

Efecto de la Sustitución de Agregado Fino por Ceniza Proveniente del Proceso de Incineración en Bruto de Residuos Sólidos Industriales en la Elaboración de Hormigón de Baja Resistencia

Benavides G.*; Luna G.*; Montenegro L.*

*Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiente; Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, Quito, Ecuador e-mail: {german.luna; lucia.montenegro}@epn.edu.ec
e-mail: gonzalo_bc7@hotmail.com

Resumen: El presente estudio se realizó con el fin de determinar la factibilidad del proceso de encapsulamiento de ceniza generada a partir de la incineración en bruto de residuos industriales en una matriz de hormigón. Se exponen por tanto resultados de la eficiencia del proceso de estabilización en función de la concentración de metales lixiviados y análisis de la variación en las propiedades físicas y mecánicas del hormigón convencional como consecuencia de la adición de ceniza (15 %, 20 %, 25 %, 30 %) en reemplazo del agregado fino de la mezcla cementante. Para ello, se fabricaron probetas cilíndricas de 30 x 15 cm y viguetas de 60 x 15 x 15 cm, 40 x 10 x 10 cm de largo, ancho y alto respectivamente. Los ensayos físico mecánicos determinaron propiedades superiores para un porcentaje de reemplazo del 15 % de ceniza por agregado fino en la mezcla de hormigón convencional, obteniendo resultados de resistencia a la compresión de 202.79 kg/cm² que representa una diferencia del 2.07 % con respecto al hormigón base; módulo de elasticidad 33.94 (GPa); módulo de rotura 33.16 kg/cm²; resistencia a la tracción indirecta 18.25 kg/cm²; esfuerzo de adherencia 3.58 (MPa); velocidad sónica 3619 m/s; peso específico S.S.S 2301 kg/m³, absorción de agua 1.073 % y volumen de poros 2.451 %. Finalmente, los resultados de la evaluación del proceso de encapsulación demostraron la eficiencia del mismo al reducir la concentración de metales en el lixiviado hasta un 97.45 % para el bario y 93.91 % para el níquel; para los metales: arsénico, cadmio, cromo, mercurio, plata, plomo y selenio existieron concentraciones por debajo del nivel mínimo de detección del equipo, sin embargo es posible evidenciar la reducción de la concentración de estos metales respecto de la concentración de los mismos de la ceniza en estado libre.

Palabras clave: Incineración, encapsulación, hormigón, lixiviación de metales, residuos peligrosos.

Abstract: The current study was conducted in order to determine the feasibility of the stabilization process of ash generated from incinerated industrial waste in a concrete matrix. The report thus presents efficiency results of stabilization process as a function of leached metal concentration and analysis of the variation in physical and mechanical properties of conventional concrete as a result of the addition of ash (15 %, 20 %, 25 % and 30 %) to replace fine aggregate of the cementing mixture. Cylindrical specimens of 30 x 15 cm and joists of 60 x 15 x 15 cm and 40 x 10 x 10 cm in length, width and height respectively were manufactured. Physical - mechanical tests determined superior mechanical properties for a concrete conventional mix with a 15 % replacement of ash, obtaining results of compressive strength 202.79 kg/cm² which represents a difference of 2.07 % compared to bases concrete; modulus of elasticity 33.94 (GPa); modulus of rupture 33.16 kg/cm²; indirect tensile strength 18.25 kg/cm²; bond stress 3.58 (MPa); sonic velocity 3619 m/s; SSS specific gravity 2301 kg/m³, water absorption 1.073 % and pore volume 2.451 %. Finally the results of the evaluation of the encapsulation process demonstrated its efficiency in reducing the concentration of leached metals up to 97.45 % for barium and 93.91 % for nickel; for: arsenic, cadmium, chromium, mercury, silver, lead and selenium the concentrations levels were below the minimum detection level of the equipment, however it is possible to demonstrate the reduction of the concentration of these metals based on its concentration in free state ash.

Keywords: Incineration, encapsulation, concrete, metal leaching, hazardous waste, recycling, alternative materials.

1. INTRODUCCIÓN

La incineración es un procedimiento utilizado para la eliminación de desechos sólidos, líquidos o gaseosos, estos últimos no suelen formar parte de aquellos que usualmente son tratados en una planta de este tipo. La destrucción térmica de los residuos tóxicos y peligrosos implica la

exposición controlada de los mismos a elevadas temperaturas (normalmente a 900 °C o incluso más) y, generalmente, en un medio oxidante. Idealmente, los principales productos generados en la combustión de residuos orgánicos son el dióxido de carbono (CO₂), el vapor de agua, y cenizas inertes. Nirich [20].

En el Ecuador la actividad petrolera es una de las industrias que genera gran cantidad de residuos sólidos provenientes de cada una de las etapas, desde la extracción, transporte, almacenamiento hasta el proceso de refinación del crudo, que se traduce en un problema ambiental para su gestión. Bravo [10]. Los desechos industriales provenientes de esta actividad comúnmente incinerados son los siguientes: absorbentes orgánicos; madera, aserrín y similares; empaques de caucho de filtros; tintas, pintura, lacas o barnices; cartón, papel y relacionados que se encuentren contaminados con hidrocarburos; contenedores plásticos y tapas de tubos; wipes, fibras y textiles; geosintéticos; esponja y poliuretano, espumas; lodos, arenas y arcillas contaminadas; equipos de protección personal; desechos sólidos domésticos; vegetación y residuales de aceite y lubricantes. Gpower [13].

Las cenizas generadas tienen contaminantes tóxicos en su composición como el Cd, Pb, Zn, los cuales presentan un potencial lixiviante importante, y a la hora de gestionar estos residuos es necesario controlar y tratar el lixiviado que puede llegar a producirse al momento de la aplicación de estos residuos. Ribeiro *et al* [23].

Entre las aplicaciones de las cenizas, como subproducto de la incineración se encuentra la elaboración de hormigones, la cual se puede utilizar de las siguientes maneras: a) incorporación directa en la mezcladora, b) adición inerte, es decir, como un elemento sustituto o en muchos casos suplementario de agregado fino si existe deficiencia en ellos y un tercer caso c) mezclado con el clinker en la preparación de cementos. De igual manera, se busca disminuir los costes de producción, mejorar las propiedades micro-estructurales del producto final y también los aspectos medioambientales al transformar un residuo en componentes con valor agregado. Santaella y Salamanca; Hidalgo [26, 18].

