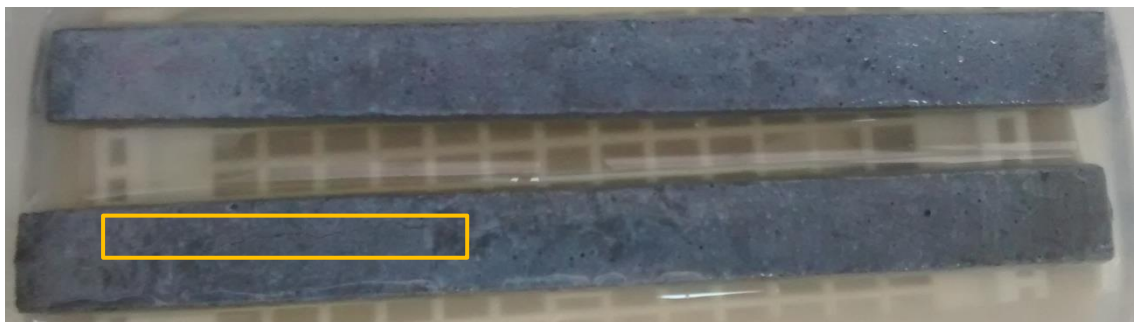
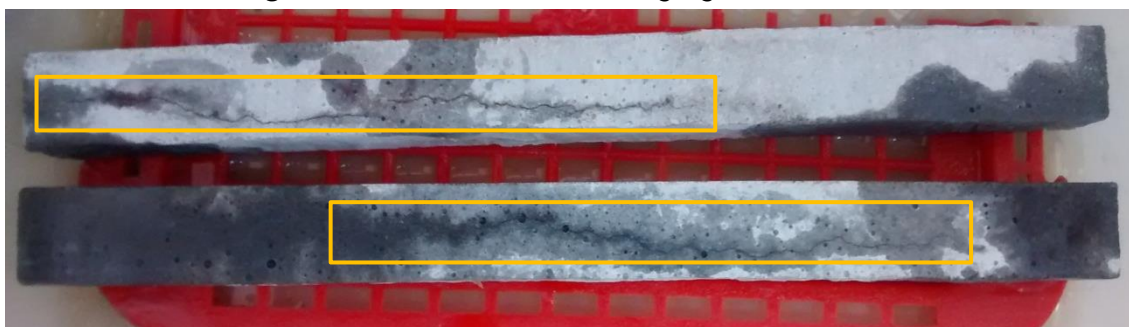


Figura 9.21: Reacción álcali – agregado. Pastón A.



Figura 9.22: Reacción álcali – agregado. Pastón B.



9.6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En lo siguiente se realiza un análisis de los resultados obtenidos, comparando con los mismos con los objetivos y las disposiciones reglamentarias e intentando interpretar el origen de los mismos.

9.6.1. Propiedades en estado fresco.

Densidad en estado fresco.

Los pastones con cenizas (A y B) presentaron densidades algo menores que los patrones, aunque siempre dentro de valores estándar para hormigones de densidad normal. Esta pequeña disminución puede asociarse a la incorporación de las cenizas, que tienen un peso específico bajo en comparación a los otros materiales.

Asentamiento.

En la elaboración de los pastones se ajustó la fluidez de los hormigones (excepto del Patrón 1) con la adición de aditivo fluidificante. El pastón A (cenizas en reemplazo de cemento) requirió una dosis de aditivo 1,00% del peso de cemento para obtener el asentamiento planificado, o 0,97% de la cantidad de cemento y cenizas. El pastón B requirió un 1,05% de aditivo del peso de cemento, o 1,02% en relación a la cantidad de cemento y cenizas. El Patrón 2 necesitó el 1,31% del peso de cemento.

La teoría indica que para lograr un mismo asentamiento, aquel hormigón que tenga mayor superficie específica en sus componentes requerirá mayor cantidad de agua que uno que tenga menor superficie específica.

En coherencia con esto, al reemplazar cemento por cenizas (Pastón A), que a partir de su granulometría surge que tienen menor superficie específica que el

cemento, se necesitó menor cantidad de aditivo fluidificante para lograr el mismo asentamiento con un hormigón sin adición (Patrón 2).

Al reemplazar arena por cenizas (Pastón B) se está aumentando la superficie específica, por lo que también se han obtenido resultados coherentes, ya que la cantidad necesaria de aditivo para lograr el asentamiento requerido fue mayor que cuando se reemplazó cemento (Pastón A).

Contenido de aire.

