



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Diseños alternativos sostenibles para el hormigón hidráulico con la utilización de vidrio molido como parte de agregado fino.

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

Autores:

Christian Fabián Auquilla Rodríguez

christian.auquilla@yahoo.com

CI: 0105947352

Daniel Enrique Peláez Oñate

dpelaez087@hotmail.com

CI: 0302016779

Director:

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco, M.Sc. PhD.

CI: 0301500476

Cuenca, Ecuador

29-marzo-2021



Resumen:

Este proyecto se enfoca en la elaboración de hormigones hidráulicos sostenibles, con la incorporación de agregado reciclado en reemplazo parcial del agregado fino. El material reciclado para ser incorporado en la mezcla, es el vidrio molido proveniente de la recolección y reciclaje de botellas de uso diario y que pueden ser encontradas en gran cantidad.

Los materiales usados para la elaboración de hormigones fueron debidamente caracterizados, cumpliendo con las características necesarias que requiere la norma ASTM C33, para usarlos en las mezclas de hormigón. En base a los resultados obtenidos en la caracterización, se diseñó una dosificación patrón para ser utilizada como una mezcla referencia y así poder cuantificar y calificar el desempeño de las demás mezclas.

El objetivo principal del proyecto fue analizar la factibilidad y sostenibilidad de hormigones hidráulicos con el uso de vidrio molido como parte del agregado fino, para lo cual se definió la elaboración de 10 tipos de mezclas con diferentes porcentajes de vidrio molido y contando con 9 especímenes en cada mezcla.

Se utilizaron ensayos destructivos en cada uno de los elementos de hormigón, así como también el uso de herramientas computacionales calculadoras y calificadoras para obtener certificaciones en base a su sostenibilidad y emisiones de gases al ambiente. Los ensayos destructivos se realizaron para obtener la resistencia a la compresión simple y a la tracción indirecta. Mientras que las herramientas computacionales calificadoras fueron Greenroads y LEED y la herramienta calculadora fue PaLATE. Los tiempos de curado considerados fueron a los 7, 14 y 28 días.

Palabras claves:

Hormigón. Vidrio molido. Sostenibilidad. Factibilidad. Ensayos. Herramientas computacionales.



Abstract:

This project focuses on the development of sustainable hydraulic concretes, with the incorporation of recycled aggregate in partial replacement of fine aggregate. The recycled material to be incorporated into the mix is ground glass from the collection and recycling of bottles for daily use, which can be found in large quantities.

The materials used for the production of concretes were properly characterized, fulfilling the necessary features required for the ASTM C33 standard, for use in concrete mixes. Based on the results obtained in the characterization, a standard dosage was designed to be used as a reference mixture and thus be able to quantify and qualify the performance of the other mixtures.

The main objective of the project was to analyze the feasibility and sustainability of hydraulic concretes with the use of ground glass as part of the fine aggregate, for which the elaboration of 10 types of mixtures with different percentages of ground glass and counting with 9 specimens in each mix.

Destructive tests were used in each of the concrete elements, as well as the use of calculating and qualifying computational tools to obtain certifications based on their sustainability and gas emissions to the environment. Destructive tests were carried out to obtain the resistance to simple compression and to indirect traction. While the qualifying computational tools were Greenroads and LEED and the calculating tool was PaLATE. The curing times considered were 7, 14 and 28 days.

Keywords:

Concrete. Ground glass. Sustainability. Feasibility. Testing. Computational tools.



ÍNDICE DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	19
ANTECEDENTES	19
ORIGEN DE LA INVESTIGACIÓN.....	21
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	22
JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	22
OBJETIVO GENERAL.....	23
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	23
1 CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	25
1.1 ÁRIDOS	25
1.1.1 GENERALIDADES.....	25
1.1.2 TIPOS DE ÁRIDOS.....	25
1.1.3 MUESTREO DE LOS ÁRIDOS	26
1.1.4 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.....	26
1.2 CEMENTO.....	34
1.2.1 GENERALIDADES.....	34
1.2.2 TIPOS DE CEMENTO	34
1.3 VIDRIO.....	35
1.3.1 GENERALIDADES.....	35
1.3.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL VIDRIO.....	36
1.4 HORMIGÓN	36
1.4.1 GENERALIDADES.....	36
1.4.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS.....	36
2 CAPÍTULO 2: MATERIALES Y METODOLOGÍA	42
2.1 MATERIALES	42
2.1.1 AGREGADOS	42
2.1.2 CEMENTO.....	42
2.1.3 VIDRIO MOLIDO	42
2.1.4 AGUA	43
2.2 METODOLOGÍA.....	43
2.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS.....	44
2.2.2 DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN PATRÓN	47



2.2.1	ENSAYO DE ESPECÍMENES.....	55
2.2.2	ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD	58
3	CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS	59
3.1	CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL.....	59
3.1.1	AGREGADO GRUESO	59
3.1.2	AGREGADO RECICLADO	60
3.1.3	DEGRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO	63
3.2	DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN	63
3.2.1	DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN.....	63
3.2.2	ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN.....	64
3.3	ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO	65
3.3.1	RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN.....	66
3.3.2	RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA DE CILINDROS DE HORMIGÓN	70
3.1	ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL HORMIGÓN MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS	75
3.1.1	ANÁLISIS MEDIANTE EL ENSAYO DE ULTRASONIDO	75
3.2	ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD	77
3.2.1	GREENROADS V2 ONLINE	77
3.2.2	LEED V4 CHECKLIST	81
3.2.3	PALATE V2.2	82
3.3	PORCENTAJES ÓPTIMOS.....	86
3.3.1	PORCENTAJE ÓPTIMO EN TÉRMINOS FÍSICO – MECÁNICO	86
3.3.2	PORCENTAJE ÓPTIMO EN TÉRMINOS DE SOSTENIBILIDAD.....	87
4	CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	89
4.1	CONCLUSIONES.....	89
4.1.1	CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	89
4.1.1	DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS PARA LOS HORMIGONES	90
4.1.2	ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO	91
4.1.3	ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD	92
4.1.4	PORCENTAJES ÓPTIMOS DE VIDRIO MOLIDO.....	93
4.2	RECOMENDACIONES.....	94
5	CAPITULO 5: BIBLIOGRAFÍA.....	96



6 CAPITULO 7: ANEXOS..... 99



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Clasificación de los áridos según su tamaño (Niño Hernández, 2010).....	25
Tabla 2: Serie de tamices normalizados (NTE INEN 154, 1987).	27
Tabla 3: Requisitos de gradación del árido fino (NTE INEN 872, 2011).	27
Tabla 4: Requisitos de gradación del árido grueso (Adaptado de NTE INEN 872, 2011). .	29
Tabla 5: Tipos de Cemento Portland (NTE INEN 152, 2012).	35
Tabla 7: Requisitos de resistencia para el hormigón (NTE INEN 2551.2011).	37
Tabla 8: Categorías de evaluación Greenroads (Tapia, 2018).	40
Tabla 9: Niveles de certificación Greenroads v2 (Greenroads,2018).	40
Tabla 10: Niveles de certificación LEED v4 (Leed, 2019).	41
Tabla 10: Serie de tamices utilizados en el análisis granulométrico	44
Tabla 11: Valores de relación agua/cemento (Materiales para ingeniería civil, 2009).....	48
Tabla 12: Volumen de árido grueso según TMN y módulo de finura del árido fino (Materiales para ingeniería, 2009).	48
Tabla 13: Porcentaje de aire contenido según TMN del árido grueso (Materiales para ingeniería, 2009).	49
Tabla 14: Cantidad de agua aproximada en función de TMN y asentamiento (Materiales para ingeniería civil, 2009).	49
Tabla 15: Reducción del contenido de agua según la forma del árido grueso (Materiales para ingeniería civil, 2009).	50
Tabla 16: Consistencia del hormigón en base al asentamiento (UNE-EN 12350-2).....	52
Tabla 17: Etiquetado y contenido de probetas de hormigón.	55
Tabla 18: Condición del hormigón según en base a la velocidad de onda (Leslie Cheesman, 1949).	58
Tabla 19: Resultados de absorción, densidad relativa y masa unitaria para el árido grueso.	62
Tabla 20: Resultados de absorción y densidad relativa para el árido fino.	62
Tabla 21: Resultados de absorción y densidad relativa para el vidrio molido.	63
Tabla 22: Porcentaje de abrasión del árido grueso.	63
Tabla 23: Peso y porcentaje de los materiales para 1m ³ de hormigón.	64
Tabla 24: Volumen inicial para la elaboración de 9 probetas.....	64
Tabla 25: Dosificación para la elaboración del hormigón patrón.	64
Tabla 26: Dosificación para mezcla con 10% de árido fino reciclado.	65
Tabla 27: Dosificación para mezcla con 15% de árido fino reciclado.	65
Tabla 28: Dosificación para mezcla con 20% de árido fino reciclado.	65
Tabla 29: Dosificación para mezcla con 25% de árido fino reciclado.	65
Tabla 30: Resistencias de las 3 muestras para 14 días compresión HP.	67
Tabla 31: Valores de resistencia a compresión de las mezclas a distintos días de curado.	68
Tabla 32: Valores de resistencia a compresión de las mezclas a distintos días de curado.	69
Tabla 33: Resistencias de las 3 muestras para 7 días tracción con 25% de vidrio molido.	71



Tabla 34: Valores de resistencia a tracción indirecta de las mezclas a distintos días de curado.	72
Tabla 35: Valores de resistencia a tracción indirecta de las mezclas a distintos días de curado (Corregida).	74
Tabla 36: Resultado del ensayo de ultrasonido a muestras de compresión.	75
Tabla 37: Resultado del ensayo de ultrasonido a muestras de tracción indirecta.	76
Tabla 38: Resumen de resultados para distintas cantidades de mezcla.	86
Tabla 39: Resumen de resultados en términos de sostenibilidad.	88
Tabla 40: Distribución granulométrica del agregado grueso.	99
Tabla 41: Distribución granulométrica del agregado fino.	99
Tabla 42: Distribución granulométrica del vidrio molido.	100
Tabla 43: Densidad y absorción del agregado fino.	100
Tabla 44: Densidad, absorción y masa unitaria del agregado grueso.	101
Tabla 45: Gradación de las muestras de ensayo para abrasión (NTE INEN 860).	101
Tabla 46: Especificaciones para la carga en el ensayo de abrasión (NTE INEN 860).	101
Tabla 47: Parámetros considerados para el diseño de 1m ³ de hormigón.	102
Tabla 48: Resultados finales de todas las muestras del hormigón patrón a compresión.	103
Tabla 49: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 10% de vidrio molido a compresión.	104
Tabla 50: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 15% de vidrio molido a compresión.	105
Tabla 51: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 20% de vidrio molido a compresión.	105
Tabla 52: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 25% de vidrio molido a compresión.	106
Tabla 53: Resultados finales de todas las muestras del hormigón patrón a tracción.	107
Tabla 54: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 10% de vidrio molido a tracción.	107
Tabla 55: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 15% de vidrio molido a tracción.	108
Tabla 56: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 20% de vidrio molido a tracción.	109
Tabla 57: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 25% de vidrio molido a tracción.	109



ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Proceso de cuarteo (ASTM C702).....	26
Ilustración 2: Estados de saturación del agregado (Niño Hernández, 2010).	32
Ilustración 3: Esquema de los modelos típicos de fractura (NTE INEN 1573).	38
Ilustración 4: Trituración del agregado reciclado (fuente propia).....	43
Ilustración 5: Granulometría del material reciclado (fuente propia).....	45
Ilustración 6: Distintos tamaños de partículas del agregado reciclado después del tamizado (fuente propia).	45
Ilustración 7: Elaboración de mezclas de hormigón (fuente propia).	50
Ilustración 8: Granulometría del árido fino replicada con agregado reciclado (fuente propia).	51
Ilustración 9: Procesos del ensayo de trabajabilidad (Materiales para ingeniería civil, 2009).	52
Ilustración 10: Resultado de primera prueba con el cono de Abrams (fuente propia).	53
Ilustración 11: Vertido de la mezcla de hormigón en moldes (fuente propia).....	54
Ilustración 12: Probetas en la piscina de curado del laboratorio de la Universidad de Cuenca (fuente propia).....	55
Ilustración 13: Rotulado de probetas a compresión de hormigón patrón (fuente propia)..	55
Ilustración 14: Especímen y prensa usada en el ensayo de compresión (fuente propia)..	56
Ilustración 15: Especímenes ensayados a compresión (fuente propia).	56
Ilustración 16: Especímenes colocados en la prensa antes de iniciar el ensayo de tracción indirecta (fuente propia).	57
Ilustración 17: Especímenes ensayados a tracción indirecta (fuente propia).....	57
Ilustración 18: Ensayo de ultrasonido en especímenes (fuente propia).....	58
Ilustración 19: Especímenes antes de ser ensayados (fuente propia).	66
Ilustración 20: Muestras de una misma mezcla para un día específico de curado (fuente propia).	67
Ilustración 21: Tipos de fallas en las probetas ensayadas a Compresión (fuente propia). 70	
Ilustración 22: Ensayo de tracción indirecta (fuente propia).....	71
Ilustración 23: Planos de falla en las probetas ensayadas a tracción indirecta (fuente propia).	73
Ilustración 24: Análisis de una probeta mediante el ensayo de ultrasonido (fuente propia).	77
Ilustración 25: Checklist de la mezcla patrón en Greenroads (Greenroads, 2020).	78
Ilustración 26: Checklist de la mezcla con un 10% de agregado reciclado en Greenroads (Greenroads, 2020).....	79
Ilustración 27: Checklist de la mezcla con un 15% de agregado reciclado en Greenroads (Greenroads, 2020).....	79
Ilustración 28: Checklist de la mezcla con un 20% de agregado reciclado en Greenroads (Greenroads, 2020).....	80
Ilustración 29: Checklist de la mezcla con un 25% de agregado reciclado en Greenroads (Greenroads, 2020).	80
Ilustración 30: Project Checklist para una certificación LEED de la mezcla de hormigón patrón.	82



