

UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Civil



Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

---

**Diseño y elaboración de mezclas de hormigón con materiales reciclados**

---

*Autores:*

Sandry Mayela Carrión Sarmiento

1900619964

Rubén Sebastián Guambaña Chérrez

0104839576

*Director:*

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco PhD.

0301500476

Cuenca - Ecuador



## RESUMEN

Este proyecto se enfoca en la elaboración de un hormigón sostenible, sustituyendo la grava por hormigón reciclado de diferentes resistencias, obtenido de la empresa Holcim, y sustituyendo el cemento por ceniza volante, obtenida de los hornos utilizados para la elaboración de ladrillos artesanales.

Se caracterizaron los agregados, y se determinó el porcentaje óptimo de hormigón reciclado mediante el ensayo de masa unitaria con la combinación de todos los agregados que intervienen en la mezcla. Para determinar el porcentaje óptimo de ceniza volante se sometió a ensayos de compresión, flexión y tracción de mezclas elaboradas con diferentes porcentajes. Se trabajó con tres tipos de ceniza: el material que pasó el tamiz N°200, el material que pasó el tamiz N°100 y con SikaFume. Finalmente se realizó una mezcla con la unión de los dos materiales reciclados.

Tanto los agregados naturales como reciclados cumplieron con las características necesarias para la elaboración de hormigón. El porcentaje óptimo de hormigón reciclado fue del 23%, cuya resistencia a compresión disminuyó en un 2%. La ceniza que pasa el tamiz N°200 fue la que presentó mejores resultados, con un porcentaje óptimo del 10%, la resistencia a compresión disminuyó un 3%.

Para el hormigón elaborado con ambos materiales reciclados, las resistencias a tracción y flexión disminuyeron en un 8% y 20% respectivamente. La resistencia a compresión de la mezcla alcanzó 201 kg/cm<sup>2</sup> a los 14 días de curado. Además, se logró una reducción del 10% de energía empleada y CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera y la disminución del 9% del costo, con respecto al hormigón patrón.

### **Palabras clave:**

Hormigón, Áridos, Hormigón reciclado, Ceniza volante, Resistencia, Sostenibilidad.



## ABSTRACT

This project focuses on the development of a sustainable concrete, replacing gravel with recycled concrete of different resistances, obtained from Holcim company, and replacing the cement with fly ash, obtained from the kilns used to make handmade bricks.

The aggregates were characterized, and the optimum percentage of recycled concrete was determined by the test method for Bulk Density ("Unit Weight"), with the combination of all the aggregates that intervene in the mixture. To determine the optimum percentage of fly ash, compression, bending and tensile tests were carried out on mixtures made with different percentages. We worked with three types of ash: the material that passed the sieve N°200, the material that passed the sieve N°100 and with SikaFume. Finally, a mixture was made with the union of the two recycled materials.

Both natural and recycled aggregates fulfilled the necessary characteristics for manufacturing of concrete. The optimum percentage of recycled concrete was 23%, whose compressive strength decreased by 2%. The ash that passes the sieve N°200 was the one that presented better results, with an optimum percentage of 10%, the resistance to compression decreased by 3%.

For concrete made with both recycled materials, tensile and flexural strengths decreased by 8% and 20%, respectively. The compression strength of the mixture reached 201 kg/cm<sup>2</sup> after 14 days of curing. In addition, a reduction of 10% in energy used and CO<sub>2</sub> emitted into the atmosphere, and a 9% reduction in cost was achieved with respect to the standard concrete.

### **Keywords:**

Concrete, Aggregates, Recycled concrete, Fly ash, Resistance, Sustainability.

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

RESUMEN.....	2
ABSTRACT .....	3
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN .....	18
1.1. ANTECEDENTES.....	18
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	24
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	27
1.4. OBJETIVOS .....	27
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	27
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	28
1.5. HIPÓTESIS Y ALCANCE.....	28
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO .....	29
2.1. AGREGADOS .....	29
2.1.1. GENERALIDADES .....	29
2.1.2. TIPOS DE AGREGADOS .....	29
2.1.3. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS .....	31
2.1.3.1. GRANULOMETRÍA.....	31
2.1.3.2. DENSIDAD.....	35
2.1.3.3. ABSORCIÓN Y HUMEDAD .....	37
2.1.3.4. MASA UNITARIA .....	38
2.1.3.5. DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO.....	39
2.2. CEMENTO.....	39
2.2.1. GENERALIDADES .....	39
2.2.2. TIPOS DE CEMENTO .....	40
2.2.3. PROPIEDADES DEL CEMENTO .....	41
2.2.3.1. DENSIDAD.....	41
2.2.3.2. CONSISTENCIA NORMAL .....	41
2.2.3.3. TIEMPO DE FRAGUADO.....	42
2.3. CENIZA VOLANTE .....	43
2.4. HORMIGÓN.....	44
2.4.1. GENERALIDADES .....	44
2.4.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS .....	44



2.4.2.1.	PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO .....	44
2.4.2.1.1.	CONSISTENCIA .....	44
2.4.2.1.2.	MANEJABILIDAD .....	46
2.4.2.1.3.	HOMOGENEIDAD.....	46
2.4.2.1.4.	DENSIDAD DE LA MEZCLA.....	47
2.4.2.2.	PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO.....	47
2.4.2.2.1.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	47
2.4.2.2.2.	RESISTENCIA A TRACCIÓN .....	49
2.4.2.2.3.	RESISTENCIA A FLEXIÓN.....	50
2.5.	EVALUACIÓN AMBIENTAL .....	52
2.5.1.	HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN.....	53
2.6.	EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	56
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOLOGÍA .....		58
3.1.	MATERIALES.....	58
3.1.1.	AGREGADOS.....	58
3.1.2.	CEMENTO .....	60
3.1.3.	CENIZA VOLANTE .....	61
3.1.4.	AGUA.....	63
3.1.5.	ADITIVO .....	63
3.2.	METODOLOGÍA .....	63
3.2.1.	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL .....	63
3.2.1.1.	AGREGADOS .....	63
3.2.1.2.	CENIZA VOLANTE.....	64
3.2.2.	DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO Y DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN.....	64
3.2.2.1.	MEZCLA PATRÓN .....	64
3.2.2.2.	MEZCLA CON HORMIGÓN RECICLADO .....	65
3.2.2.3.	MEZCLA CON CENIZA VOLANTE .....	66
3.2.2.4.	COMBINACIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO Y CENIZA VOLANTE .....	66
3.2.3.	ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN .....	66
3.2.4.	ENSAYO DE MUESTRAS Y COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ELABORADO CON MATERIALES RECICLADOS.....	67
3.2.5.	EVALUACIÓN AMBIENTAL.....	68
3.2.6.	EVALUACIÓN ECONÓMICA .....	69



CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	70
4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	70
4.1.1. AGREGADOS.....	70
4.1.1.1. CENIZA VOLANTE.....	74
4.2. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO Y DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN.....	75
4.2.1. MEZCLA CON HORMIGÓN RECICLADO .....	75
4.2.2. MEZCLA CON CENIZA VOLANTE.....	76
4.3. COMBINACIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO Y CENIZA VOLANTE Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS .....	84
4.3.1. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO.....	84
4.3.1.1. ASENTAMIENTO .....	84
4.3.1.2. DENSIDAD DE LA MEZCLA .....	85
4.3.2. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO .....	86
4.4. EVALUACIÓN AMBIENTAL .....	90
4.4.1. GREENROADS v2 .....	90
4.4.2. LEED v4.....	91
4.4.3. PALATE v2.2 .....	93
4.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA.....	96
4.5.1. MEZCLA PATRÓN.....	96
4.5.2. MEZCLA CON HORMIGÓN RECICLADO .....	96
4.5.3. MEZCLA CON CENIZA VOLANTE.....	97
4.5.4. MEZCLA DE HORMIGÓN RECICLADO Y CENIZA VOLANTE .....	98
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES .....	100
6. BIBLIOGRAFÍA.....	102
7. ANEXOS .....	107

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1 Trituradora de mandíbulas de la Universidad de Cuenca. ....	31
Ilustración 2 Esquema de aplicación de carga para el ensayo de compresión en probetas cilíndricas.....	48
Ilustración 3 Esquema de los modelos típicos de fractura. (NTE INEN 1573, 2010) .....	49



Ilustración 4 Ensayo a tracción indirecta (a) y distribución de esfuerzos (b). (Notas de Hormigón Armado, 2010) ..... 50

Ilustración 5 Ensayo de Flexión en vigas de hormigón simple. (CivilGeeks, 2011) ..... 51

Ilustración 6 Marco del análisis del ciclo de vida. (ISO 14.040, 1997) ..... 53

Ilustración 7 Agregado Grueso de río o Grava. .... 58

Ilustración 8 Agregado Grueso triturado o Ripio. .... 58

Ilustración 9 Agregado Fino o Arena ..... 59

Ilustración 10 Hormigón reciclado antes del proceso de triturado. .... 60

Ilustración 11 Hormigón reciclado después del proceso de triturado..... 60

Ilustración 12 Ceniza que pasó el tamiz N°200 y se retuvo en el fondo. .... 62

Ilustración 13 Ceniza que pasó el tamiz N°100 y se retuvo tanto en el tamiz N°200 como en el fondo..... 62

Ilustración 14 SikaFume, ceniza comercializada por Sika S.A. .... 62

Ilustración 15 Checklist para certificación Greenroads para hormigón patrón. (Greenroads, 2018)..... 90

Ilustración 16 Checklist para certificación Greenroads, utilizando sólo un material reciclado. (Greenroads, 2018) ..... 90

Ilustración 17 Checklist para certificación Greenroads, utilizando dos materiales reciclados. (Greenroads, 2018) ..... 91

Ilustración 18 Checklist para certificación LEED para hormigón patrón. (LEED, 2018).. 91

Ilustración 19 Checklist para certificación LEED, utilizando sólo un material reciclado. (LEED, 2018)..... 92

Ilustración 20 Checklist para certificación LEED, utilizando dos materiales reciclados. (LEED, 2018)..... 92

Ilustración 21 Entrada de datos en PaLATE v2.2 para hormigón patrón. .... 93

Ilustración 22 Resultados de PaLATE v2.2 para hormigón patrón. .... 93

Ilustración 23 Entrada de datos en PaLATE v2.2 para hormigón elaborado con hormigón reciclado..... 93

Ilustración 24 Resultados de PaLATE v2.2 para hormigón elaborado con hormigón reciclado. .... 94

Ilustración 25 Entrada de datos en PaLATE v2.2 para hormigón elaborado con ceniza volante..... 94



Ilustración 26 Resultados de PaLATE v2.2 para hormigón elaborado con ceniza volante ..... 94

Ilustración 27 Entrada de datos en PaLATE v2.2 para hormigón elaborado con ceniza volante y hormigón reciclado..... 95

Ilustración 28 Resultados de PaLATE v2.2 para hormigón elaborado con ceniza volante y hormigón reciclado..... 95

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1 Clasificación de los agregados según su tamaño. (Niño Hernández, 2010) ..... 29

Tabla 2 Serie de tamices normalizada. (NTE INEN 154, 1987) ..... 32

Tabla 3 Requisitos de gradación del árido fino. (NTE INEN 872, 2011) ..... 32

Tabla 4 Requisitos de gradación del árido grueso. (NTE INEN 872, 2011) ..... 33

Tabla 5 Tipos de Cemento Portland (NTE INEN 152, 2012) ..... 40

Tabla 6 Requisitos de resistencia para el hormigón. (NTE INEN 2551, 2011) ..... 44

Tabla 7 Rangos de asentamiento. (Sánchez de Guzmán, D. 2004) ..... 45

Tabla 8 Consistencia del hormigón en función del asentamiento. (Jiménez P., García A., Morán F., 2000) ..... 46

Tabla 9 Categorías Greenroads v2. (Greenroads, 2017) ..... 54

Tabla 10 Niveles de certificación Greenroads v2. (Greenroads, 2017)..... 54

Tabla 11 Categorías LEED v4. (LEED, 2018) ..... 55

Tabla 12 Niveles de certificación LEED v4. (LEED, 2018)..... 56

Tabla 13 Resistencia a compresión de probetas recicladas. .... 59

Tabla 14 Series de tamices utilizados en análisis granulométrico. .... 64

Tabla 15 Dosificación de la mezcla patrón. (Holcim, 2018) ..... 65

Tabla 16 Condiciones de absorción de los agregados naturales. (Holcim, 2018) ..... 65

Tabla 17 Tiempo de mezclado del hormigón. .... 67

Tabla 18 Granulometría del agregado grueso - Ripio ..... 70

Tabla 19 Granulometría del agregado grueso - Grava ..... 71

Tabla 20 Granulometría del agregado grueso - Hormigón Reciclado ..... 72

Tabla 21 Granulometría del agregado fino - Arena..... 73

Tabla 22 Caracterización de los agregados. .... 74

Tabla 23 Densidad de materiales cementantes. .... 74





Tabla 24 Tiempo de Fraguado .....	75
Tabla 25 Asentamiento de mezclas elaboradas con ceniza que pasa tamiz N° 200.....	76
Tabla 26 Resistencia a flexión de hormigón con ceniza que pasa tamiz N° 200. ....	77
Tabla 27 Asentamiento de mezclas elaboradas con SikaFume.....	80
Tabla 28 Resistencia a flexión de hormigón con SikaFume.....	81
Tabla 29 Resumen de las mezclas elaboradas con diferentes tipos de ceniza volante.	83
Tabla 30 Dosificación para las mezclas comparadas.....	84
Tabla 31 Asentamiento de mezclas con porcentajes óptimos de material reciclado....	85
Tabla 32 Densidad de mezclas con porcentajes óptimos de material reciclado. ....	85
Tabla 33 Resistencia a flexión de hormigón con porcentajes óptimos de material reciclado. ....	87
Tabla 34 Resumen de las mezclas elaboradas con porcentajes óptimos de material reciclado. ....	89
Tabla 35 Proyección del consumo de energía y emisiones para diferentes obras. ....	96
Tabla 36 Evaluación económica del hormigón patrón. ....	96
Tabla 37 Evaluación económica del hormigón elaborado con hormigón reciclado. ....	97
Tabla 38 Evaluación económica del hormigón elaborado con ceniza volante sin costo de adquisición.....	97
Tabla 39 Evaluación económica del hormigón elaborado con ceniza volante con costo máximo de adquisición.....	98
Tabla 40 Evaluación económica del hormigón elaborado con ceniza volante sin costo de adquisición y hormigón reciclado.....	98
Tabla 41 Evaluación económica del hormigón elaborado con ceniza volante con costo máximo de adquisición y hormigón reciclado.....	99

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Curva granulométrica del agregado grueso - Ripio .....	70
Gráfica 2 Curva granulométrica del agregado grueso - Grava .....	71
Gráfica 3 Curva granulométrica del agregado grueso - Hormigón Reciclado .....	72
Gráfica 4 Curva granulométrica del agregado fino - Arena.....	73
Gráfica 5 Curva de Masa Unitaria versus Porcentaje de agregado grueso .....	75



Gráfica 6 Resistencia a compresión versus Tiempo, para hormigón con ceniza que pasa tamiz N° 200. ....	77
Gráfica 7 Módulo de Rotura versus Porcentaje de ceniza que pasa tamiz N° 200. ....	78
Gráfica 8 Resistencia a tracción versus Tiempo, para hormigón con ceniza que pasa tamiz N° 200. ....	78
Gráfica 9 Resistencia a compresión versus Tiempo, para hormigón con ceniza que pasa el tamiz N° 100.....	79
Gráfica 10 Resistencia a tracción versus Tiempo, para hormigón con ceniza que pasa el tamiz N°100. ....	80
Gráfica 11 Resistencia a compresión versus Tiempo, para hormigón con SikaFume. ....	81
Gráfica 12 Módulo de Rotura versus Porcentaje de SikaFume.....	81
Gráfica 13 Resistencia a tracción versus Tiempo, para hormigón con SikaFume. ....	82
Gráfica 14 Resistencia a compresión versus Tiempo, para hormigón con porcentajes óptimos de material reciclado.....	86
Gráfica 15 Módulo de Rotura de hormigón con porcentajes óptimos de material reciclado. ....	87
Gráfica 16 Resistencia a tracción indirecta versus Tiempo, para hormigón con porcentajes óptimos de material reciclado.....	88

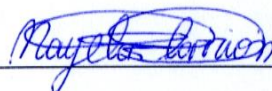
## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Sandry Mayela Carrión Sarmiento en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Diseño y elaboración de mezclas de hormigón con materiales reciclados”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre 2018



---

Sandry Mayela Carrión Sarmiento

C.I: 1900619964

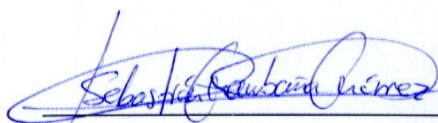
## Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Rubén Sebastián Guambaña Chérrez en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Diseño y elaboración de mezclas de hormigón con materiales reciclados”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, octubre 2018



Rubén Sebastián Guambaña Chérrez

C.I: 0104839576

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Sandry Mayela Carrión Sarmiento, autor del trabajo de titulación “Diseño y elaboración de mezclas de hormigón con materiales reciclados”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre 2018



Sandry Mayela Carrión Sarmiento

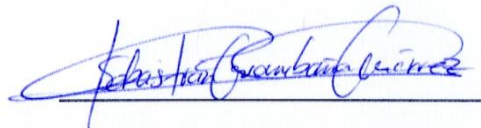
C.I: 1900619964

## Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Rubén Sebastián Guambaña Chérrez, autor del trabajo de titulación “Diseño y elaboración de mezclas de hormigón con materiales reciclados”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, octubre 2018



Rubén Sebastián Guambaña Chérrez

C.I: 0104839576



## AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios, por guiarme y darme la sabiduría necesaria en cada paso dado. A toda mi familia, por el apoyo y la motivación constante que me han brindado durante mi rol como estudiante.

A mi amigo y compañero de tesis, Sebastián, porque gracias a su paciencia y entrega a nuestro trabajo pudimos culminar con éxito.

A David, por sus palabras de aliento para seguir trabajando por mis objetivos y por el hermoso tiempo que hemos compartido.

A mis amigos, que han contribuido en la elaboración de este trabajo y a todos, con los que he compartido durante este trayecto de formación.

*Sandry Mayela Carrión Sarmiento*

A mis padres, hermana y hermanos, por el apoyo incondicional, por sus consejos, ánimo y compañía durante mi formación profesional.

A Sandry, por la confianza depositada en mí y porque gracias a su paciencia y dedicación, logramos concluir este proyecto con éxito.

A mis compañeros y amigos, quienes estuvieron junto a mí durante todo este proceso, algunos siguen hasta hoy, gracias por su presencia y apoyo a lo largo de todos estos años.

*Sebastián Guambaña Chérrez*

Queremos agradecer a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, de manera especial a nuestro director de trabajo de titulación, Ing. Daniel Mogrovejo, así como a los miembros del tribunal, por la crítica constructiva y aporte brindado en el desarrollo de esta investigación.

A la empresa Holcim y al personal de su planta en la ciudad de Cuenca, especialmente a la Ing. María Isabel Chiriboga y al Ing. Pablo Orbe, por su colaboración desinteresada.



### **DEDICATORIA**

A mis padres, Sandry y Tomas, porque gracias a su esfuerzo incansable, he culminado esta meta. Ustedes son mi fuente de amor y ejemplo de perseverancia. A mis hermanas Liseth y Nayeli, por su compañía, paciencia y motivación.

A mi angelito, Zarith, mi ejemplo de valentía e inspiración para cumplir mis sueños.

*Sandry Mayela Carrión Sarmiento*





## DEDICATORIA

A mis padres, por ser los pilares de mi vida, quienes han sabido formarme desde pequeño y han estado siempre junto a mi brindándome su apoyo, porque gracias a ellos puedo alcanzar mi meta.

A toda mi familia, porque siempre tuvieron palabras de aliento para impulsarme a seguir adelante y compartieron conmigo buenos y malos momentos.

*Sebastián Guambaña Chérrez*

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

El empleo de materiales de construcción reciclados data de tiempos posteriores a la Segunda Guerra Mundial, donde se tenían grandes cantidades de escombros en las ciudades destruidas, por lo que comenzaron a utilizarlos para reconstruir, obteniéndose buenos resultados (Álvarez & Barrios, 2018). Reino Unido y Alemania fueron los países que más desarrollaron esta metodología, dónde, la mayoría de los escombros utilizados eran material cerámico, especialmente mobiliario de servicios sanitarios, además se disponía de material pétreo natural, plásticos y concreto hidráulico. Más adelante estos materiales fueron mejorados con adiciones como escorias, cenizas, humo de sílice.

La gestión de residuos de la construcción más desarrollada se encuentra en Europa y Japón, debido a que se han implantado políticas reguladas bajo instrumentos económicos (impuestos sobre el vertido de residuos) y legales (las demoliciones deben ser selectivas) que exigen a que la industria de la construcción priorice el uso de material reciclado y sigan metodologías de selección y aplicación de material reciclado con un exhaustivo control de calidad. Existen grandes obras civiles hechas con materiales reciclados, especialmente con hormigón reciclado y que han dado buenos resultados en cuanto a propiedades de resistencia, manejabilidad y durabilidad (Calderón, 2014). Además, se están realizando investigaciones y aplicaciones de hormigones con más de un material reciclado.

En la actualidad se han desarrollado varios estudios relacionados con la aplicación de residuos dentro del hormigón, entre ellos se puede citar la sustitución de cemento por cenizas del carbón, ceniza de la cáscara de arroz, ceniza proveniente de la actividad volcánica, ceniza proveniente de plantas generadoras de energía, puzolanas naturales, etc. Otras investigaciones se centran en la sustitución de los áridos por materiales reciclados como la cerámica, porcelanato, cerámica, árido reciclado, caucho, vidrio, etc.

A continuación, se presentan los estudios internacionales más relevantes para nuestra investigación:

- a) Título: *Propiedades del hormigón de árido reciclado fabricado con adiciones activa e inerte*. Autores: *E. Pavón, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba; M. Etxeberria, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España; I. Martínez, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba*. Publicado en: *Revista de la Construcción, Volumen 10, N°3, 2011*.

Este trabajo determina las propiedades físicas y mecánicas (resistencia a la compresión y velocidad de ultrasonido) de hormigones elaborados con el 50% y 100% de material reciclado con adiciones activa e inerte y las propiedades de durabilidad (ensayos de difusión de cloruros, resistividad, absorción y porosidad). Se determinó que utilizando solo árido grueso reciclado las propiedades mecánicas fueron inferiores a las de un hormigón sin árido grueso reciclado, pero utilizando adiciones inertes presenta características de durabilidad superior al convencional.

- b) Título: *Utilización del hormigón reciclado como material de reemplazo de árido grueso para la fabricación de hormigones*. Autores: *Carlos Aguilar, María Pía Muñoz, Oscar Loyola; Universidad de Santiago de Chile, Chile*. Publicado en: *Revista Ingeniería de Construcción, Vol. 20, N°1, 2005*.

La presente investigación tuvo como objetivo principal analizar las propiedades de hormigones fabricados con áridos reciclados obtenidos de hormigones demolidos. Se analizó el efecto sobre las propiedades del hormigón, dosis de cemento, cantidad y tipo de árido reciclado utilizado en la mezcla. Al comparar áridos reciclados con naturales, se observa una disminución en prácticamente todas las propiedades físicas de los áridos reciclados. Se destaca la elevada absorción del agregado grueso reciclado. Se observaron pérdidas de resistencia a compresión y módulo de elasticidad en hormigones elaborados con árido grueso reciclado con respecto a hormigones de árido natural. Se estima que el mortero adherido a la superficie de la partícula pétreo del árido de hormigón reciclado es el factor crítico que debilita la adherencia y por lo tanto afecta todas las propiedades del hormigón elaborado con árido reciclado.



- c) Título: *Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete*. Autores: *Mukesh Limbachiya, Mohammed Seddik Meddah, Youssef Ouchagour; School of Civil Engineering & Construction, Kingston University, Londres, Reino Unido*. Publicado en: *Construction and Building Materials, 2011*.

Esta investigación presenta la sustitución de agregados gruesos naturales por agregados de concreto reciclado, obtenidos de desechos de concreto triturado, así como el uso de 30% de cenizas volantes como un sustituto parcial de cemento Portland. Este trabajo tiene como referencia un estudio previo realizado por los mismos autores, donde se estableció el potencial uso de árido reciclado grueso para producir hormigones a 28 días de curado, con una resistencia de diseño similar a la obtenida usando agregados naturales. Este artículo discute el efecto de la sustitución parcial y completa de agregados gruesos naturales por agregado grueso reciclado en un hormigón con cenizas volantes. Las propiedades físico-mecánicas y el rendimiento de durabilidad se han examinado en ambos tipos de hormigones (cemento Portland y cenizas volantes) para mezclas diseñadas con diversas proporciones de agregado reciclado (0%, 30%, 50% y 100%) en masa. Los resultados obtenidos mostraron que, aunque la incorporación de una gran cantidad de agregado de hormigón reciclado podía reducir la resistencia a la penetración de cloruro y la carbonatación del hormigón, se podía conseguir una resistencia de diseño comparable a la de la mezcla de control.

- d) Título: *Utilización de una ceniza volante de alto contenido de cal en el hormigón y su comportamiento frente a curados acelerados*. Autores: *Cengiz D. Atis, University of Cukurova, Civil Engineering Dept., Balcalo-Adana; Cahhit Bilim, Mustada Kemal University, Civil Engineering Dept. Iskenderun-Hatay; Fatih Ozcan, Kubilay Akcaozoglu, Umur K. Sevim; University of Cukurova, Civil Engineering Dept., Balcalo-Adana; Turquía*. Publicado en: *Materiales de Construcción, Vol. 52, N°267, 2002*.

Este trabajo experimental utiliza una ceniza volante de alto contenido de cal para la elaboración de 40 hormigones con tres proporciones de diferentes de material cementante (15%, 30%, 45%), con relaciones agua/cemento de 0.40 y 0.87. Se ensayaron las probetas a compresión a los 28 días y 3 meses de curado. Además, se

ensayaron probetas sometidas a curado acelerado; agua caliente y agua hirviendo, siguiendo las normas ASTM y normas turcas. Los resultados obtenidos fueron los siguientes: la ceniza se podría utilizar hasta en un 30% de sustitución de cemento, la resistencia de hormigones con un curado de 28 días se puede predecir usando el método de curado acelerado, existe una excelente relación entre ambos métodos de curado acelerado ( $R^2 = 93\%$ ) y la cantidad de ceniza utilizada no influye a la hora de predecir la resistencia a la compresión.

e) Título: *Effects of fly ash fineness on the mechanical properties of concrete*.  
Autores: *Semsi Yazici, Hasan Sahan Arel. Department of Civil Engineering, Engineering Faculty, Izmir, Turquía*. Publicado en: *Sadhana, Indian Academy of Sciences, Vol. 37, Part 3, pp. 389–403, 2012*.

El presente estudio revisa los efectos de la finura de la ceniza volante sobre la resistencia a la compresión y a la tracción del hormigón. Se sometió a molienda una ceniza de finura de 2351  $\text{cm}^2/\text{gr}$  y se obtuvieron cenizas volantes con finura de 3849  $\text{cm}^2/\text{gr}$  y 5239  $\text{cm}^2/\text{gr}$ . Se reemplazó el cemento por el 0%, 5%, 10% y 15% de cenizas volantes. En las mezclas de hormigón, la dosis de aglutinante y la relación agua/cemento se fijaron en 350  $\text{kg}/\text{m}^3$  y 0.50, respectivamente. Los valores de asentamiento para los hormigones se ajustaron a  $100 \pm 20$  mm. Se determinaron las resistencias a la tracción y a la compresión de las muestras de hormigón a los 7, 28, 56, 90, 120 y 180 días, donde se observó que la resistencia a la tracción y a la compresión de los hormigones se vio afectada por la finura de la ceniza volante a corto y largo plazo. Además, se encontró que la resistencia a la compresión y a la tracción de los hormigones aumentaba a medida que aumentaba la finura de la ceniza volante. El estudio concluye que el valor de finura debería ser superior a 3849  $\text{cm}^2/\text{gr}$  para tener un impacto positivo en las propiedades mecánicas del concreto.

A continuación, se presenta los trabajos nacionales y locales afines a nuestro estudio:

f) Título: *Hormigón con agregados reciclados de demolición de estructuras de hormigón*. Autor: *Bayron Gustavo Cadme Cárdenas, Facultad de Ingeniería, Universidad Católica Santiago de Guayaquil, Ecuador. Tesis de Grado previo a la*

*obtención del título de Ingeniero Civil. Publicado en: Repositorio Digital de la Universidad Católica Santiago de Guayaquil, 2013.*

Este trabajo presenta el diseño de mezclas de hormigón con agregado reciclado, la variación de resistencia y costos, comparado con hormigón elaborado con agregado natural. La resistencia del hormigón que utiliza agregado reciclado en sustitución total del agregado natural, se vio disminuida del 13% al 29%, manteniendo la misma relación agua/cemento y se determinó una factibilidad negativa comparada con el hormigón convencional.

g) Título: *Estudios de hormigones de altas prestaciones utilizando áridos y cemento local, cenizas volcánicas naturales y superplastificante. Autores: Byron Javier Jaigua Romero, Santiago Esteban Vásquez Urgilés, Universidad de Cuenca, Cuenca. Publicado en: Repositorio Digital de la Universidad de Cuenca, 2010.*

Este trabajo analiza la resistencia a la compresión de probetas cilíndricas normadas, con la adición de 15, 20, 25 y 30% de material puzolánico proveniente de los yacimientos del volcán Tungurahua y sometido a un proceso de molido. Para garantizar su trabajabilidad utilizaron un aditivo reductor de agua de alto rango y superplastificante. Se observó que con una adición del 20% se obtuvo una resistencia a la compresión esperada de 503 kg/cm<sup>2</sup>.

h) Título: *Concreto con áridos reciclados: Adaptación de esta tecnología alcanzando por lo menos 210 kg/cm<sup>2</sup> de resistencia a la compresión. Autor: Arq. Carlos Esteban Contreras Lojano, Universidad de Cuenca. Tesis previa a la obtención del grado de Magister en Construcciones. Publicado en: Repositorio Digital de la Universidad de Cuenca, 2012.*

Este proyecto usa la tecnología del hormigón, con áridos de residuos de construcción, para alcanzar una resistencia de 210 kg/cm<sup>2</sup>, mediante la elaboración de diferentes dosificaciones y con la sustitución del árido natural por árido reciclado. Se realiza una investigación y análisis de los residuos provenientes de las construcciones, luego se desarrolla un análisis de los materiales reciclables para la determinación de los áridos a utilizar. Se realiza un análisis de diferentes procesos

realizados a nivel internacional referente a la aplicación de hormigón con áridos reciclados, para tener diferentes criterios de la aplicabilidad de la tecnología y poderla adaptar a nuestro medio. Se desarrolla la tecnología planteada bajo las normas que garanticen su aplicación. La sustitución del árido natural por el árido reciclado, se realizó en cantidades de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% y 100% del total de áridos en la mezcla, para alcanzar una resistencia de por lo menos 210 kg/cm<sup>2</sup>. El intervalo de áridos que presentó un mejor comportamiento fue de 60% de árido natural y 40% de árido reciclado.