Los contenidos de aire en el hormigón fresco arrojaron valores iguales (3,5%) para los pastones patrones. Para los hormigones con cenizas se obtuvieron valores por encima (4,0% para el A) y por debajo (3,0% para el B). Por lo tanto, en principio no se puede afirmar que la incorporación de las cenizas produzca algún efecto respecto al contenido de aire de los hormigones en estado fresco.

9.6.2. Resistencia a compresión.

En la tabla siguiente se resumen la resistencia a compresión a los 28 días de edad de los cuatro hormigones que se elaboraron y las diferencias de éstas respecto a la del Patrón 2 (Δ).

Tabla 9.11: Resistencia a compresión de hormigones definitivos.

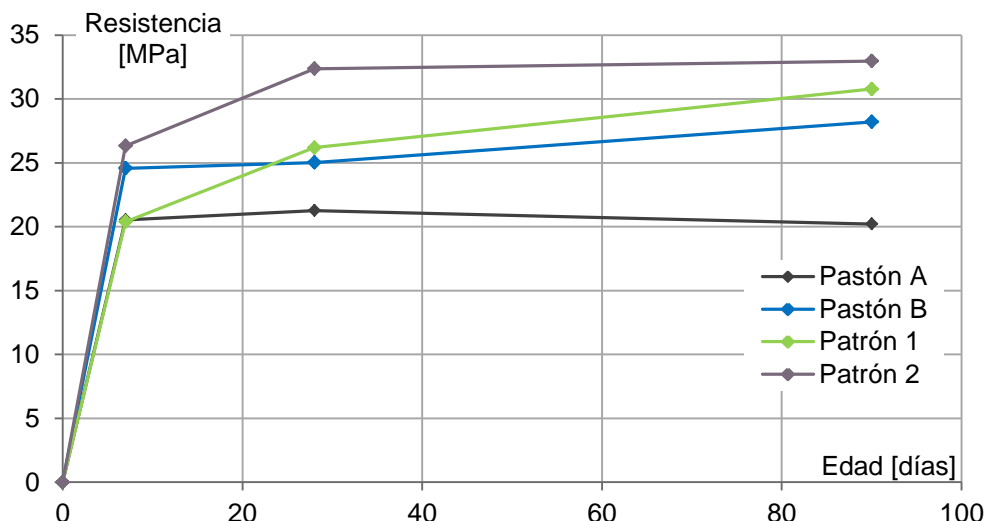
Pastón	Descripción	Resistencia a compresión [MPa]	Δ [%]
A	3% de cenizas apagadas - Reemplazo cemento - Reducción razón a/c - Con aditivo fluidificante	21,3	-34,3
B	3% de cenizas apagadas - Reemplazo arena - Reducción razón a/c - Con aditivo fluidificante	25,0	-22,7
Patrón 1	Hormigón H-25	26,2	---
Patrón 2	Reducción razón a/c - Con aditivo fluidificante	32,4	0,0

Considerando los 28 días como la edad de diseño, tal como lo indica el Reglamento CIRSOC 201, se observa que las resistencias de los hormigones con cenizas son mucho menores que la del pastón Patrón 2 (de igual relación a/c pero sin adición). Esta merma es mayor al 22,7% para el pastón B y 34,3% para el A. Las dos alternativas con cenizas incluso no alcanzan la resistencia de un hormigón H-25 (Patrón 1), aún con una razón a/c menor a éste. Por lo tanto, es posible afirmar que la incorporación de las cenizas lleva a una disminución de la resistencia a compresión y que esta adición no tiene propiedades cementicias. Las causas de esta reducción pueden interpretarse considerando diversos factores:

- En el caso del pastón A, donde la ceniza se incorpora en reemplazo del cemento, puede asociarse a un aumento de la razón a/c sumado a una disminución del tenor cemento y aumento de la superficie específica de los agregados.
 - En el caso del pastón B, donde la ceniza se incorpora en reemplazo de arena, puede asociarse al aumento de superficie específica del agregado fino sin aumento de la cantidad de pasta cementicia.
 - Para ambos casos, una mayor porosidad del hormigón ya que, aun siendo tratadas previamente (apagadas), las cenizas presentan algún grado de reacción frente al agua con generación de burbujas.
 - Ataque de las sales metálicas presentes en las cenizas sobre el hormigón.
- (Fuente: [12]).

En forma de gráfico, las evoluciones de las resistencias a compresión en función de la edad presentan curvas muy diferenciadas entre sí. Las mismas se indican en el siguiente gráfico.

Figura 9.23: Resistencia a compresión de hormigones definitivos.



En la siguiente tabla se indican las resistencias de cada pastón a las distintas edades junto a un coeficiente de resistencia. Este coeficiente representa el grado de desarrollo de la resistencia en relación a la obtenida a los 28 días.