Mediante este proyecto, se busca gestionar este residuo dándole un valor agregado en la fabricación de mampuestos de uso peatonal u ornamental que se convertirá en una nueva opción en lo concerniente a la gestión de desechos sólidos.

Sin embargo, esta disposición podría adaptarse a otros residuos los cuales pudieran mejorar las características de los mampuestos a fabricar como se reportó en el estudio de Poveda, en la elaboración de adoquines de hormigón tipo A. Poveda *et al* [22].

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materiales

2.1.1 Cemento

Se utilizó cemento hidráulico tipo GU para construcciones en general que cumple con la norma NTE INEN 2380 [17] y disponible comercialmente en el país. Las densidades real y aparente (suelta y compactada) del cemento utilizado es de 2840 kg/m³; 1050 kg/m³ y 1320 kg/m³ respectivamente.

2.1.2 Agregados

Se realizó la determinación de las propiedades físicas de los agregados que se utilizaron para el diseño de la mezcla de hormigón convencional los cuales fueron de dos tipos (grueso y fino). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades físicas de los agregados grueso y fino

Propiedad	Agregado	
	Grueso	Fino
Densidad real (kg/m ³)	2310	2540
Masa unitaria suelta (densidad aparente) (kg/m ³)	1670	1410
Masa unitaria compactada (densidad aparente) (g/cm ³)	1.84	1.49
Absorción (%)	12.79	4.43
Granulometría d ₈₀ (mm)	-	2.36
módulo de finura (MF)	-	3.0
Tamaño máximo (cm)	2.54	-

2.1.3 Ceniza

La combustión originada al interior de un horno de incineración genera un tipo de residuo de color negro con un tamaño de partícula menor a 5 (mm) como se muestra en la Fig. 1. La ceniza para su uso como aditivo en la fabricación de hormigones de cemento ha sido clasificada en la norma ASTM C 618 [6] en dos tipos generales: de clase C y clase F, de acuerdo a la cantidad de los tres principales óxidos (SiO₂ + Al₂O₃ + Fe₂O₃) éstos deben ser, en total, más de 50 % para la clase C y más de 70 % para la clase F. Mediante el análisis de Difracción de Rayos X, la ceniza proveniente del proceso de incineración en bruto de residuos industriales se clasificó como tipo C según el criterio ASTM (American Standard for Testing and Materials) ya que el total de los principales óxidos fue de 58 %. A partir de la granulometría realizada a este tipo de residuo se obtuvo el tamaño máximo nominal mediante el cálculo del d₈₀, que constituyen el tamaño para el cual 80 % de material es más fino, que en este caso es de 1.52 (mm). Densidad real, aparente, porcentaje de vacío y contenido de humedad de la ceniza fue de 2300 kg/m³, 930 kg/m³, 87.61 % y 17.16 % respectivamente. Las propiedades físicas y composición química de la ceniza se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Propiedades físicas y composición química de la ceniza

Composición química	(%)
(Na,Ca)Al(Si,Al)Si ₂ O ₈	35
SiO ₂	29
Fe ₂ O ₃	1
CaMgSi ₂ O ₆	22
CaSiO ₃	6
KAlSi ₃ O ₈	5
FeO(OH)	2
Propiedades físicas	
Densidad real (kg/m ³)	2300
Densidad aparente (kg/m ³)	930
Porcentaje de vacíos (%)	87.61
Granulometría d ₈₀ (mm)	1.52
Contenido de humedad (%)	17.16



Figura 1. Ceniza recolectada del proceso de incineración

2.2 Métodos

2.1.1 Diseño de la mezcla

El desarrollo de la investigación se dividió en dos partes. La primera consistió en determinar los efectos del contenido de cenizas en la elaboración de hormigón mediante la comparación de las propiedades físicas en estado fresco y endurecido, realizando un total de 10 ensayos. Se preparó una mezcla de hormigón base siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ACI 211.1 [1], y a partir de ésta se prepararon varias mezclas con el contenido de ceniza de 15 %, 20 %, 25 % y 30 % en tasa de reemplazo de agregado fino en peso, además, se elaboró una dosificación extra con 10 % de ceniza para llevar a cabo la evaluación de la lixiviación de los metales pesados en el residuo encapsulado. La composición de las mezclas se presenta en la Tabla 3. La segunda parte tuvo como objetivo evaluar el proceso de encapsulamiento mediante la reducción de la concentración de metales pesados en los lixiviados del residuo encapsulado respecto del residuo en estado libre.

2.1.2 Ensayos en estado fresco

Una vez elaboradas las mezclas de hormigón base y con la adición de ceniza como sustituto de arena (agregado fino), se determinaron las propiedades físicas tales como el asentamiento, temperatura y contenido de aire, mediante las normas INEN 1578 [14]; ASTM C 1064 [3] y C 231 [7], en las cuales se efectuaron tres repeticiones para cada ensayo.

2.1.3 Ensayos en estado endurecido

Se determinaron las propiedades mecánicas de resistencia a la compresión, módulo de elasticidad, resistencia a la flexión, resistencia a la tracción indirecta y adherencia, todos ellos dentro de los ensayos destructivos mediante las normas INEN 1573 [15], INEN 2554 [16], ASTM C 496 [5] y ASTM C 900 [8] respectivamente, mientras que, para los ensayos no destructivos tales como densidad, y velocidad sónica se emplearon las normas ASTM C 642 [9] y ASTM D 2845 [4]. En los cuales se efectuaron tres repeticiones para cada ensayo en probetas cilíndricas de dimensiones 30x15 cm, viguetas de 60x15x15 cm y 40x10x10 cm.