- i) Título: *Propiedades físico-mecánicas del hormigón elaborado con áridos reciclados*. Autor: *Rómulo Alejandro Arias Cabezas, Universidad Central del Ecuador, Quito. Trabajo de graduación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, 2017. Publicado en: Repositorio Digital de la Universidad Central Del Ecuador.*

Este proyecto compara las propiedades físicas y mecánicas del hormigón convencional frente al hormigón reciclado en estado fresco y endurecido. El hormigón denominado reciclado está elaborado con residuos de mampostería y hormigón proveniente de estructuras en demolición. Se toma como muestra patrón una dosificación con ciertas características y se varía el porcentaje de sustitución de agregado grueso natural. Se evaluaron siete dosificaciones en ensayos a flexión y compresión a diferentes edades (7 y 28 días), teniendo los siguientes resultados: los agregados reciclados poseen mayor absorción lo que genera dificultad en la trabajabilidad, a los 7 días de curado del hormigón reciclado se obtuvo del 84 al 93% de su resistencia final. La variación de la resistencia a flexión del hormigón con árido reciclado frente al convencional es de -6.7%. Para realizar una dosificación, se debe establecer que la resistencia del hormigón reciclado disminuye un 20% hasta un reemplazo del 30% de agregado natural.

- j) Título: *Sustitución del cemento con cenizas provenientes de la incineración del cuesco de la palma africana para la elaboración del hormigón*. Autor: *Daniel Enrique Águila Lara de La Universidad Central del Ecuador, Quito. Trabajo de graduación previo la obtención del título de Ingeniero Civil, 2016. Publicado en: Repositorio Digital de la Universidad Central Del Ecuador.*



Este trabajo explica el uso de la ceniza proveniente de la incineración del cuesco de la palma africana o puzolanas en el hormigón como sustituto parcial del cemento. El trabajo presenta como resultados: un aumento de trabajabilidad, menor segregación y sangrado del hormigón con adiciones de ceniza, un evidente retraso en el tiempo de fraguado directamente proporcional al porcentaje de ceniza volante debido a la falta de elementos como: aluminio, hierro y calcio.

Con los estudios desarrollados hasta la actualidad, se puede tener un conocimiento amplio sobre el origen de ciertos residuos, que pueden ser utilizados en la elaboración del hormigón; sus características principales y las propiedades de la mezcla elaborada con un residuo bajo las condiciones de diseño establecidas. Dentro de los trabajos locales, no existe investigación sobre el uso de cenizas provenientes de la elaboración de ladrillos artesanales, ni la utilización de hormigones reciclados de diferentes resistencias, ni la inclusión de dos materiales reciclado dentro de una mezcla, además las investigaciones antes presentadas no presentan un análisis económico ni ambiental que indique que tan rentable es la aplicación de los materiales reciclados estudiados.

## 1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido al crecimiento continuo de la población, ubicada especialmente en sectores urbanos, la industria de la construcción se expande aceleradamente, formando parte del desarrollo social y económico de los países; y contribuyendo al deterioro ambiental. Esta actividad maneja el 50% de recursos naturales explotados, el 40% de energía utilizada y es responsable del 50% de residuos producidos en el mundo (Cabello, 2007). Dentro de la industria de la construcción el hormigón es uno de los material más utilizado, alrededor del mundo se estima que se produce 32 millones de toneladas cada año (Mikulčić, Vujanović, & Duić, 2013). En los países industrializados se producen de 2 a 3 toneladas de hormigón/persona/año y se estima un incremento para el año 2020 entre del 30% al 85% en países emergentes (Cabello, 2007).

El hormigón se puede definir como un material compuesto por un esqueleto granular y una matriz cementicia. El esqueleto granular está compuesto por una serie de áridos, mientras que la matriz está compuesta por un aglomerante (cemento), agua y aditivos (Plaza Gámez, 2014). El proceso de fabricación del hormigón consiste en la extracción





de materia prima, transporte, fabricación, embalaje, procesado de materia prima, etc., que representa una acción depredadora para el medio ambiente por la demanda de energía necesaria para su elaboración, extracción de recursos no renovables y generación de desperdicios que son devueltos al ecosistema en forma de residuos sólidos, líquidos y gaseosos (O'Reilly, Bancroft y Riza). Se determinó que la contaminación ambiental aumenta gradualmente a medida que aumenta el consumo de hormigón, la construcción de edificaciones de este material es responsable del 30% de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera (Mikulčić et al., 2013). En una investigación sobre la contaminación de materiales, se estimó que por cada 1000 kg de construcción residencial: el hormigón emite alrededor de 147 kg de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Mikulčić et al., 2013).

El hormigón ordinario contiene alrededor de 12% de cemento y 80% de agregado. Esto indica que, para hacer hormigón, la arena, grava y roca triturada, en términos de volúmenes, son el componente principal e interviene directamente en las propiedades y costo final de la mezcla (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003). Alrededor del mundo se consume de 10 a 11 billones de toneladas de árido, cada año (Mehta P K Monteiro). Las actividades de extracción y transporte, consumen cantidades considerables de energía y afecta negativamente a las áreas forestadas y lechos de ríos. En Ecuador el uso de áridos ha sufrido un incremento de 315%, desde el año 1998 al 2010, y solo en el Azuay, en la última década se han explotado 75 688 268 m<sup>3</sup> de materiales para la construcción, de los cuales se ha registrado un crecimiento anual de 41.43% del 2010 al 2014 (ARCOM, 2015).

Como se mencionó anteriormente, el cemento constituye una pequeña fracción dentro del hormigón, sin embargo, en su fabricación se genera una gran cantidad de residuos contaminantes. Por cada tonelada de clinker utilizada en la fabricación de cemento, se consume 5.5 GJ de energía (Limbachiya et al., 2012) y se genera una tonelada de CO<sub>2</sub>, junto con una cantidad menor de gases NO<sub>x</sub> y CH<sub>4</sub> (Malhotra, 2010). Alrededor del mundo se producen dos mil millones de toneladas de cemento al año (Malhotra, 2010). Teniendo en cuenta que una tonelada de cemento tiene alrededor del 70% de clinker, se determina que, al año, la industria del cemento emite más de mil millones de toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Como dato nacional, según las

estadísticas del Instituto Ecuatoriano del Cemento y Hormigón (INECYC) con relación al Censo Nacional Económico, entre los años 2010 y 2011 la comercialización de cemento creció alrededor de 7.91% al pasar de 5 287 126 a 5 704 687 toneladas. (Instituto Ecuatoriano de la Construcción, 2016).

La demolición y eliminación de estructuras de hormigón es otro problema ambiental, ya que constituyen grandes masas de sólidos colocados en escombreras; en la ciudad de Cuenca la Empresa Municipal de Aseo (EMAC-EP) ha detectado deficiencias en cuanto a la cantidad de sitios adecuados para la disposición de residuos de construcción, lo que ha llevado a que se instalen escombreras provisionales para disminuir el desalojo incontrolado en ríos y quebradas, ya que hasta el año 2014 el promedio mensual de material desalojado era de 25 000 m<sup>3</sup> (EMAC-EP, 2014), lo que debería incentivar a la creación de proyectos de reciclaje y reutilización

El desequilibrio ecológico generado por las industrias, ha llevado a que el sector dedicado a la construcción de obras civiles, siga una tendencia sustentable, a través de estrategias que permitan proteger el medio ambiente. En la actualidad, se trabaja en la gestión de recursos naturales, incentivando al reciclaje y reutilización; como un proceso recuperador que permite realizar actividades seguras para el medio ambiente (Plaza Gámez, 2014). El desafío, consiste en buscar materiales suplementarios que han terminado su vida útil, o materiales que son subproductos de otros procesos industriales y utilizarlos en lugar de recursos naturales o elementos cuya fabricación represente una carga ambiental (Castañeda & Raúl, 2013). Según datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), el 80.86% de los cimientos de las edificaciones fueron proyectados a ser construidos con hormigón, el 93.77% de la estructura es de hormigón y el 56.05% de cubiertas armadas contienen hormigón. Esto nos indica que, en Ecuador, el material más usado en las edificaciones es el hormigón y teniendo en cuenta el problema ambiental que genera, se necesita dar soluciones y alternativas a las industrias locales, pero en la ciudad de Cuenca existe un escaso número de investigaciones sobre la factibilidad económica, ambiental y técnica del uso de residuos locales, que se pueden emplear dentro del hormigón.

### 1.3.JUSTIFICACIÓN

Este trabajo pretende mitigar el deterioro ambiental generado por la industria del hormigón, haciendo uso de dos desechos producidos en nuestra región; hormigón reciclado y ceniza volante, transformándolos en materia prima apta para su reutilización, que cumpla con los estándares de calidad establecidas por las normas INEN y ASTM. Entre las consecuencias que se pretende mitigar se encuentra: erosión y pérdida de la calidad del suelo, deslizamiento de taludes, desbordamiento de ríos a consecuencia de la explotación de minerales y mala disposición de escombros de edificaciones. Así mismo se pretende ayudar en la reducción de consumo de energía y emisiones gaseosas de efecto invernadero, consecuencia principalmente de la elaboración industrial del cemento. Además, la aplicación de esta alternativa dentro de las industrias hormigoneras, dará un valor adicional a la calidad del producto comercializado.

De la misma manera, se desea desarrollar una metodología que permita determinar la cantidad óptima de material reciclado que sea factible reemplazar dentro de una mezcla de hormigón, ya sea hormigón reciclado en lugar del agregado grueso o ceniza volante en reemplazo del cemento; esta metodología puede ser utilizada para investigaciones posteriores orientadas a la utilización de residuos de diferente origen, o en la determinación de otros factores de calidad como las propiedades de durabilidad a largo plazo. Además, la información presentada sobre el tratamiento previo de los materiales reciclados, servirá con un referente para las industrias hormigoneras para cuantificar el tiempo y costo que genera la inclusión de estos materiales reciclados dentro del hormigón.

### 1.4.OBJETIVOS

#### 1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Elaborar un hormigón con materiales reciclados, utilizando ceniza volante y agregado de hormigón reciclado y determinar su factibilidad frente a las mezclas comercializadas.

#### 1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las características físicas y mecánicas del agregado reciclado y la ceniza volante.
- Diseñar y elaborar un hormigón con agregado reciclado y ceniza volante.
- Comparar las características principales del hormigón elaborado con material reciclado frente a la mezcla convencional, tanto en estado fresco como endurecido, mediante ensayos de trabajabilidad, consistencia, resistencia a compresión simple, tracción indirecta y flexión.
- Medir los beneficios ambientales producidos de la elaboración de hormigón con materiales reciclados, frente a una mezcla convencional y determinar si su uso es sustentable.
- Medir los beneficios económicos de la elaboración de una mezcla con material reciclado, frente a las mezclas convencionales, para determinar su rentabilidad.

#### 1.5. HIPÓTESIS Y ALCANCE

Es factible incluir material reciclado dentro de una mezcla de hormigón convencional, como ceniza volante en sustitución de cemento y hormigón reciclado en reemplazo de agregado grueso, manteniendo ciertas características de calidad, a través de la sustitución de un porcentaje óptimo de cada material; reduciendo costos y contaminación ambiental generada por la fabricación del hormigón convencional.

Se mide la factibilidad tanto de la aplicación de cada material por separado, como la inclusión de ambos materiales dentro de la mezcla de hormigón, mediante la aplicación de una metodología dividida en diferentes etapas que abarca el trabajo realizado en el laboratorio, el análisis de los resultados y utilización de herramientas medio-ambientales. Cumpliendo con las normativas INEN (Instituto Ecuatoriano de Normalización) y ASTM (America Society for Testing and Materials).

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1. AGREGADOS

#### 2.1.1. GENERALIDADES

Las tres cuartas partes de un hormigón convencional está formado por agregados tales como: arena, grava, ripio o escoria (Neville & Brooks, 1987). Debido al gran porcentaje que ocupa dentro de la mezcla, los agregados forman el esqueleto del hormigón y contribuyen en las propiedades del mismo, así como en el costo de fabricación. A mayor volumen de árido, el costo del hormigón disminuye, ya que el costo del agregado es inferior al costo de la pasta cementante.

#### 2.1.2. TIPOS DE AGREGADOS

Tabla 1 Clasificación de los agregados según su tamaño. (Niño Hernández, 2010)

Tamaño (mm)	Denominación más común	Clasificación	Uso como agregado de mezclas
< 0.002	Arcilla	Fracción muy fina	No recomendable
0.002 – 0.074	Limo	Fracción fina	No recomendable
0.074 – 4.76 #200 - #4	Arena	Agregado fino	Material apto para mortero o concreto
4.76 – 19.1 #4 - 3/4"	Gravilla	Agregado grueso	Material apto para concreto
19.1 – 50.8 3/4" - 2"	Grava		Material apto para concreto
50.8 – 152.4 2" - 6"	Piedra		Material apto para concreto
> 152.4 6"	Rajón, Piedra bola		Concreto ciclópeo

Los agregados se pueden clasificar según su origen (naturales o reciclado), densidad, forma y tamaño. El método de clasificación más utilizado es según su tamaño; se denomina como agregados gruesos a las partículas cuyo tamaño es superior a 4.76 mm (tamiz N°4). Dentro de los agregados gruesos se tiene la grava, gravilla, grava triturada y ripio (roca triturada). Los áridos que presentan mayor adherencia con la pasta de cemento son los áridos triturados, sin embargo, los cantos rodados de río presentan mayor resistencia interna.



Se denomina como agregado fino a las partículas cuyo material tiene un tamaño inferior a 4.76 mm (tamiz N°4). Generalmente se utiliza como agregado fino la arena. La Tabla 1 presenta una clasificación del material que se utiliza dentro de la mezcla de hormigón.

Se denomina agregado reciclado, al material que se obtiene a partir del reciclaje de residuos de hormigón resultado de la demolición de escombros de la construcción. Sus características dependen directamente del tipo de obra. Este material granular se convierte en materia prima luego de pasar por un proceso de reducción de tamaño y cribado. Las clasificaciones más comunes de los áridos reciclados dependen de su granulometría y procedencia; según su granulometría se pueden clasificar como zahorras (material formado por áridos no triturados), arenas y gravas; y por su procedencia se clasifican como áridos de hormigón, áridos de asfalto, áridos de cerámico y materiales inertes (Torán & Ignacio, 2007). Los áridos más utilizados son los de hormigón reciclado, cuyo tamaño y forma depende del proceso de trituración.

Entre los tipos de trituradoras utilizadas para el procesamiento de material reciclado están: trituradoras de mandíbulas, trituradoras de cono, trituradoras de impacto horizontal y trituradoras de impacto vertical. Las trituradoras de mandíbula o machacado se denominan de primer nivel, porque las partículas que se obtienen no son tan finas (el contenido de finos es inferior al 10%), tienen forma angulosa y presentan buena distribución granulométrica. Esta trituradora está formada por dos placas de metal llamadas mandíbulas, de las cuales una se mantiene fija y la otra tiene un movimiento oscilatorio gracias a un eje excéntrico conectado a un motor. La parte superior permite el ingreso de piedras y rocas, las cuales, al ser trituradas se desalojan por la parte inferior de las placas, cuyo tamaño puede ser ajustado.



*Ilustración 1 Trituradora de mandíbulas de la Universidad de Cuenca.*

Dentro de las propiedades del agregado reciclado, la absorción y resistencia a la abrasión se consideran como desfavorables por la cantidad de mortero que esta adherido a las partículas. En el tratamiento del material reciclado es crucial la eliminación de impurezas y contaminantes.

### 2.1.3. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

#### 2.1.3.1. GRANULOMETRÍA

Es la distribución de los tamaños de las partículas de un agregado, determinado por una serie de tamices, bajo la norma NTE INEN 696 (ASTM C136; el cual consiste en separar una muestra normada en fracciones de igual tamaño, para determinar el porcentaje de material que se encuentra dentro de ciertos límites. El tamizado de agregados finos y gruesos se debe realizar por la serie de mallas detallada en la Tabla 2.

Este ensayo es importante porque permite realizar la dosificación del hormigón de tal forma que se proporcione la cantidad de pasta necesaria para llenar los espacios que deja la mezcla de agregados.

Tabla 2 Serie de tamices normalizada. (NTE INEN 154, 1987)

Tamiz N°	Abertura (mm)
2"	50,00
1 1/2"	37,50
1"	25,00
3/4"	19,00
1/2"	12,50
3/8"	9,50
N°4	4,75
N°8	2,38
N°10	2,00
N°16	1,19
N°20	0,84
N°30	0,59
N°40	0,42
N°50	0,297
N°60	0,246
N°80	0,177
N°100	0,149
N°200	0,074

En Ecuador, los agregados deben cumplir con las características físicas establecidas en la norma NTE INEN 872, donde se establecen los límites granulométricos. En la Tabla 3 se detalla los límites para el árido fino.

Tabla 3 Requisitos de gradación del árido fino. (NTE INEN 872, 2011)

Tamiz INEN	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 µm	25 a 60
300 µm	10 a 30
150 µm	2 a 10

El árido grueso, se puede clasificar según la Tabla 4, donde se especifica diferentes gradaciones, definidas por dos límites extremos, dentro de las cuales debe estar comprendida la granulometría de cada material grueso.



Tabla 4 Requisitos de gradación del árido grueso. (NTE INEN 872, 2011)

(1) Tamiz INEN (mm)	Porcentaje que debe pasar por los tamices INEN indicados en la columna (1) para ser considerado como árido grueso de grado:									
	90 – 37.5 mm	63 – 37.5 mm	53 – 4.75 mm	37.5 – 4.75 mm	26.5 – 4.75 mm	19 – 4.75 mm	13.2 – 4.75 mm	9.5 – 2.36 mm	5.3 – 26.5 mm	37.5 – 19 mm
106	100									
90	90 – 100									
75	100									
63	25 – 60	90 – 100	100						100	
53	35 – 70	95 – 100	100						90 – 100	100
37,5	0 – 15	0 – 15	95 – 100	100					35 – 70	90 – 100
26,5		35 – 70	95 – 100	100					0 – 15	20 – 55
19	0 – 5	0 – 5	37 – 70	90 – 100	100				0 – 15	0 – 15
13,2		10 – 30	25 – 60	90 – 100	100				0 – 5	0 – 5
9,5		10 – 30	20 – 55	40 – 70	85 – 100				0 – 5	0 – 5
4,75		0 – 5	0 – 10	0 – 15	10 – 30				0 – 5	0 – 5
2,38			0 – 5	0 – 5	0 – 10				0 – 5	0 – 10
1,18									0 – 5	0 – 5



Luego de realizar el ensayo, el resultado se presenta por medio de curvas granulométricas, donde la ordenada representa la abertura del tamiz, en escala logarítmica; y las abscisas representan el porcentaje de material acumulado que pasa por cada tamiz. Mediante este análisis se determina la cantidad de material grueso, fino, los excesos de ciertas fracciones y si la granulometría es continua o discontinua.

A partir de este ensayo se determinan tres conceptos fundamentales:

- **TAMAÑO MAXIMO:** Es la menor abertura del tamiz que permite que pase el 100% de la muestra (ASTM).
- **TAMAÑO MAXIMO NOMINAL:** Es la abertura del tamiz hasta el cual se haya retenido el 5% del peso de la muestra.

El tamaño de los agregados influye directamente en la cantidad de pasta necesaria para unir todos los materiales, mientras aumenta el tamaño del agregado, disminuye la cantidad de pasta cementante, pero, a mayor tamaño de los áridos mayor posibilidad de producirse fisuras. Considerando los dos escenarios, el ACI C-211, indica que a medida que disminuye el tamaño máximo del agregado, incrementa la resistencia del hormigón, porque se produce mayor adherencia entre los materiales (Mamlouk & Zaniewski, 2009).

Es importante recalcar que la granulometría de los áridos reciclados varía según el proceso de trituración que se realice y puede ser modificada mediante pequeños ajustes de la trituradora. Las trituradoras de impacto son las que reducen de forma más notoria el tamaño de las partículas, pero producen mayor cantidad de material fino, seguidas de las quebrantadoras de cono y de las de mandíbulas. Para el presente estudio se utilizó una trituradora de mandíbulas.

- **MÓDULO DE FINURA:** Es una característica que se utiliza para describir y clasificar los áridos finos o arenas, aunque en teoría se puede usar para cualquier tipo de material. El Módulo de Finura es el número que se obtiene al dividir por 100 la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie normalizada: N°100, 50, 30, 16, 8 y 4, además de 3/8", 3/4", 1 1/2", 3 y 6 pulgadas. Cuando se determina el módulo de finura para áridos finos, no se utiliza tamices mayores a 9.5 mm o 3/8". El valor de este módulo es mayor,

cuando el agregado contiene granos más gruesos y decrece cuando el agregado disminuye de tamaño.

### 2.1.3.2. DENSIDAD

La densidad se define normalmente como la división de la masa entre volumen y es proporcional a la porosidad del material, es por ello que existen diferentes tipos de densidades relacionadas con la masa del agregado y el porcentaje de vacíos, denominados como: poros permeables e impermeables, o saturados y no saturados. Existen tres tipos de densidades:

- **DENSIDAD REAL:** Masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, excluyendo sus poros permeables e impermeables.
- **DENSIDAD NOMINAL:** Masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, excluyendo los poros permeables.
- **DENSIDAD APARENTE:** Masa promedio de la unidad de volumen de las partículas del agregado, incluyendo poros permeables e impermeables.

En el diseño de hormigón, la densidad aparente se utiliza para hacer la corrección de la cantidad de agua que se debe incluir en la mezcla, ya que en la dosificación se considera que los áridos están saturados.

Esta característica física de los áridos, depende de la constitución mineralógica de la roca madre; del tamaño de los poros, su continuidad y su volumen total. La porosidad es muy importante en el comportamiento de los agregados, ya que una partícula porosa es menos densa que una partícula compacta o maciza y no solo afecta a las propiedades mecánicas sino también a las propiedades de durabilidad como la resistencia a la abrasión.

El ensayo para determinar la densidad y la gravedad específica de los agregados se detalla en la norma NTE INEN 857 para árido grueso y NTE INEN 856 para árido fino. Para determinar la densidad del árido grueso se emplean las siguientes ecuaciones:

- Densidad relativa (SH):

$$D = \frac{A}{B - C}$$

*Ecuación 1*

- Densidad relativa (SSS):

$$D = \frac{B}{B - C} \quad \text{Ecuación 2}$$

- Densidad relativa aparente (SSS):

$$D = \frac{A}{A - C} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde:

A = Masa de la muestra seca al horno, gr.

B = Masa de la muestra saturada superficialmente seca, gr.

C = Masa aparente en agua de la muestra saturada, gr.

SH = Seco al Horno.

SSS = Saturado Superficialmente Seco.

Para determinar la densidad de árido fino por medio del método gravimétrico, se utiliza las siguientes ecuaciones:

- Densidad relativa (SH):

$$D = \frac{A}{(B + S - C)} \quad \text{Ecuación 4}$$

- Densidad relativa (SSS):

$$D = \frac{S}{(B + S - C)} \quad \text{Ecuación 5}$$

- Densidad relativa aparente:

$$D = \frac{A}{(B + A - C)} \quad \text{Ecuación 6}$$

donde:

A = Masa de la muestra seca al horno, gr.

B = Masa del matraz lleno con agua hasta la marca de calibración, gr.

C = Masa del matraz lleno con la muestra y agua hasta la marca, gr.

### 2.1.3.3. ABSORCIÓN Y HUMEDAD

Según el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), la absorción es la cantidad de agua que un agregado es capaz de retener entre sus poros, por ende, su ensayo consiste determinar el incremento de masa producto de su saturación. En cambio, la humedad es el porcentaje contenido de agua. Las condiciones en que podemos encontrar a los agregados son:

- **HUMEDO NO SATURADO:** Cuando algunos de los poros permeables contienen agua.
- **SATURADO SUPERFICIE SECA (SSS):** Se produce cuando los poros internos del agregado se encuentran llenos de agua, pero la superficie está seca.
- **SATURADO SUPERFICIE HUMEDA (SSH):** Se produce cuando los agregados se encuentran expuestos a condiciones que ocasionan que tanto sus poros como su superficie se encuentren saturados con agua.

La absorción y humedad modifican la dosificación del hormigón y alteran la relación agua/cemento. Si los agregados tienen mayor humedad que absorción se tiene un exceso de agua que deberá ser retirada, mientras que, si la absorción es mayor a la humedad de los agregados se deberá aumentar la cantidad de agua para garantizar la saturación (condición del agregado que se considera en el diseño del hormigón).

La absorción del agregado grueso se determina por medio de la norma NTE INEN 856; mientras que para el agregado fino se utiliza la norma NTE INEN 857. Mientras que la humedad se determina por medio de la norma NTE INEN 862. A continuación, se detallan las ecuaciones utilizadas.

- Absorción del árido grueso:

$$Absorción, \% = \frac{B - A}{A} * 100$$

*Ecuación 7*

donde:

A = Masa de la muestra seca al horno, gr.

B= Masa de la muestra saturada superficialmente seca, gr.

- Absorción del árido fino:

$$\text{Absorción, \%} = \frac{S - A}{A} * 100$$

*Ecuación 8*

donde:

A = Masa de la muestra seca al horno, gr.

S= Masa de la muestra saturada superficialmente seca, gr.

- Humedad:

$$P = \frac{100 (W - D)}{D}$$

*Ecuación 9*

donde:

P = Contenido total de humedad evaporable de la muestra, %.

W = Masa de la muestra original, gr.

D = Masa de la muestra seca, gr.

#### 2.1.3.4. MASA UNITARIA

Esta propiedad describe la capacidad de acomodo del agregado para llenar un recipiente de volumen conocido y se determina mediante el ensayo NTE INEN 858. La masa unitaria se puede determinar suelta y compactada. La masa unitaria compactada se requiere dentro de la dosificación de hormigón y consiste en llenar un recipiente con tres capas de árido y compactar cada capa con 25 golpes estándar, dejando caer una varilla desde una altura de 5cm por encima de su borde. Las medidas de la varilla y recipiente están normadas. El objetivo de este ensayo es determinar la masa por unidad de volumen de una muestra de agregado, que no exceda de un tamaño máximo nominal de 125 mm.

Las ecuaciones utilizadas para determinar esta característica física se detallan a continuación:

- Masa Unitaria:

$$M = \frac{G - T}{V}$$

*Ecuación 10*

donde:

M = Masa unitaria del árido, kg/m<sup>3</sup>.

G = Masa del árido más el molde, kg.

V = Volumen del molde, m<sup>3</sup>.

- Contenido de vacíos:

$$\text{Vacíos, \%} = \frac{[(S - M) * Da] * 100}{(S * Da)}$$

*Ecuación 11*

donde:

Da = Densidad del agua, 998 kg/m<sup>3</sup>

### 2.1.3.5. DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO

Esta propiedad ayuda a determinar la calidad del agregado. El ensayo que permite la determinación del porcentaje de desgaste del árido grueso, está detallado en la norma NTE INEN 860 (ASTM C131) y consiste en colocar una muestra de árido grueso dentro de la máquina de Los Ángeles con la respectiva carga abrasiva, durante un tiempo normado, después se retira el material, se lava en el tamiz N°12 y se lo seca.

$$\text{Porcentaje de desgaste} = \frac{Pa - Pb}{Pa} * 100$$

*Ecuación 12*

donde:

Pa = Masa de muestra seca antes de colocar en la máquina de los Ángeles.

Pb = Masa de la muestra seca retenida en el tamiz N°12.

## 2.2. CEMENTO

### 2.2.1. GENERALIDADES

“Se utiliza la palabra cemento para asignar a toda sustancia que posee propiedades de ligante, cualquiera que sea su origen. Dada la alta producción de cemento portland, con relación a otros cementos, su uso es generalizado” (Rochel Awad, 1999). Al reaccionar químicamente el cemento con el agua, pasan por un proceso de fraguado y

endurecimiento, hasta formar un material con propiedades aglutinantes: adherencia y cohesión, que permita la unión de los minerales, formando un todo compacto (Guzmán, 2001). El cemento influye directamente en las propiedades del hormigón, especialmente en la resistencia a la compresión (propiedad más influyente).

Para garantizar la eficiencia del cemento se sigue la norma NTE INEN 152, la misma que establece que para cualquier ensayo en el cual sea necesario el cemento, este será rechazado si no cumple con determinados requisitos, si presenta indicios de fraguado parcial o si contiene terrones, ya que afectará la calidad del hormigón.

### 2.2.2. TIPOS DE CEMENTO

Los cementos hidráulicos son aquellos que tienen la propiedad de fraguar y endurecer en presencia de agua, porque reaccionan químicamente con ella para formar un material de buenas propiedades aglutinantes.

*Tabla 5 Tipos de Cemento Portland (NTE INEN 152, 2012)*

<b>Tipo</b>	<b>Características</b>	<b>Aplicaciones</b>
I	Para ser utilizado cuando no se requieren las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo.	Uso en general
IA	Cemento tipo I con incorporador de aire.	
II	Moderada resistencia a los sulfatos.	Tuberías de drenaje, muros de contención, presas.
IIA	Cemento tipo II con incorporador de aire.	
II(MH)	Moderados: calor de hidratación y resistencia a los sulfatos.	
II(MH)A	Cemento tipo II(MH) con incorporador de aire.	
III	Alta resistencia temprana (mayor finura)	Prefabricados
IIIA	Cemento tipo III con incorporador de aire.	
IV	Bajo calor de hidratación.	Presas
V	Alta resistencia a los sulfatos.	Plataformas marinas



Este material presenta propiedades de adherencia y cohesión que permiten la unión de fragmentos minerales entre sí, formando un todo compacto. En la construcción, se ha generalizado la utilización de la palabra cemento para designar un tipo de aglutinante específico denominado Cemento Portland, debido a que es el más común (Guzmán, 2001).

Según la norma NTE INEN 0152 (ASTM C150), existen diferentes tipos de cemento, los cuales se describen en la Tabla 5Tabla 5.

### 2.2.3. PROPIEDADES DEL CEMENTO

#### 2.2.3.1. DENSIDAD

Su uso principal radica en la dosificación del hormigón y se rige bajo la norma NTE INEN 156. Esta propiedad se determina con el frasco de Le Chatelier, el cual permite determinar el volumen correspondiente a una cierta masa de cemento, por desplazamiento del líquido colocado dentro del frasco. La densidad del cemento varía entre 2.90 y 3.20.

La diferencia entre las lecturas antes y después de colocar el cemento, representa el volumen del líquido desplazado. La densidad se calcula con la Ecuación 13.

$$\rho \left( \frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{masa del cemento}}{\text{volumen desplazado}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Otra forma más útil de expresar esta propiedad es como gravedad específica:

$$Gr. \text{ esp} = \frac{\text{densidad del cemento}}{\text{densidad del agua a } 4^{\circ}C} \quad \text{Ecuación 14}$$

#### 2.2.3.2. CONSISTENCIA NORMAL

Esta propiedad determina el tiempo de fraguado y estabilidad volumétrica del cemento y se rige bajo la norma NTE INEN 157 (ASTM C 187). Este ensayo se basa en la resistencia que opone la pasta de cemento y agua a la penetración de la varilla del aparato de Vicat en un tiempo determinado. Luego de 30 segundos de haber sido

soltada la varilla, se dice que la pasta está en consistencia normal cuando la varilla penetra  $25\text{mm} \pm 1\text{mm}$  bajo la superficie original de la pasta.

La consistencia normal se expresa como un porcentaje de la masa del cemento seco y se determina mediante la Ecuación 15.

$$C(\%) = \frac{m_a}{m_c} * 100 \quad \text{Ecuación 15}$$

donde:

C = Consistencia normal, %

$m_a$  = Masa del agua, gramos

$m_c$  = Masa del cemento, gramos

### 2.2.3.3. TIEMPO DE FRAGUADO

Esta propiedad determina el tiempo en que la mezcla pasa del estado fluido o plástico a estado sólido. En la práctica existen dos tipos de fraguado: inicial y final, que controlan la calidad del cemento. La norma que rige este ensayo es la NTE INEN 158 y consiste en someter la pasta de cemento a la penetración de una aguja de 1 mm de diámetro y 300gr de masa a diferentes intervalos de tiempo. El tiempo inicial de fraguado es el tiempo transcurrido entre el primer contacto y hasta que ocurra una penetración de 25mm, mientras que el tiempo de fraguado final es el transcurrido entre el primer contacto y el instante en que la aguja no deja marca circular completa en la superficie de la pasta.