Tabla 9.12: Coeficientes de resistencia a distintas edades para hormigones definitivos.

Pastón	Descripción	Resist. a compr. (7 días) [MPa]	Coef. de resist. (7 días)	Resist. a compr. (28 días) [MPa]	Resist. a compr. (90 días) [MPa]	Coef. de resist. (90 días)
A	3% de cenizas apagadas Reemplazo cemento Reducción razón a/c Con aditivo fluidificante	20,5	0,97	21,3	20,2	0,95
B	3% de cenizas apagadas Reemplazo arena Reducción razón a/c Con aditivo fluidificante	24,6	0,98	25,0	28,2	1,13
Patrón 1	Hormigón H-25	20,4	0,78	26,2	30,8	1,18
Patrón 2	Reducción razón a/c Con aditivo fluidificante	26,3	0,81	32,4	33,0	1,02

El Patrón 1 presenta una evolución continua de la resistencia, con un fuerte desarrollo en los primeros 7 días (78% de la característica), menor incremento hasta los 28 días y una tasa de crecimiento más pequeña aun hasta los 90 días de edad (18% mayor a la característica); resultó una curva típica de un hormigón normal.

El hormigón Patrón 2 muestra mayores resistencias iniciales (a 7 días, 81% de la característica) que el anterior, una curva paralela a la del Patrón 1 entre los 7 y los 28 días y crecimiento prácticamente nulo en la última etapa (sólo incremento del 2%); resultó una curva típica de un hormigón con aditivo superfluidificante. Se puede notar

que, si bien el Patrón 2 tiene una resistencia a 7 y a 28 días bastante mayor a la del Patrón 1, a edad avanzada ésta diferencia tiende a reducirse.

El Pastón A presenta una interesante resistencia inicial, siendo semejante a la del patrón 1 y, en consecuencia, algo menor que la del Patrón 2. El coeficiente a 7 días es de 0,97; esto es, a esta edad el hormigón A alcanzó el 97% de la resistencia presentada a los 28 días. En consecuencia, el aumento hasta la edad de diseño fue muy pequeño. A partir de allí la curva experimenta un leve descenso hasta la última medición, observándose a los 90 días una resistencia menor a la de los 28 e incluso a la de los 7 días.

En el caso del Pastón B, el coeficiente a 7 días es casi el mismo que el del Pastón A, por lo que también experimentó el mayor desarrollo de resistencia en la primera etapa; el valor obtenido fue superior al de los pastones 1 y A y algo menor al del 2. Luego, al ser su evolución menor hasta los 28 días, a esa edad presentó una resistencia levemente por debajo de la del Patrón 1 y bastante menor a la del 2. A diferencia del otro pastón que contenía cenizas, éste continuó incrementando en forma importante su capacidad de carga hasta los 90 días de edad.

El hecho de los altos coeficientes de resistencia en los primeros 7 días por parte de los pastones A y B puede explicarse debido a la presencia de compuestos de aluminio y calcio en las cenizas, siendo los aluminatos cálcicos del cemento los principales responsables del desarrollo de resistencias iniciales en los hormigones.

9.6.3. Ensayos de durabilidad.

Absorción capilar.

Los resultados obtenidos muestran mayores capacidades y velocidades de succión capilar por parte de los hormigones patrones con respecto a los que contienen cenizas. Todas las curvas presentan la forma sugerida por la norma de referencia. Respecto a las disposiciones reglamentarias, ninguno de los hormigones que se elaboraron cumple con el requisito de durabilidad para exposiciones a ambientes húmedos o sumergidos (con cloruros de origen distinto al marino), marino, con ciclos de congelación y deshielo, o con agresividad química. Todas superan el valor máximo de $4,0 \text{ g/m}^2\text{s}^{1/2}$ establecido para estas condiciones.

La ley de capilaridad de Jurin indica que la altura que asciende un líquido por un tubo capilar es inversamente proporcional al radio del mismo. Por lo tanto, es posible inferir que las redes capilares de los patrones son de menor diámetro que las de los hormigones con cenizas, lo cual se puede traducir en que el tamaño de los poros que dan origen a estas redes es mayor en los hormigones adicionados.

Penetración de agua.

Los resultados de este ensayo muestran que la penetración de agua es mayor en los pastones con cenizas que en los patrones, siendo el A el que mayores valores (tanto promedio como máximo) presentó.

Los hormigones patrones cumplen el requisito indicado por el Reglamento CIRSCOC 201 para estructuras destinadas a contener o conducir agua, las cuales deben tener una penetración máxima de agua igual o menor que 500mm y una media igual o menor que 30mm.