Ilustración 31: Project Checklist para una certificación LEED de la mezcla de hormigón con un porcentaje de vidrio molido como agregado fino..... 82

Ilustración 32: Entrada de datos de la mezcla del hormigón patrón en PaLate V2.2..... 82

Ilustración 33: Resultados en PaLate V2.2 de la mezcla de hormigón patrón. 83

Ilustración 34: Entrada de datos de la mezcla con 10% de vidrio molido en PaLate V2.2.83

Ilustración 35: Resultados en PaLate V2.2 de la mezcla con 10% de vidrio molido. 83

Ilustración 36: Entrada de datos de la mezcla con 15% de vidrio molido en PaLate V2.2.84

Ilustración 37: Resultados en PaLate V2.2 de la mezcla con 15% de vidrio molido. 84

Ilustración 38: Entrada de datos de la mezcla con 20% de vidrio molido en PaLate V2.2.84

Ilustración 39: Resultados en PaLate V2.2 de la mezcla con 20% de vidrio molido. 85

Ilustración 40: Entrada de datos de la mezcla con 25% de vidrio molido en PaLate V2.2.85

Ilustración 41: Resultados en PaLate V2.2 de la mezcla con 25% de vidrio molido. 85

Ilustración 42: Elementos de hormigón de distintas mezclas ensayados a los 7 días para compresión. 110

Ilustración 43: Elementos de hormigón de distintas mezclas ensayados a los 14 días para compresión. 111

Ilustración 44: Elementos de hormigón de distintas mezclas ensayados a los 28 días para compresión. 112

Ilustración 45: Elementos de hormigón de distintas mezclas ensayados a los 7 días para tracción..... 113

Ilustración 46: Elementos de hormigón de distintas mezclas ensayados a los 14 días para tracción..... 114

Ilustración 47: Elementos de hormigón de distintas mezclas ensayados a los 28 días para tracción..... 115



ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1: Curva granulométrica del árido grueso – Ripio.	59
Gráfica 2: Curva granulométrica del agregado fino – Arena.	60
Gráfica 3: Curva granulométrica del vidrio molido.	61
Gráfica 4: Comparación de curvas granulométricas entre el árido fino y el árido reciclado.	61
Gráfica 5: Resistencia a compresión de las probetas de hormigón.	68
Gráfica 6: Resistencia a compresión con una extrapolación a los 56 días de curado.	69
Gráfica 7: Resistencia a tracción indirecta de las probetas de hormigón.	72
Gráfica 8: Resistencia a tracción indirecta de las probetas de hormigón (Corregida).	74
Gráfica 9: Ensayo de ultrasonido a muestras de compresión.	75
Gráfica 10: Ensayo de ultrasonido a muestras de tracción indirecta.	76
Gráfica 11: Porcentaje óptimo en términos de resistencia a compresión y porcentaje de vidrio.	87



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1	30
Ecuación 2	30
Ecuación 3	30
Ecuación 4	30
Ecuación 5	30
Ecuación 6	30
Ecuación 7	31
Ecuación 8	31
Ecuación 9	31
Ecuación 10	31
Ecuación 11	31
Ecuación 12	31
Ecuación 13	32
Ecuación 14	32
Ecuación 15	33
Ecuación 16	33
Ecuación 17	34
Ecuación 18	37
Ecuación 19	38



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Yo, Christian Fabián Auquilla Rodríguez en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Diseños alternativos sostenibles para el hormigón hidráulico con la utilización de vidrio molido como parte de agregado fino", 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, 29 de marzo de 2021

Christian Fabián Auquilla Rodríguez

C.I: 0105947352



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Daniel Enrique Peláez Oñate en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "**Diseños alternativos sostenibles para el hormigón hidráulico con la utilización de vidrio molido como parte de agregado fino**", 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, 29 de marzo de 2021

Daniel Enrique Peláez Oñate

C.I: 0302016779



Cláusula de Propiedad Intelectual

Yo, Christian Fabián Auquilla Rodríguez, autor/a del trabajo de titulación "Diseños alternativos sostenibles para el hormigón hidráulico con la utilización de vidrio molido como parte de agregado fino", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 29 de marzo de 2021

Christian Fabián Auquilla Rodríguez

C.I: 0105947352



Cláusula de Propiedad Intelectual

Daniel Enrique Peláez Oñate, autor/a del trabajo de titulación “**Diseños alternativos sostenibles para el hormigón hidráulico con la utilización de vidrio molido como parte de agregado fino**” certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 29 de marzo de 2021

Daniel Enrique Peláez Oñate

C.I: 0302016779



DEDICATORIA

Al universo por permitirme gozar de las maravillas de la vida y que con cada cosa mala que pasa me deja una enseñanza para así trascender.

A mi familia y en especial a mis padres José y Lucía, que con todo el esfuerzo que han hecho, el amor y el apoyo que me han otorgado, me motivaron para seguir adelante hasta cumplir las metas propuestas.

A mis hermanos Esteban, Juan y Samantha por brindarme siempre su amor, confianza, enseñanzas y alentarme siempre a seguir adelante.

A mis abuelitos, en especial a mi abuelito Enrique, que me hacía sentir siempre ese orgullo tan especial que tenía hacia mí y me motivaba a seguir adelante hasta el momento de su partida, siempre permanecerá en mi corazón.

A mis amigos, los que he ido haciendo en el transcurso de mi vida universitaria, que gracias a ellos se hacía más llevadera y alegre esta etapa.

A mi novia Yesenia que siempre me alentó a seguir adelante y estuvo conmigo ante cualquier circunstancia.

Daniel Peláez Oñate

A mis padres por todo el apoyo brindado en mi vida diaria, por su amor y cariño incondicional, además de su paciencia y esfuerzo, que me ha permitido alcanzar esta meta y cumplir lo que es un sueño para mí, y para ellos. A mi hermana por el amor y la confianza brindada cada día, a mi sobrino por ser una motivación para lograr esta meta, y a todas las personas que me supieron apoyar a lo largo de este camino, ya que si el apoyo de cada uno, hubiera sido imposible alcanzar esto.

A toda mi familia, que siempre me supieron dar palabras de aliento para continuar hasta el fin y apoyarme cuando más lo he necesitado y a pesar de los momentos difíciles.

A mis abuelitos, que desde cualquier parte siempre serán mi motivación y fuerza para lograr mis metas, y que siempre quedarán sus enseñanzas y amor.

Christian Auquilla Rodríguez



AGRADECIMIENTOS

A mis padres ya que sin ellos no hubiera sido posible llegar a donde estoy ahora, ni ser la persona que soy ahora, que supieron sortear cualquier circunstancia con tal de verme triunfar.

A mis hermanos que son pilar fundamental en mi vida para cumplir las metas que se vienen y que sin ellos mi vida sería muy diferente.

A mi abuelito que siempre supo sacarme una sonrisa y a ser una persona de bien.

A todos los docentes de la facultad de Ingeniería que con sus enseñanzas tanto de la carrera como de la vida me han enseñado mucho

Al Ingeniero Daniel Mogrovejo por acompañarnos y ayudarnos en el transcurso de este trabajo de titulación.

A toda mi familia por alentarme y enseñarme a no rendirse, a seguir adelante con mi vida, siendo un mejor ser humano empático, solidario y amoroso, que todo lo que das te será devuelto.

A mi novia por ser mi apoyo incondicional y que gracias a ella he aprendido muchas cosas buenas y he corregido algunas falencias de mi persona.

Daniel Peláez Oñate

A Dios por guiarme en mi vida y permitirme llegar a concluir con esta meta.

A mis padres por ser el principal apoyo en mi vida, y haberme educado para llegar al lugar donde estoy ahora.

A mis compañeros y amigos por la confianza y el apoyo brindado en el transcurso de toda la carrera universitaria.

Al Ingeniero Daniel Mogrovejo por ser nuestro guía durante el desarrollo de este trabajo y por todo el tiempo y esfuerzo brindado.

Y a la Universidad de Cuenca, que junto con todos sus docentes y autoridades nos han permitido concluir con esta importante etapa en nuestra vida.

Christian Auquilla Rodríguez



INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

El vidrio es un material muy usado en distintas ramas de la ingeniería, como por ejemplo en la elaboración de carreteras en donde el vidrio es usado en sustitución del agregado fino; como material de base o sub-base, como material constituyente de asfalto, también es utilizado en el área hidráulica como material protector para tuberías y filtros de agua, otro uso se da al momento de fabricar mampostería como baldosas, adoquines y bloques, así como también en reemplazo parcial del agregado fino en el hormigón.

La utilización de materiales alternativos reciclados como base para la elaboración de hormigones es un tema de investigación en universidades y organismos alrededor del mundo, donde el objetivo principal es disminuir la utilización de materiales no renovables en la industria de la construcción, los cuales brinden excelentes características de durabilidad y resistencia.

En el año de 1970 se podría decir que inician los estudios de la utilización del vidrio reciclado como agregado para la elaboración de hormigones, pero se encontraron con un problema la reacción ASR (álcali – sílice), esta provoca grietas superficiales en el hormigón debido a que la reacción entre el sílice amorfo presente en el vidrio con la pasta alcalina de cemento genera expansión, este problema era muy difícil de superar en aquellos tiempos pero actualmente gracias a estudios y técnicas en la ingeniería de materiales es posible controlar dicha reacción.

En las islas Galápagos conocidas mundialmente por su extraordinario ecosistema tratando de minimizar el impacto ambiental con la ayuda de la World Wildlife Fund (WWF) en la isla Santa Cruz (Castillo, 2010), en el año 2013, se activa una consultoría para estudiar la factibilidad de usar vidrio reciclado de isla como material de construcción “Comercialización de Vidrio Molido a Base de Vidrio Reciclado para Aplicaciones Secundarias”. Se investigaron muestras de adoquines, cilindros y bloques de hormigón con diferentes porcentajes de vidrio, en donde los mejores resultados se obtuvieron para el 25% de vidrio, obteniéndose similares o mejores resultados en cuanto a resistencia de los especímenes.

Una tesis realizada en la Universidad Politécnica Nacional llamada “Obtención de adoquines fabricados con vidrio reciclado como agregado” (Hidalgo & Calderón, 2013), en esta se elaboraron muestras con vidrio que van desde 5%, 15%, 25% y 35%, donde los resultados obtenidos son buenos en cuanto a la resistencia y desgaste del adoquín, también cumplen con la resistencia a compresión según la norma INEN 1488 los adoquines elaborados con un 15% y 20% de vidrio.

De las investigaciones realizadas internacionalmente destaca la Universidad Austral de Chile donde se realizó una tesis (Catalan, 2015), sobre la influencia del vidrio en hormigones que diferentes grados de resistencia, donde se demuestra que las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido no se ven alteradas al



reemplazar parcialmente vidrio molido por árido fino, incluso se presenta un incremento en la resistencia en la muestra con 10% de vidrio molido reemplazado por arena.

Otra de las investigaciones internacionales destacadas fue realizada en la Universidad de Michigan en los Estados Unidos donde se analizó la calidad del hormigón en cuanto a su resistencia mecánica, resistencia ante la presencia de agua y durabilidad cuando se adicionaba vidrio molido de un tamaño promedio de 13 μ m y siguiendo las normas ASTM (Nassar & Soroushian, 2011). Se emplearon porcentajes de vidrio molido que van del 15% al 23% obteniéndose resultados positivos ya que demuestran que la adición del vidrio mejora la resistencia dando mayor ductilidad, mejora la absorción de humedad y los especímenes con un 20% de vidrio molido presentan mejor resistencia a largo plazo (Soroushian, 2016).

Desde algún tiempo atrás hasta ahora, se vienen realizando algunos estudios para señalar el uso de materiales alternativos como materias primas en el sector de la construcción y para reducir el impacto ambiental de la industria del hormigón, especialmente mediante el uso de materiales reciclados. Los métodos utilizados para preparar diferentes niveles de hormigón utilizan principalmente cenizas volantes, escoria de alto horno de fundiciones de acero, residuos de vidrio, neumáticos, plásticos en general y hormigón demolido. El desafío es encontrar materiales complementarios que hayan terminado su vida útil, o encontrar subproductos de otros procesos industriales y utilizarlos para reemplazar recursos naturales o elementos del proceso de fabricación que perjudicarán el medio ambiente (Castañeda & Raúl, 2013).

Desde 1998 al 2010, el uso de áridos en Ecuador aumentó en un 315%. Solo en el Azuay se utilizaron 75,688,268 metros cúbicos de materiales de construcción en los últimos diez años, de los cuales la tasa de crecimiento anual de materiales de construcción fue de 41,43% en el 2014 (ARCOM, 2015).