Tabla 3. Dosificación para 1 m³ de hormigón

Componentes	Ceniza (%)				
	0	15	20	25	30
	Peso (kg)				
Agua	193.0	193.0	193.0	193.0	193.0
Cemento	309.8	309.8	309.8	309.8	309.8
Agregado fino	723.8	615.3	579.1	543.7	506.7
Agregado grueso	951.0	951.0	951.0	951.0	951.0
Aire	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ceniza	0.0	108.5	144.7	180.1	217.1

2.1.4. Test de lixiviación

Una vez obtenidos los resultados de las propiedades mecánicas del hormigón convencional y con ceniza, en estado endurecido y fresco; se llevó a cabo el análisis TCLP (Toxicity Characteristic Leaching Procedure) de acuerdo con el método EPA 1311 [11], para determinar la concentración en los lixiviados de: arsénico, bario, cromo, níquel, plomo, mercurio, selenio y plata en las dosificaciones de hormigón con 10 %, 15 % y 20 % con ceniza. Este rango de trabajo se escogió con base en las comparaciones de las propiedades mecánicas del hormigón considerando que se obtuvieron mejores resultados reemplazando agregado fino en un 15 % en peso por ceniza proveniente del proceso de incineración. Las muestras con 10 % y 20 % de ceniza se utilizaron para comparar la lixiviación entre un límite superior e inferior respecto de la dosificación aceptada.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Asentamiento, temperatura y contenido de aire del hormigón en estado fresco

En la Fig. 2 se muestran los diferentes valores de asentamientos de acuerdo a las mezclas de hormigón obtenidas. La disminución del asentamiento o trabajabilidad de las mezclas, conforme mayor sea la presencia de ceniza, se puede atribuir a las siguientes razones: en primer lugar, la combinación entre el tamaño de partícula y la forma de los agregados es más fuerte debido a que existió mayor fricción entre ellos provocando la disminución de las características de flujo de la pasta de hormigón. Además, la cantidad de agua libre para el efecto de lubricación entre los agregados disminuyó debido a que parte de ésta pudo ser absorbida por los poros de las partículas de la ceniza.

Por otra parte, los valores de asentamiento no presentaron variaciones significantes para cada tasa de sustitución con ceniza y se mantuvieron en el rango de asentamiento 7.6 – 10.2 cm que se utilizó para el diseño de la dosificación de las mezclas, a excepción del caso en que se realizó el reemplazo con 30 % de ceniza, el cual fue menor respecto del valor mínimo utilizado.

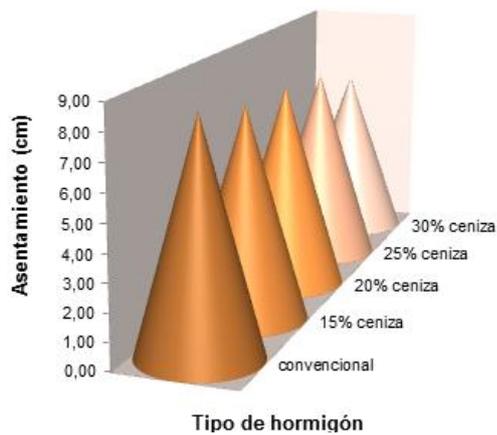


Figura 2. Asentamiento de acuerdo al tipo de hormigón

Tabla 4. Temperatura y contenido de aire para las diferentes mezclas de hormigón

Tipo de hormigón	Temperatura (°C)	Contenido de aire (%)
Convencional	19.3	1.5
15 % de ceniza	15.3	1.6
20 % de ceniza	17.0	1.7
25 % de ceniza	16.5	1.8
30 % de ceniza	16.9	1.8

Como se puede observar en la Tabla 4, los valores de temperatura son valores bajos propios de trabajar en un clima frío; se pudo observar también que existió afectación en el tiempo de fraguado del hormigón con ceniza respecto al fraguado observado en el hormigón convencional. De esta manera se puede verificar que, la temperatura bajo la cual se lleva a cabo el proceso de elaboración de hormigón es un factor de influencia en el desarrollo de las propiedades del mismo mediante la aceleración o retraso del proceso de endurecimiento.

Por lo tanto, la recomendación técnica normada es muy válida, y se debe evitar en la elaboración de hormigón trabajar con temperaturas inferiores a los $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ y superiores a los $30\text{ }^{\circ}\text{C}$. El primer caso es para impedir que los procesos químicos del cemento se detengan, mientras que, el segundo caso afectaría de manera directa la hidratación de la reacción química del cemento con el agua.

Por otra parte, en la Tabla 4 se muestran los porcentajes de contenido de aire presentes en las mezclas de hormigón. Si bien el hormigón que se elaboró es sin inclusión de aire, para el diseño y cálculo de la dosificación se tomó como referencia un contenido de aire de 1.5 % de acuerdo a la metodología descrita en la norma ACI 211.1.

El valor determinado de contenido de aire del hormigón convencional elaborado es igual al valor teórico para el diseño de la dosificación inicial, lo cual demuestra que, a pesar de diseñar una mezcla de hormigón sin inclusión de aire, es inevitable que no quede aire atrapado al momento de mezclar los componentes.

De igual manera, el contenido de aire del hormigón con ceniza se incrementó de la misma forma que se incrementó el

porcentaje de sustitución de ceniza por el agregado fino, esto es consecuencia del alto porcentaje de vacíos que tiene la ceniza que alcanza un 87.61 %, provocando que se atrape más aire en los poros de ésta.

3.2 Ensayos de resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión ($f'c$) de las mezclas de hormigón convencional y con cenizas fue determinada a edades de 3, 7, 14, 28 días de curado, como se presenta en la Tabla 5, la resistencia de diseño fue de 210 kg/cm^2 y en la Fig. 3 se muestran las curvas de endurecimiento correspondientes.

Tabla 5. Resultado ensayo de resistencia a la compresión del hormigón convencional y con ceniza a 3, 7, 14, 28 días de curado

Edad (días)	Resistencia a la compresión ($f'c = \text{kg/cm}^2$)				
	HC	C15	C20	C25	C30
3	75.28	91.60	81.26	77.77	71.66
7	132.47	138.23	125.64	106.78	100.75
14	190.36	186.08	169.60	119.33	111.52
28	208.37	202.79	182.61	144.36	137.62

HC: hormigón convencional

C30: hormigón con 30 % de ceniza

C25: hormigón con 25 % de ceniza

C20: hormigón con 20 % de ceniza

C15: hormigón con 15 % de ceniza

Los resultados obtenidos confirman que la resistencia a la compresión del hormigón aumenta con la edad de curado para todas las mezclas, pero también se cumple que a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de ceniza, la capacidad resistente del hormigón disminuye respecto del hormigón convencional para las distintas edades de curado.