El hormigón con cenizas en reemplazo de cemento no cumple las especificaciones antes indicadas, superando ampliamente el máximo y el promedio permitidos, presentando 55,0mm de promedio y 99,8mm de máximo. Para el pastón B

se observa una penetración promedio (27,0mm) apenas por debajo del permitido y una máxima (51,9mm) levemente superior al límite establecido por el Reglamento.

Respecto a un hormigón con igual dosificación pero sin cenizas (es decir, al Patrón 2), el A arrojó valores casi 4 veces mayores mientras que el B solo 1,5 veces por encima. Por lo tanto, este aumento de penetración de agua a presión puede asociarse al incremento de porosidad que surge de la reacción de las cenizas apagadas con el agua de amasado.

Reacción álcali – árido.

Como era de esperarse, el patrón sufrió una expansión (0,331 %) por encima del límite establecido por el Reglamento (0,10%). Ambos pastones con adición, el A y el B, presentaron curvas de prácticamente iguales, y muy por encima de la alternativa sin ceniza. El alargamiento promedio de las probetas fue de 1,05% y 1,13%, esto es, más de 10 veces por encima del máximo permitido.

Los resultados indican que la incorporación de cenizas en el hormigón contribuye al desarrollo de la reacción álcali – agregado. La composición de las cenizas indica que éstas tienen importantes cantidades de álcalis (iones Na^+ y K^+), cuya incorporación a los morteros analizados puede interpretarse como la causa del aumento de la expansión.

10. CONSIDERACIONES AMBIENTALES.

En el Capítulo 7 se presentaron los análisis de las composiciones químicas de las cenizas de filtro. En los mismos se puede observar la presencia de una gran cantidad y variedad de metales pesados, este tipo de cenizas corresponden a la categoría de residuos peligrosos. Como tal, se enmarcan dentro de la Ley Nacional N°24051/92: Residuos peligrosos, y su Decreto reglamentario N°831/93. La provincia de Córdoba, a través de la Ley N° 8973, adhiere a la Ley Nacional N°24051 y sus anexos.

10.1. Definición de residuo peligroso.

La ley Nacional N° 24051 indica que se considera peligroso a todo residuo que pueda causar daño, directa o indirectamente, a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general. En particular, se consideran peligrosos los residuos indicados en el Anexo I o que posean alguna de las características enumeradas en el Anexo II de esta ley. Las disposiciones son también de aplicación a aquellos residuos peligrosos que se constituyan en insumos para otros procesos industriales, como ocurre para el caso de estas cenizas.

De las categorías sometidas a control (Anexo I de la Ley), el material tiene como constituyente a las siguientes:

Y20 Berilio, compuestos de berilio.	Y26 Cadmio, compuestos de cadmio.
Y21 Compuestos de cromo hexavalente.	Y27 Antimonio, compuestos de antimonio.
Y22 Compuestos de cobre.	Y29 Mercurio, compuestos de mercurio.
Y23 Compuestos de zinc.	Y30 Talio, compuestos de talio.
Y24 Arsénico, compuestos de arsénico.	Y31 Plomo, compuestos de plomo.
Y25 Selenio, compuestos de selenio.	

En cuanto a las características peligrosas indicadas en el Anexo II de la Ley, las cenizas presentan, o podrían presentar, las siguientes:

N° de Código	Características
H10	<i>Liberación de gases tóxicos en contacto con el aire o el agua; Sustancias o desechos que, por reacción con el aire o el agua, pueden emitir gases tóxicos en cantidades peligrosas.</i>
H11	<i>Sustancias tóxicas (con efectos retardados o crónicos): Sustancias o desechos que, de ser aspirados o ingeridos, o de penetrar en la piel pueden entrañar efectos retardados o crónicos, incluso la carcinogénesis.</i>
H12	<i>Ecotóxicos: Sustancias o desechos que, si se liberan, tienen o pueden tener efectos adversos inmediatos o retardados en el medio ambiente debido a la bioacumulación o los efectos tóxicos en los sistemas bióticos.</i>
H13	<i>Sustancias que pueden, por algún medio, después de su eliminación, dar origen a otra sustancia, por ejemplo, un producto de lixiviación, que posee alguna de las características arriba expuestas.</i>

Por su parte, el Decreto reglamentario N° 831/93, establece que en el Anexo IV del mismo se determina la forma de identificar a un residuo como peligroso, acorde a lo establecido por la ley anterior. En dicho Anexo, se indica que la identificación de un residuo como peligroso, se efectuará en base a dos procedimientos:

I) Mediante listados. Si se encuentra presente en alguno de los dos listados siguientes (indicados anteriormente por la Ley):

- a) Lista de elementos o compuestos químicos peligrosos;
- b) Lista de industria y/o procesos con alta posibilidad de producir residuos que contengan compuestos peligrosos.