Como un principal problema ambiental tenemos a la demolición de estructuras de hormigón, ya que constituyen una gran cantidad de sólidos que se acumulan en los vertederos. En la ciudad de Cuenca, la Empresa Municipal de Limpieza (EMAC-EP) encontró un número insuficiente de sitios aptos para disposición de residuos de construcción, lo que motivó la instalación de botaderos temporales para reducir los desalojos incontrolados en ríos y arroyos. El material vertido es de 25.000 metros cúbicos (EMAC-EP, 2014), lo que debe fomentar la creación de proyectos de reutilización y reciclaje.

La industria de la construcción crece de una manera acelerada a causa del crecimiento continuo de la población mundial, favoreciendo el un rápido deterioro ambiental; ya que esta industria significa un 50% de los recursos naturales que son explotados, un 40% de la energía utilizada, por lo que es la causante de un 50% de los residuos sólidos producidos a nivel mundial (Cabello, 2007). El hormigón es por mucho el material más usado en todo el mundo para la construcción y se estima que se elaboran cerca de 32 millones de toneladas anualmente (Mikulčić, Vujanović, & Duić, 2013). Después de todo el proceso que significa la elaboración



del hormigón como, la extracción de la materia prima, el transporte, la fabricación, el embalaje, el procesado de materia prima, etc., la fabricación del hormigón representa una acción depredadora para el medio ambiente por la alta demanda de energía que se usa, además de la extracción de recursos no renovables y generación de desperdicios que son devueltos al ecosistema en forma de residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Se determinó que el uso del hormigón en la construcción es responsable del 30% de gases de efecto invernadero emitidos a la atmósfera (Mikulčić et al., 2013).

Debido a que el hormigón común contiene cerca de 12% de cemento y 80% de agregado, se puede decir que, para hacer hormigón, la grava, la arena y la roca triturada, son el componente principal e intervienen directamente en el costo final de la mezcla, así como en sus propiedades (Chan Yam, Solís Carcaño, & Moreno, 2003). También se debe mencionar que las actividades de extracción y transporte de los áridos generan grandes cantidades de energía, lo que podría afectar categóricamente a los lechos de ríos y a las áreas forestadas.

Como el cemento constituye una pequeña fracción dentro del hormigón, aunque represente más del 60% del costo total, en su fabricación se genera una gran cantidad de residuos contaminantes; por lo que, al año, la industria del cemento emite más de mil millones de toneladas de CO₂ 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% (Instituto Ecuatoriano de la Construcción, 2016).

En los últimos datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), nos muestran que el 80.86% de los cimientos de las edificaciones fueron proyectados a ser construidos con hormigón, el 93.77% de las estructuras son de hormigón y que el 56.05% de las cubiertas armadas contienen hormigón. Con lo que podemos corroborar que, también en el Ecuador como en otras partes del mundo, el material más usado en las construcciones es el hormigón, así que tomando en cuenta el problema ambiental que esta industria genera, entonces, existe la necesidad de brindar soluciones y métodos alternativos para las industrias locales, pero en Cuenca hay muy pocas investigaciones sobre la viabilidad económica, ambiental y técnica del uso de residuos locales.

ORIGEN DE LA INVESTIGACIÓN

Como disciplina de la ciencia, la ingeniería de materiales de construcción es una asignatura que cambia cada día que pasa, buscando constantemente mejores alternativas para resolver las diferentes necesidades del mercado. Esperamos que estas estructuras sean lo más duraderas posible, para asegurar una determinada vida útil, y para asegurar el mejor desempeño de los materiales utilizados, pero no ignoramos la rentabilidad del proyecto, todo lo cual se lleva a cabo en el entorno donde operamos como sociedad. En este contexto, nació este proyecto de investigación, que consta de los aspectos antes mencionados: innovación



tecnológica, especialmente innovación en materiales de ingeniería; reducción de costos relacionados y protección del medio ambiente.

Debido a sus buenas propiedades, el hormigón es, con mucho, el material más utilizado en la construcción. Si el diseño y la producción son razonables, el hormigón tiene excelentes propiedades mecánicas y puede resistir diversos efectos, impactos, incendios, entornos agresivos, etc.

Se estima que el mundo produce alrededor de 10 mil millones de toneladas de este material al año, que además de emitir gases de efecto invernadero implica el uso de recursos naturales no renovables y una enorme demanda de energía. Por ejemplo, producir una tonelada de cemento Portland liberará aproximadamente una tonelada de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera. A nivel mundial, la industria del cemento aporta el 7% del dióxido de carbono producido (Estudio de la influencia del vidrio molido en hormigones de grado H15, H20 y H30).

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En toda ciudad del país existe una gran cantidad de desperdicios desechados por la población, estos se dividen en los reciclables (cartón, vidrio, papel, plástico) y los no reciclables (restos de comida, desechos de hospitales, desechos de industrias). El mercado del vidrio (reciclable) ha ido creciendo significativamente en los últimos años, O-I CRIDESA, es la principal industria proveedora de vidrio en el país, fabrica el 95% de la producción total del Ecuador, el 5% restante corresponde a empresas artesanales y pequeñas fábricas (Morán, Clavijo y Orrala, 2009). De los envases producidos con vidrio que se distribuyen en el país, un promedio de 21,247.57 toneladas de estos se reciclan, esto demuestra la cantidad de material que se desecha y puede ser aprovechado para el uso en la construcción, como este proyecto demuestra.

Existen proyectos similares realizados con anterioridad sobre la utilización de agregados reciclables para la fabricación de distintos tipos de mampostería, pavimentos y otros usos en obras civiles, el presente proyecto pretende agregar información técnica y de sostenibilidad, aportando nuevos datos al conjunto de investigaciones ya realizadas en el país y si es posible aportar de igual forma a investigaciones alrededor del mundo.

JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Como material reciclado, el vidrio tiene muchas aplicaciones en el campo de la decoración y la construcción, se pueden utilizar toneladas de botellas para reducir los desechos, reducir los costos de construcción y proteger el medio ambiente.

En la actualidad, uno de los mayores problemas y preocupaciones del mundo es la gran consideración por el medio ambiente. Se está popularizando el reciclaje de materiales que se pueden utilizar en diversos procedimientos, lo que reduce la contaminación y crea nuevos productos con menos gasto de materias primas,



donde el reciclaje de vidrio se vuelve vital para esta labor, minimizando la utilización de recursos no renovables y creando nuevas fuentes energéticas y económicas.

Sin embargo, el hecho de que las botellas de vidrio no hayan sido recicladas no significa que estas causarán daños irreversibles a la tierra, ya que, es la falta de material reciclado al momento de elaborar vidrio nuevo lo causará el mayor daño al medio ambiente, porque si no hay material reciclado en el proceso de fabricación del vidrio, se deben utilizar más materias primas, por lo que se necesita más energía para fundirlas.

Actualmente el hormigón se elabora a partir de árido grueso, árido fino, cemento y agua, por lo que es necesario la extracción de grandes cantidades de arena para cubrir el mercado, lo que daña de manera irremediable al medio ambiente. Es por esto, que se plantea una alternativa sostenible como la utilización de vidrio molido en reemplazo parcial del árido fino, esto debido a que el vidrio es reutilizable y no pierde sus propiedades, por lo que el hormigón con la utilización de vidrio no perderá ninguna de sus propiedades tanto físicas como mecánicas.

OBJETIVO GENERAL

- Analizar la factibilidad y sostenibilidad de los hormigones hidráulicos propuestos con el uso de vidrio como agregado reciclado en función de compresión y tracción indirecta de un hormigón dosificado según las normas establecidas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterización de los agregados tanto de los naturales como de los reciclados, donde se realizará los ensayos de granulometría, absorción, abrasión y densidades.
- Diseño del hormigón patrón y de los hormigones propuestos, donde se diseñará los hormigones variando los porcentajes de vidrio para el hormigón propuesto.
- Análisis de la factibilidad del agregado reciclado como alternativa en términos de compresión y tracción indirecta.
- Análisis de la sostenibilidad del agregado reciclado como alternativa en función de las certificaciones otorgadas por herramientas computacionales.
- Definición de los porcentajes óptimos de vidrio en términos físico-mecánicos y de sostenibilidad.

HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

La adición de vidrio proporcionará una mejora o mantendrá las propiedades mecánicas del hormigón con fines estructurales, en relación con el hormigón tradicional, cumpliendo con los requerimientos según la norma INEN con referencia a la norma internacional ASTM.



La adición de vidrio ayudará en la reducción de emisiones de gases de invernadero y otros factores que toman en cuenta las herramientas calificadoras y calculadoras, esto gracias a que se utiliza una cantidad menor de áridos naturales en la fabricación de hormigones mejorando su sostenibilidad.



1 CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1 ÁRIDOS

1.1.1 GENERALIDADES

Los áridos o agregados en el campo de la Ingeniería Civil hacen referencia a una masa rocosa molida, grava o arena; los cuales son de gran importancia al ser parte de la composición del hormigón ocupando aproximadamente entre el 60% al 75% de su volumen (Kosmatka et al., 2004). Ya que ocupan un gran porcentaje de total de la mezcla de hormigón estos influyen directamente en el precio y las características físicas del mismo, escogiendo los áridos correctos se pueden realizar mezclas de hormigón mucho más eficientes y acorde a las exigencias del o los usuarios.

1.1.2 TIPOS DE ÁRIDOS

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 mortero o concreto
19,1 - 50,8 #4 - 3/4"	Grava		Material apto para mortero o concreto
50,8 - 152,4 2" - 6"	Piedra		Material apto para mortero o concreto
> 152,4 6"	Rajón, Piedra bola		Concreto ciclópeo

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

Es importante estudiar las propiedades y características de los áridos para así usarlos según como lo requiera la obra civil que se esté realizando. Los áridos se pueden clasificar según su proveniencia (naturales o reciclados), forma, tamaño y densidad. De las formas más comunes para clasificar a los mismos es por medio del tamaño; se conoce como árido grueso a todas las partículas cuyo tamaño es superior a 4.76mm o todas las partículas retenidas sobre el Tamiz #4 y como árido fino a todas las partículas con tamaño inferior a 4.76mm o todas las partículas que atraviesan el Tamiz #4.

1.1.3 MUESTREO DE LOS ÁRIDOS

La muestra de los áridos a ser utilizados debe ser representativa con respecto a la fuente del mismo con el fin de obtener las mejores propiedades tanto físicas, mecánicas y químicas en los ensayos de laboratorio a realizarse posteriormente, esto ya que comúnmente se da segregación en los materiales de mayor tamaño al momento de trasladarlos y depositarlos, por esto, se debe realizar el proceso del cuarteo el cual se detalla a continuación:

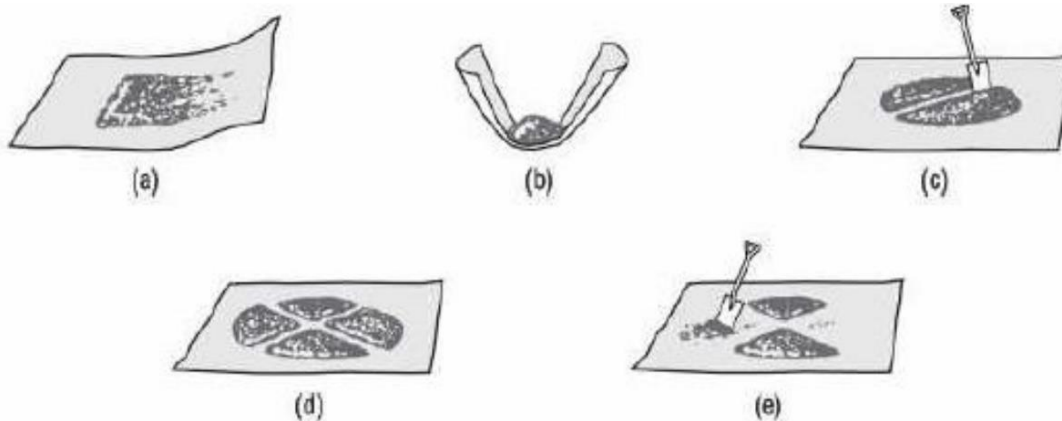


Ilustración 1: Proceso de cuarteo (ASTM C702).

- a) En un paño se mezclan las partículas haciéndolas rodar.
- b) Se forma un cono con las partículas juntando los lados del paño.
- c) Se aplanan el cono y se divide a la mitad la muestra.
- d) Se divide nuevamente la muestra para tener en cuartos.
- e) Se seleccionan dos cuartos opuestos para trabajar.

1.1.4 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

1.1.4.1 GRANULOMETRÍA

Consiste en la separación de las partículas que componen los áridos, haciéndolas pasar por una serie de tamices, la normativa que rige este proceso y en la cual se



basó esta parte del proyecto es la norma NTE INEN 696 (ASTM C136). Se toma una muestra representativa por el método antes mencionado.

En la Tabla 2 se muestra la serie de tamices normalizados según la normativa del país, estos son tanto para árido grueso como árido fino, el punto de división entre estos es el Tamiz N°4.

Tamiz N°	Abertura en [mm]
2"	50
1 1/2"	37,5
1"	25
3/4"	19
1/2"	12,5
3/8"	9,5
N°4	4,75
N°8	2,38
N°10	2
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

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

En el país se debe acatar la norma ecuatoriana NTE INEN 872, esta establece los límites granulométricos de los áridos para ser usados en la construcción. En la Tabla 3 se da a conocer los límites para el árido fino. Para el caso de los áridos gruesos Tabla 4, la tabla de límites es mucho más extensa debido a que estas deben adecuarse a las condiciones de los áridos de los diferentes partes del país.