Por otra parte, de las mezclas de hormigón con ceniza, las mezclas con 15 % y 20 % de reemplazo, a diferencia de las demás, obtuvieron una mayor ganancia de resistencia a los 3 y 7 días comparadas con la del hormigón convencional como se muestra en la Fig. 3, luego de estas edades la resistencia del hormigón con 15 % y 20 % de ceniza, a partir del día 14 y 7 respectivamente, disminuye respecto al hormigón convencional, es decir, sigue aumentando en el tiempo pero de forma gradual con valores menores al hormigón base.

Se puede evidenciar que al reemplazar el 15 % de ceniza por agregado fino en el hormigón esta mezcla mantuvo un mejor comportamiento de resistencia a la compresión, comparada con las demás mezclas. Además, las sustituciones con 25 % y 30 % de ceniza por agregado fino no son aceptables ni viables por cuanto generan una diferencia considerable respecto de la resistencia del hormigón convencional a los 28 días de curado. Esto último está directamente relacionado con la calidad, cantidad y reactividad de la adición, provocando un aumento en la demanda de agua, seguido de una disminución en la reacción puzolánica la cual retarda el avance en el desarrollo de los productos de hidratación. Valderrama, Torres y Mejía [29].

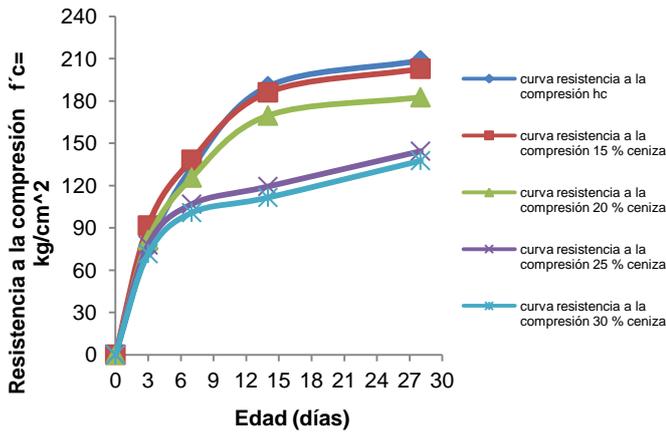


Figura 3. Curvas de endurecimiento para los diferentes tipos de hormigón

3.3 Ensayos de módulo de elasticidad

En la Tabla 6 se presentan los resultados de módulo de elasticidad obtenidos de la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria para las diferentes formulaciones de hormigón.

Tabla 6. Módulo de elasticidad para las diferentes mezclas de hormigón

Tipo de hormigón	Módulo de Elasticidad (GPa)
Convencional	24.51
15 % de ceniza	33.94
20 % de ceniza	23.34
25 % de ceniza	19.61
30 % de ceniza	18.85

Además, se puede evidenciar cómo el valor del módulo de elasticidad va disminuyendo a medida que se aumenta va la cantidad de sustitución de ceniza por agregado fino en la dosificación de la mezcla, pero con 15 % de ceniza como reemplazo, el valor del módulo de elasticidad supera el valor del hormigón convencional, probablemente se debe a que la ceniza se hidrata rápidamente a tempranas edades y luego se inhibe, dejando un centro no hidratado que se refleja en la disminución de la resistencia. Este centro no hidratado, no aporta a la ganancia de resistencia convirtiéndose en material de relleno inerte.

La determinación del módulo de elasticidad cuando se trata de materiales elásticos es considerado constante, independiente del esfuerzo que se pueda aplicar siguiendo la Ley Hooke; para el caso particular del hormigón, el módulo de elasticidad se encuentra afectado por las microfisuras que aparecen en la interface pasta-árido al aplicar una carga en éste y que provocan la no linealidad de la curva al comportarse como un pseudo-sólido, salvo en el tramo inicial que si existe linealidad.

En la Fig. 4 se observa que, cuando la resistencia es menor se logra tener líneas más inclinadas hacia el eje de la deformación, indicando que el hormigón se comporta de forma más dúctil con la inclusión de ceniza.

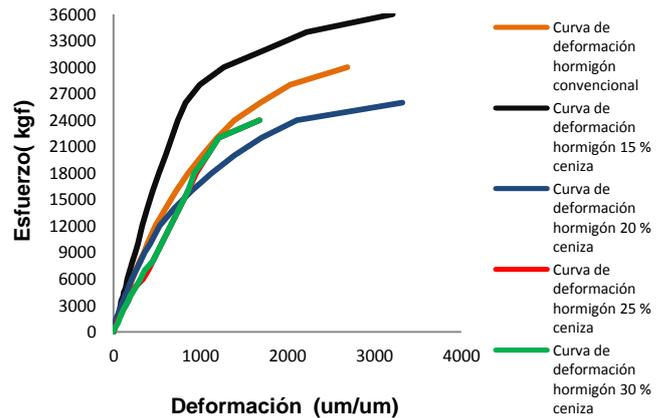


Figura 4. Curvas Esfuerzo vs. deformación de los diferentes tipos de hormigones

3.4 Ensayos de resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del hormigón y se la expresa con el Módulo Rotura (MR), en la Tabla 7 se presentan los valores de módulo de rotura del hormigón convencional y con ceniza, a 28 días de curado.

Para la National Ready Mixed Concrete Association-USA, el módulo de ruptura oscila entre el 10 % y 20 % de la resistencia a la compresión, teniendo en cuenta su dependencia en cuanto al tipo, dimensiones y volumen del agregado grueso utilizado; sin embargo, la mejor correlación para los materiales específicos es obtenida mediante ensayos de laboratorio con los materiales dados y el diseño de la mezcla utilizado. NRCMA [21].