II) En base a características de riesgo. De las características indicadas por el Decreto, las cenizas cumplen, o podrían cumplir, las siguientes:

- Lixiviabilidad: Con esta característica se identifican aquellos residuos que, en caso de ser dispuestos en condiciones no apropiadas, pueden originar lixiviados donde los constituyentes nocivos de dichos residuos alcancen concentraciones tóxicas. Los parámetros que componen a las cenizas cuyas concentraciones se deben determinar son los siguientes:

1) Arsénico	4) Cinc	7) Mercurio	10) Plomo
2) Bario	5) Cobre	8) Níquel	11) Selenio
3) Cadmio	6) Cromo (Total)	9) Plata	

En el Decreto se aclara que, dado que el objetivo de esta característica es regular la disposición de sólidos y semisólidos atendiendo a pautas de efectos ambientales, los parámetros a controlar no son excluyentes, considerándose el estudio de otros parámetros cuando la naturaleza del residuo lo requiera.

Las concentraciones límites y los métodos de análisis están descriptos en el Anexo VI de esta reglamentación.

- Toxicidad: Esta característica identifica aquellos residuos o a sus productos metabólicos que poseen la capacidad de, a determinadas dosis, provocar por acción química o químico-física un daño en la salud, funcional u orgánico, reversible o irreversible, luego de estar en contacto con la piel o las mucosas o de haber penetrado en el organismo por cualquier vía. Comprende a lo mencionado en el Anexo II de la ley N° 24051, código H11 y H12.

- Carcinogeneidad: Con esta característica se identifica a aquellos residuos capaces de originar cáncer.

10.2. Tratamientos posibles.

La Ley define como tratamiento de un residuo peligroso a *“cualquier método, técnica o proceso físico, químico, térmico o biológico, diseñado para cambiar la composición de cualquier residuo peligroso o modificar sus propiedades físicas, químicas o biológicas de modo de transformarlo en no peligroso, o menos peligroso o hacerlo seguro para el transporte, almacenamiento o disposición final; recuperar energía, o materiales o bien hacerlo adecuado para almacenamiento, y/o reducir su volumen”*. En base a esta definición, tanto el apagado de las cenizas como la inclusión de las mismas se constituyen en métodos aceptables para el tratamiento de este material.

Además, indica que se llama plantas de tratamiento a *“aquellas en las que se modifican las características físicas, la composición química o la actividad biológica de cualquier residuos peligros, de modo tal que se eliminan sus propiedades nocivas, o se recupere energía y/o recursos materiales, o se obtenga un residuo menos peligroso, o se lo haga susceptible de recuperación, o más seguro para su transporte o disposición final”*. En particular quedan comprendidas en este artículo todas aquellas instalaciones en las que se realicen las siguientes operaciones:

A. Operaciones que no pueden conducir a la recuperación de recursos, el reciclado, la regeneración, la reutilización directa u otros usos.

B. Operaciones que pueden conducir a la recuperación de recursos, el reciclado, la regeneración, reutilización directa y otros usos. Comprende todas las operaciones con respecto a materiales que son considerados o definidos jurídicamente

como desechos peligrosos y que de otro modo habrían sido destinados a una de las operaciones indicadas en A.

De esta manera, quien utilice las cenizas para incorporarlas al hormigón, se estará convirtiendo, a efectos legales, en una planta de tratamiento de residuos peligrosos.

Por su parte, el Decreto define algunos métodos de tratamiento de los residuos peligrosos, dentro de los cuales hay algunos que abarcan la aplicación que se pretende dar a las cenizas de filtro. Estos son:

- Encapsulación: Técnica para aislar una masa de residuos. Implica el completo revestimiento o aislación de una partícula tóxica o aglomerado de residuos mediante empleo de una sustancia distinta con el aditivo o ligante utilizado en la solidificación y estabilización.

- Estabilización: Método de tratamiento de residuos que limitan la solubilidad de los contaminantes, remueven el tóxico o su efecto tóxico y las características físicas pueden ser o no mejoradas. En este procedimiento el residuo es cambiado a una forma químicamente más estable, e incluye el uso de una reacción química para transformar el componente tóxico a un nuevo compuesto no tóxico. La solidificación también se halla comprendida en esta técnica.