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 μ m	25 a 60
300 μ m	10 a 30
150 μ m	2 a 10

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



Tamaño nominal (Tamices con aberturas cuadradas) [mm]	Porcentaje acumulado que debe pasar cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas)													
	100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	300 µm
de 90 a 37,5	100	90 a 100	...	25 a 60	...	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...	...
de 63 a 37,5	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...	...
de 50 a 25,0	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...	...
de 50 a 4,75	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	...	0 a 5	...	...	...
de 37,5 a 19,0	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	...	0 a 5	...	...	...	...
de 37,5 a 4,75	100	95 a 100	...	35 a 70	...	10 a 30	0 a 5	...	...	...
de 25,0 a 12,5	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...	...	...
de 25,0 a 9,5	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	...	...	...
de 25,0 a 4,75	100	95 a 100	...	25 a 60	...	0 a 10	0 a 5	...	...
de 19,0 a 9,5	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	...	...	...
de 19,0 a 4,75	100	90 a 100	...	20 a 55	0 a 10	0 a 5	...	...
de 12,5 a 4,75	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	...	...
de 9,5 a 2,36	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	...
de 9,5 a 1,18	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
de 4,75 a 1,18	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5



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

Los resultados del ensayo se presentan por medio de gráficas en escala logarítmica, en estas graficas se puede comprobar si los áridos se encuentran bien o mal gradados, si se encuentran bien gradados se puede proceder a la utilización de los mismos, por otro lado, si se encuentran mal gradados se procede a realizar la corrección respectiva.

A partir de este ensayo se determinan tres conceptos fundamentales:

- **TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO:** Se define por la abertura de la malla del tamiz más pequeño por el cual puede pasar el 100% de la muestra del agregado.
- **TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL:** Se define por la abertura del tamiz de mayor tamaño el cual retiene cierta parte de la muestra del agregado, por lo general hasta el 10% de la muestra inicial.
- **MÓDULO DE FINURA:** 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.

1.1.4.2 DENSIDAD

La densidad consiste en la división de la masa entre el volumen, ya que esta es proporcional a la porosidad de los áridos que se estén estudiando existen diferentes tipos de densidades como se las lista a continuación:

- **DENSIDAD ABSOLUTA O 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.

La porosidad cumple un papel importante en cuanto a las características de los áridos ya que de esta depende como estos se comportan mecánicamente como en pruebas de abrasión, por ejemplo, esto se debe a que no es igual el comportamiento de una partícula porosa o hueca frente al comportamiento de una maciza y sólida.

El procedimiento 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.



La densidad del árido grueso se obtiene mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

- Densidad relativa (SH):

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

Ecuación 1

- Densidad relativa (SSS):

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

Ecuación 2

- Densidad relativa aparente (SSS):

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

Ecuación 3

- Densidad con el árido grueso secado al horno:

$$\text{Densidad (SH)} = \frac{997.5 * A}{(B - C)} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Ecuación 4

- Densidad con el árido grueso en condiciones SSS:

$$\text{Densidad (SSS)} = \frac{997.5 * B}{(B - C)} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Ecuación 5

- Densidad aparente del árido grueso:

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{997.5 * A}{(A - C)} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Ecuación 6

donde:

- A = Masa de la muestra seca al horno, g.
- B = Masa de la muestra saturada superficialmente seca, g.
- C = Masa aparente en agua de la muestra saturada, g.
- SH = Seco al Horno.
- SSS = Saturado Superficialmente Seco.

Esta medida es una característica poco variable en el tiempo y en el espacio, y por lo general, en los agregados pétreos de masa normal, oscila entre 2.3 g/cm³ y 2.8g/cm³ según la roca de origen (Niño Hernández, 2010)

La densidad del árido fino se obtiene mediante el uso de las siguientes ecuaciones:



- Densidad relativa (SH):

$$D = \frac{A}{(B + S - C)}$$

Ecuación 7

- Densidad relativa (SSS):

$$D = \frac{S}{(B + S - C)}$$

Ecuación 8

- Densidad relativa aparente:

$$D = \frac{A}{(B + A - C)}$$

Ecuación 9

- Densidad con el árido fino secado al horno:

$$\text{Densidad (SH)} = \frac{997.5 * A}{(B + S - C)} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Ecuación 10

- Densidad con el árido fino en condiciones SSS:

$$\text{Densidad (SSS)} = \frac{997.5 * S}{(B + S - C)} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Ecuación 11

- Densidad aparente del árido fino:

$$\text{Densidad Aparente} = \frac{997.5 * A}{(B + A - C)} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$$

Ecuación 12

donde:

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

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

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

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

1.1.4.3 ABSORCIÓN Y HUMEDAD

La Humedad consiste en el porcentaje de agua que posee el árido, mientras que la absorción consiste en la cantidad de agua que el árido es capaz de retener en sus poros. Cuanto más poroso es un árido, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto mejor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad (Niño Hernández, 2010).

Desde el punto de vista de la porosidad y la capacidad de absorción de agua, el árido puede presentar una de las cuatro posibilidades siguientes:

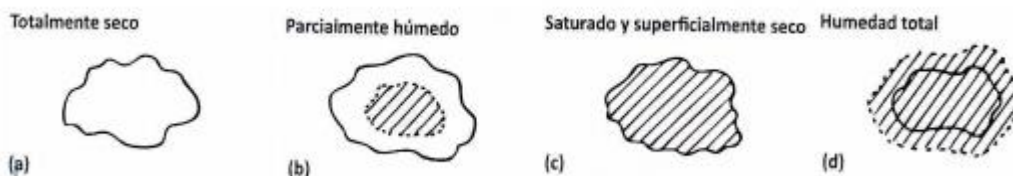


Ilustración 2: Estados de saturación del agregado (Niño Hernández, 2010).

- **TOTALMENTE SECO:** Absolutamente seco, con todos los poros vacíos, internos y superficiales.
- **PARCIALMENTE HÚMEDO:** Seco al aire o exteriormente, con parte de la masa y de los poros internos llenos.
- **SATURADO Y SUPERFICIALMENTE SECO (SSS):** Con toda la masa y los poros internos de superficies llenos, pero con la superficie seca.
- **SATURADO SUPERFICIE HÚMEDA O HUMEDAD TOTAL (SSH):** Cuando además de llenos todos sus poros, internos y superficiales y de saturada toda su masa, se acumula humedad en la superficie.

Conocer la absorción y la humedad de los áridos es de vital importancia ya que estos alteran la relación agua/cemento al momento de diseñar el hormigón. Si el árido posee una humedad mayor a la absorción se deberá retirar agua de la mezcla, por otro lado, si se tiene una absorción mayor a la humedad se deberá agregar agua a la mezcla.

La absorción del agregado grueso se determina por medio de la norma NTE INEN 857; mientras que para el agregado fino se utiliza la norma NTE INEN 856.

La humedad se determina por medio de la norma NTE INEN 862.

Las ecuaciones utilizadas son las siguientes:

- Absorción del árido grueso:

$$ABSORCIÓN. G, \% = \frac{B - A}{A} * 100$$

Ecuación 13

donde:

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

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

- Absorción del árido fino:

$$ABSORCIÓN. F, \% = \frac{S - A}{A} * 100$$

Ecuación 14



donde:

A = Masa de la muestra seca al horno, g.
S= Masa de la muestra saturada superficialmente seca, g.

- Humedad:

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

Ecuación 15

donde:

P = Contenido total de humedad evaporable de la muestra, %.
W = Masa de la muestra original, g.
D = Masa de la muestra seca, g.

1.1.4.4 MASA UNITARIA

Este ensayo se requiere para el diseño del hormigón, consiste en la capacidad de un material de acomodarse en un recipiente de volumen conocido, a esto se le conoce como masa unitaria y se la puede denominar masa unitaria suelta si es que la colocación del árido ha sido hecha por simple efecto de la gravedad o masa unitaria compactada si el árido es colocado en por capas en el recipiente y cada capa compactada con una varilla de acero, la cual está normada, la norma utilizada para la realización de este ensayo es la NTE INEN 858.

Las ecuaciones utilizadas para determinar la masa unitaria se listan a continuación:

- Masa Unitaria:

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

Ecuación 16

donde:

MU = Masa unitaria del árido, kg/m³.
G = Masa del árido más el molde, kg.
V = Volumen del molde, m³.

1.1.4.5 DUREZA O DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO

Propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del árido (Nilo Hernández, 2010). Este ensayo determina en porcentaje el desgaste del árido luego de pasar por la máquina de los ángeles con su respectiva carga abrasiva y tiempo normados, el procedimiento se detalla en la norma NTE INEN 860 (ASTM C131).

$$DESGASTE, \% = \frac{Pa - Pb}{Pa} * 100$$



donde:

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

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

1.2 CEMENTO

1.2.1 GENERALIDADES

El cemento es un material aglutinante que 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 que se denomina Cemento Portland, debido a que es el más común (Niño Hernández, 2010).

El cemento tiene la propiedad de fraguar y endurecerse ante la presencia de agua, esto se da a una reacción química que se le conoce como hidratación.

Los ensayos necesarios de rigor por los que debe pasar el cemento se encuentran en la norma NTE INEN 152, si este no cumple con ciertas demandas será rechazado y tachado como no apto para la fabricación de hormigones o morteros, ya que afectan a la calidad de los mismos.

1.2.2 TIPOS DE CEMENTO

Los cementos hidráulicos son aquellos que tienen la propiedad de fraguar y endurecer ante la presencia de agua, formando una reacción química, para formar un material con propiedades aglutinantes.

Tipo	Características	Aplicaciones
I	Para ser utilizado cuando no se requieren las propiedades especiales especificadas para cualquier otro tipo	Uso en general. Tuberías de drenaje, muros de contención, presas.
IA	Cemento tipo I con incorporador de aire	
II	Moderada resistencia a los sulfatos	
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

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

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

1.3 VIDRIO

1.3.1 GENERALIDADES

El vidrio es un material de apariencia dura, frágil y generalmente transparente, aunque se comporta como un sólido, es un fluido de muy alta viscosidad. Está compuesto por una mezcla de óxidos metálicos, siendo su componente principal el óxido de sílice, conocido como silicio (SiO_4). Si bien a simple vista pareciera ser muy similar a un cristal, la diferencia con éste radica en el ordenamiento que tienen las moléculas que lo componen, donde los enlaces Si-O están distribuidos de manera irregular, sin un patrón determinado, siendo por definición, un material amorfo.

Como ya se mencionó, el componente principal del vidrio es la sílice, obtenida a partir de arena, pedernal o cuarzo.

Desde el punto de vista estructural el vidrio está constituido por:

- Óxidos formadores de la red vítrea, *vitrificantes*, tales como SiO_2 , B_2O_3 o P_2O_5 para los tipos de productos vítreos más generales o tradicionales;
- óxidos modificadores de la red vítrea, *fundentes*, que aportan enlaces por los denominados "oxígenos no-puente", tales como óxidos alcalinos: Na_2O , K_2O , u óxidos alcalinotérreos como CaO , MgO , y
- óxidos *estabilizantes* que tienen un carácter intermedio o anfótero, aportando los denominados "oxígenos puente", tales como: Al_2O_3 , Fe_2O_3 (Cortés, 1987).

Además de estos componentes básicos los productos vítreos incorporan otros óxidos que cumplen diversas funciones secundarias: afinantes, colorantes, decolorantes, opacificantes, fluidificantes, catalizadores, o nucleantes de la cristalización.

Si bien el silicio es el principal componente de vidrio, dependiendo de la finalidad de éste, se le añaden distintas proporciones de otros componentes, el anexo B contiene una tabla con la composición de algunos vidrios comúnmente comercializados.



1.3.2 PROPIEDADES FÍSICAS DEL VIDRIO.

Dependiendo de la composición, algunos vidrios funden a temperaturas muy bajas, como 500°C, mientras que otros necesitan 1650°C, aunque por lo general, al presentar un elevado contenido de sílice, la temperatura final de fusión es más cercana a este último valor.

En cuanto a resistencia mecánica, presenta normalmente una resistencia a la tracción entre 3.000 y 5.500N/cm², aunque puede llegar a sobrepasar los 70.000 N/cm² si el vidrio ha recibido un tratamiento especial.

El vidrio es un mal conductor de calor y electricidad, por lo que resulta práctico para el aislamiento térmico y eléctrico.

1.4 HORMIGÓN

1.4.1 GENERALIDADES

La norma NTE INEN 964 define al hormigón como: “Material compuesto de partículas embebidas en una mezcla aglutinante conformada por agua y cemento hidráulico”

El hormigón tiene tres estados, el estado fresco, el estado de fraguado y el estado endurecido. La propiedad mecánica que destaca del hormigón es su resistencia a compresión, esta es la más fácil de evaluar y con la cual se puede garantizar un buen comportamiento estructural, pero no hay que olvidar que existen otras propiedades que se debe tener en cuenta para obtener en mejor resultado posible.

1.4.2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

1.4.2.1 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

1.4.2.1.1 CONSISTENCIA

Consiste en la oposición que presenta la masa de hormigón en estado fresco a experimentar deformaciones, es muy sensible a las variaciones de agua, empleo de aditivos, así como también del tamaño, forma y granulometría de los áridos empleados. El proceso para la obtención de la consistencia del hormigón consiste en rellenar el cono de Abrams en 3 capas, cada capa debe ser compactada con 25 golpes utilizando una varilla lisa, todo esto se dicta en la norma NTE INEN 1578.