Para determinar el tiempo de fraguado inicial, la norma establece la siguiente ecuación:

$$\left( \left( \frac{H - E}{C - D} \right) * (C - 25) \right) + E \quad \text{Ecuación 16}$$

donde:

E = Tiempo en minutos de la última penetración mayor que 25mm

H = Tiempo en minutos de la primera penetración menor que 25mm

C = Lectura de penetración al tiempo E

D = Lectura de penetración al tiempo H

### 2.3. CENIZA VOLANTE

La norma NTE INEN 491 otorga definiciones y clasificación de puzolanas, dentro de las cuales se puede encontrar la ceniza volante que se utilizó en este estudio. De acuerdo con la normativa nacional, el cascote es un “material granulado grueso obtenido por la rotura de ladrillo y usado, a la vez, como agregado y como material puzolánico. Se obtiene como un residuo de la industria del ladrillo.” (NTE INEN 491, 1980). El tamaño de las partículas depende de las tecnologías que se empleen para la pulverización del carbón, que es uno de los componentes de la arcilla con la cual se hacen los ladrillos, además del quemado y la recolección de la ceniza. La ceniza volante puede tener diámetros entre 1  $\mu\text{m}$  y 150  $\mu\text{m}$ .

Las cenizas volantes están constituidas fundamentalmente por partículas vítreas, esféricas o redondeadas, de granulometría muy fina y con composición química muy similar a la de la materia mineral del carbón, de la que procede. Así pues, sus componentes principales son sílice, alúmina, óxido férrico y cal, en diferentes proporciones según su origen. También se encuentran en la ceniza partículas irregulares y angulosas, tanto minerales como partículas de carbón que no se ha quemado.

La incorporación de cenizas volantes en las mezclas de hormigón se puede realizar para reducir la cantidad de cemento, caso en el que actúa como un elemento activo; o también como sustituto de una parte de los áridos del hormigón, entonces constituye un elemento inerte. En el primer caso, la incorporación permite reducir el costo del hormigón ya que las cenizas son baratas y afectan las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido, mejorando la manejabilidad y disminuyendo el calor de hidratación, debido a la reducción de contenido de cemento. En estado endurecido se puede presentar baja resistencia a edades tempranas, pero a largo plazo se puede alcanzar resistencias superiores a las obtenidas en un hormigón que no contenga ceniza, ya que las cenizas tienen un proceso de reacción puzolánica muy lenta.

## 2.4. HORMIGÓN

### 2.4.1. GENERALIDADES

“El hormigón es una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta está compuesta de cemento y agua, une los agregados creando una masa similar a una roca” (Kosmath, 2004). Los componentes de un hormigón interactúan entre ellos hasta formar una mezcla semilíquida y luego de pasar por las etapas de fraguado inicial y final, y endurecimiento, alcanzando ciertas características especiales, que dependen directamente de las propiedades de sus componentes.

La ventaja principal del hormigón es su alta resistencia a compresión, lo que no pasa frente a la tracción o flexión, por lo que es necesario el empleo de otros materiales como el acero. La norma NTE INEN 2551, establece la resistencia mínima a compresión que deben cumplir los hormigones, descritos en la Tabla 7.

Tabla 6 Requisitos de resistencia para el hormigón. (NTE INEN 2551, 2011)

Tipo de Hormigón	Resistencia a Compresión MPa (kg/cm <sup>2</sup> )*		
	3 días	7 días	28 días
Alta Resistencia Inicial	17 (170)	24 (240)	-
Resistencia Normal			
Masa Normal	-	17 (170)	24 (240)
Liviano, Utilizando arena de masa normal	-	17 (170)	24 (240)
Liviano	-	17 (170)	24 (240)

\*Adaptado.

### 2.4.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

#### 2.4.2.1. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

Se presentan en forma heterogénea, ya que los agregados son de origen y dimensiones diferentes, las principales propiedades se describen a continuación.

##### 2.4.2.1.1. CONSISTENCIA

La consistencia es la facilidad del hormigón de adaptarse a una forma específica (Hannant, 1994). La consistencia de una mezcla de hormigón depende de la cantidad de agua de amasado y cemento, empleo de aditivos, tamaño, granulometría y forma de los agregados. Esta propiedad se determina en base a la norma NTE INEN 1578 y consiste en colocar, en tres capas, el hormigón recién mezclado dentro del cono de

Abrams y compactarlo con 25 golpes por cada capa. Inmediatamente se levanta el cono y se mide el asentamiento. En la Tabla 7 y Tabla 9 se detalla el rango de asentamiento correspondiente a cada tipo de consistencia.

Tabla 7 Rangos de asentamiento. (Sánchez de Guzmán, D. 2004)

Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0 - 20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación.	Con vibradores de formaleta; concretos de proyección neumática (lanzados).	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión.
Seca	20 - 35	Pavimentos.	Pavimentadoras con terminadora vibratoria.	Secciones sujetas a vibración intensa.
Semi-seca	35 - 50	Pavimentos, fundaciones en concreto simple. Losas poco reforzadas.	Colocación con máquinas operadas manualmente.	Secciones simplemente reforzadas con vibración.
Media (plástica)	50 - 100	Pavimentos compactados a mano, losas, muros, vigas, columnas, cimentaciones.	Colocación manual.	Secciones simplemente reforzadas con vibración.
Húmeda	100 - 150	Elementos estructurales esbeltos o muy reforzados.	Bombeo.	Secciones bastante reforzadas con vibración.
Muy húmeda	150 - 200	Elementos esbeltos, pilotes fundidos "in situ".	Tubo embudo tremie.	Secciones altamente reforzadas sin vibración.
Súper fluida	Más de 200	Elementos muy esbeltos.	Autonivelante, autocompactante.	Secciones altamente reforzadas sin vibración y normalmente no adecuados para vibrarse.

Tabla 8 Consistencia del hormigón en función del asentamiento. (Jiménez P., García A., Morán F., 2000)

Consistencia	Asentamiento*
Seca (S)	0 a 20 mm
Plástica (P)	30 a 50 mm
Blanda (B)	60 a 90 mm
Fluida (F)	100 a 150 mm
Líquida (L)	> 160 mm

\*Asentamiento medido con cono de Abrams

#### 2.4.2.1.2. MANEJABILIDAD

La manejabilidad es una propiedad que se refiere a la facilidad con que este puede ser mezclado, manipulado, transportado, colocado, compactado sin que pierda su homogeneidad. Está directamente relacionado con la consistencia del material descrita anteriormente (Barros Fierro & Ramírez Cueva, 2012). El hormigón debe ser lo suficientemente trabajable para garantizar un buen colocado, acomodo y compactado sin las necesidades de añadir más agua. Normalmente se utilizan aditivos fluidizantes o incorporador de aire para mejorar la trabajabilidad del hormigón.

Dentro de los factores que afectan esta propiedad es el exceso en el tiempo de transporte o mezclado prolongado y el volumen de la mezcla. Si la mezcla es fluida, es aceptable; por otra parte, si la pasta contiene más cemento que agua es seca y menos trabajable y si la pasta tiene más agua que cemento será más trabajable y menos cohesiva (Rivera G., 2015).

#### 2.4.2.1.3. HOMOGENEIDAD

La homogeneidad es la propiedad del hormigón que indica que cualquier parte de la masa debe estar correctamente mezclada, evitando la exudación o segregación de los materiales. Se entiende por exudación al fenómeno en que el agua de la mezcla tiende a elevarse hacia la superficie y segregación a la separación de los elementos de la mezcla. Una pérdida de homogeneidad provoca un mal acabado superficial, afectando a la durabilidad y resistencia mecánica del hormigón (Barros Fierro & Ramírez Cueva, 2012).

#### 2.4.2.1.4. DENSIDAD DE LA MEZCLA

La densidad de la mezcla en estado plástico es un factor importante a considerar dentro de la industria hormigonera debido a que permite verificar la cantidad de materiales que se necesitan para elaborar un determinado volumen de hormigón.

El peso unitario del hormigón depende del tipo y la cantidad del tamaño del árido, cantidad de aire retenido y atrapado y de la cantidad de agua y cemento. Normalmente el hormigón tiene una densidad que va desde los 2200 a los 2400 kg/m<sup>3</sup>. En Ecuador, la norma desarrollada para realizar este ensayo es la NTE INEN 1579 y consiste en medir masa del hormigón compactado dentro de un recipiente y relacionarla para el volumen del mismo mediante la siguiente ecuación:

$$D = \frac{M_c - M_m}{V_m}$$

*Ecuación 17*

donde:

Mc = Masa del recipiente lleno con hormigón

Mm = Masa del recipiente

Vm = Volumen del recipiente

#### 2.4.2.2. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

##### 2.4.2.2.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

La resistencia a compresión simple es la característica más importante de un hormigón, es la resistencia de diseño del calculista y se determina con probetas de tamaño normalizado, se conoce como  $f'c$  y puede expresarse tanto en MPa como en kg/cm<sup>2</sup>. Si no se especifica su edad, se adopta que es a los 28 días (Guzman, 2001).

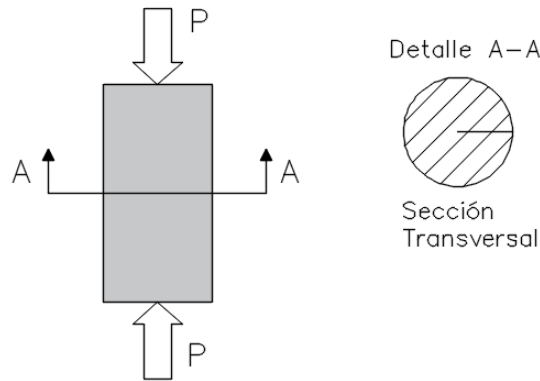


Ilustración 2 Esquema de aplicación de carga para el ensayo de compresión en probetas cilíndricas.

Para determinar la resistencia a compresión de probetas cilíndricas se siguen dos normas en específico: NTE INEN 1576 (ASTM C31) para la elaboración de los especímenes y la norma NTE INEN 1573 (ASTM C39) para el ensayo de resistencia a compresión, el cual consiste en aplicar una carga axial de compresión a cilindros de relación altura/diámetro igual a 2, a una velocidad de  $0,25 \pm 0,05 \text{ MPa/s}$ . La resistencia a la compresión se determina dividiendo la carga máxima alcanzada para el área de la sección transversal.

$$f'c = \frac{P}{A}$$

Ecuación 18

donde:

$f'c$  = Resistencia a compresión del espécimen, en  $\text{kg/cm}^2$ .

$P$  = Máxima carga aplicada, en  $\text{kg}$ .

$A$  = Área de la carga axial del espécimen, en  $\text{cm}^2$ .

Luego que el cilindro de hormigón llega a la rotura, es necesario observar las líneas de fallas para determinar los esfuerzos que han producido la falla y mejorar la mezcla. En la Ilustración 3 se muestra los tipos de falla detallados en la norma NTE INEN 1573.



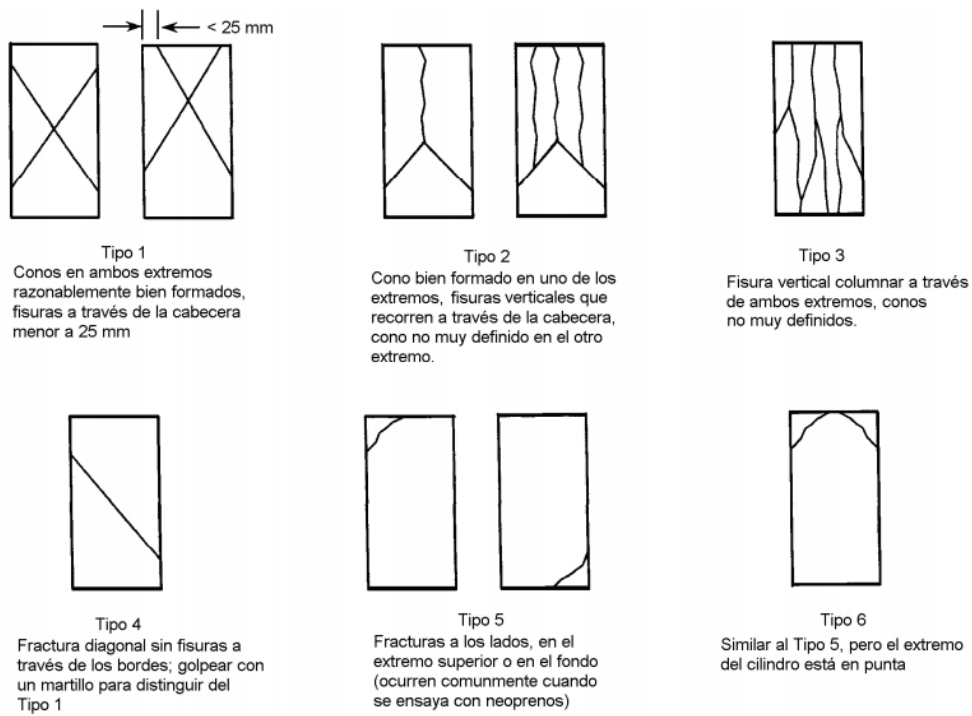


Ilustración 3 Esquema de los modelos típicos de fractura. (NTE INEN 1573, 2010)

#### 2.4.2.2.2. RESISTENCIA A TRACCIÓN

Como se indicó anteriormente el hormigón no es resistente a la tracción, apenas alcanza entre el 10% y 15% de su resistencia a compresión y generalmente no es una característica que usualmente se refiera en obra, sin embargo, es necesario conocer su valor debido a que, en ciertas estructuras, como los pavimentos, la resistencia a tracción puede reflejar de mejor manera cualidades como la calidad y limpieza de los áridos (Jiménez Montoya, P., García Meseguer, A., & Morán Cabré, F., 2010).

El ensayo se rige bajo la norma ASTM C496 y consiste en someter a compresión diametral una probeta (generalmente cilíndrica), a lo largo del cilindro formando una línea hasta alcanzar una rotura, a una velocidad de 0.9 MPa/min (Sáez & Patricio, 2014).

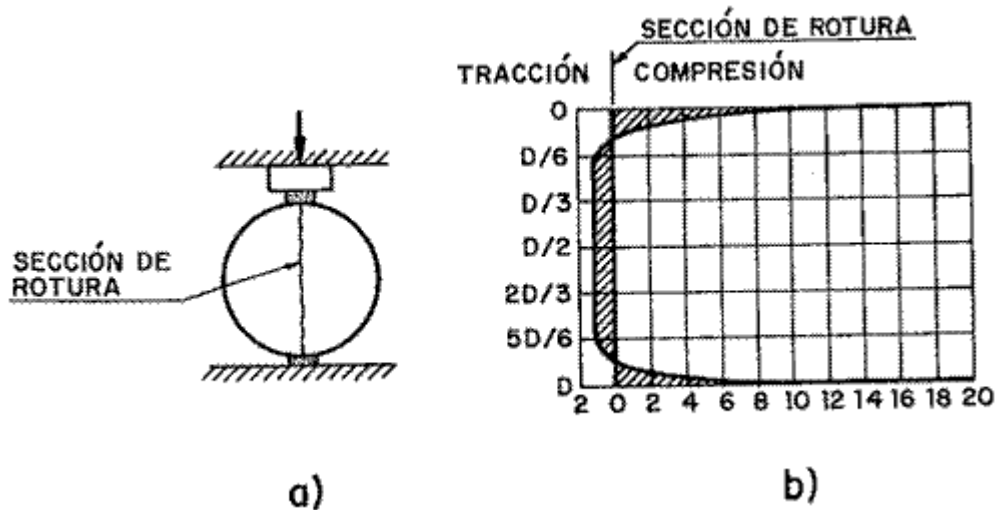


Ilustración 4 Ensayo a tracción indirecta (a) y distribución de esfuerzos (b). (Notas de Hormigón Armado, 2010)

La resistencia a tracción se calcula mediante la Ecuación 19:

$$f'_t = \frac{2F}{\pi * a * l}$$

Ecuación 19

donde:

F = Carga de rotura

a = Diámetro de la probeta

l = Longitud de la probeta

Una forma aproximada de determinar la resistencia a tracción, se calcula con:

$$f_t = 1,5\sqrt{f'_c}$$

Ecuación 20

#### 2.4.2.2.3. RESISTENCIA A FLEXIÓN

La resistencia del hormigón a flexión es superior a la resistencia a tracción, pero menor a la resistencia a la compresión (Rivera G., 2015). Este parámetro no es un factor determinante dentro de la calidad del hormigón, pero sirve para determinar la colaboración del hormigón dentro de una estructura armada.

La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Rotura (MR) y se determina mediante el ensayo especificado en las normas ASTM C78 o ASTM C293, dependiendo si la viga es sometida a carga en los tercios del elemento, o a una carga en el punto

medio, respectivamente. En el presente trabajo se utiliza la norma NTE INEN 2554 (ASTM C78), para aplicar la carga en los tercios de una viga simple de hormigón con sección transversal de 6 x 6 pulgadas (152.4 x 152.4 mm) y con una luz mínima de tres veces la altura del espécimen.

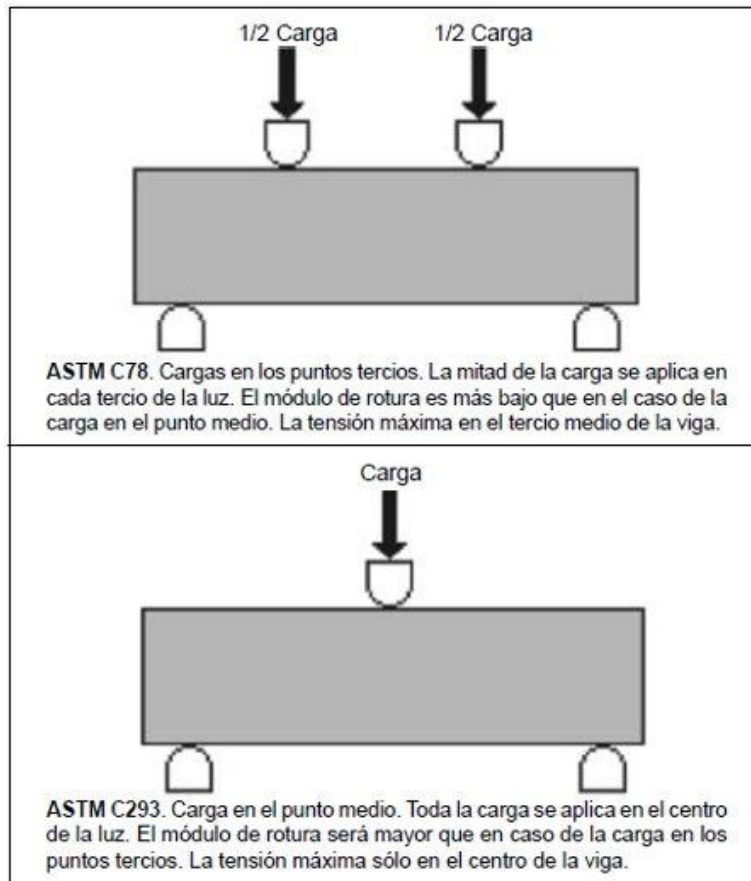


Ilustración 5 Ensayo de Flexión en vigas de hormigón simple. (CivilGeeks, 2011)

El módulo de rotura a flexión,  $MR$ , se encuentra entre el 10% y 20% de la resistencia a la compresión y es menor cuando está sometido a carga en dos puntos tercios que al estar sometido a carga en el punto medio (Guayanay Juca & Morales Mediavilla, 2016). Cuando no se disponen de ensayos de flexión, se puede utilizar una relación aproximada para determinar el módulo de rotura.

$$MR = k(RC)^{1/2}$$

Ecuación 21

donde:

MR = Módulo de rotura estimado para el hormigón ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

RC = Resistencia a la compresión obtenida en el hormigón ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

k = Constante que varía normalmente entre 2,0 y 2,7 para resistencias en  $\text{kg}/\text{cm}^2$  a los 28 días.

## 2.5. EVALUACIÓN AMBIENTAL

La (EIA) es un proceso jurídico-administrativo cuyo objetivo es medir, controlar y prevenir los posibles efectos que la ejecución de un determinado proyecto puede causar sobre un medio ambiente. La EIA está formada por factores ambientales que incluyen a los bienes materiales y al ser humano, como: económico, salud, bienestar, etc. Entonces un proyecto luego de ser evaluado ambientalmente es correcto si está vinculado con la vocación natural de su entorno (Orea & Villarino, 2013).

Una herramienta fiable de la Evaluación del Impacto Ambiental es el Análisis del Ciclo de Vida (ACV), que considera que el impacto se puede producir en cualquier etapa de su vida. Los aspectos básicos del análisis de ciclo de vida es un inventario de aspectos ambientales (entradas y salidas de energías y materiales, emisiones, etc.) y la evaluación de sus efectos potenciales como: efecto invernadero, agujero en la capa de ozono, energía, recursos naturales, etc. (Ortiz, Cea, & Josa, 2007).

El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) tiene aspectos globales, es decir que, la solución a problemas o la reducción de un agente contaminante no proporciona otro deterioro medio ambiental, además relaciona todos los residuos o emisiones generadas en función del sistema utilizado, lo que facilita algún tipo de evaluación. El defecto de este análisis es que no especifica el efecto temporal o espacial de una variante (Cardim de Carvalho Filho, 2001).

Según la ISO, el análisis del ciclo de vida está compuesto por cuatro elementos mostrados en la Ilustración 6 y descritos a continuación:

- Definición del objetivo y alcance
- Análisis de inventario
- Evaluación del impacto ambiental
- Interpretación de los resultados.

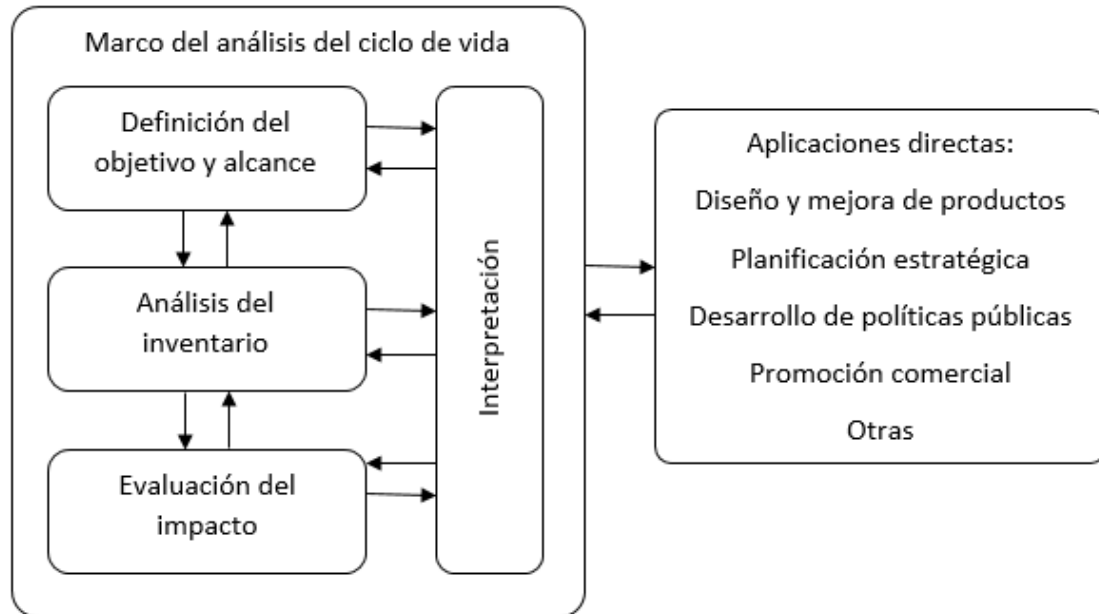


Ilustración 6 Marco del análisis del ciclo de vida. (ISO 14.040, 1997)

Para la evaluación del ciclo de vida del hormigón se puede encontrar software con diferentes criterios medioambientales evaluados que deben ser identificados para ingresar correctamente los datos solicitados. El comportamiento del hormigón a lo largo de su ciclo de vida es variable y está definido por:

- Composición de la mezcla: cemento, agregados, aditivo, agua, etc.
- Condiciones de producción: transporte, manejo de materia prima, acabados, consumo de energía.
- Necesidad de rehabilitación.
- Demolición, re-uso y reciclado de hormigón desechado.

### 2.5.1. HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN

Las herramientas de sostenibilidad medioambiental se clasifican en calificadoras y cuantificadoras. Las herramientas calificadoras otorgan una determinada certificación al proyecto evaluado, correspondiente a los puntos alcanzados durante cada etapa de su ciclo de vida. Las herramientas calculadoras miden el impacto ambiental que se genera a lo largo del ciclo de vida de cualquier tipo de proyecto.

Dentro de las herramientas Calificadoras se encuentra Greenroads y LEED, los cuales se describen a continuación.

- **GREENROADS v2.**

El sistema de calificación *Greenroads* es un manual de instrucciones utilizado para medir la sostenibilidad, da seguimiento a la gestión interna, gestión de rendimiento y la comunicación pública de los proyectos de infraestructura vial. Este sistema está formado por créditos relacionadas con el diseño y construcción de una obra vial; a cada crédito se le asigna una cantidad de puntos y la puntuación final es un indicador del desempeño del proyecto. La versión on-line *Greenroads v2 Project Checklist* está compuesta por categorías descritas en la Tabla 9.

Tabla 9 Categorías *Greenroads v2*. (*Greenroads, 2017*)

Categorías	Créditos	Puntos	Descripción
Medio ambiente y agua	10	30	Parámetros generales relacionados con la sostenibilidad del proyecto.
Actividades de construcción	11	20	Los parámetros evaluados incentivan la aplicación de metodologías ambientales relacionadas con recursos naturales.
Materiales y diseño	6	24	Promueve la reducción de costos, alargar la vida útil de los productos, reducir mantenimiento, a través del reciclado, optimización del materia, etc.
Utilidades y controles	8	20	Evaluar las prácticas sostenibles que ofrezcan un servicio que garantice seguridad y confort.
Acceso y habitabilidad	10	21	Evalúa las actividades consideradas para mejorar la calidad de servicio por encima de lo diseñado, relacionadas con la cultura, recreación, accesibilidad.
Creatividad y Esfuerzo	4	15	Reconocen cosas como la priorización de los valores locales, que supera los mínimos establecidos y las nuevas ideas que no se incluyen en el Sistema de Clasificación.
<b>Total</b>	<b>49</b>	<b>130</b>	

La calificación final es la suma de puntos obtenidos por cada crédito y se colocan en los niveles de certificación explicados a continuación:

Tabla 10 Niveles de certificación *Greenroads v2*. (*Greenroads, 2017*)

Nivel	Puntuación mínima
Bronce	40
Plata	50
Oro	60
Evergreen	80

- **LEED v4.**

LEED o Lideresa en Energía y Diseño Ambiental, es un sistema de calificación para proyectos destinados a la construcción de edificios amigables con el medio ambiente, eficaces y económicos. Debido a su prestigio internacional se ha convertido en un estándar para el diseño y operación de estructuras de alto rendimiento. La última versión, LEED v4 está diseñado para ser más flexible y registrar los aspectos propios de cada proyecto; tiene un enfoque basado en el rendimiento para el diseño, operaciones y mantenimiento a lo largo del ciclo de vida del proyecto. Las categorías desarrolladas por el checklist de LEED v4 en sus diferentes sistemas de calificación se describen en la Tabla 11.

*Tabla 11 Categorías LEED v4. (LEED, 2018)*

<b>Categoría</b>	<b>Descripción</b>
Pensamiento integrador	Promueve la selección de personas adecuadas para iniciar el proyecto y alinear los objetivos que permitan disminuir tiempo y recursos valiosos. Fomenta y recompensa la búsqueda de conexiones entre diferentes sistemas y procesos de construcción.
Energía	Incentiva el consumo mínimo de energía y recompensas de energías renovables. Enfatiza los impactos asociados a la energía para que los edificios tengan mayor rendimiento energético y operativo.
Agua	Esta sección se encarga de la medición de todas las fuentes de agua relacionadas con el edificio para garantizar que los proyectos puedan monitorear, controlar su uso e identificar las oportunidades de ahorro.
Residuos	Aborda las estrategias de reducción de fuentes, reutilización, reciclaje y el control de desperdicio de energía; como prioridades para reducción de residuos.
Materiales	Promueve el dialogo entre fabricantes y equipos del proyecto sobre la optimización de impactos ambientales, sociales, salud y posibles compensaciones que permitan seleccionar el material. Esta categoría considera el ciclo completo del edificio.
Localización y transportación	Se debe considerar la ubicación correcta de las edificaciones para que los usuarios tengan acceso a los servicios públicos. Esta herramienta mide los beneficios en metros de distancias de viaje, estacionamientos absolutos, redes de bicicleta.
Sitios sostenibles	Abordan impactos de recompensas sobre las decisiones que contemplen el cuidado del entorno que rodea al edificio, la relación entre edificio y servicios del ecosistema; y la preservación de la

---

	biodiversidad.
Salud y experiencia humana.	Se busca que los espacios de los edificios brinden salud y confort a los ocupantes. Esta categoría sube el valor del edificio, mejora la productividad y disminuye el ausentismo.
Impactos regionales	Esta categoría reconoce la ayuda que brindan los proyectos a la solución de problemas específicos de su ubicación.
Innovaciones	El tema de sostenibilidad está en constante evolución, es por ello que esta categoría reconoce las características innovadoras y estrategias sostenibles.

---

Según la puntuación obtenida en la evaluación, LEED ubica a los proyectos dentro de los siguientes niveles de certificación:

*Tabla 12 Niveles de certificación LEED v4. (LEED, 2018)*

<b>Nivel</b>	<b>Puntos</b>
Certificación LEED	40-49
Silver	50-59
Gold	60-70
Platinum	80 o más

- **PALATE v2.2**

PaLATE es una herramienta calculadora que sirve para la evaluación del Ciclo de Vida de un Pavimento, a través del cálculo de efectos ambientales y económicos. Mide las emisiones de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> y CO emitidas durante las etapas de construcción, mantenimiento del proyecto y las emisiones emitidas por el equipo utilizado, además determina la cantidad de energía consumida. La hoja correspondiente a construcción, está dividido en diferentes secciones correspondientes a las capas de un pavimento que deben ser llenados con los datos de densidad de los materiales utilizados, cantidad y distancia de transportación.

## 2.6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

En el diseño de un hormigón se considera los requisitos de resistencia y durabilidad que demanda una determinada obra; pero entre más exigencias mayor es el costo de fabricación. El costo de un hormigón convencional depende directamente de la cantidad de los materiales utilizados y de su disponibilidad.





El uso de materiales considerados de desperdicio no tiene un precio de adquisición definido. Sin embargo, el precio del proceso de preparación puede afectar el costo de producción convencional. Este costo debe relacionarse con las propiedades de resistencia, trabajabilidad y durabilidad del hormigón para establecer si es rentable o no el uso de materiales reciclados (Lara & Enrique, 2016).

## CAPÍTULO 3: MATERIALES Y METODOLOGÍA

### 3.1. MATERIALES

#### 3.1.1. AGREGADOS

Los agregados de origen natural que se utilizaron fueron proporcionados por la empresa Holcim de su planta ubicada en la ciudad de Cuenca. Se emplearon tres tipos de agregados:

- Agregado Grueso de río o Grava: TMN = 19 mm (3/4")
- Agregado Grueso triturado o Ripio: TMN = 19 mm (3/4")
- Agregado Fino o Arena

La grava y la arena son procedentes del cantón Santa Isabel ubicado a 75 km al suroeste de la ciudad de Cuenca, mientras que el agregado triturado procede de las minas ubicadas en el sector de El Descanso, 19 km al norte de la ciudad.