- Solidificación: Método de tratamiento ideado para mejorar las características físicas y de manipuleo de un residuo, caracterizado por la producción de un bloque monolítico de residuo tratado, con elevada integridad estructural.

Esto significa que tanto el apagado como la incorporación de las cenizas al hormigón, son métodos válidos y aceptados por la legislación vigente.

10.3. Ensayos y estudios a realizar.

Como exigen la ley y el decreto citados, será necesario realizar ensayos de lixiviación sobre el hormigón, a efectos de determinar la capacidad que tiene este material de retener en su matriz a los metales pesados aportados por las cenizas.

En ese sentido, la recopilación de estudios realizados sobre otros residuos de similares características indica que el hormigón es un buen material para tratar residuos mediante la técnica de solidificación/estabilización. Por lo tanto, es de esperarse que se obtengan altas eficiencias de retención de metales pesados en ensayos de lixiviación.

Para tal objetivo, en la confección de cada pastón se dejaron preparados los cubos de 30cm de lados para extraer testigos y realizar los ensayos de lixiviación. Para estas pruebas, se ha elegido realizarlas según la "Norma IRAM 29016: Calidad ambiental. Calidad del agua. Lixiviación. Procedimiento de extracción y ensayo de integridad estructural", ya que permite el análisis de elementos monolíticos como una muestra de hormigón.

Al finalizar este informe los ensayos de lixiviación no se habían realizado por limitaciones técnico – económicas del Laboratorio, pero se espera llevarlos a cabo en un breve lapso.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

11.1. CONCLUSIONES.

Es posible afirmar que se han cumplido los objetivos específicos del trabajo, pudiendo caracterizar a las cenizas en estudio, determinar su comportamiento y obtener un panorama general de las consecuencias de introducirlas en morteros y hormigones. En base a los resultados obtenidos y las interpretaciones que se realizaron de los mismos, se pueden expresar las siguientes conclusiones:

11.1.1. Respecto a las características de las cenizas.

La composición química de las cenizas es muy variable en el tiempo, dependiendo de los materiales que se reciclen para obtener el aluminio. Aun así, todas las muestras presentan importantes concentraciones de diversos metales pesados y sales solubles en agua.

Las cenizas de filtro en estado natural (tal como se extraen del proceso) presentan una alta reactividad frente al agua. Esta reacción está caracterizada por un aumento de la temperatura y del volumen, formando un material espumoso con gran cantidad de burbujas gaseosas en su interior. Una vez que las cenizas han reaccionado con agua, al rehidratarlas presentan una actividad mucho menor.

El contenido de sales solubles de las cenizas es muy elevado y no cumple con el requisito establecido por el Reglamento CIRSOC 201.

11.1.2. Respecto al uso de las cenizas en morteros.

Respecto al uso de cenizas naturales.

Al ser incorporadas a morteros, las cenizas naturales producen importantes aumentos de volumen y de la porosidad, con consecuencias sobre la densidad, absorción y resistencia.

Cuando se utilizan cenizas naturales como sustituto de cemento, a medida que se incrementa el porcentaje reemplazado la absorción de agua por parte de las probetas aumenta y la densidad relativa real del hormigón resultante disminuye. El aumento de volumen no sigue una relación definida.

Para un mismo contenido de cenizas naturales, el aumento de volumen y de absorción crece a medida que lo hace la relación a/c. A mayor contenido de agua los morteros con cenizas naturales se alejan más del caso patrón; a menor contenido de agua, los comportamientos se aproximan. Utilizar las cenizas como reemplazo de cemento o como reemplazo de arena conduce a resultados similares respecto a estos parámetros.

Al sustituir cemento por cenizas naturales también se aumenta el requerimiento de agua, por lo que se incrementa la relación a/c. Además, la espuma generada por la reacción de las cenizas con el agua conduce a tener un mortero muy poroso. Estos fenómenos llevan a que la incorporación de cenizas naturales produzca una importante disminución en la resistencia del material. La resistencia a compresión es menor mientras mayor es el porcentaje de cenizas utilizado para reemplazar cemento. Usar ceniza natural como sustituto de cemento lleva a una resistencia mayor que usarla en reemplazo de arena.

Respecto al uso de cenizas apagadas.

Al ser incorporadas en morteros, no producen cambios perceptibles de volumen, densidad y absorción de agua. Utilizar las cenizas como reemplazo de

cemento o de arena conduce a resultados similares respecto a estos parámetros. También producen una disminución de la resistencia en comparación a morteros sin adiciones, aunque es posible alcanzar valores más cercanos a los de éstos y, por lo tanto, mayores a los obtenidos con cenizas sin tratar (para dosificaciones análogas). A medida que se reduce la razón a/c, hay un aumento de resistencia a la compresión. Usar ceniza apagada como sustituto de cemento lleva a obtener una resistencia menor que usarla en reemplazo de arena.