1.4.2.1.2 TRABAJABILIDAD O MANEJABILIDAD

Consiste en la facilidad que se tiene con el hormigón al ser mezclado, vertido, transportado, etc., esto con el fin de garantizar una buena colocación y compactación en obra sin necesidad de modificar ninguno de sus componentes. Los factores que afectan a la trabajabilidad son: el contenido de agua, el contenido de aire, las propiedades de los agregados, relación pasta/agregado y las



condiciones climáticas. Existen aditivos que ayuda a que el hormigón sea más fluido a pesar de que se utilice menos agua para así ganar resistencia.

1.4.2.2 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

1.4.2.2.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Esta característica la da el calculista encargado del diseño del hormigón y es la más importante del hormigón, se la representa mediante las siglas f'_c y tanto en MPa como Kg/cm^2 . Se realizan ensayos de compresión simple a probetas cilíndricas en diferentes edades del hormigón para poder observar si el diseño va acorde con lo estipulado:

Tipos de Hormigón	Resistencia a compresión MPa (Kg/cm ²)		
	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)

Tabla 6: Requisitos de resistencia para el hormigón (NTE INEN 2551.2011).

Existen dos normas para la realización de probetas cilíndricas de hormigón:

- NTE INEN 1576 (ASTM C31): Para la elaboración de los especímenes.
- NTE INEN 1573 (ASTM C39): Para el ensayo a compresión simple.

El ensayo consiste en aplicar una carga axial en probetas que tengan una relación altura/diámetro igual a 2 a una velocidad de 0.25 ± 0.05 MPa/s. La resistencia o f'_c se determina mediante la siguiente ecuación:

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

Ecuación 18

donde:

f'_c = Resistencia a compresión simple en kg/cm^2 .

P = Carga máxima en kg.

A = Área de la carga axial del espécimen en cm^2 .

Una vez fallado el espécimen es necesario catalogar el tipo de rotura y como se distribuyeron los esfuerzos para para consideraciones en mezclas futuras, según la norma NTE INEN 1573 existen diferentes tipos de fallas, como podemos ver en la siguiente figura.

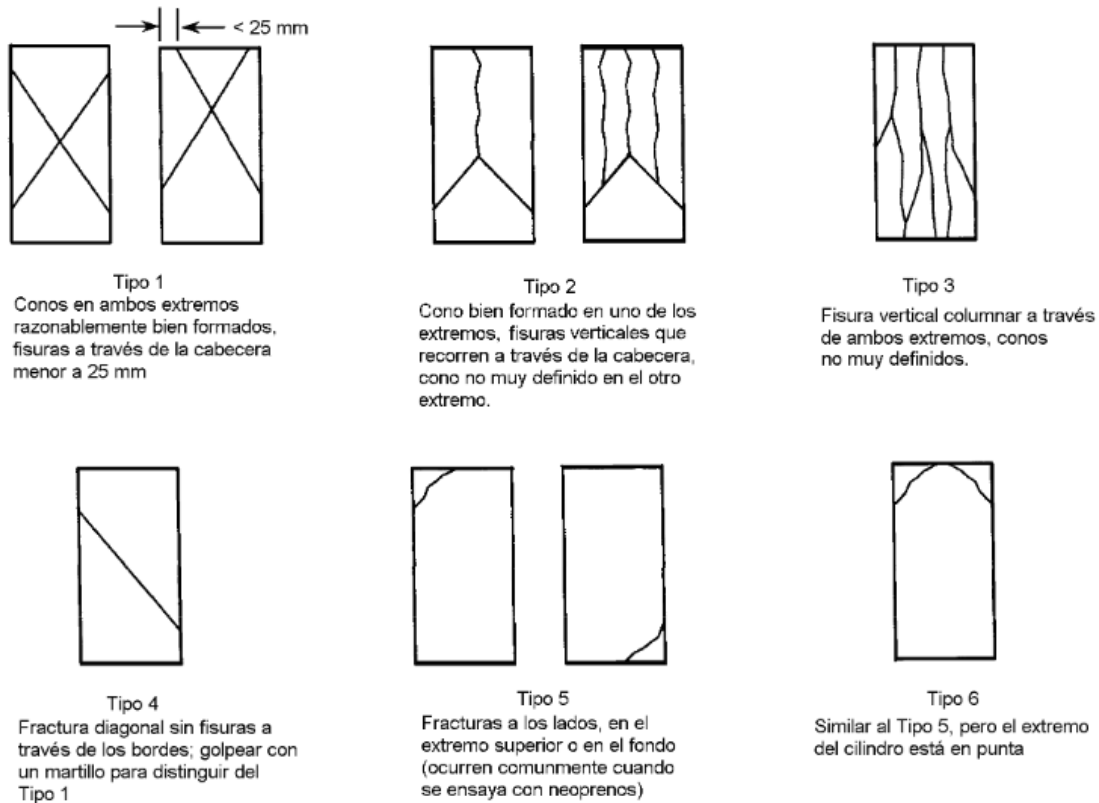


Ilustración 3: Esquema de los modelos típicos de fractura (NTE INEN 1573).

1.4.2.2 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA

Debido a la naturaleza del hormigón su estructura es débil ante esfuerzos de tracción, por lo que la resistencia a tracción no siempre es un parámetro considerado en el diseño de estructuras (Niño Hernández, 2010). Pero ya que el hormigón no es usado solo en ámbito estructural sino también en al ámbito vial, donde las estructuras están sometidas a esfuerzos indirectos, tener una buena resistencia a tracción equivale a un hormigón de buenas cualidades en adherencia y áridos. La resistencia a tracción del hormigón es mucho menor que su resistencia a compresión, en torno a un 10%, y limita, en muchos casos, el uso de este material.

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).

La resistencia a tracción indirecta se calcula usando la siguiente ecuación:

$$f'_t = \frac{2 * F}{\pi * D * L}$$

Ecuación 19



donde:

f_t = Resistencia a tracción indirecta.

F = Carga máxima.

D = Diámetro de la probeta.

L = Longitud de la probeta.

1.4.2.3 ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

1.4.2.3.1 VELOCIDAD DE PULSO MEDIANTE ULTRASONIDO COMO INDICADOR DE CALIDAD

El ensayo de pulso consiste en medir el tiempo que demora un pulso ultrasónico (rango de frecuencia varía entre 20 y 150 kHz) al recorrer la distancia definida entre un transductor emisor y un transductor receptor, ambos acoplados al hormigón en estudio.

Este ensayo nos ayuda a darnos una idea de cuan uniforme es la estructura del espécimen de hormigón, es decir si en su interior existen algún tipo de grietas o huecos que afecten en la resistencia del mismo.

1.4.2.4 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD

La explotación de materiales y el uso de energía para su extracción deben estar en un rango óptimo para evitar en lo mayor posible el impacto hacia el medio ambiente.

1.4.2.4.1 GREENROADS V2

Se la considera a esta como una herramienta calificadora que asigna una certificación, basada en una revisión de documentos de un proyecto que cumplan ciertos estándares y tecnologías alternativas y renovables (Sabnis, 2011).

Para conocer si existe un beneficio mediante el uso de agregado reciclado en la elaboración de hormigones y así obtener una certificación, se hizo uso de la herramienta computacional online Greenroads v2 Project Checklist, la cual tiene 7 categorías que se dan a conocer en la siguiente tabla:

Requerimientos del proyecto	Actividades básicas obligatorias para ser consideradas "sostenibles".
Medio ambiente y agua	Promover las mejores prácticas ambientales relacionadas con el uso de la tierra, el hábitat, el agua y otros recursos ecológicos.
Actividades de construcción	Promover las mejores prácticas ambientales, sociales y económicas para la construcción más allá del cumplimiento mínimo.
Materiales y diseño	Promover prácticas responsables para la administración de materiales a fin de reducir los costos, extender la vida útil y reducir el mantenimiento.



Utilidades y controles	Promueva las mejores prácticas para mejorar las operaciones, mejorar la movilidad, sistemas eficientes y mejorar la experiencia del usuario.
Acceso y habitabilidad	Promueva las mejores prácticas para mejorar la calidad de vida, incluida la seguridad, la salud humana, el acceso, la justicia social y la creación de lugares.
Creatividad y esfuerzo	Promover prácticas que son únicas y superan las expectativas de rendimiento.

Tabla 7: Categorías de evaluación Greenroads (Tapia, 2018).

Los niveles de certificación que ofrece Greenroads se los presenta en la siguiente tabla:

BRONCE	Requerimientos del proyecto + (40-49) puntos
PLATA	Requerimientos del proyecto + (50-59) puntos
ORO	Requerimientos del proyecto + (60-69) puntos
EVERGREEN	Requerimientos del proyecto + (80-130) puntos

Tabla 8: Niveles de certificación Greenroads v2 (Greenroads, 2018).

1.4.2.4.2 PaLATE v2.2

PaLATE es una herramienta calculadora, que permite la evaluación del ciclo de vida de pavimentos para efectos ambientales y económicos. Fue diseñado por el consorcio de diseño y fabricación verde de la universidad de California-Berkeley.

PaLATE evalúa los efectos ambientales y económicos del pavimento y la construcción de carreteras. Los usuarios ingresan los diseños iniciales, el material de construcción inicial, el material y los procesos de mantenimiento, el equipo y el costo de un proyecto. Los resultados ambientales incluyen:

- Consumo de energía (MJ).
- Consumo de agua (kg).
- Emisiones de dióxido de carbono (MJ).
- Emisiones de óxido de nitrógeno (Kg).
- Emisión de partículas -10 (Kg).
- Emisiones de dióxido de azufre (Kg).
- Emisiones de monóxido de carbono (Kg).
- Información sobre lixiviados (mercurio, plomo, desechos peligrosos generados según RCRA y potencial de toxicidad humana tanto cancerosa como no cancerosa).



1.4.2.4.3 LEED V4 CHECKLIST

Este es un sistema de certificación de proyectos que busca excelencia en energía y diseño ambiental, es desarrollada por el US Green Building Council. Entre los criterios que evalúa esta herramienta están:

- Sostenibilidad en los materiales y recursos.
- Eficiencia energética.
- Innovación en el proceso de diseño.
- Eficiencia y aprovechamiento de agua.
- Materiales y recursos respetuosos con el medio ambiente.

Acorde a la evaluación que realiza LEED se puede obtener una de los siguientes niveles de certificación:

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

Tabla 9: Niveles de certificación LEED v4 (Leed, 2019).

Entre los beneficios de esta certificación se encuentran: la reducción de residuos en los vertederos, mejor conservación de la energía y agua, edificios más saludables y seguros para los habitantes, los propietarios pueden beneficiarse de desgravaciones fiscales dependiendo de sus municipios, y el principal beneficio con esta certificación suele ser la aminoración de costes de operación los cuales rentabilizan este tipo de construcciones, por más de que en cierto casos el valor de la construcción o del inmueble pueda ser mayor a los convencionales (U.S. Green Building Council, 2018).



2 CAPÍTULO 2: MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 MATERIALES

2.1.1 AGREGADOS

Los distintos agregados son provenientes de una fuente natural, los cuales fueron obtenidos de una empresa de extracción de materiales llamada VIPESA Cía. Ltda., ubicada en el sector del Descanso Km 15 1/2, ahí se nos facilitó con los tipos de material:

- Agregado grueso triturado o Ripio.
- Agregado fino o Arena.

El almacenamiento de los áridos se lo realizó en un lugar seco y aireado.

2.1.2 CEMENTO

El cemento utilizado en este proyecto es Holcim Fuerte tipo GU, mismo que fue escogido por tratarse de un tipo de cemento cuyo uso es muy común dentro de las construcciones tradicionales a través del tiempo. El cemento Holcim Fuerte Tipo GU está diseñado para todo tipo de construcción en general, contando como principales características su resistencia, durabilidad y destacado desempeño que cumple y excede los estándares de la norma NTE INEN 2380 (Holcim, 2015).

El proceso de almacenamiento de los sacos de cemento en cuestión se realizó en un lugar seco y con ventilación de esta manera se da paso al cumplimiento de la norma NTE INEN 152.

2.1.3 VIDRIO MOLIDO

El vidrio fue obtenido de un local comercial el cual recolecta las botellas para luego ser desechadas en la basura en el sector de Santa Isabel. Para el proceso de trituración del vidrio se utilizó la máquina de los ángeles que posee el laboratorio de la facultad, esto se dio ya que no se posee maquinaria de trituración de tamaño regulable, posterior al triturado se realizó la granulometría del vidrio y se separó en recipientes diferentes las partículas de vidrio retenidas en cada tamiz, esto con la finalidad de relacionarlos de mejor manera y mejorar la maniobrabilidad de los mismos. Según (Almeida y Trujillo, 2017) para que el vidrio actúe como una puzolana se debe tomar las partículas de tamaño máximo de 150 μm que equivale a un tamaño de partícula que pase el tamiz #100.



Ilustración 4: Trituración del agregado reciclado (fuente propia).

2.1.3.1 LIMPIEZA DEL VIDRIO

Las botellas recolectadas son sometidas a un lavado con agua caliente y detergente común, con la finalidad de remover cualquier residuo acumulado producto de su uso anterior, especialmente restos orgánicos, además de remover las etiquetas correspondientes a cada envase.

El proceso es relativamente sencillo, debido a la naturaleza soluble de los adhesivos utilizados para la demarcación de las botellas, en su gran mayoría.

Luego de limpiar y enjuagar las botellas se deben secar en su totalidad para evitar problemas en el proceso de trituración, sobre todo con el material fino producido en la molida.