*Ilustración 7 Agregado Grueso de río o Grava.*



*Ilustración 8 Agregado Grueso triturado o Ripio.*



Ilustración 9 Agregado Fino o Arena

Las partículas de hormigón reciclado son provenientes de cilindros donados por la empresa Holcim, los cuales fueron sometidos al ensayo de compresión simple con anterioridad y cuyos valores de resistencia se mantuvieron siempre entre  $210 \text{ kg/cm}^2$  y  $350 \text{ kg/cm}^2$ . En la Tabla 13 se presenta los valores de resistencia de las probetas recicladas, así como el porcentaje de cada rango respecto del total de muestras obtenidas.

Tabla 13 Resistencia a compresión de probetas recicladas.

Rango de Resistencia ( $\text{kg/cm}^2$ )	Número De Cilindros	%
200-240	13	26.5
240-280	13	26.5
280-320	12	24.5
320-360	12	24.5
<b>Total</b>	<b>49</b>	<b>100.0</b>

Los cilindros de hormigón pasaron por un proceso de trituración hasta obtener un Tamaño Máximo de agregado igual a  $9.5 \text{ mm}$  ( $3/8''$ ), este proceso se realizó en la máquina trituradora perteneciente al Laboratorio de Materiales de Construcción de la Facultad de Arquitectura de la Universidad de Cuenca. Debido a la complejidad del proceso y para aumentar la practicidad no se realizó la separación del agregado grueso

y el matriz cementante que conformaban los cilindros de hormigón reciclado, solamente se desechó el material fino que pasó el tamiz N°4.



*Ilustración 10 Hormigón reciclado antes del proceso de triturado.*



*Ilustración 11 Hormigón reciclado después del proceso de triturado.*

### 3.1.2. CEMENTO

Debido a que se partió de una dosificación otorgada por la empresa Holcim Ecuador S.A., se decidió utilizar cemento tipo III, el cual es utilizado por la empresa para elaborar las mezclas de hormigón comercializadas en la ciudad de Cuenca. Esto se realizó con la finalidad de aprovechar los beneficios de este tipo de material cementante como su mayor módulo de finura, además de que permite alcanzar una alta resistencia a edades tempranas para ensayar los especímenes antes del tiempo de curado especificado en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC - SE - HM) y tal como establece la norma NTE INEN 1573 (ASTM C39).

El cemento Holcim Premium tipo HE es un cemento hidráulico de alta resistencia fabricado bajo la norma ecuatoriana NTE INEN 2380 (ASTM C1157). Está compuesto por clinker de cemento portland, yeso y adiciones puzolánicas naturales. Es apto para todo tipo de estructuras, ya que gracias a su alta resistencia a edades tempranas permite un desencofrado rápido. El desarrollo de la resistencia de cemento hidráulico se debe a sus características físicas y químicas, además de la relación agua/cemento, relación cemento/agregado, granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez de las partículas del agregado, uso de aditivos, condiciones de curado y condiciones del medio ambiente (Holcim, 2015).

Para cumplir con la norma NTE INEN 152, se almacenaron los sacos de cemento en un lugar cubierto, seco y ventilado; no estuvo en contacto con el piso o pegado a la pared y no se utilizaron sacos almacenados más de tres meses, ni sacos de cemento abiertos más de 15 días.

### 3.1.3. CENIZA VOLANTE

Se utilizó el residuo proveniente de los hornos en los cuales se elaboran ladrillos artesanales, los mismos que posteriormente son utilizados como mampostería en viviendas y otras edificaciones. Este residuo se sometió en primer lugar a un proceso de secado y tamizado para eliminar las partículas de carbón que no llegaron a incinerarse en la elaboración de los ladrillos. Luego se realizó la granulometría (NTE INEN 696) del residuo de ceniza para determinar el porcentaje que pasa por cada tamiz. Para realizar las mezclas se seleccionó dos tipos de materiales; (i) la ceniza que pasó el tamiz N°200 y se retuvo en el fondo, es decir, partículas menores a 0.075 mm, y (ii) la ceniza que pasó el tamiz N°100 y se retuvo tanto en el tamiz N°200 como en el fondo, las cuales tienen un tamaño menor a 0.149 mm.



*Ilustración 12 Ceniza que pasó el tamiz N°200 y se retuvo en el fondo.*



*Ilustración 13 Ceniza que pasó el tamiz N°100 y se retuvo tanto en el tamiz N°200 como en el fondo.*

Para realizar una comparación con una ceniza proveniente de procesos industriales, también se trabajó con SikaFume, una adición en polvo fino, color gris, con base en microsílica y la cual es comercializada por la empresa Sika S.A. en Ecuador.



*Ilustración 14 SikaFume, ceniza comercializada por Sika S.A.*

### 3.1.4. AGUA

El agua utilizada tanto en la fabricación del hormigón, como en el proceso de curado de los especímenes, es el agua potable de la ciudad de Cuenca, la cual es apta para la elaboración de mezclas de hormigón (NEC, 2015).

### 3.1.5. ADITIVO

En las mezclas de hormigón se utilizó el aditivo Sikament N 450, un superplastificante, reductor de agua de alto poder y economizador de cemento, elaborado por la empresa Sika S.A. exclusivamente para Holcim Ecuador S.A. Gracias a sus características este aditivo ayuda a fluidificar el hormigón y facilita su colocación, además permite recuperar el asentamiento del hormigón premezclado sin afectar sus tiempos de fraguado. Según la cantidad que se utilice, se puede reducir hasta un 25% del agua de la mezcla, manteniendo la manejabilidad inicial y obteniéndose un incremento de la resistencia en todas las edades.

La cantidad de aditivo que se utilizó en cada mezcla de hormigón equivale al 1% de la masa de cemento y fue colocado en la última porción de agua de amasado de la mezcla.

## 3.2. METODOLOGÍA

Para elaborar el hormigón con material reciclado se establecieron varios pasos a seguir: (1) caracterización de los agregados naturales y reciclados, (2) determinación del porcentaje óptimo de cada material reciclado y diseño de las mezclas de hormigón, (3) elaboración de mezclas de hormigón patrón y hormigón con material reciclado, (4) ensayo de las muestras y comparación de propiedades entre el hormigón patrón y el hormigón elaborado con material reciclado, (5) evaluación ambiental y (6) evaluación económica.

### 3.2.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

#### 3.2.1.1. AGREGADOS

Para determinar las propiedades de los agregados se realizaron los siguientes ensayos de caracterización:

- Análisis granulométrico de los áridos, grueso y fino (NTE INEN 696:2011)

Para el análisis granulométrico se utilizaron los tamices detallados en la Tabla 14.

Tabla 14 Series de tamices utilizados en análisis granulométrico.

AGREGADO GRUESO		AGREGADO FINO	
Tamiz	Abertura en mm	Tamiz	Abertura en mm
1"	25.00	N°4	4.75
3/4"	19.00	N°8	2.38
1/2"	12.50	N°10	2.00
3/8"	9.50	N°16	1.19
N°4	4.75	N°30	0.59
N°8	2.38	N°40	0.42
		N°50	0.297
		N°100	0.149
		N°200	0.074

- Densidad, Gravedad Específica y Absorción del Árido Fino (NTE INEN 856:2010)
- Densidad, Gravedad Específica y Absorción del Árido Grueso (NTE INEN 857:2010).
- Degradación del Árido Grueso de partículas menores a 37.5mm mediante el uso de la Máquina de los Ángeles (NTE INEN 860:2011)
- Masa unitaria (peso volumétrico) y Porcentaje de vacíos (NTE INEN 858).

### 3.2.1.2. CENIZA VOLANTE

Para comparar las propiedades de los diferentes tipos de ceniza y el cemento se determinó la densidad según la norma NTE INEN. Además, se determinó el tiempo de fraguado de la mezcla de cemento y el porcentaje óptimo de ceniza.

### 3.2.2. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO Y DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN

#### 3.2.2.1. MEZCLA PATRÓN

La dosificación que se utilizó como base para la presente investigación y a la cual se realizaron las modificaciones pertinentes, hasta encontrar un porcentaje óptimo de los elementos reciclados, fue otorgada por la empresa Holcim y corresponde a una resistencia a compresión  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ . La mezcla patrón para  $1.0 \text{ m}^3$  de hormigón se presenta en la Tabla 15 y corresponde a los agregados con la absorción que se indica en la Tabla 16.



Tabla 15 Dosificación de la mezcla patrón. (Holcim, 2018)

Material	Cantidad necesaria para 1.0 m <sup>3</sup> de hormigón
Cemento	318 kg
Ripio	194 kg
Grava	776 kg
Arena	762 kg
Agua	192 lt
Aditivo	4.54 kg

Tabla 16 Condiciones de absorción de los agregados naturales. (Holcim, 2018)

Agregado	Absorción (%)
Arena	5.5
Ripio	1.77
Grava	4.6

Se realizaron ajustes de absorción y humedad en cada una de las mezclas elaboradas.

A partir de la mezcla patrón, se determinó el diseño para el hormigón con material reciclado, el cual se diferencia del primero por el porcentaje de agregado grueso que fue reemplazado por el agregado de hormigón reciclado y por el porcentaje de cemento reemplazado por la ceniza volante. Para determinar el porcentaje óptimo de cada material se estudió cada uno por separado.

### 3.2.2.2. MEZCLA CON HORMIGÓN RECICLADO

Para la determinación del porcentaje óptimo de agregado de hormigón reciclado se realizó el ensayo de Masa Unitaria descrito en la norma NTE INEN 858. Se prepararon cuatro ensayos que tuvieron como base la combinación de áridos con las proporciones establecidas en la dosificación patrón, en las cuales se varió el porcentaje de agregado de hormigón reciclado en sustitución de la grava, los porcentajes de material reciclado utilizados fueron: 20%, 25%, 30% y 35%. Los resultados obtenidos se presentan en una gráfica de Masa Unitaria versus Porcentaje de Agregado de Hormigón Reciclado, donde se obtuvo una curva de tendencia de segundo orden, para determinar el porcentaje óptimo de agregado reciclado que genere el punto máximo de la curva.

### 3.2.2.3. MEZCLA CON CENIZA VOLANTE

Para determinar el porcentaje óptimo de ceniza volante que se puede incluir en el diseño como reemplazo del cemento, se elaboraron los siguientes diseños:

- Mezclas con la ceniza extraída de los hornos utilizados para la elaboración de ladrillos artesanales y la cual pasó el tamiz N° 200 y se retuvo en el fondo de la serie. Esta ceniza se utilizó en reemplazo del cemento en porcentajes de 10%, 20%, 30%, 50% y 70%.
- Mezclas con la ceniza extraída de los hornos utilizados para la elaboración de ladrillos artesanales y la cual pasó el tamiz N° 100; y se retuvo tanto en el tamiz N° 200 como en el fondo de la serie. La ceniza se utilizó en reemplazo del cemento en porcentajes de 10%, 20% y 30%.
- Mezclas con SikaFume, producto elaborado por la empresa Sika S.A. Este material se utilizó en reemplazo del cemento en porcentajes de 10%, 20% y 30%.

El segundo y tercer tipo de mezclas no se realizó con todos los porcentajes de ceniza utilizados en el primer tipo, ya que el material utilizado es más denso que el cemento y, teniendo en cuenta la bibliografía estudiada, la trabajabilidad y capacidad de adherencia disminuye significativamente a medida que aumenta el porcentaje de ceniza utilizada.

Los resultados de las mezclas correspondientes a cada tipo de ceniza se representaron mediante gráficas que mostraron la relación entre la resistencia y el tiempo de curado, para determinar así el porcentaje óptimo de ceniza que puede reemplazar al cemento.

### 3.2.2.4. COMBINACIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO Y CENIZA VOLANTE

Una vez que se determinó el porcentaje óptimo de cada uno de los materiales reciclados por separado, se realizó una combinación de los mismos dentro de una sola mezcla para estudiar el comportamiento conjunto.

### 3.2.3. ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN

Para la elaboración de todas las mezclas de hormigón se siguió la norma NTE INEN 1576 (ASTM C31), correspondiente a la elaboración y curado de especímenes de hormigón de cemento hidráulico. Los especímenes elaborados fueron de dos tipos: (i)

cilíndricos utilizados para ensayos de compresión simple y tracción indirecta; y (ii) prismáticos utilizados para ensayos de flexión. Es importante establecer que se utilizó el material de la misma manera que se lo hace en la industria, es decir, los agregados naturales se utilizaron tal como llegan a la planta hormigonera, sin lavar ni tamizar.

Todas las mezclas realizadas fueron calculadas para llenar un volumen correspondiente a 9 probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, una viga con una sección transversal de 6 x 6 x 21 pulgadas o 152.4 x 152.4 x 533.4 mm; además se tuvo en cuenta un excedente del 30% del volumen, que permita realizar los ensayos de asentamiento y densidad de la mezcla. El tiempo de mezclado se detalla en la Tabla 17.

*Tabla 17 Tiempo de mezclado del hormigón.*

<b>Tiempo (minuto)</b>	<b>Estado De La Mezcladora</b>	<b>Descripción</b>
00:00	Parada	Colocar los agregados gruesos y la mitad de agua
01:00	Movimiento	
02:00	Parada	Colocar el agregado fino
03:00	Movimiento	
04:00	Parada	Colocar el material cementante
05:00	Movimiento	
06:00	Movimiento	Colocar el agua y aditivo
07:00	Parada	Mover manualmente
08:00	Movimiento	

#### 3.2.4. ENSAYO DE MUESTRAS Y COMPARACIÓN DE PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ELABORADO CON MATERIALES RECICLADOS

En estado fresco fue importante evaluar la trabajabilidad o la capacidad de colocación y compactación, para ello se determinó el asentamiento del hormigón mediante el ensayo descrito en la norma NTE INEN 1578 (ASTM C143), así mismo, se determinó la densidad y rendimiento de la mezcla de hormigón según la norma NTE INEN 1579 (ASTM C138).

En estado endurecido se determinaron las propiedades mecánicas del hormigón mediante los ensayos que se detallan a continuación, para todas las mezclas elaboradas:

- Resistencia a compresión simple a los 3, 7 y 14 días de curado, en base a la norma NTE INEN 1573 (ASTM C39).
- Resistencia a flexión de vigas a los 14 días de curado, en base a la norma NTE INEN 2554 (ASTM C78).
- Ensayo de resistencia a tracción indirecta de especímenes cilíndricos a los 3, 7 y 14 días de curado, en base a la norma ASTM C496.

Además, para las mezclas que contenían ceniza volante de hornos, se realizó un ensayo más de compresión simple a los 21 días de curado, esto con la finalidad de evaluar si el hormigón elaborado con ceniza era de fraguado lento y si llegaba a alcanzar la resistencia de diseño.

Después de realizar los ensayos en el hormigón, se generaron diagramas de relación entre las propiedades mecánicas evaluadas tanto para la mezcla patrón como para las mezclas con materiales reciclados, con el objetivo de determinar la factibilidad de su uso en la construcción.

### 3.2.5. EVALUACIÓN AMBIENTAL

Al momento de evaluar el hormigón patrón y el hormigón elaborado con materiales reciclados en las herramientas Greenroads, LEED y PaLATE, se utilizó únicamente las categorías relacionadas con materiales. En el caso de las herramientas de calificación, los puntos asignados varían, según la cantidad de materiales reciclados utilizados.

- Greenroads v2: se utilizaron las categorías de “Materiales y Diseño” y “Creatividad y Esfuerzo”.
- LEED v4: se llenaron las categorías “Materiales y Recursos” e “Innovación”, correspondientes al sistema de calificación “Construcción Nueva y Renovación Importante”.
- PaLATE v2.2: Para establecer diferencias entre el hormigón patrón y el hormigón elaborado con material reciclado, se ingresó la cantidad de grava y cemento para 1.00 m<sup>3</sup> de hormigón, menos el porcentaje de hormigón reciclado y ceniza utilizada. No se ingresó la cantidad de los materiales reciclados porque ya ha finalizado su vida útil.

Se proyectó los valores de consumo de energía y emisiones de CO<sub>2</sub> para tres cantidades de hormigón: La primera cantidad corresponde a 17.04 m<sup>3</sup> de hormigón ( $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ ), utilizado en las columnas del proyecto: OBRAS POR COMPLEMENTAR PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CUATRO CENTROS INFANTILES DEL BUEN VIVIR, PERTENECIENTE AL PROYECTO MIES; la segunda cantidad corresponde a 32.05 m<sup>3</sup> de hormigón ( $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ ), utilizado en el edificio de administración del proyecto: OBRA DE READECUACIÓN DE LA NAVE INDUSTRIAL DESTINANA AL PROYECTO OONOVANCENTRO DE LA MADERA Y EL INMUEBLE, EN LAS INSTALACIONES DEL ECOPARQUE CHAULLAYACU; y la tercera corresponde a la cantidad de hormigón fabricado por la empresa Holcim en el año 2017.

### 3.2.6. EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se determinó el costo que tienen los materiales dentro de 1.0 m<sup>3</sup> de hormigón, entre ellos está el costo de adquisición y preparación de los materiales para transformarlos en materia prima. Esta evaluación se realizó de las mezclas elaboradas con cada material reciclado y de la mezcla que combina ambos materiales reciclados. Para ello, se realizó una investigación del mercado, de la ciudad de Cuenca encargado de la venta de los materiales utilizados; de donde se tomó los máximos costos de venta al por menor o máximo costo de adquisición, incluyendo el IVA.

- El costo de los agregados se obtuvo de la empresa Vipesa Construcciones Cía. Ltda.
- El costo de agua se obtuvo de la página web: Generador de Precios - Ecuador.
- El valor del cemento Holcim Premium HE, es un valor aproximado otorgado por la empresa Holcim, ya que este tipo de cemento no se vende al por menor.
- El hormigón reciclado no tiene valor de adquisición ya que es un residuo que normalmente es colocado en los escombros de la empresa Holcim.
- El costo de la ceniza, corresponde a dos posibilidades: (1) la ceniza no tiene precio de adquisición y (2) la ceniza tiene máximo precio de adquisición que determinado por el tiempo que toma la recolección del mismo.
- El costo del aditivo, se obtuvo de la página de venta online Disensa.
- El costo de triturado y tamizado se obtuvo de la página web Generador de Precios - Ecuador.

## CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 4.1. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

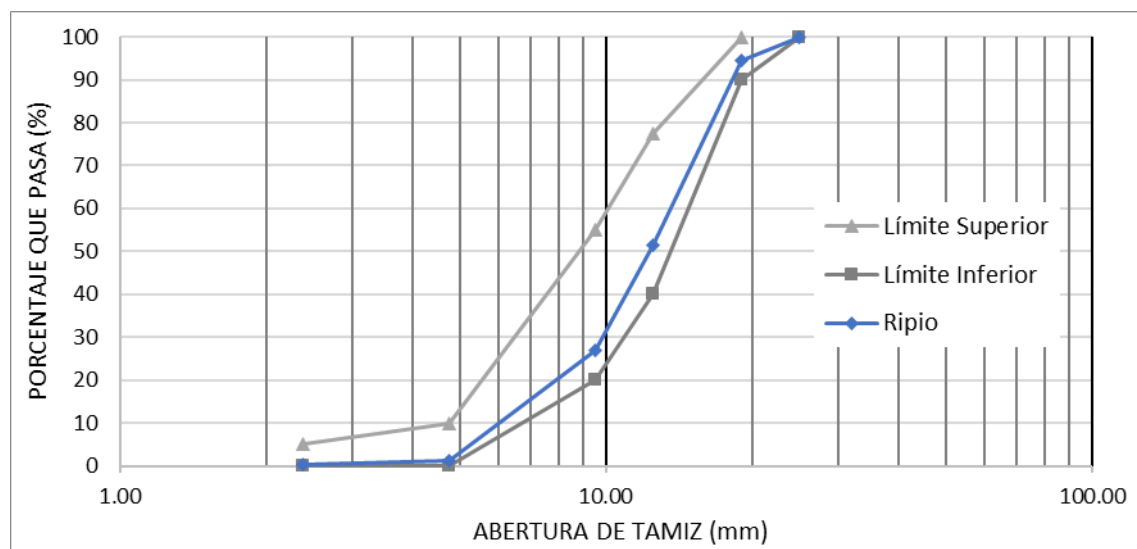
#### 4.1.1. AGREGADOS

Se presenta el análisis granulométrico de los áridos de origen natural. En las gráficas se dibuja, en color azul la curva granulométrica para cada material y en gris los límites que debe cumplir el material para ser considerado apto para la elaboración de mezclas de hormigón.

La Tabla 18 presenta los pesos y porcentajes correspondientes a cada tamiz para el análisis del Ripio, el cual tiene un Tamaño Máximo Nominal de 19 mm (3/4").

Tabla 18 Granulometría del agregado grueso - Ripio

Tamiz N°	Abertura del tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso Retenido Acumulado (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
1"	25.00	0.0	0.0	0.00	100.00
3/4"	19.00	842.3	842.3	5.47	94.53
1/2"	12.50	6618.4	7460.7	42.97	51.56
3/8"	9.500	3790.3	1125.1	24.61	26.96
N°4	4.750	3973.5	15224.5	25.80	1.16
N°8	2.380	131.7	15356.2	0.86	0.31
Fondo		47.2	15403.4	0.31	0.00
<b>TOTAL</b>		<b>15403.4</b>			

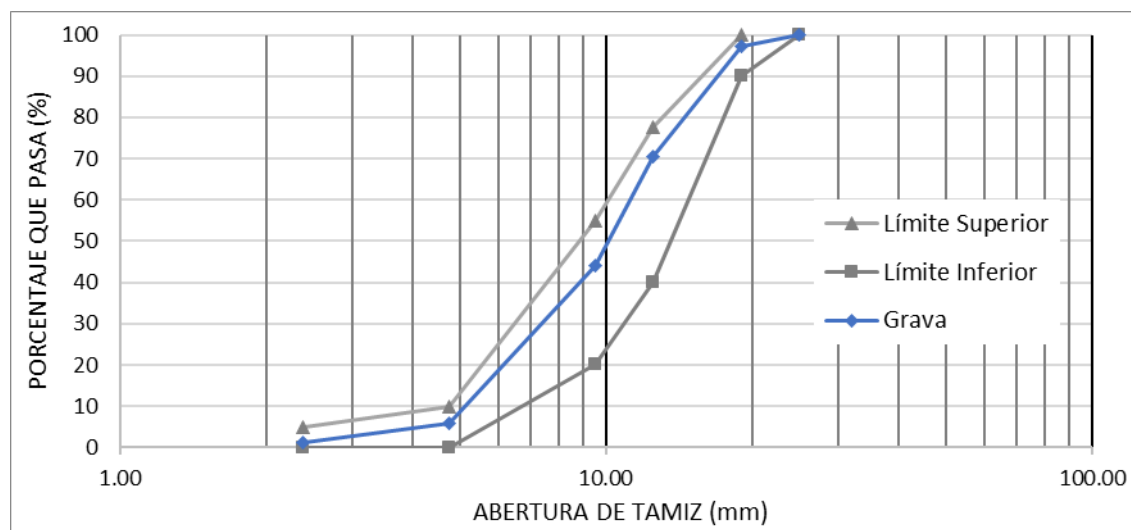


Gráfica 1 Curva granulométrica del agregado grueso - Ripio

La Tabla 19 y la Gráfica 2, corresponden al análisis del agregado grueso tipo Grava, el mismo que tiene un Tamaño Máximo Nominal de 19 mm (3/4").

Tabla 19 Granulometría del agregado grueso - Grava

Tamiz N°	Abertura del tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso Retenido Acumulado (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
1"	25.00	0.0	0.0	0.00	100.00
3/4"	19.00	479.7	479.7	2.85	97.15
1/2"	12.50	4465.3	4945.0	26.57	70.57
3/8"	9.500	4458.1	9403.1	26.53	44.05
N°4	4.750	6444.0	15847.1	38.35	5.70
N°8	2.380	742.7	16589.8	4.42	1.28
Fondo		215.2	16805.0	1.28	0.00
<b>TOTAL</b>		<b>16805.0</b>			



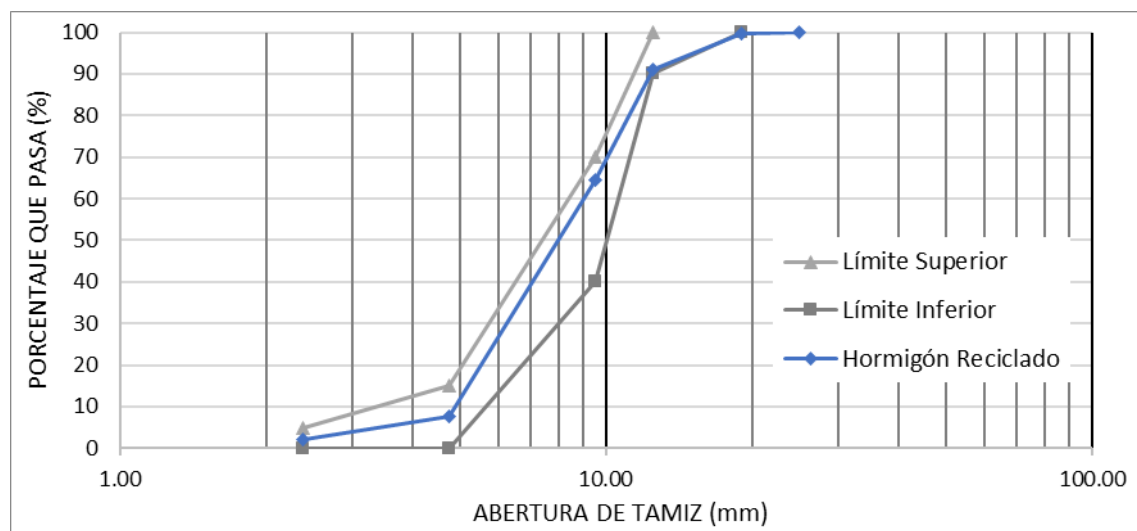
Gráfica 2 Curva granulométrica del agregado grueso - Grava

El agregado proveniente del reciclaje de hormigón se caracterizó una vez triturado, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 20 y en la Gráfica 3.

De este material se desechó todo lo que pasó el tamiz N°4, es decir se separó aproximadamente un 8% de material que no fue utilizado en las mezclas de hormigón.

Tabla 20 Granulometría del agregado grueso - Hormigón Reciclado

Tamiz N°	Abertura del tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso Retenido Acumulado (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje que pasa (%)
1"	25.00	0.0	0.0	0.00	100.00
3/4"	19.00	25.5	25.5	0.26	99.74
1/2"	12.50	843.6	869.1	8.74	90.99
3/8"	9.500	2560.8	3429.9	26.54	64.45
N°4	4.750	5472.8	8902.7	56.73	7.72
N°8	2.380	534.4	9437.1	5.54	2.18
Fondo		210.0	9647.1	2.18	0.00
<b>TOTAL</b>		<b>9647.1</b>			



Gráfica 3 Curva granulométrica del agregado grueso - Hormigón Reciclado

Se realizó la caracterización de la arena donada por la empresa Holcim, la cual procede del cantón Santa Isabel. Se presenta los pesos y porcentaje retenidos en cada tamiz de la serie normalizada en la Tabla 21 y la curva granulométrica en la Gráfica 4.

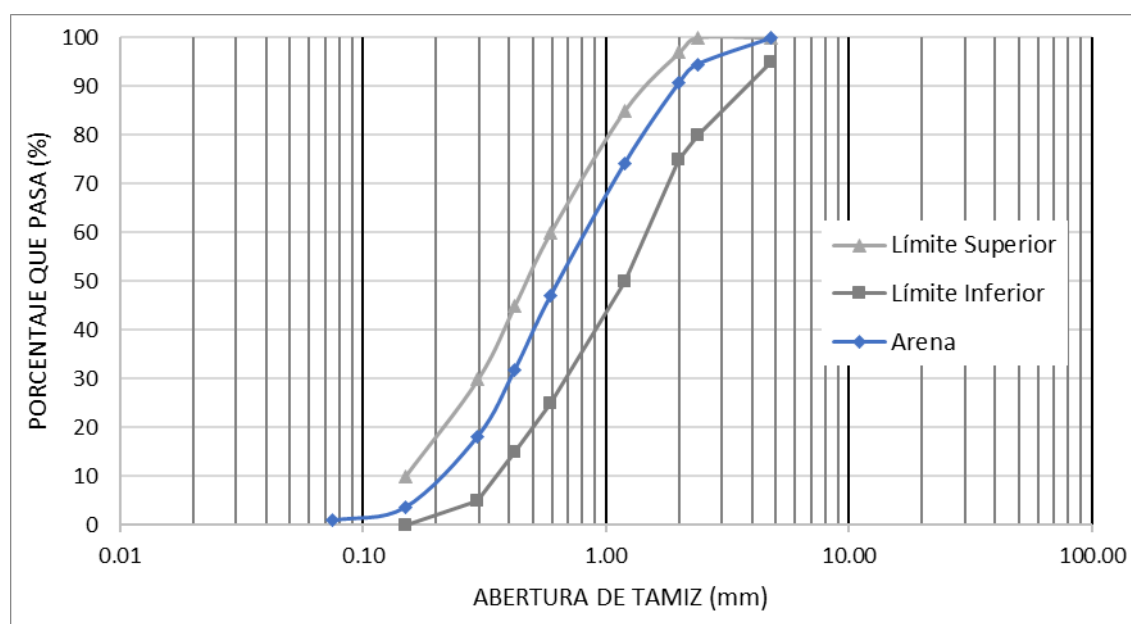
En este caso, la Tabla 21 contiene una columna adicional, que detalla el porcentaje retenido acumulado por cada tamiz, dato que es necesario para el cálculo del Módulo de Finura.

El Módulo de Finura del agregado fino o arena es igual a 2.63.



Tabla 21 Granulometría del agregado fino - Arena

Tamiz N°	Abertura del tamiz (mm)	Peso Retenido (gr)	Peso Retenido Acumulado (gr)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
4	4.75	6.3	6.3	0.13	0.13	99.87
8	2.38	261.3	267.6	5.35	5.47	94.53
10	2.00	179.7	447.3	3.68	9.15	90.85
16	1.19	814.2	1261.5	16.66	25.81	74.19
30	0.59	1328.2	2589.7	27.17	52.98	47.02
40	0.42	744.4	3334.1	15.23	68.21	31.79
50	0.297	661.5	3995.6	13.53	81.74	18.26
100	0.149	717.1	4712.7	14.67	96.41	3.59
200	0.075	130.4	4843.1	2.67	0.92	0.92
<b>Fondo</b>		45.2	4888.3	0.92	100.00	0.00
<b>TOTAL</b>		<b>4888.3</b>				



Gráfica 4 Curva granulométrica del agregado fino - Arena

En la Tabla 22 se detalla las propiedades de los agregados que influyen directamente en el diseño del hormigón, en Anexos se detalla todos los ensayos de caracterización que se realizaron con los agregados.

Tabla 22 Caracterización de los agregados.

	Ripio	Grava	Agregado Reciclado	Arena
<b>Tamaño Máximo (mm)</b>	19.00 3/4"	19.00 3/4"	9.50 3/8"	
<b>Tamaño Máximo Nominal (mm)</b>	19.00 3/4"	19.00 3/4"	9.50 3/8"	
<b>Peso Unitario (kg/m<sup>3</sup>)</b>	1475.29	1531.56	1362.75	1386.99
<b>Densidad (SSS) (kg/m<sup>3</sup>)</b>	2517.47	2481.00	2361.21	2498.75
<b>Porcentaje de Absorción (%)</b>	2.38	4.54	7.48	4.04
<b>Porcentaje de Vacíos (%)</b>	40.00	35.46	37.97	42.25
<b>Porcentaje de Desgaste (%)</b>	25.06	23.05	42.64	

El agregado reciclado al ser un material triturado como el ripio, tiene forma alargada y alongada lo cual no permite el fácil acomodo de las partículas dentro de un molde y por ende se tiene una masa unitaria inferior a la de la grava. Además, el árido reciclado al tener material fino adherido a las partículas, ocupa parte del espacio que podría ser utilizado por agregado grueso, por ello presenta menor peso por unidad de volumen que el resto de agregados gruesos. Estas condiciones del agregado grueso reciclado hacen que requiera mayor cantidad de agua que el resto de agregados gruesos y presente mayor absorción y desgaste.