Tabla 7. Módulo de rotura para las diferentes mezclas de hormigón

Tipo de hormigón	Módulo de rotura (kg/cm ²)	Disminución del MR (%)	Relación MR/f'c (%)
Convencional	38.47	-	18.46
15 % de ceniza	33.16	13.8	16.35
20 % de ceniza	27.43	28.69	15.02
25 % de ceniza	25.80	32.93	17.87
30 % de ceniza	24.05	37.48	17.48

Los resultados obtenidos de resistencia a la flexión normalmente se encuentran muy debajo de los valores de resistencia a la compresión, pero son superiores a los valores de resistencia a la tracción. A su vez todos los valores de relación entre el módulo de rotura respecto de la resistencia a la compresión se encuentran en el rango establecido anteriormente (10 % y 20 %), y son determinantes al momento de aplicar este tipo de hormigón para elaborar mampuestos o en su defecto vigas, elementos prefabricados o postes.

De igual manera, en la Tabla 7 se observa el efecto de la ceniza en la resistencia a la flexión del hormigón convencional, la cual disminuye a medida que la tasa de

reemplazo de la ceniza se incrementa, llegando a ser de alrededor del 37 % y del 13.8 % menor con sustitución de ceniza del 30 % y 15 % respectivamente.

3.5 Ensayos por tracción indirecta

El estudio realizado por Silva expone a la resistencia por tracción indirecta (f_t) como una de las propiedades fundamentales del hormigón y que se puede relacionar con la resistencia a la compresión. Silva *et al.* De igual manera se establece que la variación en esta propiedad se encuentra entre 7 – 13 % del f_c . Gutiérrez [12].

Tabla 8. Resultados de resistencia por tracción indirecta y su comparación con la resistencia a la compresión

Tipo de hormigón	Resistencia a la tracción (kg/cm ²)	Relación f_t/f_c (%)
Convencional	23.66	11
15 % de ceniza	18.25	9
20 % de ceniza	14.56	8
25 % de ceniza	13.96	10
30 % de ceniza	13.12	10

Los valores de resistencia a la tracción del hormigón convencional y con ceniza se presentan en la Tabla 8, a 28 días de curado, en ella se observa que a medida que aumenta la cantidad de sustitución de ceniza por agregado fino, es menor la resistencia a la tracción indirecta, siguiendo la misma tendencia de la resistencia a la compresión.

Por otra parte, se ve que la relación entre la resistencia a la tracción indirecta y la resistencia a la compresión se encuentran en el rango establecido en bibliografía especializada, lo cual comprueba el comportamiento del material y que se realizaron de manera adecuada las pruebas. Gutiérrez [12].



Figura 5. Proceso de fisuramiento en tracción indirecta

Adicionalmente, se establece un análisis del tipo de fisuras presente en las probetas después del ensayo de tracción indirecta. En la Fig. 5 se puede observar que las fisuras se inician en la parte central de la probeta (a), y se propaga hacia los apoyos en la dirección de aplicación de la carga (b).

Una vez que la fisura central se ha extendido, aparecen fisuras secundarias las cuales crecen desde el borde hacia el interior de la probeta, paralela a la fisura principal (c).

Además, en esta última se puede observar que existe rotura con formación de cuña, estos tipos de fisuras se consideran anómalas y se deben, en mucho, a que se incrementa el nivel de resistencia, la edad del hormigón, el contenido de aire o en su debido caso a agregados de menor resistencia provocando propagación a través de éstos.

3.6 Determinación del esfuerzo por adherencia

El objetivo de este ensayo es determinar el esfuerzo de adherencia resultante de aplicar una carga tensionante al extremo de una barra embebida, respecto de la superficie de la probeta de hormigón, para generar su desplazamiento hacia afuera. La Tabla 9, resume los valores promedio de tres mediciones para el ensayo de esfuerzo de adherencia del hormigón convencional y con ceniza a 28 días.

Tabla 9. Resultados de esfuerzo de adherencia

Tipo de Hormigón	Esfuerzo de adherencia (MPa)
Convencional	3.71
15 % de ceniza	3.58
20 % de ceniza	3.21
25 % de ceniza	2.98
30 % de ceniza	2.95

El esfuerzo a la adherencia para este caso se encuentra asociado al deslizamiento que se produce en una barra de acero corrugada de diámetro equivalente a 1.3 cm, es decir, poseer un desplazamiento menor asociado a una mayor fuerza de adherencia implica una adherencia de mejor calidad. Otro factor a tener en cuenta en la afectación de los resultados es la elaboración de la dosificación respecto a la relación agua-cemento, en los hormigones con 30 % y 25 % de ceniza existe un mayor consumo de agua debido a la porosidad de la misma, por lo tanto, la mayor cantidad de vacíos o aire atrapado podría llevar a la presencia de una menor superficie de agarre. El trabajo presentado por Ruiz, establece que la adherencia en el hormigón tiene un límite de 8.3 (MPa) según la norma ACI 318-08 [2], mientras que, para un hormigón de 210 kg/cm² de resistencia y barras menores a 32 mm de diámetro el Eurocódigo 2 [25] indica valores de 2.3 (MPa) como mínimo. Si se compara los valores presentados en la Tabla 9 con los rangos citados, se evidencia que el hormigón convencional y con ceniza elaborado para este proyecto cumple con la norma establecida. Ruiz *et al* [25].

3.7 Determinación de la velocidad sónica

Los valores obtenidos del ensayo de pulso ultrasónico presentados en la Tabla 10 determinan que la calidad del hormigón convencional es buena con una velocidad de 3861 m/s, si se observa los resultados obtenidos de velocidad sónica para el hormigón con ceniza se evidencia que, la calidad que se acerca más a la del hormigón convencional es con 15 % de ceniza en sustitución de agregado fino 3619 m/s, para porcentajes de 20 % y 25 % de ceniza es un hormigón aceptable con valores de velocidad sónica comprendidos entre 3600 m/s – 4500 m/s y para un 30 % de reemplazo de

ceniza es malo 2795 m/s, al ser comparados con la bibliografía citada. Jiménez, García y Morán [19].