2.1.4 AGUA

El agua utilizada para la fabricación de las probetas de hormigón, así como también para el curado de las mismas consiste en el agua potable que cuenta la ciudad de Cuenca, esta es apta para la elaboración de hormigones según la NEC 2015.

2.2 METODOLOGÍA

Para dar cumplimiento de este proyecto se planteó una serie de pasos específicos para la obtención de resultados como son los siguientes:

1. Caracterización de los materiales naturales.
2. Caracterización del material reciclado.
3. Diseño de mezclas de hormigón patrón.
4. Diseño de mezclas de hormigón con material reciclado.
5. Elaboración de hormigón patrón y hormigón con material reciclado.
6. Ensayo de muestras a diferentes tiempos de curado.
7. Evaluación ambiental.



8. Encontrar un porcentaje óptimo de material reciclado en cuanto a factibilidad y sostenibilidad.
9. Análisis y discusión de resultados.
10. Conclusiones.

2.2.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS

Es muy importante la caracterización de los agregados naturales ya que de esto depende el diseño y elaboración de hormigón patrón, así como también del agregado reciclado para una mejor maniobrabilidad del mismo, es por eso que se realizaron los siguientes ensayos:

2.2.1.1 GRANULOMETRÍA

Para iniciar se tomó una muestra representativa de cada tipo de árido mediante el método del cuarteo ya antes mencionado, luego los árido debidamente lavados, esto con el fin de eliminar cualquier impureza:

Análisis granulométrico del árido grueso (ripió) y fino (arena) mediante el uso de los siguientes tamices:

AGREGADO GRUESO			AGREGADO FINO	
Tamiz	Abertura en milímetros		Tamiz	Abertura en milímetros
1"	25		Nº 4	4,75
3/4"	19		Nº 8	2,38
1/2"	12,5		Nº 10	2
3/8"	9,5		Nº 16	1,19
Nº 4	4,75		Nº 30	0,59
			Nº 40	0,42
			Nº 50	0,297
			Nº 100	0,149
			Nº 200	0,074

Tabla 10: Serie de tamices utilizados en el análisis granulométrico.

Para el árido grueso se pesó inicialmente 10149.9g de material, a continuación, se lo dejó secar en un horno por 24 horas a temperatura controlada, al día siguiente se procedió al tamizado haciendo uso de una de las máquinas de cribado existentes en el laboratorio de la facultad. Tamaño máximo nominal del árido grueso (TMN) es 19 mm o 3/4".

Para el árido fino se comprobó que todo el material pase el tamiz Nº4 y se preparó una muestra de 475.69 g secos y se los tamizó haciendo uso de la máquina de tamizado del laboratorio y la serie de tamices mencionados en la Tabla 10. El módulo de finura del árido fino es 3.26.

2.2.1.2 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL RECICLADO

Para el agregado reciclado primero dentro de un saco se rompió las botellas en pedazos más pequeños y manejables, haciendo uso de guantes de cuero y gafas para seguridad, a continuación, se introdujo todo el material en la máquina de los ángeles con todas las esferas de acero para mayor rapidez de trituración, después se tamizó el material con el mismo juego de tamices presentados en la Tabla 10 y se fue separando lo que retenía cada tamiz, lo que quedaba retenido en el tamiz N°4 se volvía a triturar y tamizar.



Ilustración 5: Granulometría del material reciclado (fuente propia).



Ilustración 6: Distintos tamaños de partículas del agregado reciclado después del tamizado (fuente propia).

2.2.1.3 DENSIDAD Y ABSORCIÓN

Las normas a seguir para la obtención de la densidad y absorción son la NTE INEN 857 para árido grueso y la NTE INEN 856 para árido fino.

Como se indica en la norma para el análisis del agregado grueso con tamaño máximo nominal de 19mm se toma una muestra de aproximadamente 3kg, a continuación, se deja la muestra cubierta de agua en una bandeja por 24 horas, al



siguiente día se la seca superficialmente con un trapo, toalla o franela para así tener la muestra en estado Saturada Superficialmente Seca (SSS), luego se colocó la muestra en una canastilla de malla y se tomó el peso al aire, luego se sumergió la canastilla en agua y se registró su peso (Peso aparente), por último se dejó la muestra en un horno a temperatura constante por 24h.

A continuación, el listado de ecuaciones utilizadas para el cálculo de densidad y absorción para el árido grueso:

- Ecuación 1
- Ecuación 2
- Ecuación 3
- Ecuación 4
- Ecuación 5
- Ecuación 6
- Ecuación 13
- Ecuación 15

Para el árido fino se pesó una muestra de 500g secos y utilizando el método gravimétrico se procedió a calcular las densidades. Se deja la muestra cubierta por agua en una bandeja por 24 horas y así saturarla, luego de este tiempo se seca la muestra con la ayuda de una toalla, trapo o franela para dejarla en condiciones Saturada Superficialmente Seca (SSS) lo cual se comprueba con el uso de un molde cónico y un compactador, se llenó el molde con 3 capas, cada capa compactada con 25 golpes.

Se procedió a obtener el peso del picnómetro en uso con agua a 23oC hasta la marca que este posee, luego se agregó el árido fino con cuidado y la ayuda de un embudo de papel, se agitó el embudo para liberar burbujas de aire en el interior del árido, se comprobó que el agua esté hasta la marca de calibración del picnómetro y con la temperatura antes mencionada, por último, se sacó la muestra del picnómetro y se la deja secar en un horno a temperatura constante por 24 horas.

A continuación, el listado de ecuaciones utilizadas para el cálculo de densidad y absorción para el árido fino:

- Ecuación 7
- Ecuación 8
- Ecuación 9
- Ecuación 10
- Ecuación 11
- Ecuación 12
- Ecuación 14
- Ecuación 15



2.2.1.4 DETERMINACIÓN DE LA MASA UNITARIA

En un recipiente metálico resistente a deformarse previamente pesado, se colocó el agregado grueso en 3 capas, cada capa se compactó con 25 golpes de una varilla lisa de punta redondeada, al momento de compactar la primera capa es importante no golpear el fondo del recipiente con la varilla ya que esto ocasionaría una mala compactación, en la última capa se compactó, se enrasó y se tomó el peso del recipiente con el agregado grueso. A continuación, se retiró el agregado y se llenó de agua hasta rebosar y usando una placa de vidrio se tapó observando que no existan burbujas entre el agua y la placa el recipiente, por último, se registró el peso del recipiente con agua.

Para el cálculo de la masa unitaria se usa la siguiente ecuación:

- Ecuación 16

2.2.1.5 DUREZA O DEGRADACIÓN DEL AGREGADO GRUESO

La norma que se siguió para este ensayo es la NTE INEN 860, este consiste en ensayar la degradación que tienen las partículas menores a 37.5 mm del árido grueso a usarse en la fabricación de hormigones.

Primero se define el tipo de graduación del árido según la norma y la distribución granulométrica del mismo, posteriormente, en base a la graduación la norma nos dice el número de esferas de acero y masa abrasiva a usarse para el ensayo.

Una vez definidos los parámetros anteriores se procedió a tamizar una muestra del árido grueso, luego se lavó para eliminar los finos y se dejó secar en el horno por 24 horas, pasado este tiempo se pesa la cantidad requerida por la normativa, en este caso fueron 5000g, a continuación, se introduce el material en la máquina de los ángeles con la respectiva carga abrasiva y se hizo girar 500 veces a una velocidad de 33 rev/min. Terminado este proceso se retira el material de la máquina y se lo lavó nuevamente, pero esta vez sobre el tamiz N°12 y se lo dejó a secar nuevamente por 24 horas en el horno, pasado este tiempo se pesa el material y se aplica la ecuación siguiente para hallar el porcentaje de degradación:

- Ecuación 17

2.2.2 DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN PATRÓN

Para la elaboración de la mezcla se usó el método del ACI 211.1, el cual se concibe en el principio de la relación agua/cemento. El método tiene una variabilidad dependiendo de la calidad del agregado, por lo que se usa como recomendación el



cumplimiento de la norma ASTM C33 (ASTM, 2003) para el agregado fino y grueso (ACI 211, 1991).

2.2.2.1 ELABORACIÓN DE MEZCLAS

Los agregados minerales después de ser lavados, caracterizados y considerados aptos granulométricamente para la mezcla de hormigón, se los secó en la hornilla, porque a consideración del autor se logra tener una mejor uniformidad y control del agua que se requiere en la mezcla por factores como absorción e hidratación.

Primero se estableció la relación agua/cemento como primer paso, este valor se obtuvo según la resistencia requerida a los 28 días que es de 210 kg/cm² y también se considera si el hormigón es o no aireado. El agua usada para elaboración/curado del concreto, es agua potable de la ciudad de Cuenca.

Resistencia a la compresión a los 28 días, f'c MPa (psi)	Relación agua/cemento en peso	
	Hormigón aireado	Hormigón no aireado
17 (2500)	0,67	0,54
21 (3000)	0,58	0,46
24 (3500)	0,51	0,4
28 (4000)	0,44	0,35
31 (4500)	0,38	...
35 (5000)	...	...

Tabla 11: Valores de relación agua/cemento (Materiales para ingeniería civil, 2009).

A continuación, se determinó el volumen de árido grueso contenido en una unidad de volumen tomando en cuenta su tamaño máximo nominal de 19 mm o ¾" (TMN) y el módulo de finura del árido fino igual a 3,26:

Tamaño máximo nominal del árido grueso mm (pulg).	Volumen de árido grueso apisonado en seco por unidad de volumen de hormigón			
	Módulo de finura			
	2,4	2,6	2,8	3
9,5 (3/8)	0,50	0,48	0,46	0,44
12,5 (1/2)	0,59	0,57	0,55	0,53
19 (3/4)	0,66	0,64	0,62	0,60
25 (1)	0,71	0,69	0,67	0,65
37,5 (1 1/2)	0,75	0,73	0,71	0,69
50 (2)	0,78	0,76	0,74	0,72
75 (3)	0,82	0,80	0,78	0,76
150 (6)	0,87	0,85	0,83	0,81

Tabla 12: Volumen de árido grueso según TMN y módulo de finura del árido fino (Materiales para ingeniería, 2009).



El siguiente paso es el porcentaje de vacíos contenidos en la mezcla que se definió en base al tamaño máximo nominal del árido grueso:

Características de la mezcla de diseño	Tamaño máximo nominal del árido grueso							
	9,5 mm (3/8")	12,5 mm (1/2")	19 mm (3/4")	25 mm (1")	37,5 mm (1 1/2")	50 mm (2")	75 mm (3")	150 mm (6")
Hormigón no aireado	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Hormigón aireado (**)								
Exposición pequeña	4,5	4	3	3	2,5	2	1,5	1
Exposición moderada	6	5,5	5	4,5	4,5	4	3,5	3
Exposición severa	7,5	7	6	6	5,5	5	4,5	4

Tabla 13: Porcentaje de aire contenido según TMN del árido grueso (Materiales para ingeniería, 2009).

Posteriormente, se procedió a definir los límites de asentamiento según el tipo de estructura a diseñar y obtener la cantidad de agua aproximada en kg/m³:

Asentamiento mm (pulg)	Tamaño máximo nominal del árido grueso							
	9,5 mm (3/8")	12,5 mm (1/2")	19 mm (3/4")	25 mm (1")	37,5 mm (1 1/2")	50 mm (2")	75 mm (3")	150 mm (6")
Hormigón no aireado								
25 a 50 (1 a 2)	207 (350)	199 (335)	190 (315)	179 (300)	166 (275)	154 (260)	130 (220)	113 (190)
75 a 100 (3 a 4)	228 (385)	216 (365)	205 (340)	193 (325)	181 (300)	169 (285)	145 (245)	124 (210)
150 a 175 (6 a 7)	243 (410)	228 (385)	216 (360)	202 (340)	190 (315)	178 (300)	160 (270)	...
Hormigón aireado								
25 a 50 (1 a 2)	181 (305)	175 (295)	168 (280)	160 (270)	150 (250)	142 (240)	122 (205)	107 (180)
75 a 100 (3 a 4)	202 (340)	193 (325)	184 (305)	175 (295)	165 (275)	157 (265)	133 (225)	19 (200)
150 a 175 (6 a 7)	216 (365)	205 (345)	197 (325)	184 (310)	174 (290)	166 (280)	154 (260)	...

Tabla 14: Cantidad de agua aproximada en función de TMN y asentamiento (Materiales para ingeniería civil, 2009).

Por último, se consideró una reducción en la cantidad de agua, esto en base al tipo de árido grueso que se tiene:

Forma del árido	Reducción en el contenido de agua en kg/m ³ (lb/yd ³)
Sub-angular	12 (20)

Grava con partículas trituradas	21 (35)
Grava redondeada	27 (45)

Tabla 15: Reducción del contenido de agua según la forma del árido grueso (Materiales para ingeniería civil, 2009).



Ilustración 7: Elaboración de mezclas de hormigón (fuente propia).

2.2.2.2 ELABORACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

Para este proceso se secó los áridos al horno con anterioridad, es decir se encuentran en humedad del 0%. La norma empleada para la elaboración de las probetas de hormigón tanto el patrón como el que contiene el agregado reciclado es la NTE INEN 1576 (ASTM C31). Los moldes cilíndricos e implementos utilizados para la elaboración de las probetas de hormigón cumplen con las especificaciones dictadas en la normativa.