#### 4.1.1.1. CENIZA VOLANTE

La ceniza volante, obtenida en los hornos utilizados para la fabricación de ladrillos artesanales y que pasa el tamiz N°200, presenta mayor densidad que el material cementante, por lo que se necesita mayor cantidad de material para cubrir la demanda de cemento dentro de la mezcla.

Tabla 23 Densidad de materiales cementantes.

Material	Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )
Cemento	3.10
Ceniza que pasa tamiz N° 200	3.21*
Ceniza que pasa tamiz N° 100	2.48*
Ceniza Volante SikaFume	2.24

\*Valores obtenidos mediante ensayo NTE INEN 156

En la Tabla 24, se muestra el tiempo de fraguado de la combinación 90%Cemento-10%Ceniza (porcentaje óptimo), correspondiente a la ceniza proveniente de la elaboración de ladrillos artesanales, para una consistencia normal de 30%. Se puede observar que el tiempo de fraguado inicial de la muestra que contiene ceniza es mayor al tiempo correspondiente al cemento. Esto nos indica que la ceniza volante retarda el proceso de hidratación propia del cemento, ya que se demora en reaccionar con el agua.

Tabla 24 Tiempo de Fraguado

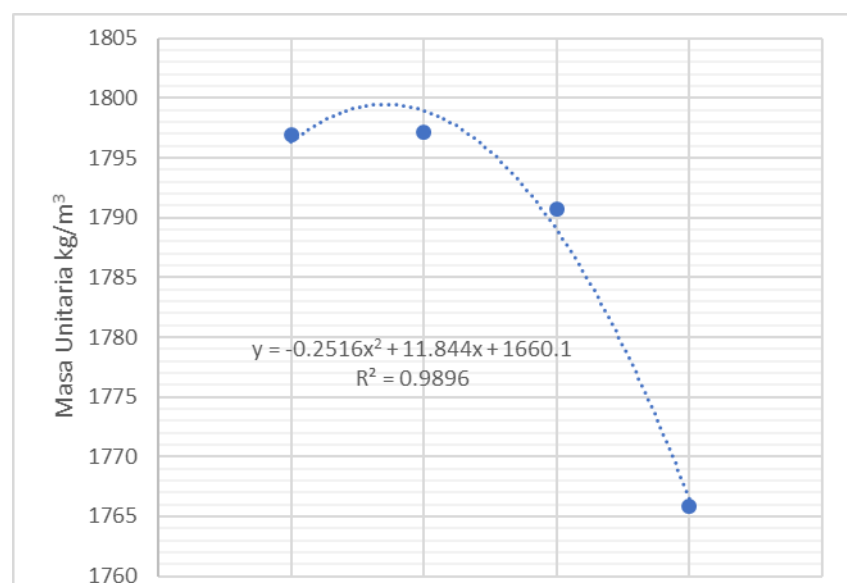
	10% Cemento		90%Cemento - 10%Ceniza*	
	Fraguado Inicial	Fraguado Final	Fraguado Inicial	Fraguado Final
<b>Penetración (mm)</b>	25	0	25	0
<b>Tiempo (min)</b>	45	No más de 420	90	280

\*Valores obtenidos mediante ensayo NTE INEN 158

## 4.2. DETERMINACIÓN DEL PORCENTAJE ÓPTIMO Y DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN

### 4.2.1. MEZCLA CON HORMIGÓN RECICLADO

La curva de masa unitaria de la mezcla de todos los agregados, en las proporciones que intervienen en la mezcla, muestra que se puede obtener un hormigón con las mejores características si se reemplaza el 23% de grava por árido reciclado, a partir de este valor las propiedades de resistencia del hormigón disminuirá a medida que se aumente la cantidad de agregado reciclado.



<b>Agregado reciclado</b>	20%	25%	30%	35%
<b>Agregado natural</b>	80%	75%	70%	65%

Gráfica 5 Curva de Masa Unitaria versus Porcentaje de agregado grueso

#### 4.2.2. MEZCLA CON CENIZA VOLANTE

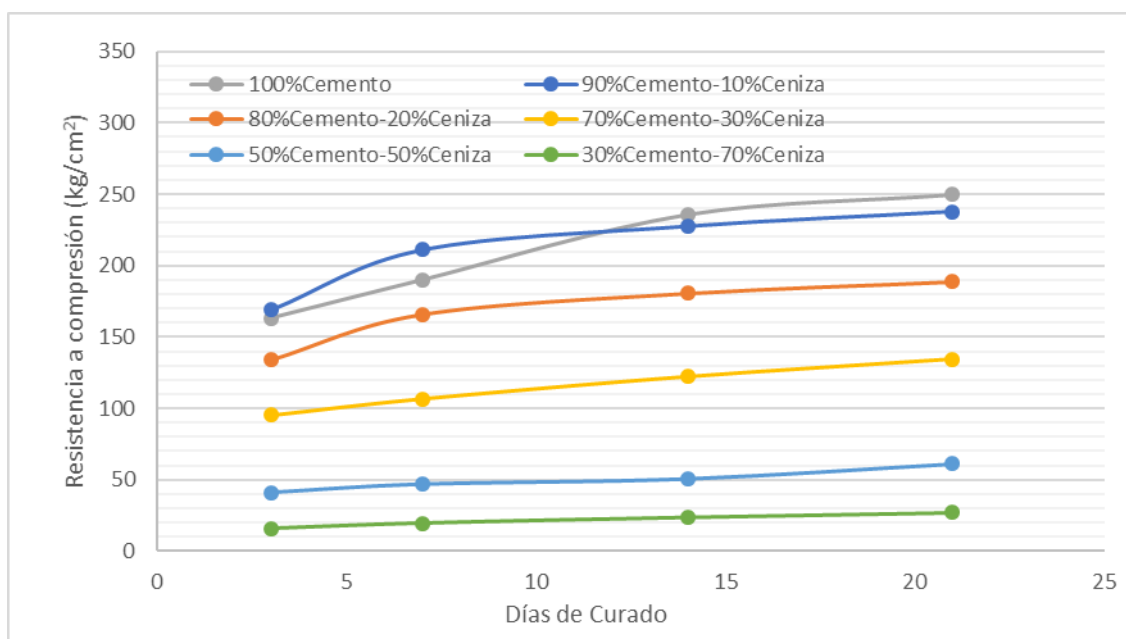
- Ceniza procedente de la elaboración de ladrillos artesanales, que pasa el tamiz N°200.

Incorporar ceniza volante con una densidad y absorción mayor que el cemento portland ha provocado que las mezclas elaboradas con diferentes porcentajes de ceniza tengan un asentamiento menor que la mezcla patrón; el valor de asentamiento disminuye a medida que aumenta el porcentaje de ceniza utilizado en reemplazo del cemento. En la Tabla 7 se observa que las mezclas con asentamiento de 55 mm, se puede colocar manualmente en secciones sometidas a compactación, de 10 y de 5 mm es necesario utilizar un sistema de colocación de proyección neumática en secciones sometidas a vibración frecuente.

*Tabla 25 Asentamiento de mezclas elaboradas con ceniza que pasa tamiz N° 200.*

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Fecha de fundición</b>	<b>Asentamiento (mm)</b>
SC7	Mezcla Patrón	Lunes 03/09	160
SC2	10% Ceniza	Lunes 27/08	55
SC3	20% Ceniza	Lunes 27/08	10
SC4	30% Ceniza	Miércoles 29/08	10
SC5	50% Ceniza	Miércoles 29/08	5
SC6	70% Ceniza	Viernes 31/08	5

La resistencia a compresión a los 21 días de curado, de los cilindros elaborados con 10% de ceniza volante alcanza la resistencia de 240 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que la mezcla patrón alcanza esta resistencia de diseño a los 14 días, lo que indica que la ceniza necesita más tiempo de fraguado que el cemento. A los 14 días de curado la resistencia de la mezcla elaborada con 10% de ceniza disminuye un 4% respecto de la mezcla patrón. Las curvas siguen la misma tendencia y muestran que la resistencia de compresión disminuye a partir que aumenta el porcentaje de ceniza volante; la resistencia alcanzada por las probetas elaboradas con porcentajes de ceniza desde 20% en adelante, es menor a la resistencia mínima estructural de 210 kg/cm<sup>2</sup> incluso después de 14 días de curado.



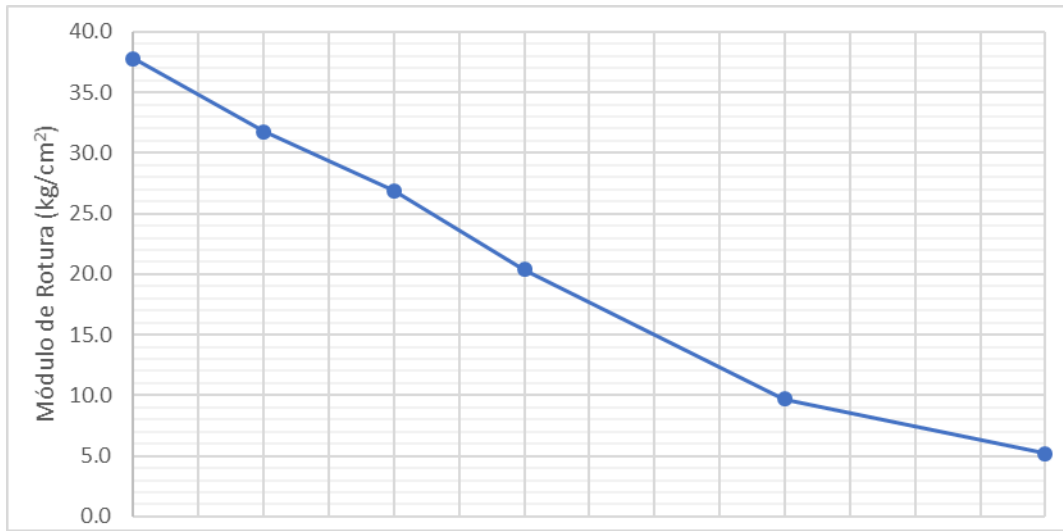
Gráfica 6 Resistencia a compresión versus Tiempo, para hormigón con ceniza que pasa tamiz N° 200.

En las vigas sometidas a flexión, la rotura se produjo en el tercio medio de la luz libre (450 mm). Los resultados se presentan en la Tabla 26 y en la Gráfica 7 para las vigas elaboradas con diferentes porcentajes de ceniza volante y ensayados a los 14 días de curado.

El Módulo de Rotura disminuye conforme aumenta el porcentaje de ceniza volante que se incluyó en la dosificación, sin embargo este comportamiento estuvo dentro de lo esperado, que es entre el 10 y 20% de la resistencia a compresión.

Tabla 26 Resistencia a flexión de hormigón con ceniza que pasa tamiz N° 200.

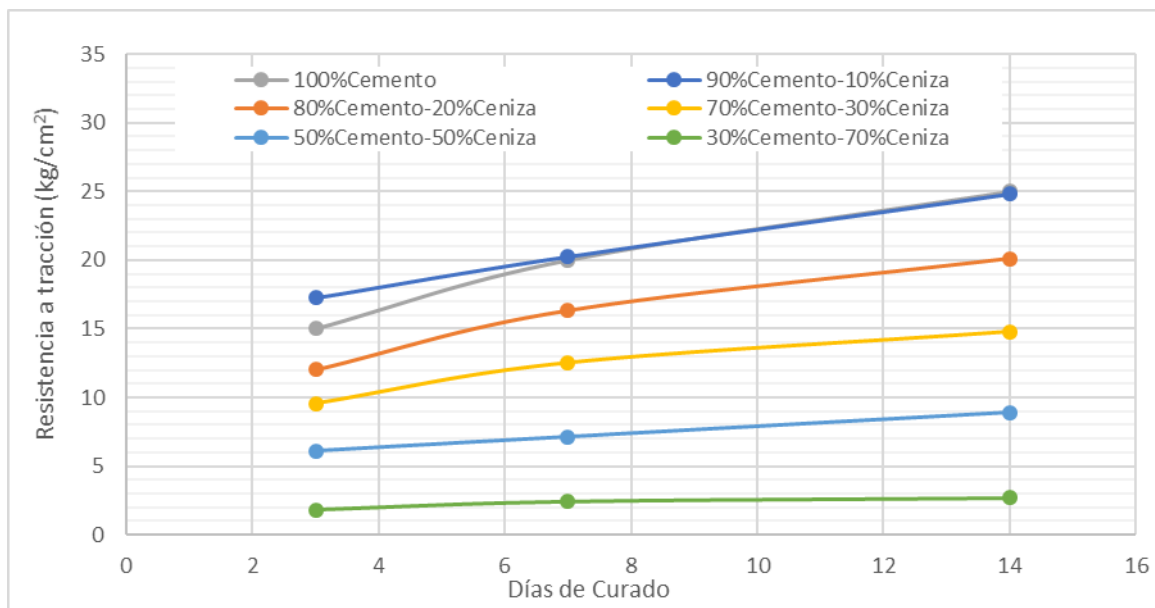
Código	Descripción	Módulo de Rotura (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje de la Resistencia a Compresión (%)	Cumple (10% - 20%) f'c
SC7	Mezcla Patrón	37.8	16.2	✓
SC2	10% Ceniza	31.7	13.7	✓
SC3	20% Ceniza	26.9	13.4	✓
SC4	30% Ceniza	20.4	15.2	✓
SC5	50% Ceniza	9.7	15.9	✓
SC6	70% Ceniza	5.2	19.4	✓



Ceniza que pasa tamiz N°200	0%	10%	20%	30%	50%	70%
Cemento	100%	90%	80%	70%	50%	30%

Gráfica 7 Módulo de Rotura versus Porcentaje de ceniza que pasa tamiz N° 200.

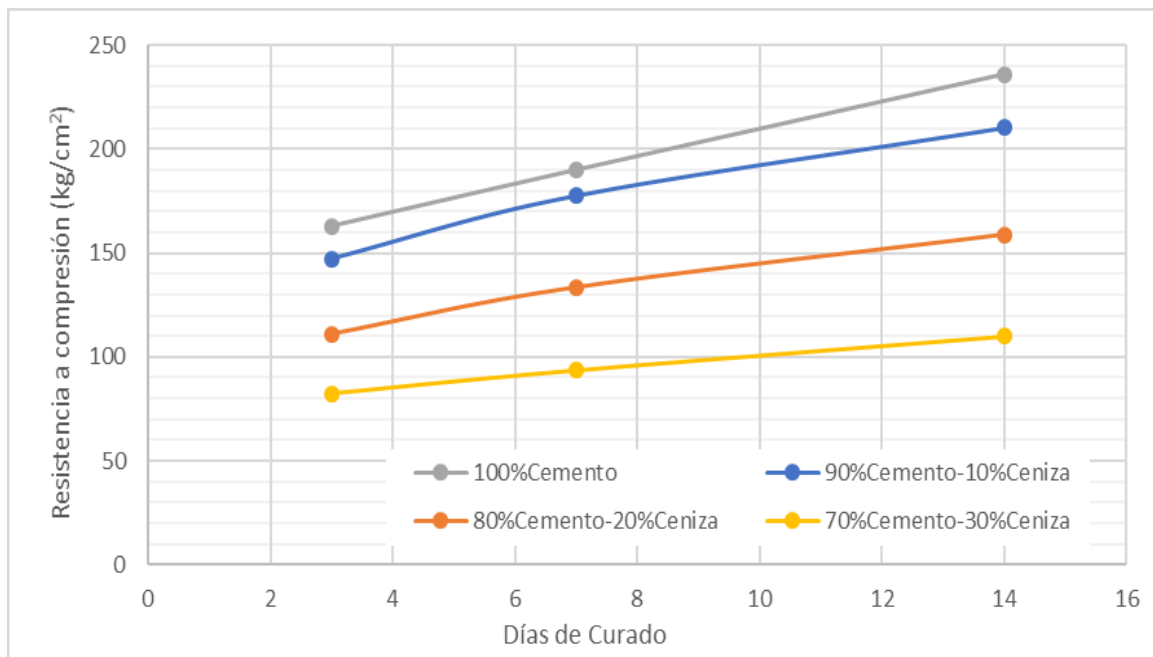
En la Gráfica 8, se observa que la resistencia a tracción indirecta de las probetas elaboradas con el 10% de ceniza es superior a la resistencia alcanzada por la mezcla patrón en los primeros días de curado. A los 3 días la resistencia aumenta en un 15%, sin embargo, a los 14 días tiene una resistencia similar a la obtenida con la mezcla patrón, alrededor de 25 kg/cm<sup>2</sup>.



Gráfica 8 Resistencia a tracción versus Tiempo, para hormigón con ceniza que pasa tamiz N° 200.

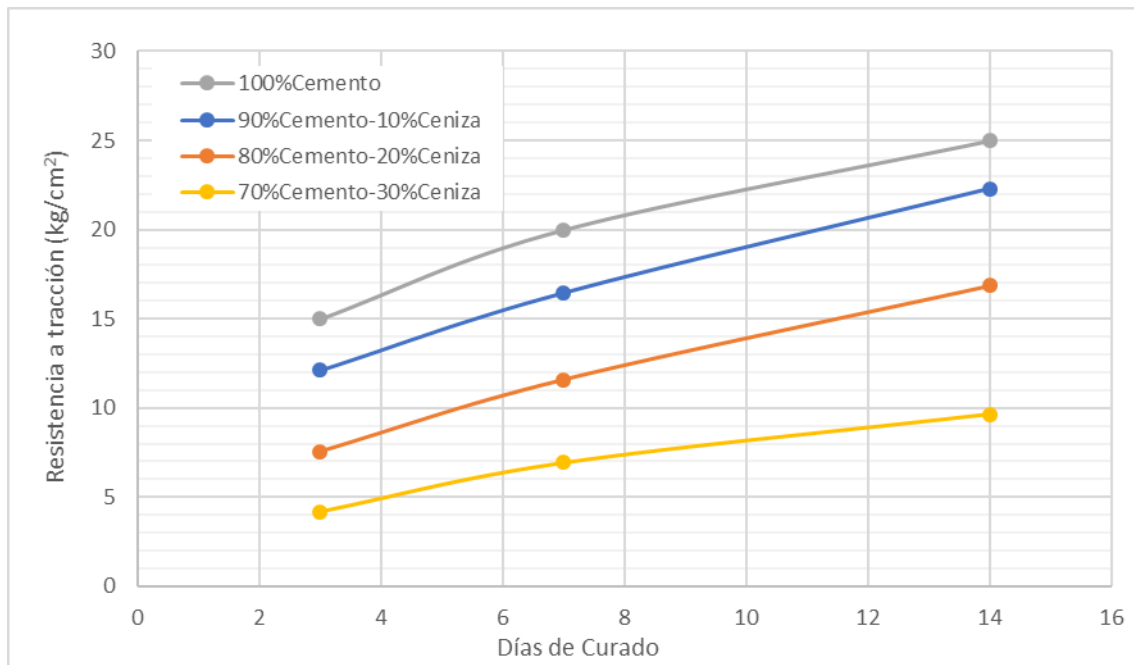
- Ceniza proveniente de la elaboración de ladrillos artesanales, que pasa el tamiz N°100 y queda retenida en el tamiz N°200 y en el fondo.

La resistencia a compresión de la mezcla elaborada con el menor porcentaje de ceniza, disminuye alrededor del 11% de la resistencia alcanzada por la mezcla patrón, además las mezclas elaboradas con más del 10% de ceniza tienen una resistencia a compresión menor que la mínima estructural. Por lo tanto, los hormigones fabricados con este tipo de ceniza (densidad menor a la del cemento) son deficientes.



Gráfica 9 Resistencia a compresión versus Tiempo, para hormigón con ceniza que pasa el tamiz N° 100.

La resistencia a tracción indirecta de la mezcla elaborada con el menor porcentaje de ceniza (10%), disminuye 11% con respecto a la resistencia obtenida con la mezcla patrón y esta diferencia aumenta a medida que aumenta el porcentaje de ceniza.



Gráfica 10 Resistencia a tracción versus Tiempo, para hormigón con ceniza que pasa el tamiz N°100.

- SikaFume.

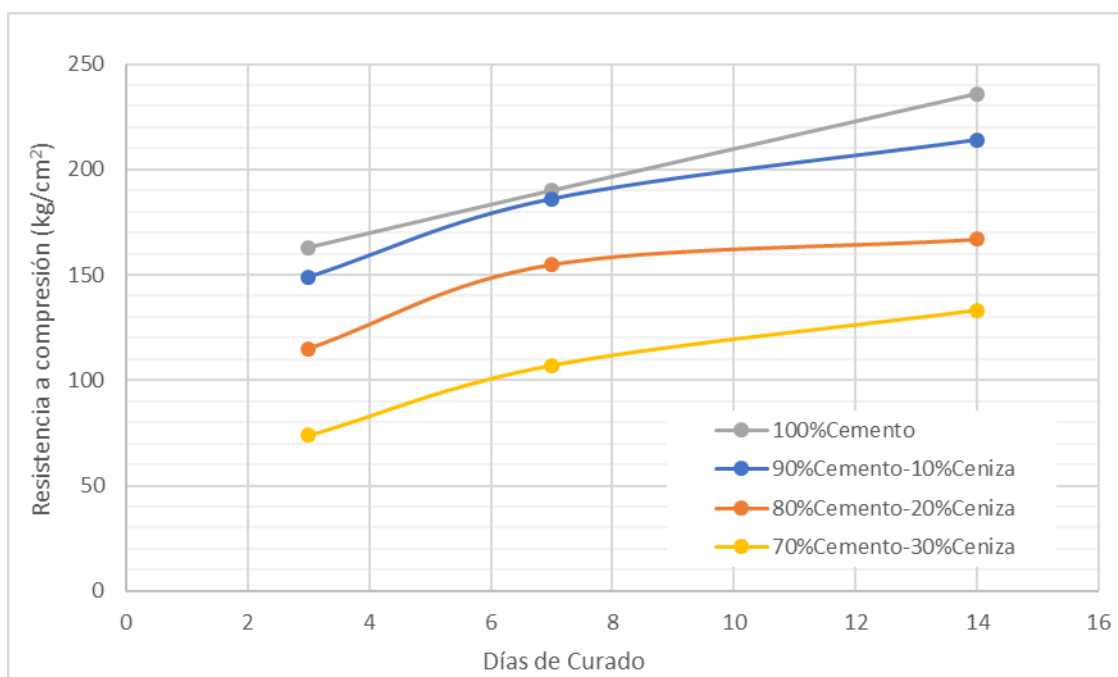
Las mezclas en las cuales se utilizó SikaFume presentaron una buena trabajabilidad con un porcentaje de ceniza de 10% en reemplazo del cemento, con valores mayores el asentamiento disminuyó considerablemente. Teniendo en cuenta la Tabla 8, un asentamiento de 10 a 20 mm necesita un sistema de compactación con vibradores formaleta y se puede colocar solo en secciones sujetas a vibración extrema.

Tabla 27 Asentamiento de mezclas elaboradas con SikaFume.

Código	Descripción	Fecha de fundición	Asentamiento (mm)
SC7	Hormigón Patrón	Lunes 03/09	160
SC8	10% SikaFume	Miércoles 05/09	140
SC9	20% SikaFume	Miércoles 05/09	20
SC10	30% SikaFume	Viernes 07/09	10

En este caso, la resistencia a compresión a los 14 días de curado de todas las mezclas que contienen SikaFume, disminuye más del 9% de la obtenida por la mezcla patrón, debido a que la densidad de este material es mayor a la densidad del cemento utilizado (HE) y no trabaja como un buen material aglutinante.



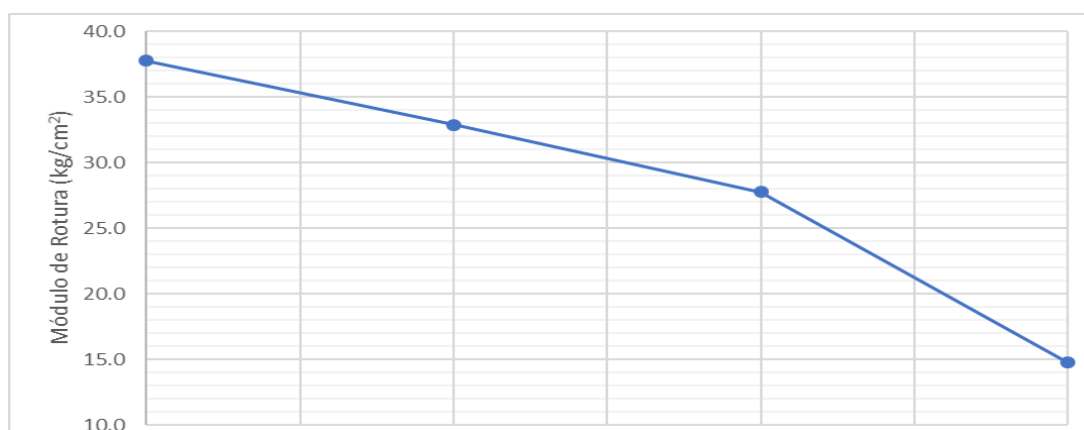


Gráfica 11 Resistencia a compresión versus Tiempo, para hormigón con SikaFume.

La resistencia a flexión de las vigas elaboradas con este material presentó una disminución con respecto a la viga patrón, sin embargo, ningún ensayo salió del mínimo esperado con respecto a la resistencia a compresión de las mismas mezclas.

Tabla 28 Resistencia a flexión de hormigón con SikaFume.

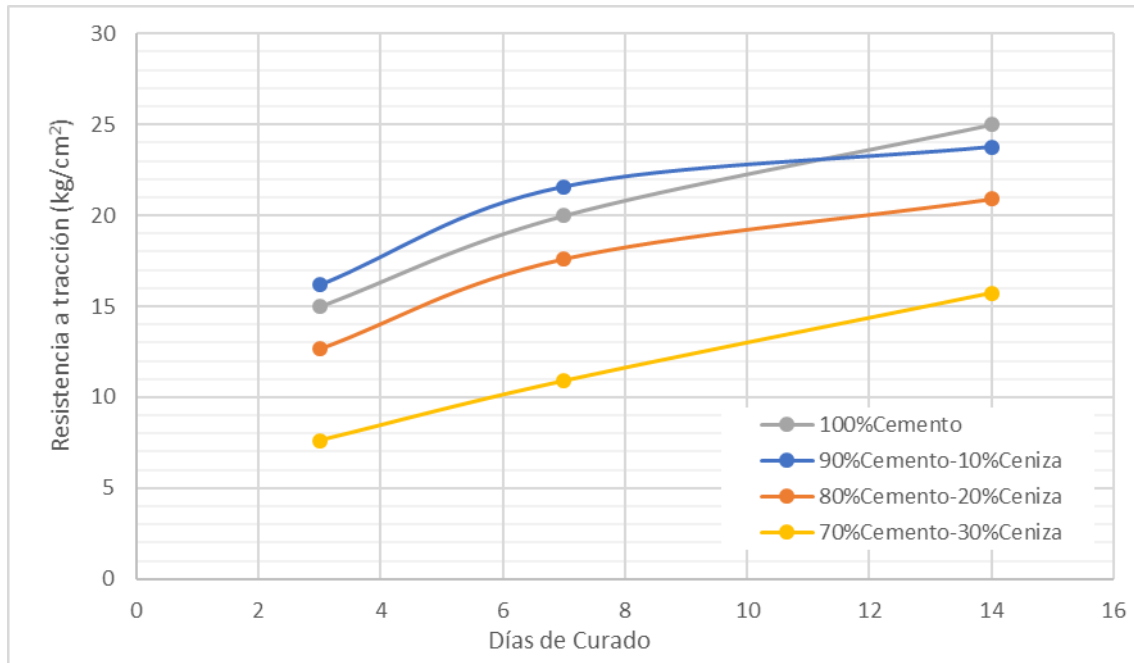
Código	Descripción	Módulo de Rotura (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje de la Resistencia a Compresión (%)	Cumple (10% - 20%) f'c
SC7	Mezcla Patrón	37.8	16.2	✓
SC8	10% SikaFume	32.9	15.4	✓
SC9	20% SikaFume	27.8	16.6	✓
SC10	30% SikaFume	14.8	11.1	✓



<b>SikaFume</b>	0%	10%	20%	30%
<b>Cemento</b>	100%	90%	80%	70%

Gráfica 12 Módulo de Rotura versus Porcentaje de SikaFume.

La resistencia a tracción indirecta del hormigón elaborado con 10% de SikaFume, se puede comparar con la resistencia obtenida con la mezcla patrón, ya que disminuye solo el 5% de la resistencia alcanzada por la mezcla patrón, luego la resistencia disminuye en porcentajes mayores al 16% de la resistencia alcanzada por la mezcla patrón.



Gráfica 13 Resistencia a tracción versus Tiempo, para hormigón con SikaFume.

En la Tabla 29 se puede observar el resumen de las propiedades de las mezclas correspondientes con cada tipo de ceniza que han alcanzado mayor resistencia. Se determinó que la ceniza que alcanza mayor resistencia a compresión, tracción indirecta y flexión y es comparable con la mezcla patrón, es la ceniza proveniente de la elaboración de ladrillos artesanales que pasa el tamiz N° 200 y se retiene en el fondo, en el porcentaje 90%Cemento-10%Ceniza.

Tabla 29 Resumen de las mezclas elaboradas con diferentes tipos de ceniza volante.

Tipo de ceniza utilizada	Porcentaje Óptimo	Resultados					Pérdida con respecto a la mezcla patrón		
		Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Tracción Indirecta (kg/cm <sup>2</sup> )	Flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	Asentamiento (mm)	Resistencia a Compresión	Resistencia a Tracción Indirecta	Resistencia a flexión	Asentamiento
Ceniza que pasa el tamiz Nº200	10%	228	25	31.7	55	3%	0%	16%	66%
Ceniza que pasa el tamiz Nº100	10%	210	22	---	---	11%	12%	---	---
SikaFume	10%	214	24	32.9	140	9%	4%	13%	13%

### 4.3.COMBINACIÓN DE HORMIGÓN RECICLADO Y CENIZA VOLANTE Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados que se compararon son: (i) mezcla patrón, (ii) mezcla elaborada con el porcentaje óptimo de hormigón reciclado, (iii) mezcla elaborada con el porcentaje óptimo ceniza volante y (iv) mezcla elaborada con los dos materiales reciclados. La dosificación de cada mezcla se muestra en la Tabla 30.

*Tabla 30 Dosificación para las mezclas comparadas*

<b>Material</b>	<b>Unidad</b>	<b>Mezcla Patrón</b>	<b>Mezcla con Hormigón Reciclado</b>	<b>Mezcla con Ceniza Volante</b>	<b>Mezcla con Hormigón Reciclado y Ceniza Volante</b>
Cemento	kg	318	318	286.2	286.2
Ripio	kg	194	194	194	194
Grava	kg	776	597.52	776	597.52
Arena	kg	762	762	762	762
Agua	kg	192	192	192	192
Aditivo	kg	3.18	3.18	3.18	3.18
Hormigón reciclado	kg	0	178.48	0	178.48
Ceniza Volante	kg	0	0	31.8	31.8

#### 4.3.1. PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

##### 4.3.1.1. ASENTAMIENTO

La incorporación de ceniza volante en reemplazo del cemento combinado con un reemplazo parcial de agregado reciclado en reemplazo de agregado grueso o grava afecta las propiedades de la mezcla de hormigón en estado fresco. El ensayo de asentamiento tanto para la mezcla patrón, para la mezcla con el porcentaje óptimo de hormigón reciclado, para la mezcla elaborada con el porcentaje óptimo de ceniza volante y la mezcla elaborada con la combinación de ambos materiales se muestran en la Tabla 31.