Tabla 10. Calidad del hormigón para rangos de velocidad de pulso ultrasónico

Tipo de hormigón	Velocidad sónica (m/s)		Calidad del hormigón	
	Ensayado	Referencia	Ensayado	Referencia
Convencional	3861	>4500	Bueno	Excelente
15 % de ceniza	3619	3600 - 4500	Bueno	Bueno
20 % de ceniza	3296	3000 - 3600	Aceptable	Aceptable
25 % de ceniza	3066	2100 - 3000	Aceptable	Malo
30 % de ceniza	2795	<2100	Malo	Muy malo

Estos resultados se deben fundamentalmente a que el valor de la velocidad sónica se ve afectada por el contenido de aire; el tipo, cantidad y tamaño máximo del agregado, además del contenido de cavidades y la estructura de los poros del hormigón, demostrando así que al colocar mayor cantidad de una ceniza con altos porcentajes de vacíos (87.61 %) como lo es la utilizada en este proyecto existirá afectación en la porosidad del hormigón, por consiguiente a la propiedad ensayada y a la calidad del producto final.

3.8 Determinación del peso específico y absorción de agua

Tabla 11. Resultados de peso específico, absorción de agua y volumen de poros para los diferentes tipos de hormigón

Tipo de hormigón	Peso específico (kg/m ³)			Absor. de agua (%)	Volumen de poros (%)
	En seco	S.S.S	después de inmersión y de ebullición		
Convencional	2295	2308	2273	0.822	1.895
15 % de ceniza	2272	2301	2248	1.073	2.451
20 % de ceniza	2268	2281	2241	1.206	2.732
25 % de ceniza	2241	2274	2209	1.399	3.136
30 % de ceniza	2216	2266	2184	1.455	3.211

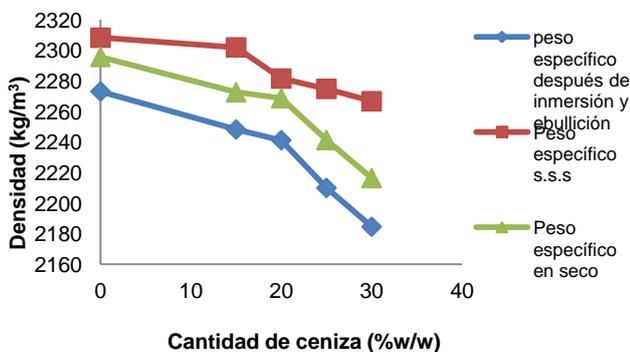


Figura 6. Influencia del porcentaje de ceniza en el peso específico

En la Fig. 6 se observa el desarrollo del peso específico del hormigón con y sin ceniza evidenciando una tendencia de disminución a medida que aumenta el porcentaje de sustitución de ceniza por agregado fino respecto del hormigón sin ésta, el valor de pesos específicos en condición seca, saturada (S.S.S), después de inmersión y ebullición disminuyeron de 2295 kg/m³ a 2216 kg/cm³, 2308 kg/cm³ a 2266 kg/cm³ y de 2273 kg/cm³ a 2184 kg/cm³ respectivamente como se observa en la Tabla 11.

Un factor del cual depende el peso específico del hormigón es la proporción de áridos que componen la mezcla, ya que poseen distintas densidades, en el caso particular de este estudio: agregado fino y grueso (2310 kg/cm³; 2540 kg/m³). Para un hormigón con agregados de naturaleza determinada, el peso específico se ve afectado por la cantidad de poros en la matriz del cemento, es decir, el aire arrastrado y el aire atrapado en el hormigón.

Los valores de porcentaje de poros presentados en la Tabla 11 se incrementan a medida que aumenta el porcentaje de ceniza de 1.895 % a 3.211 %, justificable por la porosidad que presenta la ceniza (87,16%) provocando de igual manera que exista también un aumento en el porcentaje de absorción de agua de 0.822 % a 1.455 %, adicional a los valores presentados en la Tabla 11, se grafican los incrementos del porcentaje de volumen de poros y absorción de agua en la Fig. 7.

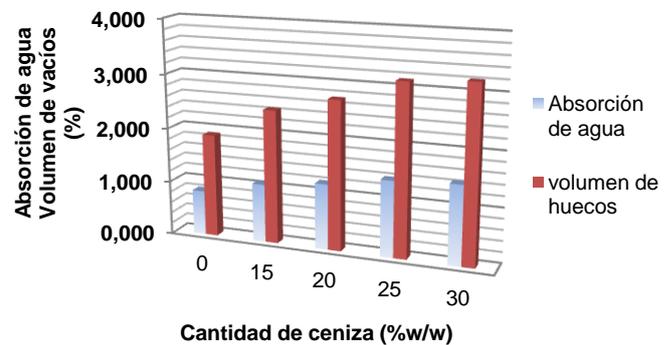


Figura 7. Influencia de porcentaje de ceniza en la absorción de agua y volumen de huecos

El volumen de poros generado pudo ser producto de la relación agua - cemento en la elaboración del hormigón, debido a que cuanto mayor es esta relación se obtiene un hormigón más poroso.

3.9 Resultados del test de lixiviación TCLP de las mezclas de hormigón con ceniza para el control ambiental

Los datos que se presentan en la Tabla 12 corresponden al test TCLP de las mezclas de hormigón con 20 %, 15 % (dosificación óptima), 10 % de ceniza y ceniza en estado libre. Cuando se habla de dosificación óptima, se usa como referencia a la propiedad mecánica más importante del hormigón que es la resistencia a la compresión, para la cual dicha mezcla desarrolló de manera favorable esta propiedad acercándose al valor del hormigón convencional. Por lo tanto,

la mezcla con 20 % de ceniza representa un valor inferior y la mezcla con 10 % de ceniza la cual fue adicional y exclusiva para esta comparación representa un valor superior de resistencia a la compresión.

Tabla 12. Comparación del extracto lixiviado de la ceniza libre respecto del hormigón con 10 %, 15 % y 20 % de ceniza

Elemento	Contenido de extracto lixiviado (mg/L)				Límite máximo permisible (mg/L) ²
	Ceniza libre	Hormigón			
		C10	C15	C20	
Arsénico	<0.010	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
Bario	11.000	0.580	0.280	0.604	100.0
Cadmio	<0.020	<0.001	<0.001	<0.001	1.0
Cromo Total	<0.050 ¹	<0.078	0.0051	0.055	5.0
Mercurio	0.007	<0.001	<0.001	<0.001	0.2
Níquel	0.460	0.028	0.063	0.073	5.0
Plata	<0.010	<0.001	<0.001	<0.001	5.0
Plomo	0.230	<0.005	<0.005	<0.005	5.0
Selenio	<0.010	<0.010	<0.010	<0.010	1.0

¹Representa la concentración de cromo hexavalente de la ceniza en estado libre

²Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales de la Ordenanza 404 del Distrito Metropolitano de Quito

Como se observa en la Tabla 12, tanto para la ceniza en estado libre como el hormigón con porcentaje de 10 %, 15 % y 20 % de ceniza, los resultados del análisis TCLP demuestran que, las concentraciones de arsénico, cadmio, plata y selenio se encuentran por debajo del nivel mínimo de detección del equipo, es decir, concentraciones menores a (0.010 y 0.005 mg/L) para el arsénico, (0.020 y 0.001 mg/L) para el cadmio, (0.010 y 0.001 mg/L) para la plata y (0.010 mg/L) para el selenio.