11.1.3. Respecto al uso de cenizas apagadas en hormigones.

En general, las propiedades que estas cenizas le confieren a los hormigones son principalmente negativas. La incorporación de este residuo lleva a disminuir la resistencia a compresión, aumentar la penetración de agua y empeorar el comportamiento frente a la reacción álcali – agregado en comparación a un hormigón de similar dosificación pero sin esta adición. Aun así, la utilización de cenizas en reemplazo de arena lleva a un comportamiento más cercano al ideal que al incluirlas como sustituto de cemento. Resulta dificultoso incluso igualar los parámetros de un hormigón si adición y con una razón a/c mayor.

Respecto a las propiedades en estado fresco.

Al añadir cenizas se produce una leve disminución de la densidad en estado fresco, manteniéndose dentro de valores de densidades normales. En cuanto al aire incorporado, no hay variaciones respecto a hormigones sin este residuo.

El asentamiento se ve afectado dependiendo de si se reemplaza cemento o arena, ya que en un caso se está disminuyendo la superficie específica de los componentes del hormigón y en otra aumentando la misma.

Respecto a la resistencia a compresión.

La incorporación de las cenizas lleva a una disminución de la resistencia a compresión. Considerando los 28 días como la edad de diseño, las resistencias de los hormigones con cenizas son menores que la de uno de igual relación a/c pero sin adición. Incluso no alcanzan la resistencia de un hormigón con una razón a/c menor. Para igual razón a/c, un hormigón con cenizas en sustitución de arena tiene mayor resistencia que uno en las cuales se utiliza el residuo para reemplazar cemento. La mayor parte de la resistencia a compresión simple de los hormigones con cenizas se desarrolla en los primeros 7 días, con un achatamiento de la curva de este parámetro en función de la edad.

Respecto a la durabilidad.

Si bien la velocidad de succión capilar de agua es menor para los hormigones con cenizas que para los patrones, ninguno cumple con el requisito para exposiciones a ambientes húmedos o sumergidos (con cloruros de origen distinto al marino), marino, con ciclos de congelación y deshielo, o con agresividad química exigido por el Reglamento.

La penetración de agua es mayor en los pastones con cenizas que en los no adicionados, siendo más elevada cuando se sustituye cemento (supera ampliamente el máximo y el promedio indicado por el Reglamento CIRSCOC 201 para estructuras destinadas a contener o conducir agua) que en el caso de reemplazar arena (se ubica sobre los límites establecidos).

El agregado de cenizas contribuye al desarrollo de la reacción álcali-agregado cuando se tiene un árido reactivo, debido al alto contenido de álcalis que tienen las cenizas. Por el contrario, no tiene efectos puzolánicos al no contener sílice reactiva.

11.1.4. Respetto a las consideraciones ambientales.

La composición de las cenizas indica que se trata de un residuo peligroso a efectos de la legislación argentina. Por lo tanto no se deben utilizar las cenizas fuera de tareas de investigación, hasta tanto se compruebe que la lixiviación de los elementos peligrosos no excede los límites establecidos por la ley de aplicación. En ese aspecto, estudios anteriores sobre la inclusión de este tipo de residuos en hormigones indican que este material tiene una alta eficiencia de retención de metales pesados en ensayos de lixiviación.

11.2. RECOMENDACIONES Y ESTUDIOS FUTUROS.

Dado los efectos indeseados observados se pueden controlar en gran medida, y por la importancia ambiental que implica, resulta de interés avanzar en la búsqueda de alternativas que permitan incorporar este tipo de residuos en materiales como el hormigón. Además, por tratarse de un material del cual no existen antecedentes de aplicaciones similares será necesaria una mayor repetitividad de ensayos a fin de minimizar los errores que pudieran cometerse en este estudio. Así se podrán alcanzar conclusiones más precisas y dilucidar algunos interrogantes que se han planteado en este proceso.