Todas las mezclas fueron calculadas para llenar un volumen correspondiente a 9 probetas cilíndricas de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, además se tuvo en cuenta un excedente del 17% para realizar el ensayo de asentamiento.

Al material reciclado triturado se consideró que no tenía una capa superficial de finos que afecten la adherencia o absorban el agua, ni tampoco se encontraba sucio con materia orgánica, por lo que no se realizó un lavado del residuo triturado. El material se encontraba todo el tiempo fuera de contacto con factores que lo pudieran humedecer, por lo que se consideró como material seco al momento de la elaboración del hormigón.

El proceso para agregar el árido fino reciclado en cada probeta fue primero, obtener la muestra total de árido fino natural a usarse en la mezcla, luego, dependiendo del

tipo de mezcla que se iba a realizar ya sea la que contiene vidrio en un 10%, 15%, 20% o 25%, del total de árido fino natural se retiraba el porcentaje de vidrio a agregar, ese porcentaje de árido fino natural retirado se le realizó su respectiva granulometría y se replicaba esa granulometría con el árido fino reciclado.



Ilustración 8: Granulometría del árido fino replicada con agregado reciclado (fuente propia).

Para la elaboración de las muestras de hormigón con agregado reciclado y después de tener todos los elementos pesados, primeramente, se humedeció la concretera con el fin de no permitir que su pared absorba el agua útil para la hidratación del cemento, y se lo dejó escurrir por un 1 minuto para que no altere la relación agua/cemento, determinada para la mezcla.

Después, se mezcló por un minuto en la concretera todo el agregado grueso y la mitad del agua, luego se agregó todo el árido fino y se mezcló por otro minuto, posteriormente se colocó todo el material cementante y se dejó mezclar por un minuto, pasado ese tiempo se colocó el agua restante y se dejó mezclar por otro minuto, por último, se paró la concretera y se movió manualmente la mezcla con la ayuda de una cuchareta por otro minuto, a continuación, se enciende nuevamente la concretera y se deja mezclar por un último minuto para así descargar en una carretilla toda la mezcla, así poder realizar en ensayo para medir la trabajabilidad del hormigón y luego empezar el llenado de los moldes cilíndricos.

El ensayo de trabajabilidad se lo realiza empleando el cono de Abrams y una varilla lisa con las puntas redondeadas en sus extremos. Se llenó el cono de Abrams con 3 capas de la mezcla, cada capa se compactó con 25 golpes de la varilla, una vez lleno el cono se lo alzó y colocó alado de la mezcla para proceder a medir el asentamiento de la misma como se muestra en la siguiente figura:

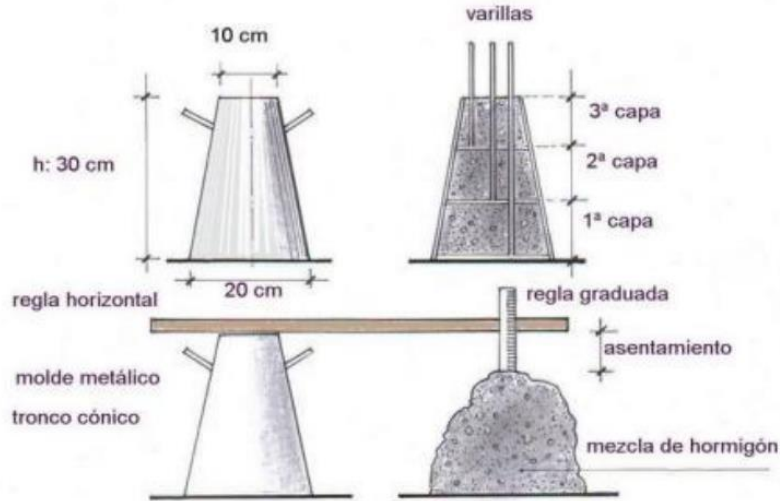


Ilustración 9: Procesos del ensayo de trabajabilidad (Materiales para ingeniería civil, 2009).

En la siguiente tabla se detalla el tipo de consistencia que puede tener la mezcla en base al resultado obtenido en el ensayo de trabajabilidad:

Consistencia de la mezcla	Asentamiento (mm)
Seca	0 a 20
Plástica	30 a 50
Blanda	60 a 90
Fluida	100 a 150
Líquida	160 a 200

Tabla 16: Consistencia del hormigón en base al asentamiento (UNE-EN 12350-2).



Ilustración 10: Resultado de primera prueba con el cono de Abrams (fuente propia).

A continuación, se procedió al vertido de la mezcla en los moldes cilíndricos, estos se los llenó con 3 capas y a cada capa se le aplica una compactación de 25 golpes, luego de este proceso, con un martillo de goma se golpea los alrededores de cada molde de 10 a 15 veces, esto con el fin de eliminar las burbujas de aire atrapadas en el interior de la mezcla.



Ilustración 11: Vertido de la mezcla de hormigón en moldes (fuente propia).

Como último paso, se cubrió las nueve probetas con dos bolsas de plástico grandes, esto para evitar la evaporación del agua existente en la mezcla de hormigón, así como también cumplir con la normativa.

Después de 24 horas se desencofraron las probetas, se las etiquetó y se las colocó en la piscina de curado que posee el laboratorio de la facultad, las etiquetas en cada probeta son para diferenciarlas entre las que pertenecen al hormigón patrón, que son las fabricadas como hormigón convencional y las que poseen árido reciclado, que son las fabricadas con reemplazo parcial del árido fino por árido reciclado. En cada fundición se elaboró 9 probetas, estas se dividen en 3 grupos, para así tener 3 probetas para ensayar a los 7 días, 3 probetas para ensayar a los 14 días y 3 probetas para ensayar a los 28 días.

El código de etiquetado, que es muy importante para llevar un correcto procesamiento de los especímenes se presenta en la siguiente tabla:

Mezcla	Contenido	Etiqueta		
M1	Hormigón patrón para compresión	7DCHP	14DCHP	28DCHP
M2	Hormigón patrón para tracción	7DTHP	14DTHP	28DTHP
M3	Hormigón 10% de vidrio para compresión	7DC10	14DC10	28DC10
M4	Hormigón 15% de vidrio para compresión	7DC15	14DC15	28DC15
M5	Hormigón 20% de vidrio para compresión	7DC20	14DC20	28DC20
M6	Hormigón 25% de vidrio para compresión	7DC25	14DC25	28DC25

M7	Hormigón 10% de vidrio para tracción	7DT10	14DT10	28DT10
M8	Hormigón 15% de vidrio para tracción	7DT15	14DT15	28DT15
M9	Hormigón 20% de vidrio para tracción	7DT20	14DT20	28DT20
M10	Hormigón 25% de vidrio para tracción	7DT25	14DC25	28DT25

Tabla 17: Etiquetado y contenido de probetas de hormigón.



Ilustración 12: Probetas en la piscina de curado del laboratorio de la Universidad de Cuenca (fuente propia).



Ilustración 13: Rotulado de probetas a compresión de hormigón patrón (fuente propia).

2.2.1 ENSAYO DE ESPECÍMENES

2.2.1.1 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Este ensayo es el más importante, se lo realiza mediante la aplicación de una carga axial sobre las caras circulares de los extremos del cilindro, la velocidad del ensayo es de 0.25 MPa/seg. La resistencia a la compresión se determinó usando la prensa del laboratorio de la facultad de ingeniería.

Para determinar la resistencia a la compresión o f'_c se utiliza la siguiente ecuación 18.



Ilustración 14: Especimen y prensa usada en el ensayo de compresión (fuente propia).



Ilustración 15: Especímenes ensayados a compresión (fuente propia).

2.2.1.2 ENSAYO DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN INDIRECTA

Para estimar la resistencia a la tracción por medio de los cilindros se propuso realizar el método de tracción indirecta.

El ensayo consiste en aplicar carga a compresión en el sentido longitudinal de la probeta cilíndrica, hasta que se produzca la falla. Para tener un mejor control de si se está aplicando la carga en la manera correcta, se dibujaron dos líneas una opuesta a la otra en la superficie del cilindro y ahí es donde se aplicó la carga. El equipo que se usó fue la misma prensa para el ensayo a compresión, a una velocidad de 0.9 MPa/min (ASTM C496, 1996).

Para determinar la resistencia a la tracción indirecta o f'_t se utiliza la ecuación 19.



Ilustración 16: Especímenes colocados en la prensa antes de iniciar el ensayo de tracción indirecta (fuente propia).



Ilustración 17: Especímenes ensayados a tracción indirecta (fuente propia).

2.2.1.3 ENSAYO DE ULTRASONIDO

Para este ensayo se utilizó el equipo proporcionado por el laboratorio de la facultad de ingeniería, este antes de ser usado se calibró con las herramientas proporcionadas por el propio aparato. El ensayo de ultrasonido se realizó a las probetas con 28 días de curado.

Primero se aplica una cierta cantidad de material de acople (gel) en la superficie lisa de los transductores y en las caras extremas de la probeta, esto con el fin de evitar que exista aire entre las superficies, a continuación, se aplica la presión

necesaria para que se dé un contacto adecuado en las superficies de la probeta y los transductores para reducir el porcentaje de error, por último, se realiza la medición.



Ilustración 18: Ensayo de ultrasonido en especímenes (fuente propia).

Para definir las condiciones de calidad del hormigón, se usó la tabla de clasificación que proponen (Leslie y Cheesman, 1949) que se muestra a continuación:

Velocidad de onda (m/s)	Condición del hormigón
Más de 4570	Excelente
De 3650 a 4570	Buena
De 3050 a 3650	Regular
De 2130 a 3050	Pobre
Menos de 2130	Muy pobre

Tabla 18: Condición del hormigón según en base a la velocidad de onda (Leslie Cheesman, 1949).

2.2.2 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD

Para evaluar esta sección del proyecto se hizo uso de herramientas calificadoras y calculadoras, las cuales mediante un proceso brindan certificaciones o niveles de calificación, estas también, son capaces de emitir datos en cuanto a contaminación por emisiones de CO₂ y huellas de carbono generadas.

- Como herramientas calificadoras se empleó: LEED y GreenRoads.
- Como herramienta calculadora se empleó: PaLATE.

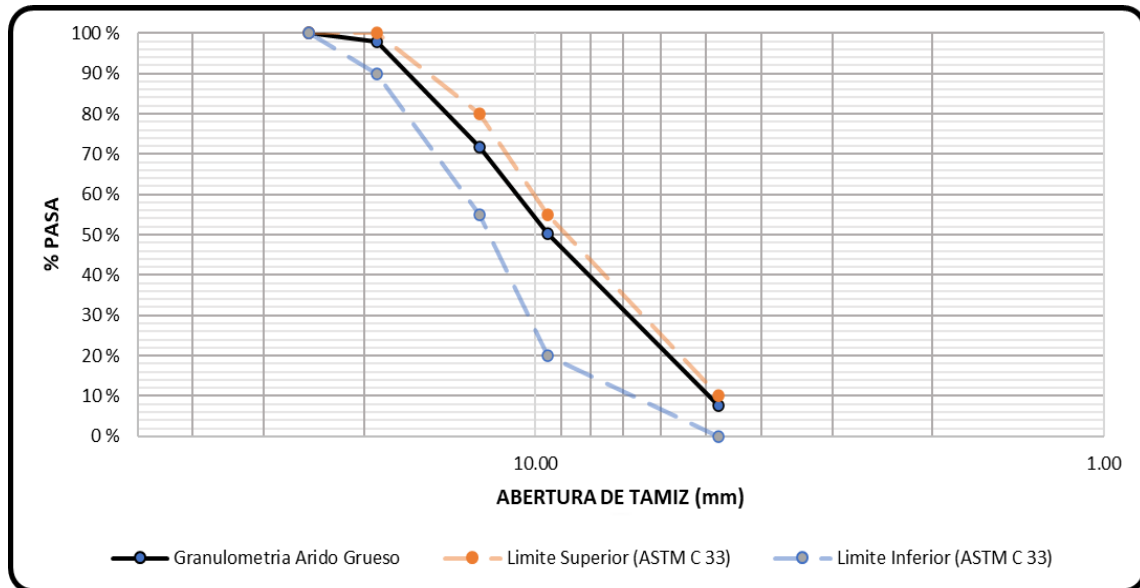
Para obtener mejores resultados de sostenibilidad en cuanto a la evaluación ambiental, se utilizó como referencia la mezcla con mayor contenido de árido reciclado.