Para la concentración de cromo se presentan, de igual manera valores por debajo del nivel mínimo de detección, tanto para la ceniza en estado libre como para el hormigón con 10 % de ceniza. Además, la concentración de cromo es superior en las mezclas de hormigón respecto de la ceniza en estado libre, debido a que esta última se reportó como cromo hexavalente y no total. A diferencia del mercurio y plomo, cuyas concentraciones presentan valores por debajo del nivel mínimo (0.001 y 0.005 mg/L) respectivamente, en los hormigones con 10 %, 15 % y 20 % de ceniza.

Por último, para el bario y el níquel sí se pudo evidenciar con valores puntuales como disminuyeron las concentraciones en el extracto lixiviado después del proceso de estabilización con hormigón. En la Fig. 8, se observa como varió el porcentaje de encapsulación para estos dos metales, con una particularidad para el hormigón con 10 % de ceniza, del cual se esperaba un valor mayor que el reflejado en el hormigón con 15 % de ceniza para el bario.

De lo anterior, si bien no se obtuvo valores puntuales de la concentración de arsénico, cadmio, plata, selenio, plata y mercurio a diferencia del bario y el níquel, sin embargo, se puede observar que el efecto de la encapsulación de la mezcla de hormigón sobre la ceniza es efectivo y, al igual que la ceniza en estado libre, se cumple con lo establecido en la Resolución NO. 002-SA-2014: Norma Técnica de desechos

peligrosos correspondiente a la Ordenanza No. 404 del Distrito Metropolitano de Quito [27].

De acuerdo a lo mencionado en el párrafo anterior, se podría pensar en verter directamente la ceniza a los rellenos de seguridad, sin embargo una acumulación de la concentración de metales y una posible lixiviación hacia el agua subterránea de éstos, representaría un peligro. Por lo tanto, se hace necesario realizar un tratamiento previo.

Entre las consideraciones a tomar en cuenta para valorar los factores que pueden afectar el encapsulamiento y en consecuencia la lixiviación de los metales pesados se encuentra: la superficie específica que se forma en la base del silicato de calcio (C-S-H), ya que permite la absorción y la adsorción de los iones; y una alcalinidad elevada que ayuda a la precipitación de los hidróxidos insolubles, teniendo en cuenta que puede existir una disminución de la alcalinidad relacionado con la cantidad de cemento utilizado y del período de encapsulado como se reportó en el estudio de Rozumová, en la estabilización de cenizas de fondo generadas en el proceso de incineración de residuos peligrosos. Rozumová *et al* [24].

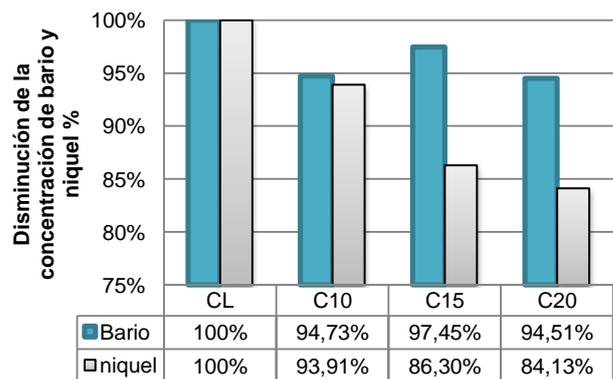


Figura 8. Porcentaje de retención de los metales bario y níquel después del proceso de encapsulación

Para el caso particular de este proyecto todas las muestras de hormigón con ceniza se tomaron a 28 días curado, por lo tanto la precipitación de los metales como hidróxidos insolubles se debió principalmente al pH medido del extracto TCLP, el cual fue de 12.0 cuando se trabajó con 10 %, 15 % y 20 % de ceniza.

4. CONCLUSIONES

La ceniza proveniente del proceso de incineración en bruto de residuos industriales se cataloga como residuo no peligroso según la Norma Técnica de Desechos Peligrosos y Especiales de la Ordenanza 404 del Distrito Metropolitano de Quito mediante el análisis de toxicidad TCLP realizado a la ceniza en estado libre, el cual determinó que las concentraciones de arsénico, bario, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo y selenio en la ceniza libre estuvieron por debajo de los límites permisibles. Sin embargo, existió una concentración de bario en la ceniza (11.00 mg/L) que comparada con el resto de metales pesados

cuyo nivel es inferior al límite máximo permisible, esta concentración de bario fue superior.

Dentro de la caracterización química de la ceniza, mediante la norma ASTM C618 se comprobó que ésta es de tipo C, cumpliendo con un mínimo del 50 % en la suma de los compuestos: óxido de silicio, óxido de hierro y óxido de aluminio, los cuales representan un 58.1 % de la composición total de la misma.

Las propiedades determinadas en la caracterización física de la ceniza son: 2300 kg/m³; 930 kg/m³; 87.61 %; 17.16 y 1.52 (mm) correspondientes a la densidad real, densidad aparente, porcentaje de vacíos, humedad, y granulometría (d₈₀) respectivamente. Verificando que la ceniza puede utilizarse como reemplazo del agregado fino, ya que su tamaño de partícula es menor a éste 2.36 (mm) y cumple con el tamaño recomendado en la elaboración de hormigón, menor a 5 (mm).