De acuerdo a los resultados y conclusiones de este trabajo, se pueden realizar algunas recomendaciones respecto a la forma de aplicar estas cenizas y al curso a seguir en estudios futuros:

- No se aconseja utilizar estas cenizas de filtro en forma directa o natural en hormigones estructurales. Es importante pretratarlas para disminuir su reactividad (apagarlas), como así también tratar de extraer las sales solubles que contienen.
- Realizar siempre pastones de prueba con la dosificación que se desee utilizar, constatando que las propiedades en estado fresco, la resistencia y los parámetros de durabilidad concuerden con lo requerido para el proyecto en particular.
- Estudiar la factibilidad de aplicar este residuo en la fabricación de hormigones no estructurales (de relleno), bloques y adoquines.
- Estudiar la utilización de cenizas naturales para la fabricación de hormigones celulares, utilizándolas como agente espumígeno.
- Cada estudio de una posible aplicación de las cenizas debe acompañarse con ensayos de lixiviación para asegurar que el hormigón diseñado sea efectivo en la retención de metales pesados.
- Realizar los correspondientes estudios que demuestren la viabilidad (o no) económica de las posibles aplicaciones propuestas.

12. BIBLIOGRAFÍA

- 1) Asociación de Fabricantes de Cemento Portland (AFCP) (2011). *Informe de sostenibilidad 2011*. www.afcp.org.ar
- 2) Asociación de Fabricantes de Cemento Portland (AFCP) (2014). *La industria del cemento y la sostenibilidad*. www.afcp.org.ar
- 3) Autores varios. *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association. Illinois, Estados Unidos.
- 4) Autores varios (2001). *Durabilidad del hormigón estructural*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Olavarría, Argentina.
- 5) Autores varios (2012). *Ese material llamado hormigón*. Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón. Buenos Aires, Argentina.
- 6) Autores varios. *Tratamiento del polvo de aluminio mediante disolución acuosa*. Revista de Metalurgia.
- 7) Barreda, M., Sota, J.D, Banda Noriega, R.B., Miguel, R.E. *Hormigones de cemento portland elaborados con RAF obtenidos en diferentes procesos de fundición*. Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Plata, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires.
- 8) Barreda, M., Sota, J.D. *Valor agregado de un residuo contaminante al resolver un problema tecnológico*. Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Plata.
- 9) Centro de Investigaciones Avanzadas en Tecnología del Hormigón (CIATH) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la U.N.C. *Diseño racional de mezclas de hormigón – Método ICPA*.
www.efn.uncor.edu/departamentos/estruct/ciath/.
- 10) Ciaccio, G., Genazzi, C., Zerbino, L. *Estudios de lixiviación de larga duración sobre morteros que incorporan cenizas de residuos patogénicos*. Universidad Nacional de La Plata.
- 11) *Decreto Nacional 831/93*. www.infoleg.gob.ar
- 12) Elías, Xavier. *Reciclaje de residuos industriales*. Editorial Díaz de Santos. España.
- 13) Gil Bravo, Antonio; Gandía Pascual, Luis (2004). *Gestión de las escorias salinas de los procesos de segunda fusión del aluminio*. Universidad Pública de Navarra; Departamento de Química Aplicada.
- 14) Giovanbattista, P.A. *Incorporación de cenizas volantes en el hormigón elaborado. Beneficios y usos*. www.matermixsrl.com.ar
- 15) Instituto del Cemento Portland Argentino. *Hormigones livianos*. www.icpa.org.ar
- 16) Instituto de Cemento Portland Argentino (ICPA). *La reducción del impacto ambiental del hormigón. El hormigón puede ser durable y ambientalmente amistoso*. www.icpa.org.ar
- 17) Instituto de Cemento Portland Argentino (ICPA). *Hormigón y pavimentos sostenibles*. www.icpa.org.ar

- 18) *Ley Nacional N° 24051/92*. www.infoleg.gob.ar
- 19) *Ley Provincial N° 8973 de Córdoba*. www.secretariadeambiente.cba.gov.ar
- 20) Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto de la República Argentina, Subsecretaría de Comercio Internacional, Dirección General de Estrategias de Comercio Exterior, Dirección de Oferta Exportable (2010). *Informe sectorial: Sector de la Industria del Aluminio y sus manufacturas*. www.argentinatradenet.gov.ar
- 21) *Reglamento CIRSOC 201: Reglamento argentino de estructuras de hormigón*. Centro de investigación de los reglamentos nacionales de seguridad para las obras civiles (CIRSOC). Ministerio de planificación federal, inversión pública y servicios. Secretaría de obras públicas de la Nación. 2005. www.inti.gob.ar/cirsoc
- 22) Página web de la empresa Metal Veneta S.A.: www.metalveneta.com.ar
- 23) Página web de la empresa Aluar Aluminio Argentino S.A.I.C.: www.aluar.com.ar
- 24) *El Constructor. Periódico de la construcción y negocios*. Año 115. Edición N° 5003.
- 25) Riberiro, A. y otros (2008). *Cenizas volantes de incineradoras de residuos sólidos urbanos. Tratamientos y aplicaciones*. Revista Ingeniería Química N° 460. España.