Tanto para el hormigón patrón como para la mezcla elaborada solamente con agregado reciclado no existió variación alguna en el revenimiento, sin embargo, la mezcla elaborada con la ceniza volante, obtenida de los hornos donde se fabrican ladrillos, tuvo una disminución del asentamiento del 35% en comparación con el patrón. Finalmente, en la mezcla elaborada con la combinación de los porcentajes

óptimos de ceniza volante y hormigón reciclado se tuvo un asentamiento de 5 mm, lo que indica según la Tabla 8, que era una mezcla con una consistencia muy seca y que posiblemente necesitaba ser sometida a vibración intensa. A pesar de ello no hubo mayor problema para fundir los elementos, tanto probetas como la viga, ya que el producto final no presentaba diferencia en su superficie (poros) con los elementos elaborados anteriormente.

Tabla 31 Asentamiento de mezclas con porcentajes óptimos de material reciclado.

Código	Descripción	Fecha de fundición	Asentamiento (mm)
SC7	Hormigón Patrón	Lunes 03/09	160
SC1	23% Hormigón Reciclado	Viernes 24/08	160
SC2	10% Ceniza	Lunes 27/08	55
SC18	10% Ceniza + 23% Hormigón Reciclado	Viernes 28/09	05

#### 4.3.1.2. DENSIDAD DE LA MEZCLA

En la Tabla 32 se resume los pesos obtenidos al realizar el ensayo NTE INEN 1579, así como el cálculo de la densidad de cada una de las mezclas. El volumen del recipiente en el cual se determinó la masa era de 7 litros y su peso al aire era 3501.2 gramos.

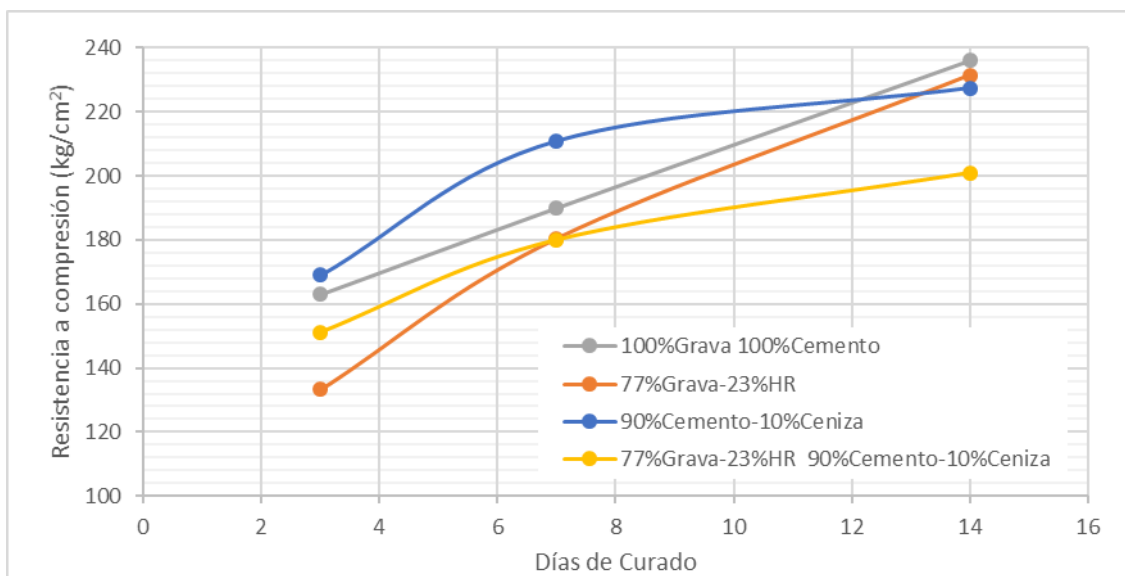
Tabla 32 Densidad de mezclas con porcentajes óptimos de material reciclado.

Código	Descripción	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
SC7	Hormigón Patrón	2294.6
SC1	23% Hormigón Reciclado	2272.3
SC2	10% Ceniza	2349.8
SC18	10% Ceniza + 23% Hormigón Reciclado	2286.2

El hormigón elaborado únicamente con ceniza volante alcanzó una mayor densidad que la mezcla patrón, debido a que este material permitió llenar una mayor cantidad de vacíos. En cambio, las mezclas que incluyeron el hormigón reciclado tuvieron una densidad más baja que el patrón, lo que significa que para estas mezclas se necesitará menor cantidad de materiales para elaborar 1 m<sup>3</sup> de hormigón. A pesar de los cambios de densidad, las variaciones no son de más allá del 3% con respecto a la mezcla patrón.

#### 4.3.2. PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

En la Gráfica 14 se puede observar que las curvas no siguen la misma tendencia, debido a la influencia que tiene la inclusión de los materiales reciclados dentro de la mezcla. La resistencia alcanzada por la mezcla que combina ambos materiales reciclados es inferior a la mezcla patrón y a las mezclas elaboradas con un solo material reciclado. La resistencia a compresión a los 14 días de curado, del hormigón elaborado con ceniza volante y hormigón reciclado fue de 201 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que la mezcla patrón alcanzó 236 kg/cm<sup>2</sup>; esto indica que utilizando el porcentaje óptimo de materiales reciclados se disminuye un 15% de la resistencia patrón. La resistencia a compresión a los 3 días de curado de la mezcla elaborada con 23% de hormigón reciclado es inferior a la resistencia alcanzada por las otras mezclas e inferior a la mezcla patrón en un 18%, sin embargo, a los 14 días de curado es inferior a la mezcla patrón en un 2%; el factor que afecta este rendimiento inicial se debe al porcentaje y grosor de mortero adherido al agregado que afecta el proceso de hidratación del cemento.

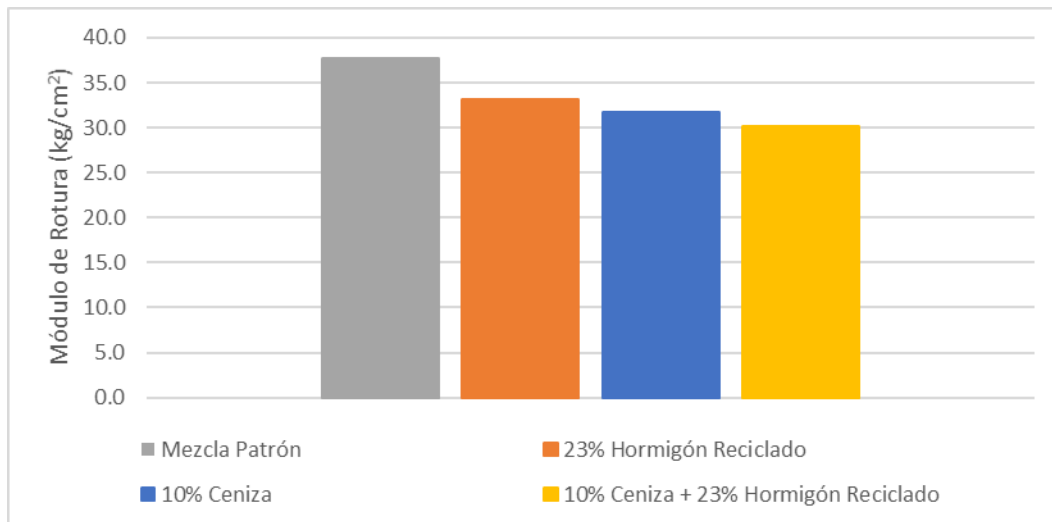


Gráfica 14 Resistencia a compresión versus Tiempo, para hormigón con porcentajes óptimos de material reciclado.

En la Tabla 33 se presenta los resultados del ensayo a flexión realizado sobre las vigas de hormigón para el cual se empleó la norma NTE INEN 2554 (ASTM C 78), aplicando la carga en los tercios del elemento. La fractura se produjo en el tercio medio de todos los elementos.

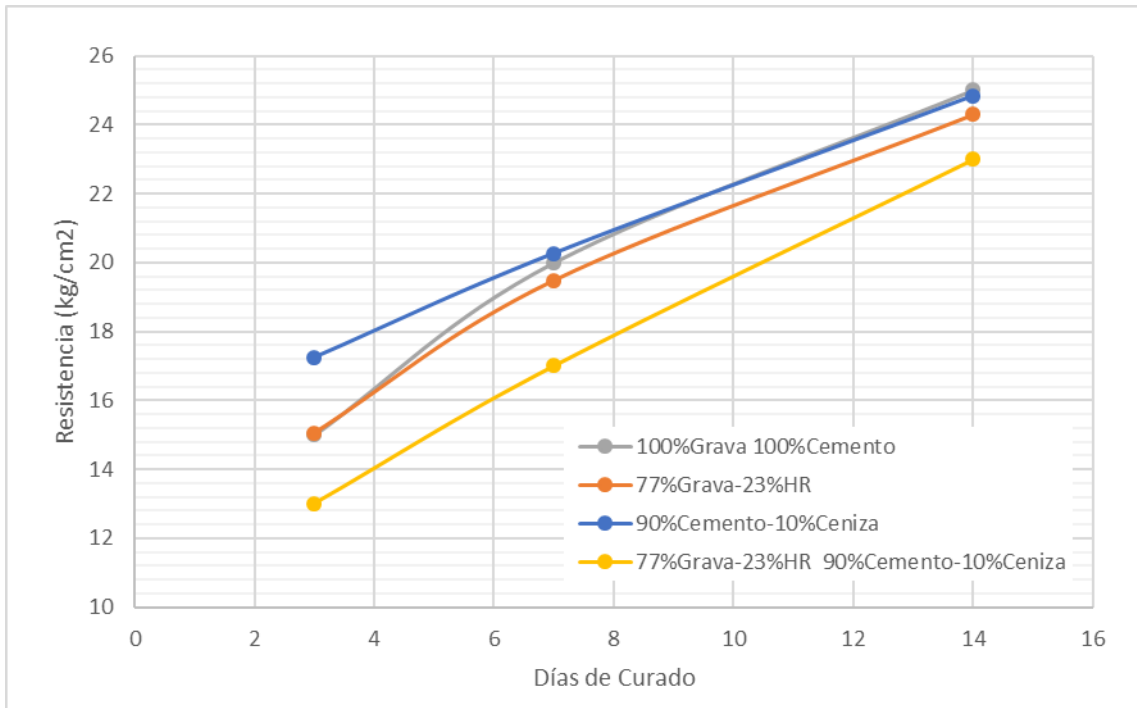
Tabla 33 Resistencia a flexión de hormigón con porcentajes óptimos de material reciclado.

Código	Descripción	Módulo de Rotura (kg/cm <sup>2</sup> )	Porcentaje de la Resistencia a Compresión (%)	Cumple (10% - 20%) f <sub>c</sub>
SC7	Mezcla Patrón	37.8	16.2	✓
SC1	23% Hormigón Reciclado	33.1	14.6	✓
SC2	10% Ceniza	31.7	13.7	✓
SC18	10% Ceniza + 23% Hormigón Reciclado	30.1	15.0	✓



Gráfica 15 Módulo de Rotura de hormigón con porcentajes óptimos de material reciclado.

En el ensayo de tracción indirecta se observó que la mezcla de hormigón elaborada con material reciclado alcanza resistencias menores que las otras mezclas comparadas y disminuyó alrededor de un 13% con respecto al patrón, cuando se ensayó a los tres días de curado. Sin embargo, a los 14 días la resistencia del hormigón elaborado con los dos materiales reciclados fue de 23 kg/cm<sup>2</sup>, mientras que el patrón fue de 25 kg/cm<sup>2</sup>. Las curvas correspondientes a las mezclas de hormigón elaboradas con un material reciclado comparado con la mezcla patrón no siguen la misma tendencia, ya que a los 3 días de curado presentan mayor resistencia, pero a los 14 días de curado presentan una ligera disminución a comparación de la mezcla patrón. A los 14 días de curado la mezcla elaborada con hormigón reciclado disminuye un 4% mientras que el hormigón elaborado con ceniza volante no presenta cambios.



Gráfica 16 Resistencia a tracción indirecta versus Tiempo, para hormigón con porcentajes óptimos de material reciclado.

A continuación, se muestra la tabla resumen de las propiedades de los diferentes tipos de hormigones evaluados, a los 14 días de curado, donde se observa que, para todos los ensayos realizados la mezcla elaborada con hormigón reciclado alcanzó mayores resistencias, sin embargo, la mezcla elaborada con el 10% de ceniza volante tiene valores no muy alejados de los obtenidos por la mezcla patrón.



Tabla 34- Resumen de las mezclas elaboradas con porcentajes óptimos de material reciclado.

Material Utilizado	Porcentaje utilizado	Resultados					Pérdida con respecto a la mezcla patrón		
		Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Tracción Indirecta (kg/cm <sup>2</sup> )	Flexión (kg/cm <sup>2</sup> )	Asentamiento (mm)	Resistencia a Compresión	Resistencia a Tracción Indirecta	Resistencia a flexión	Asentamiento
Hormigón reciclado	23%	231	24	33.1	160	2%	4%	12%	0%
Ceniza que pasa el tamiz N°200	10%	228	25	31.7	55	3%	0%	16%	66%
Hormigón reciclado + Ceniza volante que pasa el tamiz N°200	10%	201	23	30.1	5	15%	8%	20%	97%

## 4.4. EVALUACIÓN AMBIENTAL

### 4.4.1. GREENROADS v2

- Hormigón Patrón

#### Greenroads v2 Project Checklist

<b>Project Name *</b> Diseño y elaboración de mezclas	<b>City, State/Province, Country</b> Cuenca	<b>Project Manager</b> Sandry Carrión y Sebastián Guar	
<b>Project Budget (million USD)</b> 	<b>Current Status</b> Planning		


<b>Target Score:</b> Minimum Project Requirements not met  Bronze Silver Gold Evergreen <b>Requirements:</b> No <b>Email</b> Send a complete copy of this checklist to yourself. <b>Your email</b> sandry.carrión@ucuenca.ed  <input type="button" value="SEND"/> <input type="button" value="Print"/>	<b>Materials &amp; Design</b> Attempting My Score		<b>Creativity &amp; Effort</b> Attempting My Score			
	MD-1 Preservation & Reuse 1-5 points	Y	1	CE-1 Educated Team 1-2 points	Y	2
	MD-2 Recycled & Recovered Content 1-5 points	Y	1	CE-2 Innovative Ideas 1-5 points	Y	1
	MD-3 Environmental Product Declarations 2 points	Y	2	CE-3 Enhanced Performance 1-5 points	Y	5
	MD-4 Health Product Declarations 2 points	Y	2	CE-4 Local Values 1-3 points		
	MD-5 Local Materials 1-5 points	Y	5			
	MD-6 Long-Life Design 1-5 points					

Ilustración 15 Checklist para certificación Greenroads para hormigón patrón. (Greenroads, 2018)

- Hormigón elaborado solo con un material reciclado.

#### Greenroads v2 Project Checklist

<b>Project Name *</b> Diseño y elaboración de mezclas	<b>City, State/Province, Country</b> Cuenca	<b>Project Manager</b> Sandry Carrión y Sebastian Guar	
<b>Project Budget (million USD)</b> 	<b>Current Status</b> Planning		


<b>Target Score:</b> Minimum Project Requirements not met  Bronze Silver Gold Evergreen <b>Requirements:</b> No <b>Email</b> Send a complete copy of this checklist to yourself. <b>Your email</b> sandry.carrión@ucuenca.ec  <input type="button" value="SEND"/> <input type="button" value="Print"/>	<b>Materials &amp; Design</b> Attempting My Score		<b>Creativity &amp; Effort</b> Attempting My Score			
	MD-1 Preservation & Reuse 1-5 points	Y	4	CE-1 Educated Team 1-2 points	Y	2
	MD-2 Recycled & Recovered Content 1-5 points	Y	4	CE-2 Innovative Ideas 1-5 points	Y	4
	MD-3 Environmental Product Declarations 2 points	Y	2	CE-3 Enhanced Performance 1-5 points	Y	5
	MD-4 Health Product Declarations 2 points	Y	2	CE-4 Local Values 1-3 points		
	MD-5 Local Materials 1-5 points	Y	5			
	MD-6 Long-Life Design 1-5 points					

Ilustración 16 Checklist para certificación Greenroads, utilizando sólo un material reciclado. (Greenroads, 2018)

- Hormigón elaborado con la combinación de hormigón reciclado y ceniza volante.

**Project Name \*** Diseño y elaboración de mezclas

**City, State/Province, Country** Cuenca

**Project Manager** Sandry Carrion y Sebastian Guar

**Project Budget (million USD)**

**Current Status** Planning

**Target Score:** Minimum Project Requirements not met

**Requirements:** No

**Email** Send a complete copy of this checklist to yourself.

**Your email** sandry.carrion@ucuenca.ec

**SEND** **Print**

Materials & Design	Attempting	My Score	Creativity & Effort	Attempting	My Score
MD-1 Preservation & Reuse 1-5 points	<input type="checkbox"/>	5	CE-1 Educated Team 1-2 points	<input type="checkbox"/>	2
MD-2 Recycled & Recovered Content 1-5 points	<input checked="" type="checkbox"/>	5	CE-2 Innovative Ideas 1-5 points	<input checked="" type="checkbox"/>	5
MD-3 Environmental Product Declarations 2 points	<input type="checkbox"/>	2	CE-3 Enhanced Performance 1-5 points	<input type="checkbox"/>	5
MD-4 Health Product Declarations 2 points	<input type="checkbox"/>	2	CE-4 Local Values 1-3 points	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
MD-5 Local Materials 1-5 points	<input type="checkbox"/>	5			
MD-6 Long-Life Design 1-5 points	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>			

Ilustración 17 Checklist para certificación Greenroads, utilizando dos materiales reciclados. (Greenroads, 2018)

Las mezclas elaboradas solo con un material reciclado colaboran con 28 puntos de los 40 puntos necesarios para que un proyecto vial obtenga la certificación de más bajo nivel (Bronce), en cambio la mezcla que combina la ceniza volante y hormigón reciclado obtuvo 31 puntos de los 40 puntos. Hay que recalcar que el puntaje obtenido pertenece únicamente a dos de las 8 categorías correspondientes a la sección de construcción nueva.

#### 4.4.2. LEED v4

- Hormigón patrón:

**LEED v4 for BD+C: New Construction and Major Renovation**  
 Project: Checklist Project Name: Diseño y elaboración de mezclas de hormigón con materiales reciclados  
 Date: 09/10/2018

7	0	0	Materials and Resources	13
Y			Prereq Storage and Collection of Recyclables	Required
Y			Prereq Construction and Demolition Waste Management Planning	Required
1	0	0	Credit Building Life-Cycle Impact Reduction	5
2	0	0	Credit Building Product Disclosure and Optimization - Environmental Product Declarations	2
0	0	0	Credit Building Product Disclosure and Optimization - Sourcing of Raw Materials	2
2	0	0	Credit Building Product Disclosure and Optimization - Material Ingredients	2
2	0	0	Credit Construction and Demolition Waste Management	2
1	0	0	Innovation	6
1	0	0	Credit Innovation	5
0	0	0	Credit LEED Accredited Professional	1
<b>8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>TOTALS</b>	<b>Possible Points: 110</b>

Certified: 40 to 49 points, Silver: 50 to 59 points, Gold: 60 to 79 points, Platinum: 80 to 110

Ilustración 18 Checklist para certificación LEED para hormigón patrón. (LEED, 2018)

- Hormigón elaborado solo con un material reciclado.



**LEED v4 for BD+C: New Construction and Major Renovation**

Project Checklist

Project Name: Diseño y elaboración de mezclas de hormigón con materiales reciclados  
Date: 09/10/2018

11	0	0	<b>Materials and Resources</b>		<b>13</b>
Y			Prereq	Storage and Collection of Recyclables	Required
Y			Prereq	Construction and Demolition Waste Management Planning	Required
4		0	Credit	Building Life-Cycle Impact Reduction	5
2		0	Credit	Building Product Disclosure and Optimization - Environmental Product Declarations	2
1		0	Credit	Building Product Disclosure and Optimization - Sourcing of Raw Materials	2
2		0	Credit	Building Product Disclosure and Optimization - Material Ingredients	2
2		0	Credit	Construction and Demolition Waste Management	2
<b>4 0 0 Innovation</b>					
4		0	Credit	Innovation	5
0		0	Credit	LEED Accredited Professional	1
<b>15 0 0 TOTALS</b>					<b>Possible Points: 110</b>

**Certified:** 40 to 49 points, **Silver:** 50 to 59 points, **Gold:** 60 to 79 points, **Platinum:** 80 to 110

*Ilustración 19 Checklist para certificación LEED, utilizando sólo un material reciclado. (LEED, 2018)*

- Hormigón elaborado con la combinación de hormigón reciclado y ceniza volante.



**LEED v4 for BD+C: New Construction and Major Renovation**

Project Checklist

Project Name: Diseño y elaboración de mezclas de hormigón con materiales reciclados  
Date: 09/10/2018

13	0	0	<b>Materials and Resources</b>		<b>13</b>
Y			Prereq	Storage and Collection of Recyclables	Required
Y			Prereq	Construction and Demolition Waste Management Planning	Required
5		0	Credit	Building Life-Cycle Impact Reduction	5
2		0	Credit	Building Product Disclosure and Optimization - Environmental Product Declarations	2
2		0	Credit	Building Product Disclosure and Optimization - Sourcing of Raw Materials	2
2		0	Credit	Building Product Disclosure and Optimization - Material Ingredients	2
2		0	Credit	Construction and Demolition Waste Management	2
<b>5 0 0 Innovation</b>					
5		0	Credit	Innovation	5
0		0	Credit	LEED Accredited Professional	1
<b>18 0 0 TOTALS</b>					<b>Possible Points: 110</b>

**Certified:** 40 to 49 points, **Silver:** 50 to 59 points, **Gold:** 60 to 79 points, **Platinum:** 80 to 110

*Ilustración 20 Checklist para certificación LEED, utilizando dos materiales reciclados. (LEED, 2018)*

Dentro de las dos categorías evaluadas, de la sección destinada a la evaluación de nuevas construcciones de edificios, el uso de un material reciclado aporta con 15 puntos de los 40 mínimos necesarios para obtener la certificación LEED de más bajo nivel y la mezcla que combina ambos materiales reciclados aporta con 18 puntos de los 40 puntos mínimos, mientras que la mezcla patrón aporta únicamente con 8 puntos para obtener esta certificación. La mezcla que combina ambos materiales reciclados en la categoría “Materiales y Recursos” obtuvo todos los puntos posibles, mientras que en la categoría “Innovación” se obtuvieron 5 de los 6 puntos posibles.

#### 4.4.3. PALATE v2.2

El consumo de energía y la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, debido a la elaboración de 1m<sup>3</sup> de hormigón fueron las siguientes:

- Hormigón patrón

	Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site One-Way Only		
	Unit	tons/CY	CY	tons	Distance (mi)	Mode	
	PCC Pavements	Ripio 3/4	3.20	0.06	0.19	12	Truck
Grava 3/4		3.11	0.25	0.78	45	Truck	▼
Arena		3.15	0.24	0.76	45	Truck	▼
Cemento HE		2.37	0.14	0.32	125	Truck	▼
Aditivo Sikament 450		0.91	0.0035	0.0032	0	Truck	▼
Agua		0.78	0.24	0.19		Truck	▼
<b>Total: PCC to site</b>		<b>2.03</b>		<b>2.25</b>	<b>0</b>	Truck	▼

Ilustración 21 Entrada de datos en PaLATE v2.2 para hormigón patrón.

		Energy [GJ]	CO <sub>2</sub> e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	2.1	297
	Materials Transportation	0.3	18
	Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	2.1	297
	Materials Transportation	0.3	18
	Equipment	0.0	0
<b>Total</b>		<b>2.4</b>	<b>315</b>

Ilustración 22 Resultados de PaLATE v2.2 para hormigón patrón.

- Hormigón elaborado con 23% hormigón reciclado en reemplazo de grava.

	Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site One-Way Only		
	Unit	tons/CY	CY	tons	Distance (mi)	Mode	
	PCC Pavements	Ripio 3/4	3.20	0.06	0.19	12	Truck
Grava 3/4		3.11	0.20	0.62	45	Truck	▼
Arena		3.15	0.24	0.76	45	Truck	▼
Cemento HE		2.37	0.14	0.32	125	Truck	▼
Aditivo Sikament 450		0.91	0.0035	0.0032	0	Truck	▼
Hormigón reciclado		2.88	0.0000	0.00	0	Truck	▼
Agua		0.78	0.24	0.19		Truck	▼
<b>Total: PCC to site</b>		<b>2.03</b>		<b>2.09</b>	<b>0</b>	Truck	▼

Ilustración 23 Entrada de datos en PaLATE v2.2 para hormigón elaborado con hormigón reciclado.

		Energy [GJ]	CO <sub>2</sub> e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	2.1	296
	Materials Transportation	0.2	16
	Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	2.1	296
	Materials Transportation	0.2	16
	Equipment	0.0	0
<b>Total</b>		<b>2.3</b>	<b>312</b>

Ilustración 24 Resultados de PaLATE v2.2 para hormigón elaborado con hormigón reciclado.

- Hormigón elaborado con 10% de ceniza volante en reemplazo de cemento.

	Material	Density tons/CY	PCC		Materials Transport To (or From) Site One-Way Only			
			Unit	CY	tons	Distance (mi)	Mode	
PCC Pavements	Ripio 3/4	3.20	0.06	0.19	12	Truck	▼	
	Grava 3/4	3.11	0.25	0.78	45	Truck	▼	
	Arena	3.15	0.24	0.76	45	Truck	▼	
	Cemento HE	2.37	0.12	0.29	125	Truck	▼	
	Aditivo Sikament 450	0.91	0.0035	0.0032	0	Truck	▼	
	Ceniza Volante	2.50	0.0000	0.00	0	Truck	▼	
	Agua	0.78	0.24	0.19		Truck	▼	
	<b>Total: PCC to site</b>	2.03		2.21	0	Truck	▼	

Ilustración 25 Entrada de datos en PaLATE v2.2 para hormigón elaborado con ceniza volante.

		Energy [GJ]	CO <sub>2</sub> e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	1.9	270
	Materials Transportation	0.2	17
	Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	1.9	270
	Materials Transportation	0.2	17
	Equipment	0.0	0
<b>Total</b>		<b>2.2</b>	<b>287</b>

Ilustración 26 Resultados de PaLATE v2.2 para hormigón elaborado con ceniza volante

- Hormigón elaborado con 10% de ceniza volante en reemplazo de cemento y 23% de hormigón reciclado en reemplazo de grava.

	Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site		
			Unit	tons/CY	CY	tons	One-Way Only
					Distance (mi)	Mode	
PCC Pavements	Ripio 3/4	3.20	0.06	0.19	12	Truck	▼
	Grava 3/4	3.11	0.20	0.62	45	Truck	▼
	Arena	3.15	0.24	0.76	45	Truck	▼
	Cemento HE	2.37	0.12	0.29	125	Truck	▼
	Aditivo Sikament 450	0.91	0.0035	0.0032	0	Truck	▼
	Hormigón reciclado	2.88	0.0000	0.0000	0	Truck	▼
	Ceniza Volante	2.50	0.0000	0.00	0	Truck	▼
	Agua	0.78	0.24	0.19		Truck	▼
	<b>Total: PCC to site</b>	<b>2.03</b>		<b>2.06</b>	<b>0</b>	<b>Truck</b>	<b>▼</b>

Ilustración 27 Entrada de datos en PaLATE v2.2 para hormigón elaborado con ceniza volante y hormigón reciclado.

		Energy [GJ]	CO <sub>2</sub> e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	1.9	268
	Materials Transportation	0.2	16
	Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	1.9	268
	Materials Transportation	0.2	16
	Equipment	0.0	0
<b>Total</b>		<b>2.1</b>	<b>284</b>

Ilustración 28 Resultados de PaLATE v2.2 para hormigón elaborado con ceniza volante y hormigón reciclado.

De acuerdo a la cuantificación del impacto ambiental determinado por esta herramienta, la elaboración de la mezcla patrón consume más energía y emite mayor cantidad de gases que las otras tres mezclas evaluadas. La reducción de los valores obtenidos de la mezcla elaborada con hormigón reciclado en comparación con la mezcla patrón, no es significativa (2% de la energía consumida y 1% de CO<sub>2</sub>e). En cambio, los resultados obtenidos de la mezcla elaborada con ceniza volante, disminuye en 8% de consumo de energía y 9% de CO<sub>2</sub>e con respecto a la mezcla patrón. Se obtuvo menor consumo de energía y menor liberación de CO<sub>2</sub>e con la mezcla que incluye los dos materiales reciclados, en un 10% con respecto a la mezcla patrón. En la Tabla 35 se muestra la proyección del análisis ambiental para tres obras importantes de la ciudad de Cuenca.

Tabla 35 Proyección del consumo de energía y emisiones para diferentes obras.

Tipo de Mezcla	Para 1.0 m <sup>3</sup>		Para 17.04 m <sup>3</sup>		Para 32 m <sup>3</sup>		Para 78 000 m <sup>3</sup>	
	Energía Consumida (GJ)	CO <sub>2</sub> e (kg)	Energía Consumida (GJ)	CO <sub>2</sub> e (kg)	Energía Consumida (GJ)	CO <sub>2</sub> e (kg)	Energía Consumida (GJ)	CO <sub>2</sub> e (kg)
Patrón	2.4	315	40.4	5 370	76.0	10 100	1 726 797.4	229 419 296
Hormigón reciclado	2.3	312	39.7	5 318	74.6	10 003	1 694 756.9	227 208 882
Ceniza que pasa el tamiz N°200	2.2	287	37.2	4 890	70.0	9 198	1 590 096	208 931 426
Hormigón reciclado + Ceniza volante	2.1	284	36.5	4 843	68.7	9 110	1 560 910.5	206 918 051

Se observa que, para la fabricación de hormigón, durante un año se reduce 165 886.9 GJ de energía y 22 501 245 kg de CO<sub>2</sub>e, si se utiliza los dos materiales reciclados dentro de la mezcla.

#### 4.5. EVALUACIÓN ECONÓMICA

##### 4.5.1. MEZCLA PATRÓN

Tabla 36 Evaluación económica del hormigón patrón.

Material	Precio (USD)	Unidad	Cantidad para 1m <sup>3</sup> de hormigón (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad para 1m <sup>3</sup> de hormigón (m <sup>3</sup> )	Total (USD)
Cemento	10.00	50 kg	320.0			64.00
Ripio	17.92	1 m <sup>3</sup>	194.0	2517.47	0.077	1.38
Grava (río)	14.00	1 m <sup>3</sup>	776.0	2481.00	0.313	4.38
Arena	16.80	1 m <sup>3</sup>	762.0	2498.75	0.305	5.12
Agua	1.60	1 m <sup>3</sup>	190.0	1000.00	0.190	0.30
Aditivo	23.58	50 kg	3.2			1.51
<b>Total</b>						<b>76.70</b>

##### 4.5.2. MEZCLA CON HORMIGÓN RECICLADO

La cantidad de hormigón reciclado que se debe tamizar, es la suma del material necesario para colocar en la mezcla más el porcentaje de material desechado que pasa el tamiz N° 4.





Tabla 37 Evaluación económica del hormigón elaborado con hormigón reciclado.