La mezcla de hormigón con 15 % de ceniza tuvo mejor comportamiento en las propiedades ensayadas comparada con el hormigón convencional. Además, se demostró que al reemplazar una mayor cantidad de agregado fino por ceniza se afecta considerablemente las propiedades mecánicas del hormigón principalmente la resistencia a la compresión junto a la deformación del mismo. Es así que, la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad fueron equivalentes a 202.79 kg/cm² y 33.94 (GPa) respectivamente cuando se trabajó con dicha mezcla, comparada con el hormigón convencional con valores correspondiente a 208.37 kg/cm² y 24.51 (GPa).

El tratamiento de encapsulación de las cenizas por medio de la elaboración de mampuestos de hormigón, demostró la eficiencia del mismo al reducir la concentración de metales en el lixiviado hasta un 97.45 % para el bario y 93.91 % para el níquel, para los metales: arsénico, cadmio, cromo, mercurio, plata, plomo y selenio existieron concentraciones por debajo del nivel mínimo de detección del equipo. Sin embargo, se evidencia la acción estabilizante del mecanismo.

El resultado de este proceso busca reducir el impacto ambiental mediante: la reducción de materias primas requeridas para la elaboración de mampuestos de hormigón, elaboración de materiales compuestos a partir de residuos sólidos, y buscará otras alternativas de disposición final para este tipo de residuos. Además, si no se realizara el proceso de encapsulación, implicaría un costo de 0.60 USD/kg de ceniza tratada por un gestor calificado.

REFERENCIAS

- [1] Práctica Estándar para seleccionar el proporcionamiento de concreto de peso normal, pesado y masivo, ACI Standard 211.1, 2002.
- [2] Requisitos de reglamento para concreto estructural, ACI Standard 318-08, 2008.
- [3] Método estándar para la temperatura de mezclas frescas de concreto, ASTM Standard C 1064, 1999
- [4] Método de prueba estándar para la determinación en laboratorio de las velocidades de pulso y las constantes elásticas ultrasónicas de roca, ASTM Standard D 2845, 2005.
- [5] Método de ensayo normalizado para resistencia a la tracción indirecta de especímenes cilíndricos de concreto, ASTM Standard C 496, 2011.
- [6] Especificación normalizada de ceniza volante de carbón y puzolana natural en crudo o calcinada para uso de concreto, ASTM Standard C 618, 2012.
- [7] Método de prueba estándar para contenido de aire del hormigón fresco por el método de presión, ASTM Standard C 231, 2014.
- [8] Método de prueba estándar para la resistencia a la extracción de la barra corrugada en hormigón endurecido, ASTM Standard C 900, 2014.
- [9] Método de prueba estándar para la densidad, absorción, y huecos en hormigón endurecido, ASTM Standard C 642, 2014
- [10] Bravo, E. "Los impactos de la explotación petrolera en ecosistemas tropicales y la biodiversidad". [Online]. Available: http://www.inredh.org/archivos/documentos_ambiental/impactos_explotacion_petrolera_esp.pdf, 2007 (Junio, 2015).
- [11] Method 1311: Toxicity Characteristics Leaching Procedure, EPA Standard 1311, 1992.
- [12] Gutiérrez, L. "El concreto y otros materiales para la construcción". (2da. ed). Manizales, Colombia: Centro de publicaciones Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2003, p. 111.
- [13] Gpower. "Estudio de Impacto y Plan de Manejo Ambiental: Centro de Tratamiento Integral Shushufindi". [Online]. Available: http://maesucumbios.files.wordpress.com/2013/05/eiaborador_final.pdf, 2013 (Febrero, 2014).
- [14] Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento, NTE INEN 1578, 2010.
- [15] Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico, NTE INEN 1573, 2010.
- [16] Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión, NTE INEN 2554, 2010.
- [17] Cementos hidráulicos. Requisitos de desempeño de cementos hidráulicos, NTE INEN 2380, 2011.
- [18] Hidalgo, A. "Valoración de residuos de biomasa en la industria de la construcción". [Online]. http://www.energia2012.es/sites/default/files/V_alorizacion%20de%20residuos%20de%20biomasa%20en%20la%20industria.pdf, 2012 (Septiembre, 2015).
- [19] Jiménez P. García, A. y Morán, F. "Hormigón Armado". (14va. ed.). Barcelona, España: Gustavo Gil, S.A, 2000, p. 122.
- [20] Nirich, S. "Introducción a la Problemática de los residuos". [Online]. http://frit.utn.edu.ar/posgrado/ambiental/Introduccion_nResiduos.doc, 2006 (Febrero, 2014).
- [21] NRMCA. "El concreto en la práctica: Qué, Por qué y Cómo". [Online]. <http://www.nrmca.org/aboutconcrete/cips/CIP16es.pdf>, 2008, (Septiembre, 2014).
- [22] Poveda *et al*, "Análisis de la influencia del vidrio molido sobre la resistencia al desgaste en adoquines de hormigón tipo A", Revista Politécnica no. 35, Ecuador, 2015.
- [23] Ribeiro *et al.*, "Cenizas Volantes de Incineradoras de Residuos Sólidos Urbanos: tratamientos y aplicaciones". Revista Ingeniería Química, 46(1), 110-122, 2008.
- [24] Rozumová *et al.*, "Estabilización de cenizas de fondo generadas de la incineración de residuos peligrosos". Revista Ingeniería química y ambiente, 3(1), 1-9, 2015.
- [25] Ruiz *et al.*, "Análisis mesomecánico del fenómeno de adherencia en estructuras de hormigón armado". Mecánica computacional, 31(1), 1749-1766, 2012.
- [26] Santaella, L. y Salamanca R., "Comportamiento del concreto con bajos porcentajes de ceniza volante (termopaipa IV) y agua constante". Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina, 14(1), 1-7, 2004.
- [27] Secretaria de Ambiente. "Resolución 002-SA-2014: Norma Técnica Residuos Peligrosos correspondiente a la Ordenanza Metropolitana de Quito N° 0404", Ecuador, 2014.
- [28] Silva *et al.*, "Obtención de concretos autocompactantes empleando residuos de demolición". Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales, 35(1), 86-94, 2014.
- [29] Valderrama, C. Torres J. y Mejía de Gutiérrez, R., "Características de desempeño de un concreto adicionado con cenizas volantes de alto nivel de inquemados". Revista Ingeniería e Investigación, 31(1), 39-46, 2011.