Material	Precio (USD)	Unidad	Cantidad para 1m <sup>3</sup> de hormigón (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad para 1m <sup>3</sup> de hormigón (m <sup>3</sup> )	Total (USD)
Cemento	10.00	50 kg	320.0			64.00
Ripio	17.92	1 m <sup>3</sup>	194.0	2517.47	0.077	1.38
Grava (río)	14.00	1 m <sup>3</sup>	620.8	2481.00	0.250	3.50
Arena	16.80	1 m <sup>3</sup>	762.0	2498.75	0.305	5.12
Agua	1.60	1 m <sup>3</sup>	190.0	1000.00	0.190	0.30
Aditivo	23.58	50 kg	3.2			1.51
Hormigón Reciclado	0.00	1 kg	167.62	2400	0.0698	0.00
Triturado de hormigón reciclado	1.00	1 m <sup>3</sup>	167.62	2400.00	0.0698	0.07
Tamizado del hormigón reciclado	1.00	1 m <sup>3</sup>	167.62	2400.00	0.0698	0.07
<b>Total</b>						<b>75.89</b>

#### 4.5.3. MEZCLA CON CENIZA VOLANTE

La ceniza volante tiene un costo de 2 dólares el saco de 12 kg, pero de este solamente se puede utilizar 7.5 kg dentro de una mezcla de hormigón, entonces, como se necesita colocar 32 kg en 1.00 m<sup>3</sup> de mezcla, es necesario comprar 51.2 kg.

- La ceniza no tiene precio de adquisición.

Tabla 38 Evaluación económica del hormigón elaborado con ceniza volante sin costo de adquisición

Material	Precio (USD)	Unidad	Cantidad para 1m <sup>3</sup> de hormigón (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad para 1m <sup>3</sup> de hormigón (m <sup>3</sup> )	Total (USD)
Cemento	10.00	50 kg	288			57.60
Ripio	17.92	1 m <sup>3</sup>	194	2517.47	0.077	1.38
Grava (río)	14.00	1 m <sup>3</sup>	776	2481.00	0.313	4.38
Arena	16.80	1 m <sup>3</sup>	762	2498.75	0.305	5.12
Agua	1.60	1 m <sup>3</sup>	190	1000.00	0.190	0.30
Aditivo	23.58	50 kg	3.2			1.51
Ceniza	0.00	12 kg	51.2			0.00
Tamizado Ceniza	1.00	1 m <sup>3</sup>	51.2	2500	0.02048	0.02
<b>Total</b>						<b>70.31</b>

- La ceniza tiene máximo precio de adquisición.

Tabla 39 Evaluación económica del hormigón elaborado con ceniza volante con costo máximo de adquisición.

Material	Precio		Cantidad para		Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad para		Total (USD)
	(USD)	Unidad	1m <sup>3</sup> de hormigón (kg)	(kg)		1m <sup>3</sup> de hormigón (m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	
Cemento	10.00	50 kg	288					57.60
Ripio	17.92	1 m <sup>3</sup>	194		2517.47	0.077		1.38
Grava (río)	14.00	1 m <sup>3</sup>	776		2481.00	0.313		4.38
Arena	16.80	1 m <sup>3</sup>	762		2498.75	0.305		5.12
Agua	1.60	1 m <sup>3</sup>	190		1000.00	0.190		0.30
Aditivo	23.58	50 kg	3.2					1.51
Ceniza	2.00	12 kg	51.2					8.53
Tamizado Ceniza	1.00	1 m <sup>3</sup>	51.2		2500	0.02048		0.02
							<b>Total</b>	<b>78.85</b>

#### 4.5.4. MEZCLA DE HORMIGÓN RECICLADO Y CENIZA VOLANTE

- La ceniza no tiene precio de adquisición.

Tabla 40 Evaluación económica del hormigón elaborado con ceniza volante sin costo de adquisición y hormigón reciclado.

Material	Precio		Cantidad para		Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad para		Total (USD)
	(USD)	Unidad	1m <sup>3</sup> de hormigón (kg)	(kg)		1m <sup>3</sup> de hormigón (m <sup>3</sup> )	(m <sup>3</sup> )	
Cemento	10.00	50 kg	288					57.60
Ripio	17.92	1 m <sup>3</sup>	194		2517.47	0.077		1.38
Grava (río)	14.00	1 m <sup>3</sup>	620.8		2481.00	0.250		3.50
Arena	16.80	1 m <sup>3</sup>	762		2498.75	0.305		5.12
Agua	1.60	1 m <sup>3</sup>	190		1000.00	0.190		0.30
Aditivo	23.58	50 kg	3.2					1.51
Hormigón Reciclado	0.00	1 kg	167.62		2400	0.0698		0.00
Triturado de hormigón reciclado	1.00	1 m <sup>3</sup>	167.62		2400	0.0698		0.07
Tamizado del hormigón reciclado	1.00	1 m <sup>3</sup>	167.62		2400	0.0698		0.07
Ceniza	0.00	12 kg	51.2					0.00
Tamizado de ceniza	1.00	1 m <sup>3</sup>	51.2		2500	0.02048		0.02
							<b>Total</b>	<b>69.58</b>

- La ceniza tiene máximo precio de adquisición.

Tabla 41 Evaluación económica del hormigón elaborado con ceniza volante con costo máximo de adquisición y hormigón reciclado.

Material	Precio (USD)	Unidad	Cantidad para 1m <sup>3</sup> de hormigón (kg)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad para 1m <sup>3</sup> de hormigón (m <sup>3</sup> )	Total (USD)
Cemento	10.00	50 kg	288			57.60
Ripio	17.92	1 m <sup>3</sup>	194	2517.47	0.077	1.38
Grava (río)	14.00	1 m <sup>3</sup>	620.8	2481.00	0.250	3.50
Arena	16.80	1 m <sup>3</sup>	762	2498.75	0.305	5.12
Agua	1.60	1 m <sup>3</sup>	190	1000.00	0.190	0.30
Aditivo	23.58	50 kg	3.2			1.51
Hormigón Reciclado	0.00	1 kg	167.62	2400	0.0698	0.00
Triturado de hormigón reciclado	1.00	1 m <sup>3</sup>	167.62	2400	0.0698	0.07
Tamizado del hormigón reciclado	1.00	1 m <sup>3</sup>	167.62	2400	0.0698	0.07
Ceniza	2.00	12 kg	51.2			8.53
Tamizado de ceniza	1.00	1 m <sup>3</sup>	51.2	2500	0.02048	0.02
<b>Total</b>						<b>78.11</b>

Se determinó que el costo de elaboración de la mezcla con hormigón reciclado es menor que la mezcla patrón en 1%, debido a que el hormigón es extraído de la misma empresa y no tiene costo de adquisición. Para la mezcla con ceniza volante, el costo disminuye en 8%, si la ceniza no tiene precio de adquisición. En cambio, el costo de la mezcla elaborada con ceniza volante es superior a la mezcla patrón en 3%, si la ceniza tiene costo de adquisición. Los procedimientos de preparación de los dos materiales reciclados, sobre todo de la ceniza volante, influyen directamente en el costo de la mezcla que combina ambos materiales reciclados, superando el costo de la mezcla patrón en 2% en el caso que la ceniza tenga un precio máximo de adquisición y disminuye en 9% del costo de elaboración de la mezcla patrón, si se considera la posibilidad de que la ceniza no tiene precio de adquisición.



## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Este trabajo reveló que es factible la utilización de hormigón reciclado y ceniza volante dentro de las mezclas de hormigón, ya que alcanza propiedades mecánicas comparables con las obtenidas por la mezcla patrón, además de una disminución de costos y cargas ambientales generadas durante su fabricación.

Se evaluaron las características físicas y mecánicas de las partículas de hormigón reciclado y se determinó que cumplen con los requerimientos establecidos en la normativa para la elaboración de mezclas de hormigón (NTE INEN 872). La absorción y desgaste es mayor en el agregado reciclado en comparación los agregados de origen natural, debido a la cantidad de mortero adherido a las partículas.

Se logró diseñar y elaborar mezclas de hormigón con la inclusión de ceniza volante proveniente de la elaboración de ladrillos artesanales, en lugar del 10% del peso total de cemento y hormigón reciclado en reemplazo del 23% del peso de la grava. Se utilizó cada material por separado y al final se elaboró una mezcla con la combinación de ambos.

Se comparó las características del hormigón en estado fresco, obteniéndose la misma trabajabilidad del hormigón patrón si se incluye hormigón reciclado, una disminución de la trabajabilidad de hasta el 66% con respecto al patrón si se trabaja con ceniza volante y una disminución del 97% cuando se emplearon ambos materiales reciclados al mismo tiempo.

De igual manera se compararon las características del hormigón endurecido, donde la resistencia a compresión y tracción indirecta de las mezclas elaboradas con un sólo material reciclado son menores entre un 2 y 4% a las resistencias alcanzadas por la mezcla patrón, por lo que se puede asegurar la factibilidad de la utilización de cada material reciclado. La mezcla que incluyó el porcentaje óptimo de los dos materiales reciclados presenta una reducción del 15% de la resistencia a compresión, 8% de la resistencia a tracción y 20% de la resistencia a flexión en comparación con las resistencias alcanzadas por la mezcla patrón.

En la evaluación realizada con las herramientas de calificación, se determinó que a media que se aumenta la cantidad de materiales reciclados dentro de la fabricación de



hormigón, aumenta la calificación medio ambiental y disminuye la cantidad de energía utilizada y la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>e.

Se determinó que el costo de elaboración del hormigón disminuye, si se utiliza hormigón reciclado y ceniza volante (sin costo de adquisición), lo que indica que el proceso de triturado y tamizado no genera incrementos de costo significativo. Para la mezcla que utiliza ambos materiales reciclados, el costo disminuye en un 9%, por lo que a nivel económico es la mezcla que presenta mayor factibilidad, frente a la mezcla convencional.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, M., & Barrios, G. (2018). Producción de árido reciclado. *Caribeña de Ciencias Sociales*, (mayo). Recuperado de <https://www.eumed.net/rev/caribe/2018/05/produccion-arido-reciclado.html>
- Barros Fierro, V. P., & Ramírez Cueva, H. C. (2012). Diseño de hormigones con fibras de polipropileno para resistencias a la compresión de 21 y 28 MPa con agregados de la cantera de Pifo. Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/517>
- Cabello, F. J. A. (2007). *El impacto ambiental en la construcción industrial: criterios para una construcción sostenible* (<http://purl.org/dc/dcmitype/Text>). UNED. Universidad Nacional de Educación a Distancia (España). Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=42003>
- Calderón, Á. N. (2014). *Uso y fomento del árido reciclado en hormigón estructural como oportunidad de mejora medioambiental y económica. Aplicación a la Comunidad Autónoma de La Rioja* (<http://purl.org/dc/dcmitype/Text>). Universidad de La Rioja. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=43246>
- Castañeda, B., & Raúl, N. (2013). Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado. Recuperado de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/handle/001/132>
- Chan Yam, J. L., Solís Carcaño, R., & Moreno, É. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 7(2). Recuperado de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=46770203>



CONCRETO SIMPLE ING. GERARDO A. RIVERA L. (2015, mayo 23). Recuperado 24 de septiembre de 2018, de

<https://inforcivilonline.wordpress.com/2015/05/23/concreto-simple-ing-gerardo-a-rivera-l/>

Escombreras | EMAC - EMPRESA PÚBLICA MUNICIPAL DE ASEO DE CUENCA. (s. f.).

Recuperado 25 de septiembre de 2018, de

<http://www.emac.gob.ec/?q=content/escombreras-0>

Guayanay Juca, C. A., & Morales Mediavilla, A. L. (2016). Análisis del comportamiento de hormigón con inclusión de vidrio reciclado en hormigones de resistencia normal. Recuperado de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/7398>

Guzman, D. S. de. (2001). *TECNOLOGIA DEL CONCRETO Y DEL MORTERO*. Pontificia Universidad Javeriana.

Limbachiya, M., Meddah, M. S., & Ouchagour, Y. (2012). Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. *Construction and Building Materials*, 27(1), 439–449. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.023>

Malhotra, V. m. (2010). Global warming, and role of supplementary cementing materials and superplasticisers in reducing greenhouse gas emissions from the manufacturing of portland cement. *International Journal of Structural Engineering*, 1(2), 116–130. <https://doi.org/10.1504/IJStructE.2010.03148>

Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2009). *Materiales para ingeniería civil*. Pearson Educación.

MEHTA P K MONTEIRO P J M Concreto Estructura propiedades e materiais São Paulo. (s. f.). Recuperado 12 de septiembre de 2018, de

<https://www.coursehero.com/file/p40qpee3/MEHTA-P-K-MONTEIRO-P-J-M-Concreto-Estrutura-propiedades-e-materiais-S%C3%A3o-Paulo/>

Mikulčić, H., Vujanović, M., & Duić, N. (2013). Reducing the CO2 emissions in Croatian cement industry. *Applied Energy*, 101, 41–48.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.083>

Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). *CONCRETE TECHNOLOGY. REVISED EDITION.*

Recuperado de <https://trid.trb.org/view/370160>

Plaza Gámez, B. (2014). Estudio de la posibilidad de sustitución de hormigones tradicionales por hormigones ecológicos fabricados con conglomerados procedentes de residuos industriales y áridos reciclados. Recuperado de

<https://riunet.upv.es/handle/10251/44295>

Rochel Awad, R. (1999). *Hormigón reforzado: NSR-98* (Sexta edición). Medellín:

Universidad Pontificia Bolivariana.

Sáez, Q., & Patricio, A. (2014). Determinación del módulo de rotura y deflexiones en vigas de hormigón, en base a su resistencia a la compresión ( $f'c = 24$  MPa), fabricado con cemento Lafarge y materiales procedentes de la cantera del Río Anzu, Cantón Tena, Provincia del Napo. Recuperado de

<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/3014>

Torán, T., & Ignacio, J. (2007). Gestión de residuos de construcción y demoliciones.

Áridos reciclados. Recuperado de <https://digital.csic.es/handle/10261/4990>





INEN (1982) 872: Áridos para hormigón. Requisitos.

INEN (2011) 696: Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.

INEN (1987) 154: Tamices de ensayo. Dimensiones nominales de las aberturas.

INEN. (2010) 857: Áridos, Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.

INEN. (2010). 856: Áridos. determinación de la densidad, densidad relativa y absorción del árido fino.

INEN (2011) 862: Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad.

INEN (2010) 858: Áridos. Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos.

INEN 860: Áridos. Determinación del valor de la depredación del árido grueso de

INEN (2011) 696: Áridos. Análisis Granulométrico en los áridos, fino y grueso.

INEN (2011) 860: Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la Máquina de los Ángeles.

INEN (2012)152: Cemento portland. Requisitos.

INEN (2009)156: Cemento Hidráulico. Determinación de la densidad.

INEN (2009)157: Cemento Hidráulico. Determinación de la consistencia normal. Método de Vicat.

INEN (2009)158: Cemento hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado.

ASTM 618. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete.

INEN (2011) 2551: Hormigón y mortero. Materiales secos combinados ensacados para elaborar hormigón y mortero.

INEN (2010) 1578: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.



INEN (2013) 1579: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la densidad, rendimiento y contenido de aire.

INEN (2011) 1576: Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de espécimen para ensayo.

INEN (2010) 1573: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.

ASTM C 496. Método de prueba estándar para Determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de hormigón.

ASTM C78: Resistencia a la flexión de las vigas de hormigón.

INEN (2011) 2554: Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón (Utilizando una viga simple con carga en los tercios).

NEC. (2015). Estructuras de hormigón armado. Código: NEC-SE-HM. Quito, Ecuador.

Niño Hernández, J. (2010). Tecnología de concreto (Tercera Ed.). ASOCRETO. Colombia.

Sika Ecuatoriana S.A. (2015). Hoja Técnica de Producto Sikament N 450.



## 7. ANEXOS

<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclad
<b>FECHA:</b>	24 de marzo de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Cilindros de Hormigón
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Holcim - Planta Cuenca
<b>ENSAYO A COMPRESIÓN</b>	
NTE INEN 1573	

CÓDIGO DE LA PROBETA	CARGA MÁXIMA (kgf)	RESISTENCIA (kg/cm <sup>2</sup> )
25720	27992	352.10
25720	25542	321.28
25721	24951	313.85
25721	26549	333.95
25722	25779	324.26
25723	26462	332.86
25723	33325	419.18
25724	27277	349.71
25724	34970.5	439.88
25725	22737	286.00
25725	27332	343.80
25726	22200	279.25
25726	24645	310.00
25808	22056	277.43
25833	21402	269.21
25861	21799	274.20
25862	23857	300.09
25868	21825	274.53
25868	21949	276.09
25869	16214	203.95
25870	16687	209.90
25872	24709	310.80
25872	17212	216.50
25873	25406	319.57
25874	21292	267.82
25874	23651	297.50
25875	31385	394.78
25875	29539	371.56
25881	27273	343.06
25883	22620	284.53
25883	21331	268.31
25884	23219	292.06
25885	24134	303.57
25885	19720	248.05
25887	18023	226.71
25887	18429	231.81
25889	19448	244.63



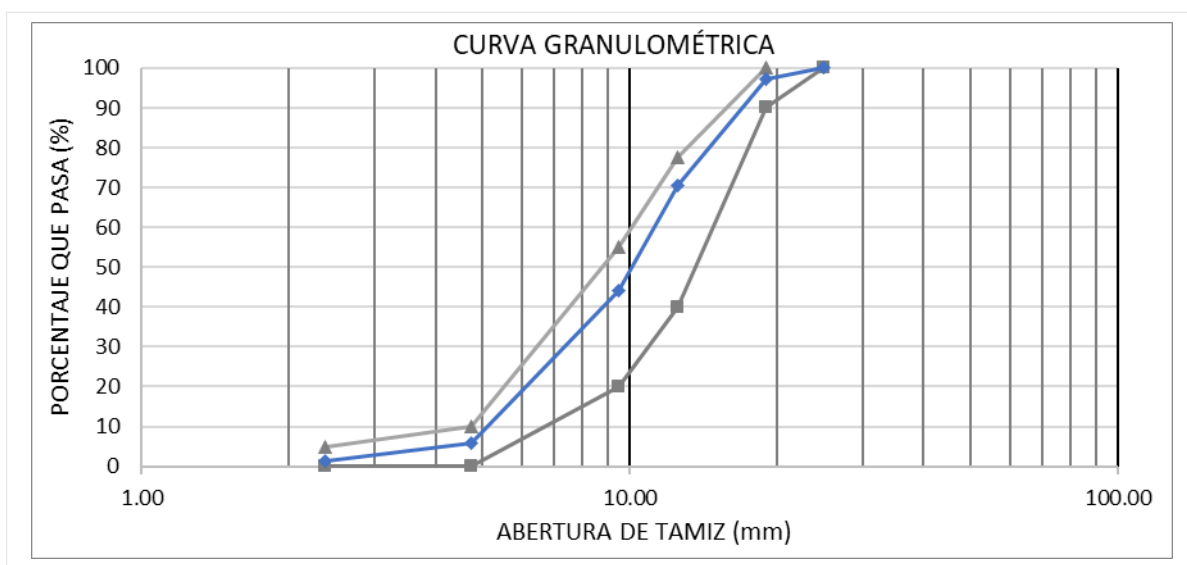
25893	15938	200.5
25899	20334	255.77
25900	16779	211.06
25901	16471	207.18
25901	16433	206.7
25902	19564	246.09
25902	15836	203.03
25903	22875	287.74
25904	20247	254.68
25905	16178	194.59
25906	18192	228.83
25906	18482	232.48

<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Jueves, 16 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado Grueso - Grava
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Santa Isabel
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>	
NTE INEN 696	

TAMIZ #	ABERTURA mm	PESO RETENIDO (gr)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	PORCENTAJE ESPECIF. (%)
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.0	0.0	0.00	100.00	
3/4"	19.00	479.7	479.7	2.85	97.15	
1/2"	12.50	4465.3	4945.0	26.57	70.57	
3/8"	9.50	4458.1	9403.1	26.53	44.05	
N°4	4.75	6444.0	15847.1	38.35	5.70	
N°8	2.38	742.7	16589.8	4.42	1.28	
N°10	2.00					
N°16	1.19					
N°20	0.84					
N°30	0.59					
N°40	0.42					
N°50	0.297					
N°60	0.246					
N°80	0.177					
N°100	0.149					
N°200	0.074					
PASA N°200		215.2	16805.0	1.28	0.00	
TOTAL		16805.0				

PESO ANTES ENSAYO = 16829.6 gr.

PESO DESPUÉS ENSAYO = 16805.0 gr.

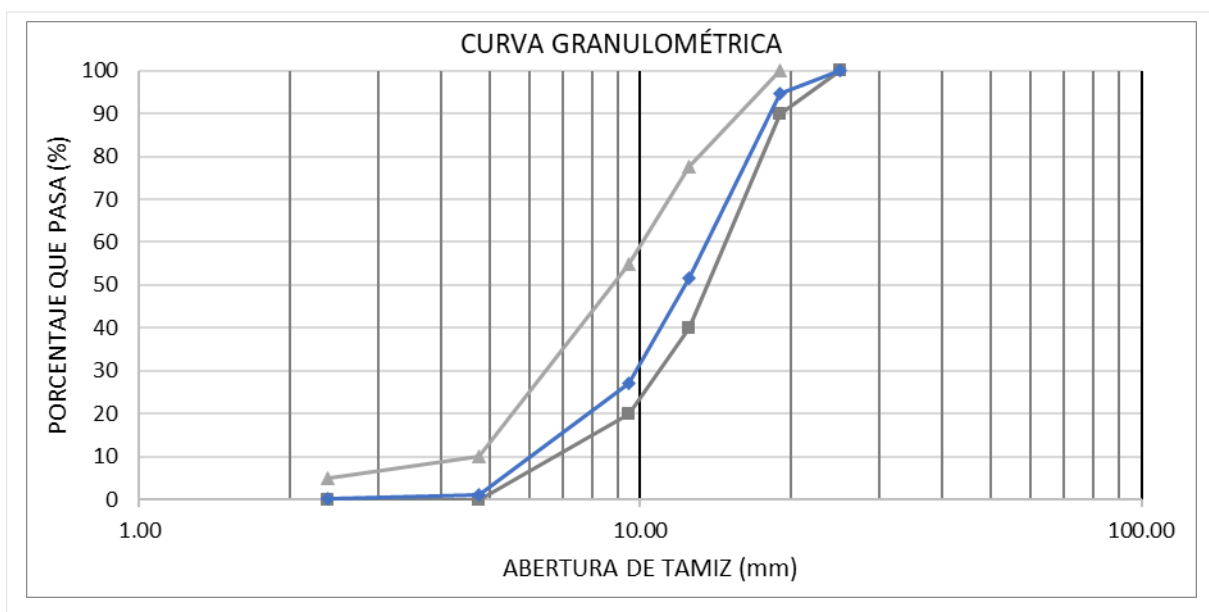


<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Jueves, 16 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado Grueso - Ripio
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	El Descanso
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>	
NTE INEN 696	

TAMIZ #	ABERTURA mm	PESO RETENIDO (gr)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	PORCENTAJE ESPECIF. (%)
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.0	0.0	0.00	100.00	
3/4"	19.00	842.3	842.3	5.47	94.53	
1/2"	12.50	6618.4	7460.7	42.97	51.56	
3/8"	9.50	3790.3	11251.0	24.61	26.96	
N°4	4.75	3973.5	15224.5	25.80	1.16	
N°8	2.38	131.7	15356.2	0.86	0.31	
N°10	2.00					
N°16	1.19					
N°20	0.84					
N°30	0.59					
N°40	0.42					
N°50	0.297					
N°60	0.246					
N°80	0.177					
N°100	0.149					
N°200	0.074					
PASA N°200		47.2	15403.4	0.31	0.00	
TOTAL		15403,4				

PESO ANTES ENSAYO = 15405.5 gr.

PESO DESPUÉS ENSAYO = 15403.4 gr.

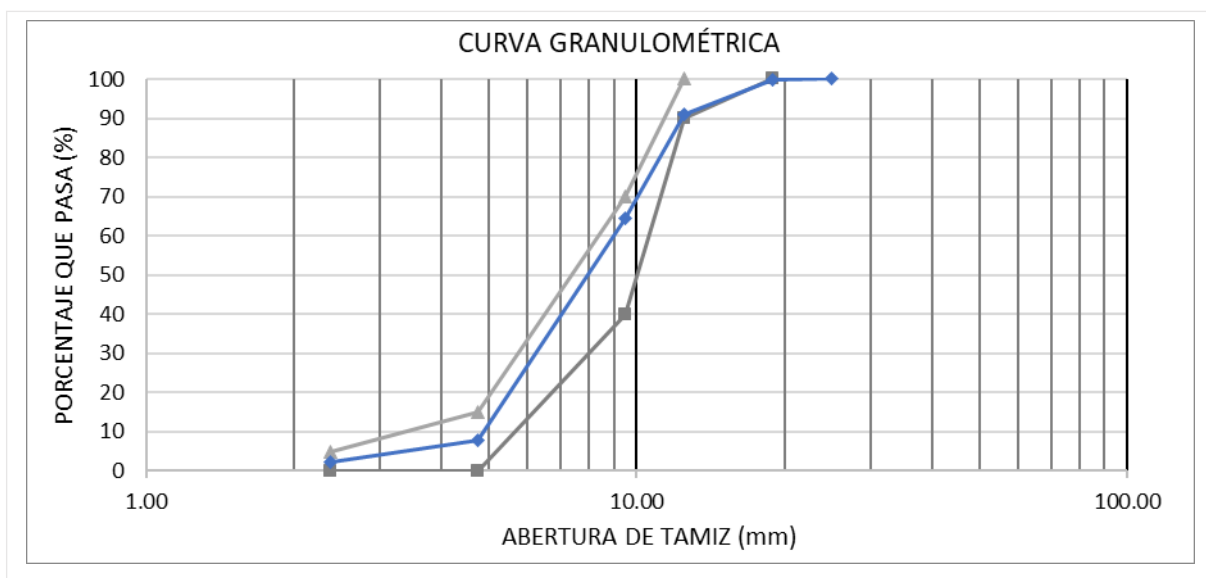


<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Martes, 21 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado Grueso - Agregado Reciclado
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Holcim - Planta Cuenca
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>	
NTE INEN 696	

TAMIZ #	ABERTURA	PESO RETENIDO (gr)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	PORCENTAJE ESPECIF. (%)
	mm					
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00	0.0	0.0	0.00	100.00	
3/4"	19.00	25.5	25.5	0.26	99.74	
1/2"	12.50	843.6	869.1	8.74	90.99	
3/8"	9.50	2560.8	3429.9	26.54	64.45	
N°4	4.75	5472.8	8902.7	56.73	7.72	
N°8	2.38	534.4	9437.1	5.54	2.18	
N°10	2.00					
N°16	1.19					
N°20	0.84					
N°30	0.59					
N°40	0.42					
N°50	0.297					
N°60	0.246					
N°80	0.177					
N°100	0.149					
N°200	0.074					
PASA N°200		210.0	9647.1	2.18	0.00	
TOTAL		9647.1				

PESO ANTES ENSAYO = 9657,3 gr.

PESO DESPUÉS ENSAYO = 9647,1 gr.

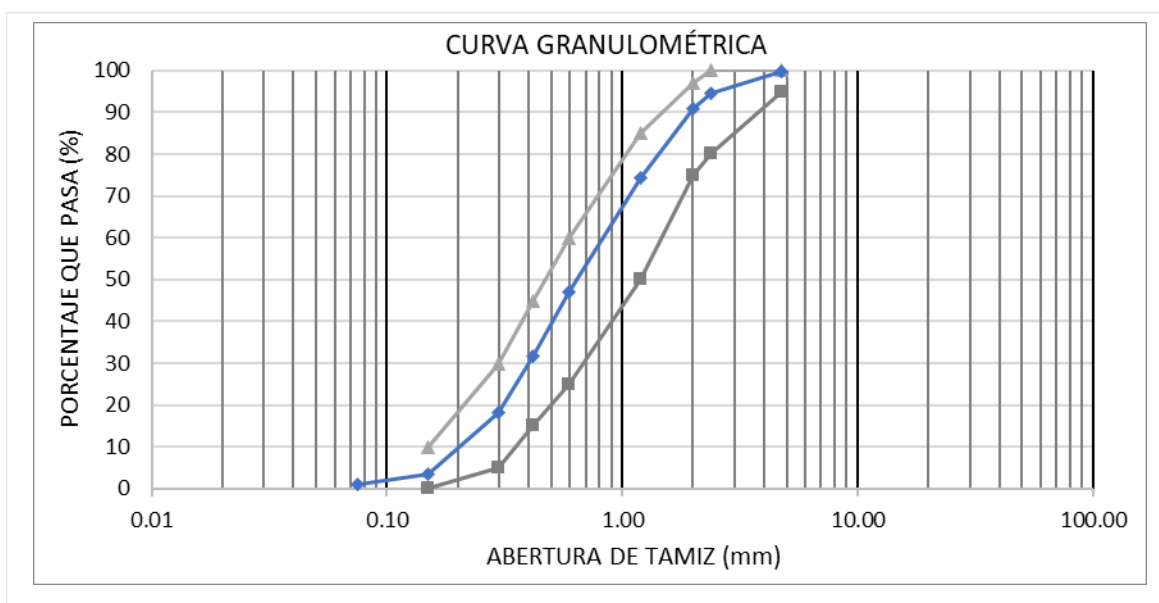


<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Martes, 21 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado Fino - Arena
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Santa Isabel
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>	
NTE INEN 696	

TAMIZ #	ABERTURA mm	PESO RETENIDO (gr)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	PORCENTAJE ESPECIF. (%)
2"	50.00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N°4	4.75	6.3	63	0.13	99.87	
N°8	2.38	261.3	267.6	5.35	94.53	
N°10	2.00	179.7	447.3	3.68	90.85	
N°16	1.19	814.2	1261.5	16.66	74.19	
N°20	0.84					
N°30	0.59	1328.2	2589.7	27.17	47.02	
N°40	0.42	744.4	3334.1	15.23	31.79	
N°50	0.297	661.5	3995.6	13.53	18.26	
N°60	0.246					
N°80	0.177					
N°100	0.149	717.1	4712.7	14.67	3.59	
N°200	0.074	130.4	4843.1	2.67	0.92	
PASA N°200		45.2	4888.3	0.92	0.00	
TOTAL		4888.3				

PESO ANTES ENSAYO = 4895.0 gr.

PESO DESPUÉS ENSAYO = 4888.3 gr.



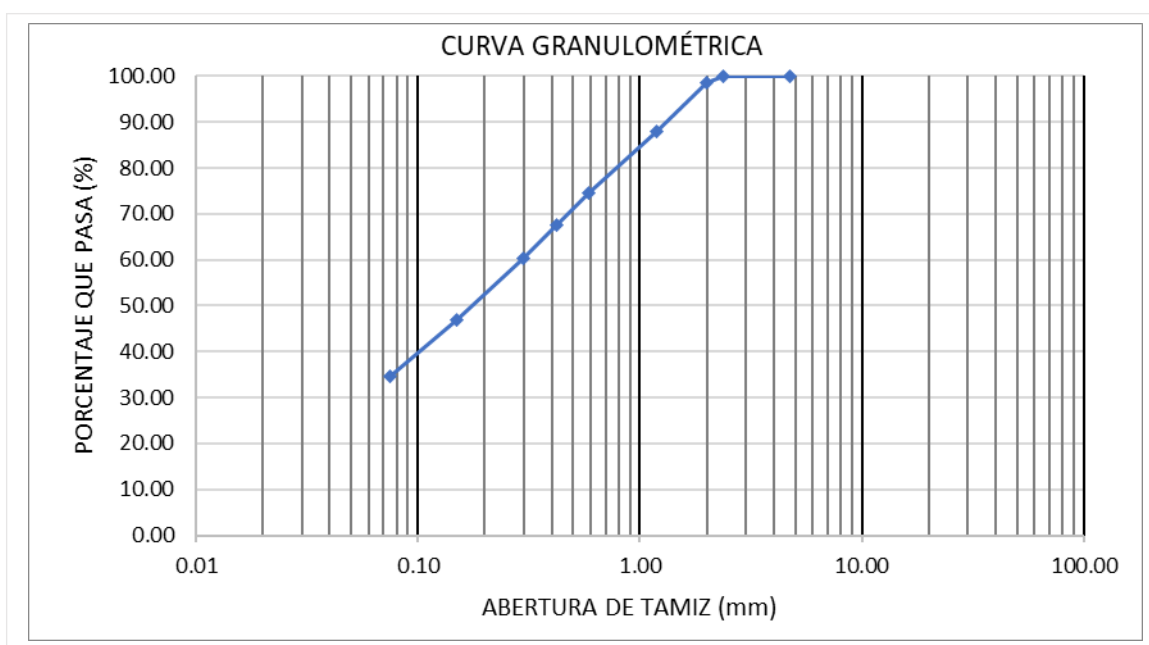


<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Jueves, 16 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Ceniza Volante
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Residuo producto de la elaboración de ladrillos artesanales
<b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b>	
NTE INEN 696	

TAMIZ #	ABERTURA	PESO RETENIDO (gr)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)	PORCENTAJE ESPECIF. (%)
	mm					
2"	50,00					
1 1/2"	37.50					
1"	25.00					
3/4"	19.00					
1/2"	12.50					
3/8"	9.50					
N°4	4.75	0.0	0.0	0.00	100.00	
N°8	2.38	2.7	2.7	0.09	99.91	
N°10	2.00	38.0	40.7	1.22	98.69	
N°16	1.19	330.9	371.6	10.63	88.06	
N°20	0.84					
N°30	0.59	418.5	790.1	13.45	74.62	
N°40	0.42	223.1	1013.2	7.17	67.45	
N°50	0.297	221.5	1234.7	7.12	60.33	
N°60	0.246					
N°80	0.177					
N°100	0.149	421.4	1656.1	13.54	46.79	
N°200	0.074	374.9	2031.0	12.04	34.75	
PASA N°200		1081.5	3112.5	34.75	0.00	
TOTAL		3112.5				

PESO ANTES ENSAYO = 3115.0 gr.

PESO DESPUÉS ENSAYO = 3112.5 gr.





<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclad
<b>FECHA:</b>	Jueves, 16 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado grueso natural - Grava
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Santa Isabel
<b>PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN</b>	
NTE INEN 857	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	#	Valores	Datos del Ensayo
B	Masa de la Muestra Superficialmente Seca	gr	3015	
	Masa Aparente en Agua de la Canastilla	gr	895.3	
	Masa Aparente en Agua de la Muestra Saturada + Canastilla	gr	2698.1	
A	Masa de la Muestra Seca	gr	2884	
C	Masa Aparente en Agua de la Muestra Saturada	gr	1802.8	

**CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS**

Densidad relativa (SH):  $D = \frac{A}{B - C} =$  2.38 gr/cm<sup>3</sup>

Densidad relativa (SSS)  $D = \frac{B}{B - C} =$  2.49 gr/cm<sup>3</sup>

Densidad relativa aparente (SSS):  $D = \frac{A}{A - C} =$  2.67 gr/cm<sup>3</sup>

Densidad (SH)  $D = \frac{997.5 A}{B - C} =$  2373.20 kg/m<sup>3</sup>

Densidad (SSS)  $D = \frac{997.5 B}{B - C} =$  2481.00 kg/m<sup>3</sup>

Densidad aparente (SSS):  $D = \frac{997.5 A}{A - C} =$  2660.74 kg/m<sup>3</sup>

Absorción:  $D = \frac{B - A}{A} =$  4.54 %



<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclad
<b>FECHA:</b>	Jueves, 16 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado grueso - Ripio
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Santa Isabel
<b>PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN</b>	
NTE INEN 857	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	#	Valores	Datos del Ensayo
B	Masa de la Muestra Superficialmente Seca	gr	3104.5	
	Masa Aparente en Agua de la Canastilla	gr	896.5	
	Masa Aparente en Agua de la Muestra Saturada + Canastilla	gr	2770.9	
A	Masa de la Muestra Seca	gr	3032.3	
C	Masa Aparente en Agua de la Muestra Saturada	gr	1874.4	

**CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS**

Densidad relativa (SH):  $D = \frac{A}{B - C} =$  2.47    gr/cm<sup>3</sup>

Densidad relativa (SSS):  $D = \frac{B}{B - C} =$  2.52    gr/cm<sup>3</sup>

Densidad relativa aparente (SSS):  $D = \frac{A}{A - C} =$  2.62    gr/cm<sup>3</sup>

Densidad (SH):  $D = \frac{997.5 A}{B - C} =$  2458.92    kg/m<sup>3</sup>

Densidad (SSS):  $D = \frac{997.5 B}{B - C} =$  2517.47    kg/m<sup>3</sup>

Densidad aparente (SSS):  $D = \frac{997.5 A}{A - C} =$  2612.25    kg/m<sup>3</sup>

Absorción:  $D = \frac{B - A}{A} * 100 =$  2.38    %



<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Viernes, 17 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado grueso reciclado
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Holcim - Planta Cuenca
<b>PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN</b>	
NTE INEN 857	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	#	Valores	Datos del Ensayo
B	Masa de la Muestra Superficialmente Seca	gr	3007.1	
	Masa Aparente en Agua de la Canastilla	gr	895.2	
	Masa Aparente en Agua de la Muestra Saturada + Canastilla	gr	2632	
A	Masa de la Muestra Seca	gr	2798	
C	Masa Aparente en Agua de la Muestra Saturada	gr	1736.8	

**CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS**

Densidad relativa (SH):  $D = \frac{A}{B - C} =$  2.20      gr/cm<sup>3</sup>

Densidad relativa (SSS):  $D = \frac{B}{B - C} =$  2.37      gr/cm<sup>3</sup>

Densidad relativa aparente (SSS):  $D = \frac{A}{A - C} =$  2.64      gr/cm<sup>3</sup>

Densidad (SH):  $D = \frac{997.5 A}{B - C} =$  2196.95      kg/m<sup>3</sup>

Densidad (SSS):  $D = \frac{997.5 B}{B - C} =$  2361.21      kg/m<sup>3</sup>

Densidad aparente (SSS):  $D = \frac{997.5 A}{A - C} =$  2630.046      kg/m<sup>3</sup>

Absorción:  $D = \frac{B - A}{A} * 100 =$  7.48      %



<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclad
<b>FECHA:</b>	Viernes, 17 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado fino - Arena
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	El Descanso
<b>PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN</b>	
NTE INEN 857	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO					
	Nomenclatura	#	Valores		Datos del Ensayo
S	Masa de la Muestra Superficialmente Seca	gr	500		
C	Masa del Matraz + Agua + Muestra	gr	975.1		
	Temperatura a Grados Centígrados	°C	20		
B	Masa del Matraz + Agua	gr	674.7		
A	Masa de la Muestra Seca	gr	480.6		
	Peso Específico del agua	T °C	20	gr/cm <sup>2</sup>	

**CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS**

Densidad relativa (SH):  $D = \frac{A}{(B + S - C)} =$  2.41 gr/cm<sup>3</sup>

Densidad relativa (SSS):  $D = \frac{S}{(B + S - C)} =$  2.51 gr/cm<sup>3</sup>

Densidad relativa aparente (SSS):  $D = \frac{A}{(B + A - C)} =$  2.67 gr/cm<sup>3</sup>

Densidad (SH):  $D = \frac{997.5 A}{(B + S - C)} =$  2401.80 kg/m<sup>3</sup>

Densidad (SSS):  $D = \frac{997.5 S}{(B + S - C)} =$  2498.75 kg/m<sup>3</sup>

Densidad aparente (SSS):  $D = \frac{997.5 A}{(B + A - C)} =$  2630.37 kg/m<sup>3</sup>

Absorción:  $D = \frac{(S - A)}{A} * 100 =$  4.04 %



<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Lunes, 20 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado grueso natural - Grava
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Santa Isabel
<b>MASA UNITARIA</b>	
NTE INEN 858	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	#	Valores	Datos del Ensayo
G	Masa del Árido + el Molde	kg	21.45	
	Diámetro del Molde	cm	20.3	
	Altura del Molde	cm	30.2	
V	Volumen del Molde	m <sup>3</sup>	0.0098	
T	Masa del Molde	kg	6.48	
A	Gravedad específica del Árido	kg/m <sup>3</sup>	2373.20	
	Densidad del agua	kg/m <sup>3</sup>	998	

### CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS

Masa unitaria:  $M = \frac{G - T}{V} =$

1531.56 kg/m<sup>3</sup>

Contenido de vacíos:  $V = \frac{[(S * M) - Da] * 100}{(S * Da)} =$

35.46 %



<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Lunes, 20 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado grueso triturado - Ripio
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Santa Isabel
<b>MASA UNITARIA</b>	
NTE INEN 858	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	#	Valores	Datos del Ensayo
G	Masa del Árido + el Molde	kg	20.9	
	Diámetro del Molde	cm	20.3	
	Altura del Molde	cm	30.2	
V	Volumen del Molde	m <sup>3</sup>	0.0098	
T	Masa del Molde	kg	6.48	
A	Gravedad específica del Árido	kg/m <sup>3</sup>	2458.92	
	Densidad del agua	kg/m <sup>3</sup>	998	

#### CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS

$$\text{Masa unitaria } M = \frac{G - T}{V} =$$

1475.29 kg/m <sup>3</sup>
---------------------------

$$\text{Contenido de vacío: } V = \frac{[(S * M) - Da] * 100}{(S * Da)} =$$

40 gr/cm <sup>2</sup>
-----------------------



<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Lunes, 20 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado grueso reciclado
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Holcim - Cuenca
<b>MASA UNITARIA</b>	
NTE INEN 858	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	#	Valores	Datos del Ensayo
G	Masa del Árido + el Molde	kg	19.8	
	Diámetro del Molde	cm	20.3	
	Altura del Molde	cm	30.2	
V	Volumen del Molde	m <sup>3</sup>	0.0098	
T	Masa del Molde	kg	6.48	
A	Gravedad específica del Árido	kg/m <sup>3</sup>	2196.95	
	Densidad del agua	kg/m <sup>3</sup>	998	

**CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS**

Masa unitaria:  $M = \frac{G - T}{V} =$

1362.75 kg/m<sup>3</sup>

Contenido de vacíos:  $V = \frac{[(S * M) - Da] * 100}{(S * Da)} =$

37.97 %





<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Lunes, 20 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado fino - Arena
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Santa Isabel
<b>MASA UNITARIA</b>	
NTE INEN 858	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	#	Valores	Datos del Ensayo
G	Masa del Árido + el Molde	kg	7.029	
	Diámetro del Molde	cm	15.6	
	Altura del Molde	cm	15.7	
V	Volumen del Molde	m <sup>3</sup>	0.003	
T	Masa del Molde	kg	2.87	
S	Gravedad específica del Árido	kg/m <sup>3</sup>	2401.8	
Da	Densidad del agua	kg/m <sup>3</sup>	998	

#### CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS

Masa unitaria:  $M = \frac{G - T}{V} =$

1386.99 kg/m<sup>3</sup>

Contenido de vacíos:  $V = \frac{[(S * M) - Da] * 100}{(S * Da)} =$

42.25 %



<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Martes, 21 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado grueso natural - Grava
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Santa Isabel
<b>DEGRADACIÓN</b>	
NTE INEN 860	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	#	Valores	Datos del Ensayo
	Esferas		11	
	Masa de cada Esfera	gr	387	
	Carga Abrasiva	gr	4257	
	Tiempo de Abrasión	min	17	
Pa	Masa de la Muestra Seca antes de colocar en la Máquina de Los Ángeles.	gr	5001	
Pb	Masa de la Muestra Seca Retenida en el Tamiz Nº 12	gr	3848.2	

<b>CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS</b>
---------------------------------

Porcentaje de desgaste:  $\frac{Pa - Pb}{Pa} * 100 =$

23.05    %
------------



<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Martes, 21 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado grueso triturado - Ripio
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	El Descanso
<b>DEGRADACIÓN</b>	
NTE INEN 860	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	#	Valores	Datos del Ensayo
	Esferas		11	
	Masa de cada Esfera	gr	387	
	Carga Abrasiva	gr	4257	
	Tiempo de Abrasión	min	17	
Pa	Masa de la Muestra Seca antes de colocar en la Máquina de Los Ángeles.	gr	5003.7	
Pb	Masa de la Muestra Seca Retenida en el Tamiz Nº 12	gr	3749.6	

**CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS**

Porcentaje de desgaste:  $\frac{Pa - Pb}{Pa} * 100 =$

25.06	%
-------	---



<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	Martes, 21 de agosto de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregado grueso reciclado
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Holcim - Cuenca
<b>DEGRADACIÓN</b>	
NTE INEN 860	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	#	Valores	Datos del Ensayo
	Esferas		11	
	Masa de cada Esfera	gr	387	
	Carga Abrasiva	gr	4257	
	Tiempo de Abrasión	min	17	
Pa	Masa de la Muestra Seca antes de colocar en la Máquina de Los Ángeles.	gr	5001.7	
Pb	Masa de la Muestra Seca Retenida en el Tamiz Nº 12	gr	2868.9	

<b>CÁLCULOS DE LAS MUESTRAS</b>
---------------------------------

Porcentaje de desgaste:  $\frac{Pa - Pb}{Pa} * 100 =$

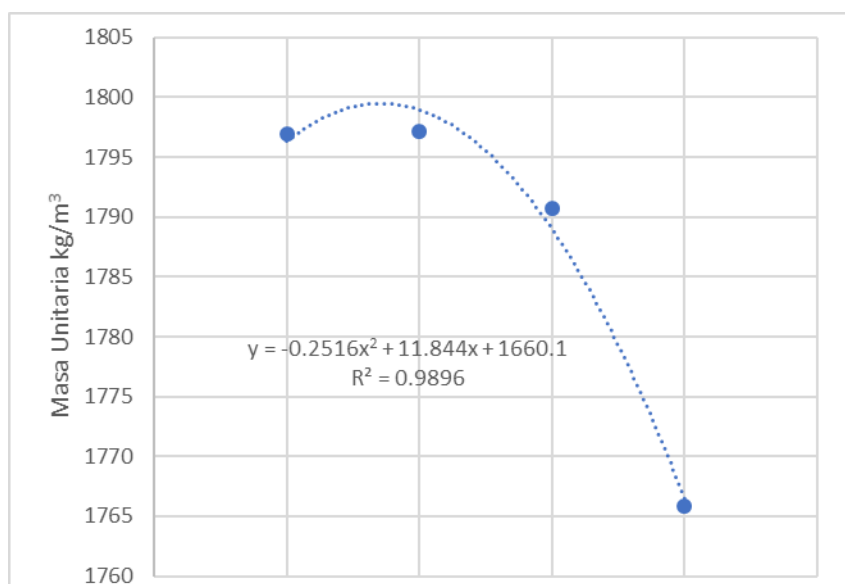
42.64    %
------------

<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclad
<b>FECHA:</b>	Miércoles, 22 de agosto del 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Agregados naturales: grava y arena; ripio; y agregado grueso reciclado
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Santa Isabel
<b>MASA UNITARIA</b>	
NTE INEN 858	

Material	kg	%	kg
Arena	762	44	
Grava	776	45	
Ripio	194	11	
<b>TOTAL</b>	<b>1732</b>	<b>100</b>	

Agregado	%	0	20	25	30	35
Agregado reciclado		0	20	25	30	35
Arena	kg	7.92	7.92	7.92	7.92	7.92
Grava	kg	8.10	6.48	6.08	5.67	5.27
Ripio	kg	1.98	1.98	1.98	1.98	1.98
Material Reciclado	kg	0.00	1.62	2.03	2.43	2.84

	Nomenclatura	#	Valores				Datos del Ensayo
			20	25	30	35	
	Árido Reciclado	%	20	25	30	35	
G	Masa del Árido + el Molde	kg	23.414	23.41	23.35	23.1085	
	Diámetro del molde	cm	20.3	20.3	20.3	20.3	
	Altura del Molde	cm	30.4	30.4	30.4	30.4	
V	Volumen del Molde	m	0.0098	0.0098	0.0098	0.0098	
T	Masa del Molde	hg	5.7341	5.73	5.73	5.7341	
	Masa Unitaria	kg/m <sup>3</sup>	1796.91	1797.18	1790.74	1765.85	



	15%	20%	25%	30%	35%	40%
<b>Agregado reciclado</b>	15%	20%	25%	30%	35%	40%
<b>Agregado natural</b>	85%	80%	75%	70%	65%	60%

<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva.
<b>DESCRIPCIÓN :</b>	Mezclas Realizadas
<b>PROCEDENCIA :</b>	

**DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS REALIZADAS**

Dosificación Patrón					
Volumen		1.00 m <sup>3</sup>	Absorción %	0.037 m <sup>3</sup>	0.029 m <sup>3</sup>
Cemento	kg	318		11.803	9.22
Ripio	kg	194	1.770	7.201	5.626
Grava	kg	776	4.600	28.803	22.504
Arena	kg	762	5.500	28.283	22.098
Agua	lt	192		7.126	5.568
Aditivo	kg	3.18		0.118	0.092

- Mezcla Patrón Corregida

Mezcla Patrón Corregido				
	Absorción (%)	Humedad (%)	C. Absorción (kg)	C. Humedad (kg)
Cemento			11.88	11.88
Ripio	2.24	0.01	7.20	7.20
Grava	4.54	0.02	28.80	28.80
Arena	4.08	0.02	28.28	28.28
Agua			6.74	6.73
Aditivo			0.12	0.12

- Dosificación de mezclas utilizado agregado reciclado en reemplazo de grava.

Mezcla con 23% Agregado Reciclado				
	Absorción (%)	Humedad (%)	C. Absorción (kg)	C. Humedad (kg)
Cemento			11.88	11.88
Ripio	2.24	0.004	7.20	7.20
Grava	4.54	0.04	22.18	22.18
Arena	4.08	0.06	28.28	28.28
Agua			7.24	7.21
Aditivo			0.12	0.12
Reciclado	7.47	0.00	6.62	6.62

- Dosificación de mezclas utilizado ceniza proveniente de la elaboración de ladrillos.  
Material retenido en el fondo.

<b>Mezcla con 10% de Ceniza Volante</b>				
	<b>Absorción (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C. Absorción (kg)</b>	<b>C. Humedad (kg)</b>
Cemento			10.59	10.59
Ripio	2.24	0.01	7.18	7.18
Grava	4.54	0.04	28.71	28.71
Arena	4.08	0.75	28.19	28.19
Agua			6.72	6.50
Aditivo			0.12	0.12
Ceniza			1.18	1.18

<b>Mezcla con 20% de Ceniza Volante</b>				
	<b>Absorción (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C. Absorción (kg)</b>	<b>C. Humedad (kg)</b>
Cemento			9.41	9.41
Ripio	2.24	0.01	7.18	7.18
Grava	4.54	0.04	28.71	28.71
Arena	4.08	0.75	28.19	28.19
Agua			6.72	6.50
Aditivo			1.18	1.18
Ceniza			2.35	2.35

<b>Mezcla con 30% de Ceniza Volante</b>				
	<b>Absorción (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C. Absorción (kg)</b>	<b>C. Humedad (kg)</b>
Cemento			8.236	8.236
Ripio	2.240	0.007	7.178	7.178
Grava	4.540	0.022	28.712	28.712
Arena	4.080	0.053	28.194	28.194
Agua			6.720	6.698
Aditivo			0.118	0.118
Ceniza			3.530	3.530

<b>Mezcla con 50% de Ceniza Volante</b>				
	<b>Absorción (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C. Absorción (kg)</b>	<b>C. Humedad (kg)</b>
Cemento			5.88	5.88
Ripio	2.24	0.01	7.18	7.18
Grava	4.54	0.02	28.71	28.71
Arena	4.08	0.06	28.19	28.19
Agua			6.72	6.70
Aditivo			1.18	1.18
Ceniza			5.88	5.88

<b>Mezcla con 70% de Ceniza Volante</b>				
	<b>Absorción (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C. Absorción (kg)</b>	<b>C. Humedad (kg)</b>
Cemento			3.53	3.53
Ripio	2.24	0.01	7.18	7.18
Grava	4.54	0.04	28.71	28.71
Arena	4.08	0.07	28.19	28.19
Agua			6.72	6.69
Aditivo			0.12	0.12
Ceniza			8.24	8.24

- Dosificación con ceniza volante proveniente de Sika.

<b>Mezcla con 10% de Ceniza Volante</b>				
	<b>Absorción (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C. Absorción (kg)</b>	<b>C. Humedad (kg)</b>
Cemento			10.59	10.59
Ripio	2.24	0.73	7.18	7.18
Grava	4.54	0.04	28.71	28.71
Arena	4.08	0.09	28.19	28.19
Agua			6.65	6.56
Aditivo			0.12	0.12
Ceniza			1.18	1.18

<b>Mezcla con 20% de Ceniza Volante</b>				
	<b>Absorción (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C. Absorción (kg)</b>	<b>C. Humedad (kg)</b>
Cemento			9.4	9.4
Ripio	2.24	0.73	7.18	7.18
Grava	4.54	0.04	28.71	28.71
Arena	4.08	0.09	28.19	28.19
Agua			6.65	6.56
Aditivo			1.18	1.18
Ceniza			2.35	2.35

<b>Mezcla con 30% de Ceniza Volante</b>				
	<b>Absorción (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C. Absorción (kg)</b>	<b>C. Humedad (kg)</b>
Cemento			8.236	8.236
Ripio	2.240	0.009	7.178	7.178
Grava	4.540	0.035	28.712	28.712
Arena	4.080	0.079	28.194	28.194
Agua			6.646	6.613
Aditivo			0.118	0.118
Ceniza			3.530	3.530



- Dosificación de mezclas utilizado ceniza proveniente de la elaboración de ladrillos.  
Material retenido en el tamiz N° 200 y fondo.

<b>Mezcla con 10% de Ceniza Volante</b>				
	<b>Absorción (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C. Absorción (kg)</b>	<b>C. Humedad (kg)</b>
Cemento			10.59	10.59
Ripio	2.24	0.00	7.18	7.18
Grava	4.54	0.00	28.71	28.71
Arena	4.08	0.00	28.19	28.19
Agua			6.65	6.65
Aditivo			0.12	0.12
Ceniza			1.18	1.18

<b>Mezcla con 20% de Ceniza Volante</b>				
	<b>Absorción (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C. Absorción (kg)</b>	<b>C. Humedad (kg)</b>
Cemento			9.41	9.41
Ripio	2.24	0.00	7.20	7.20
Grava	4.54	0.00	28.80	28.80
Arena	4.08	0.00	28.28	28.28
Agua			6.64	6.64
Aditivo			0.12	0.12
Ceniza			2.35	2.35

<b>Mezcla con 30% de Ceniza Volante</b>				
	<b>Absorción (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C. Absorción (kg)</b>	<b>C. Humedad (kg)</b>
Cemento			11.766	11.766
Ripio	2.24	0.00	7.20	7.20
Grava	4.54	0.00	28.80	28.80
Arena	4.08	0.00	28.28	28.28
Agua			6.64	6.64
Aditivo			0.12	0.12
Ceniza			3.53	3.53



- Dosificación de la mezcla de hormigón con el porcentaje óptimo de ceniza volante (residuos de la elaboración de ladrillos) y agregado reciclado.

<b>Mezcla con 10% de Ceniza y 23% de Agregado reciclado</b>				
	<b>Absorción (%)</b>	<b>Humedad (%)</b>	<b>C. Absorción (kg)</b>	<b>C. Humedad (kg)</b>
Cemento			10.6	10.6
Ripio	2.24	0.01	7.18	7.18
Grava	4.54	0.03	22.18	22.18
Arena	4.08	0.02	28.19	28.19
Agua			7.12	7.11
Aditivo			0.12	0.12
Ceniza			1.2	1.2
Reciclado	7.47		6.62	6.62



<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	4 de octubre de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	90%Cemento HE - 10%Ceniza Volante
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Holcim - Fábrica de elaboración de ladrillos artesanales
<b>CONSISTENCIA NORMAL</b>	
NTE INEN 157	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO				
	Nomenclatura	#	Valores	Datos del Ensayo
ma	Masa del agua	gr	625	
mc	Masa del cemento	gr	195	

<b>CÁLCULOS DEL ENSAYO</b>
----------------------------

Consistencia normal:

$$C(\%) = \frac{m_a}{m_c} * 100$$

30 %



<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>FECHA:</b>	4 de octubre de 2018
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	90%Cemento HE - 10%Ceniza Volante
<b>PROCEDENCIA DEL MATERIAL:</b>	Holcim - Fábrica de elaboración de ladrillos artesanales
<b>TIEMPO DE FRAGUADO</b>	
NTE INEN 158	

EJECUCIÓN DEL ENSAYO			
Lectura	Hora	Tiempo (min)	Penetración (mm)
1	10:48	0	48
2	11:18	30	40
3	11:28	40	38
4	11:38	50	34
5	11:48	60	32
6	11:58	70	30
7	12:08	80	27
8	12:18	90	25
9	12:28	100	22.5
10	12:38	110	21
11	12:48	120	19.5
12	12:58	130	17.5
13	13:08	140	14.5
14	13:18	150	13
15	13:28	160	11.5
16	13:38	170	11
17	13:48	180	10
18	13:58	190	8.5
19	14:08	200	6
20	14:18	210	4
21	14:28	220	3
22	14:38	230	2
23	14:48	240	1
24	14:58	250	1
25	15:08	260	0.5
26	15:18	270	0.5
37	15:28	280	0

CÁLCULOS DEL ENSAYO		
90%Cemento - 10%Ceniza		
	Fraguado Inicial	Fraguado Final
<b>Penetración (mm)</b>	25	0
<b>Tiempo (min)</b>	90	280

<b>PROYECTO:</b>	Diseño y Elaboración de Mezclas de Hormigón con Materiales Reciclados
<b>UBICACIÓN:</b>	Av. 12 de Abril y Agustín Cueva
<b>DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL:</b>	Cilindros de hormigón.
<b>ENSAYO A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN INDIRECTA</b>	

- Mezcla Patrón

Días de Curado	Cilindro	Resistencia a Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Cilindro	Resistencia a Tracción Indirecta (kg/cm <sup>2</sup> )
3	SC04-SC05- SC72	163	SC01-SC71	15
7	SC02-SC03- SC73	190	SC06-SC74	20
14	SC07- SC76	236	SC09-SC77	25
21	SC09-SC8-SC75	250		



SC76



SC77

- Mezcla hecha con 23% de hormigón reciclado.

Días de Curado	Cilindro	Promedio Resistencia a Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Cilindro	Resistencia a Tracción Indirecta (kg/cm <sup>2</sup> )
3	SC11-SC12	133	SC13	15
7	SC14-SC15	181	SC16	19
14	SC18-SC19	231	SC17	24



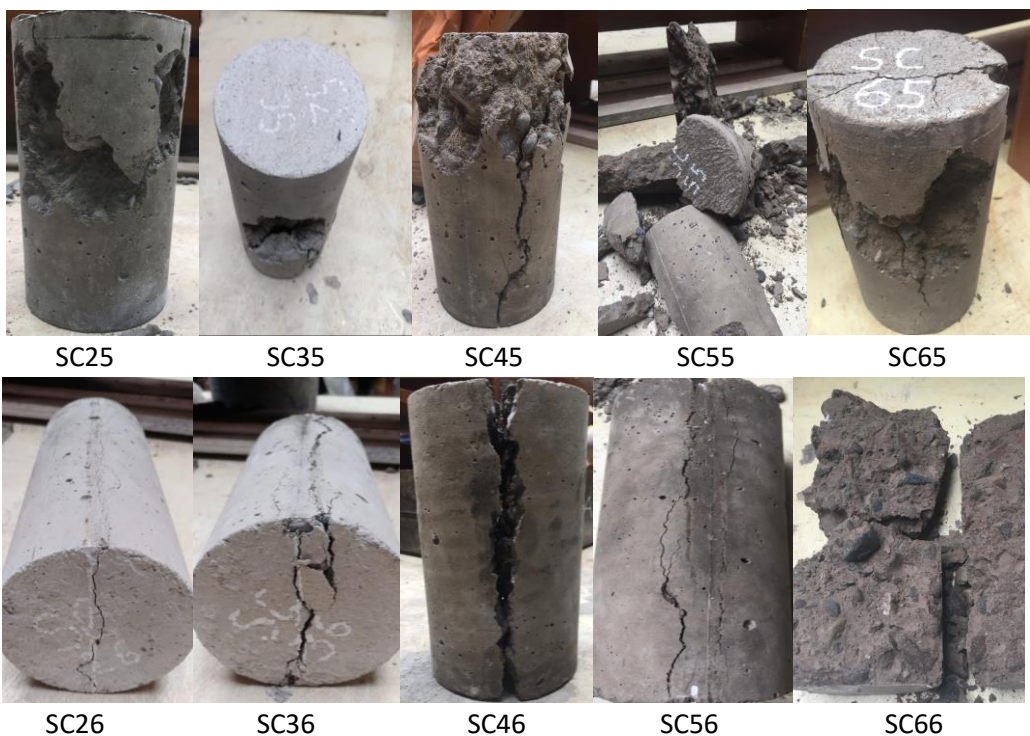
SC18



SC17

- Mezcla hecha con ceniza volante proveniente de hornos fabricantes de ladrillos artesanales que pasa el tamiz N°200

Resistencia a Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )										
% Ceniza	Cilindro	10	Cilindro	20	Cilindro	30	Cilindro	50	Cilindro	70
3	SC21	169	SC31	134	SC41	95	SC51	41	SC61	16
7	SC23	211	SC33	166	SC43	107	SC53	47	SC63	20
14	SC25	228	SC35	181	SC45	122	SC55	51	SC65	24
21	SC27	238	SC37	189	SC47	134	SC57	61	SC67	27
Resistencia a Tracción Indirecta (kg/cm <sup>2</sup> )										
3	SC22	17	SC32	12	SC42	10	SC52	6	SC62	2
7	SC24	20	SC34	16	SC44	13	SC54	7	SC64	2
14	SC26	25	SC36	20	SC46	15	SC55	9	SC65	3



- Mezcla hecha con ceniza volante proveniente de hornos fabricantes de ladrillos artesanales que pasa el tamiz N°100.

Resistencia a Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )						
% CENIZA	Cilindro	10	Cilindro	20	Cilindro	30
3	SC111	147	SC121	111	SC131	82
7	SC112	178	SC122	133	SC132	93
14	SC113	210	SC123	159	SC133	110
Resistencia a Tracción Indirecta (kg/cm <sup>2</sup> )						
3	SC114	12	SC124	8	SC134	4
7	SC115	16	SC125	12	SC1135	7
14	SC116	22	SC126	17	SC136	10



- Mezcla hecha con SikaFume

Resistencia a Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )						
% CENIZA	Cilindro	10	Cilindro	20	Cilindro	30
3	SC81	149	SC91	115	SC101	74
7	SC83	186	SC93	155	SC103	107
14	SC84	214	SC95	167	SC105	133
Resistencia a Tracción Indirecta (kg/cm <sup>2</sup> )						
3	SC82	16	SC92	13	SC102	8
7	SC85	22	SC94	18	SC104	11
14	SC86	24	SC96	21	SC106	16



- Mezcla elaborada con el 23% de hormigón reciclado y 10% de ceniza volante.

Días de Curado	Cilindro	Resistencia a Compresión(kg/cm <sup>2</sup> )	Cilindro	Resistencia a Tracción Indirecta (kg/cm <sup>2</sup> )
3	SC181	151	SC182	13
7	SC183	180	SC184	17
14	SC185	201	SC186	23



SC185

SC186