3 CAPÍTULO 3: RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

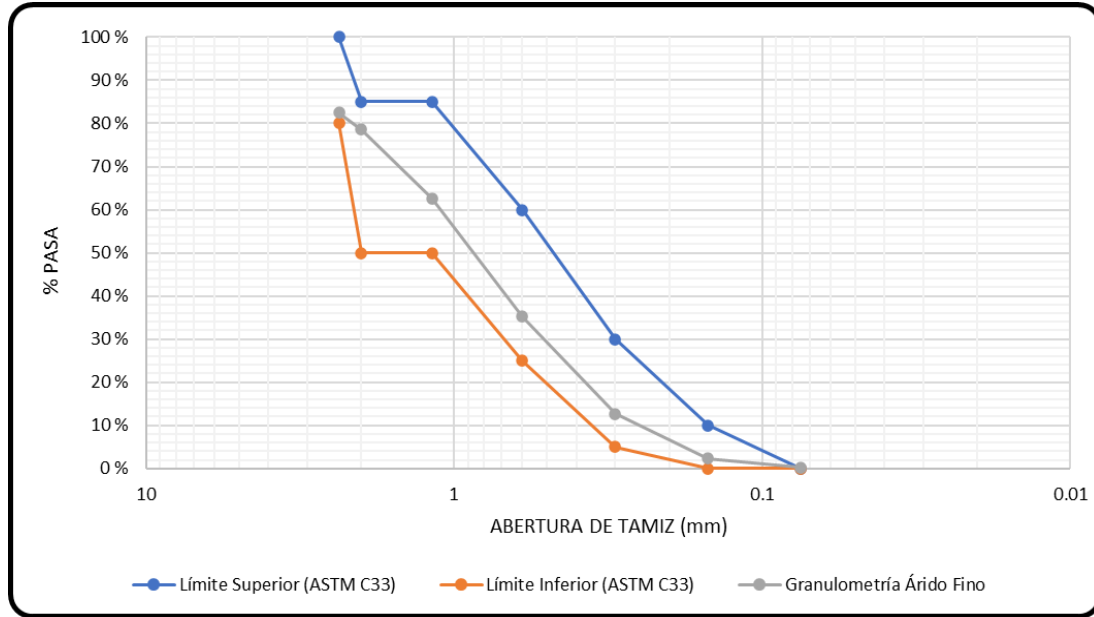
3.1.1 AGREGADO GRUESO

El análisis granulométrico que se presenta a continuación en la Gráfica 1, corresponde al agregado grueso de origen natural, conocido normalmente como ripio. Los límites son los que se deben cumplir para que el agregado sea apto para la elaboración de hormigones establecidos en la normativa ASTM C33, teniendo un tamaño máximo nominal del agregado de $\frac{3}{4}$ ".



Gráfica 1: Curva granulométrica del árido grueso – Ripio.

De la misma manera, en la siguiente figura se presenta el análisis granulométrico del agregado fino según lo establecido en la norma ASTM C33. El Módulo de Finura del agregado fino o arena es igual a 3.26 (Gráfica 2).



Gráfica 2: Curva granulométrica del agregado fino – Arena.

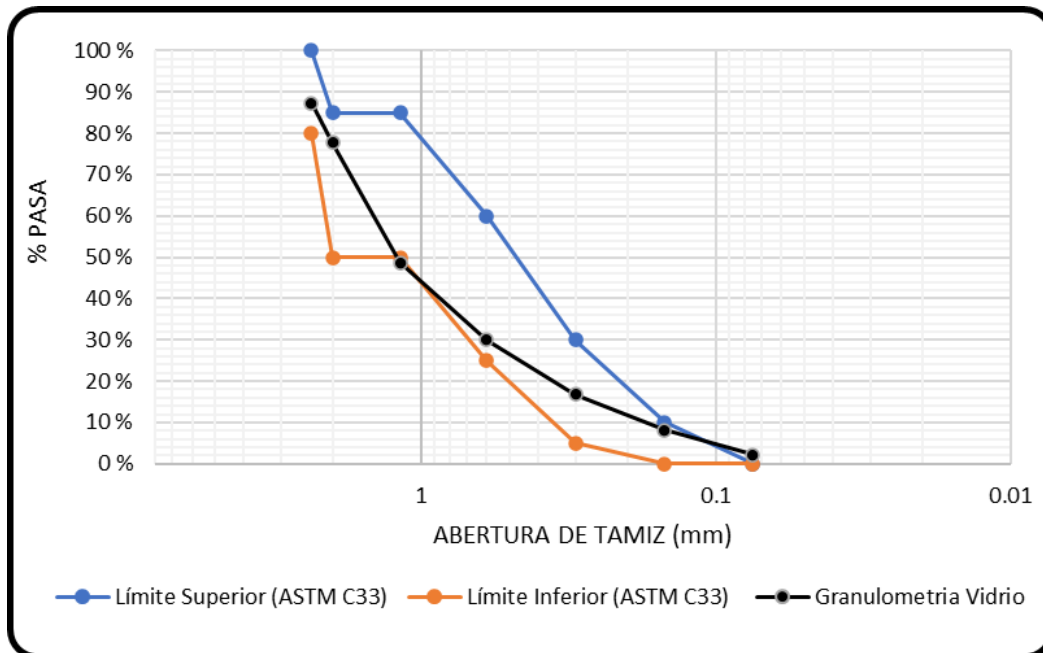
Las arenas, de acuerdo a su módulo de finura (Gutiérrez Libia, 2003) se las puede clasificar en:

- Arenas finas: 0.5 -1.5
- Arenas medias: 1.5 – 2.5
- Arenas gruesas: 2.5 – 3.5

Según el módulo de finura obtenido, se puede decir que el material según su clasificación corresponde a una arena gruesa.

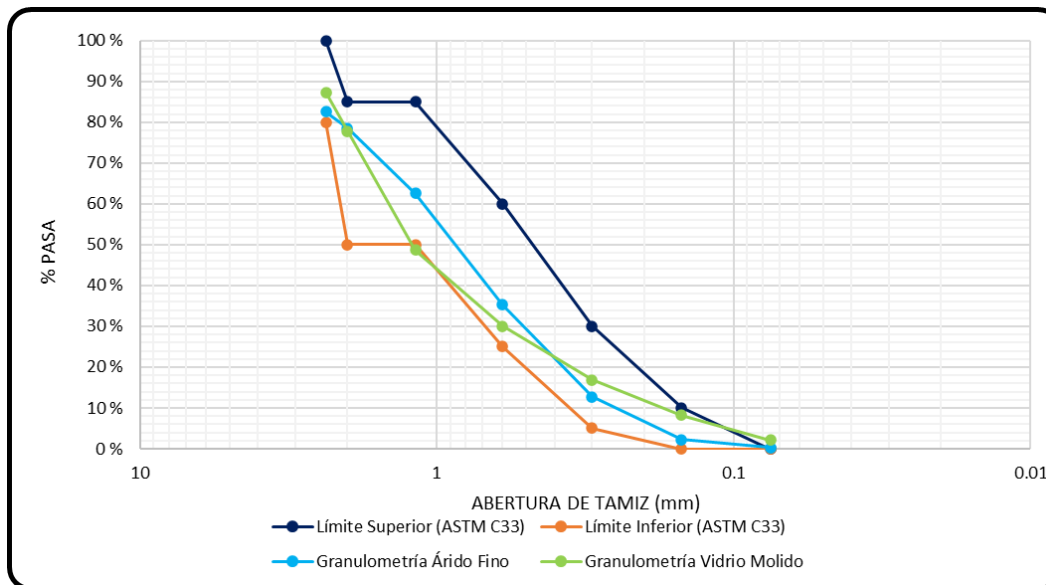
3.1.2 AGREGADO RECICLADO

De la misma forma en la siguiente figura se muestra la curva granulométrica del vidrio molido como agregado fino, bajo los mismos límites de la ASTM C33. Después del tamizado se observa que el porcentaje que pasa el tamiz #16 no cumple el límite establecido, pero dado que para el diseño de hormigones se realizó un intercambio exacto de medidas entre el agregado fino y el agregado reciclado no habría problemas con la granulometría obtenida. Además, después del tamizado se observó que existe una gran cantidad de material fino en forma de polvo, por lo que se tuvo un excedente que pasaba el tamiz #200 teniendo que descartarlo (Gráfica 3).



Gráfica 3: Curva granulométrica del vidrio molido.

El módulo de finura del vidrio molido fue de 3.31, por lo que está dentro del rango aceptable para ser considerado como una arena gruesa.



Gráfica 4: Comparación de curvas granulométricas entre el árido fino y el árido reciclado.

Como se puede observar en la gráfica 4, al comparar las granulometrías del árido reciclado con el árido fino, constatamos que el árido reciclado es casi idóneo para el uso en la fabricación de hormigones de acuerdo a los límites impuestos por la ASTM, pero existen dos puntos los cuales están fuera del rango de los límites permitidos, estos son los valores que retienen el tamiz #16 y el tamiz #200, es por eso que en laboratorio se pudo corregir esto agregando material en el tamiz #16 y quitando material en el tamiz #200, ya que aquí se tiene un mayor control que en



obra al momento de realizar cualquier mezcla, debido a esto, se tuvo que realizar el reemplazo en medidas exactas entre los áridos finos para la elaboración de las mezclas de hormigón.

ABSORCIÓN, DENSIDAD RELATIVA Y MASA UNITARIA.

Una vez obtenido los datos del laboratorio, se procede a obtener los resultados mediante las ecuaciones para obtener los valores de densidad: desde la Ecuación 1 hasta la Ecuación 16, que fueron citadas anteriormente. Los resultados que se obtuvieron para el agregado fino, el agregado grueso y el vidrio molido, se muestra en las siguientes tablas. El valor de la masa unitaria se obtiene solamente para el agregado grueso, el cual se encuentra dentro del rango aceptable que es entre 1200 a 1750 Kg/m³, así como, el rango de absorción para el agregado grueso esta entre 0.5% a 2% y para el agregado fino entre 2% y 6% (Kotsmatka & Wilson, 2016). Dado que el agregado fino no se encuentra dentro del rango normal, ya que tiene un valor menor, se tendrá que hacer una consideración de este en la dosificación final.

Detalle	Resultado
Densidad (SH) (kg/m ³)	2073.39
Densidad (SSS) (kg/m ³)	2102.15
Densidad aparente (kg/m ³)	2134.94
Densidad Relativa (SH)	2.0786
Densidad relativa (sss)	2.1075
Densidad relativa aparente	2.1403
Absorción	1.387
Masa Unitaria	1416.33

Tabla 19: Resultados de absorción, densidad relativa y masa unitaria para el árido grueso.

Detalle	Resultado
Densidad (SH) (kg/m ³)	2264.086
Densidad (SSS) (kg/m ³)	2543.345
Densidad aparente (kg/m ³)	3144.386
Densidad Relativa (SH)	2.6976
Densidad relativa (sss)	25497
Densidad relativa aparente	3.1523
Absorción	1.174

Tabla 20: Resultados de absorción y densidad relativa para el árido fino.



En el caso del vidrio molido, no se cuenta con un ensayo específico para obtener su densidad, por lo cual se realizó el mismo procedimiento que para los demás materiales, pero con cierta incertidumbre ya que la absorción del vidrio es casi nula y el material debía alcanzar el estado SSS (Tabla 21).

Detalle	Resultado
Densidad (SH) (kg/m ³)	2513.7
Densidad (SSS) (kg/m ³)	2513.7
Densidad aparente (kg/m ³)	2513.7
Densidad Relativa (SH)	2.52
Densidad relativa (sss)	2.52
Densidad relativa aparente (sss)	2.52
Absorción	0.03

Tabla 21: Resultados de absorción y densidad relativa para el vidrio molido.

3.1.3 DEGRADACIÓN DEL ÁRIDO GRUESO

Una vez obtenida la distribución granulométrica del árido grueso, podemos clasificarlo como un árido de gradación tipo B, con lo cual se puede especificar una carga abrasiva a usar de 4584 ± 25 g, correspondiente a 11 esferas. La norma INEN NTE 860, indica que se deben usar 5000 ± 10 g de material, que pasa el tamiz $\frac{3}{4}$ " y es retenido sobre el tamiz $\frac{3}{8}$ ", estando divididos 2500g retenidos sobre el tamiz $\frac{1}{2}$ " y 2500g que pasen este último, con lo cual después del ensayo y con la ecuación 17 se obtuvo el porcentaje de abrasión (tabla 22).

Masa inicial de la muestra (g)	4600
Masa retenida tamiz #12	3780
% de desgaste	17.82%

Tabla 22: Porcentaje de abrasión del árido grueso.

El valor máximo de abrasión, para que un árido sea aceptado en el diseño del hormigón debe ser menor al 25% (Kotsmatka & Wilson, 2016).

3.2 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN

3.2.1 DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN

Para el diseño de la mezcla de 1m^3 del hormigón patrón, se consideró dentro de la dosificación una relación $a/c=0.58$; en la siguiente tabla se muestran los pesos y el porcentaje equivalente de los materiales usados.



Material	Peso por 1m ³ (Kg)	Porcentaje %
Agregado grueso	878	37.0
Agregado fino	822	34.6
Agua	248	10.4
Cemento	427	18.0
Total	2375	100.0

Tabla 23: Peso y porcentaje de los materiales para 1m³ de hormigón.

3.2.2 ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN

Una vez realizado todos los ensayos y comprobado que los materiales a usar, cumplen con las especificaciones técnicas de todas las normas requeridas para el diseño de las mezclas, se procede a la elaboración del diseño para el hormigón patrón, así como el diseño final con las variaciones de árido fino reemplazado por vidrio molido.

Finalmente, se elaboraron 10 mezclas de hormigón, cada una para elaborar 9 probetas cilíndricas, dando como resultado un total de 90 especímenes. Cada probeta tenía unas dimensiones de, 10cm de diámetro por 20cm de altura, tomando en cuenta que se añadió un porcentaje de desperdicio igual al 17%, para poder realizar el ensayo de asentamiento en cada mezcla. A continuación, se presentan las siguientes tablas con el volumen de diseño y los pesos de los materiales utilizados para cada mezcla.

Elemento	Cantidad	Medidas del espécimen (cm)		Volumen	
Cilindros	9	φ=10	h=20	0.01571	m ³
			Desperdicio	17	%
			Volumen final de diseño	0.01962	m ³

Tabla 24: Volumen inicial para la elaboración de 9 probetas.

Dosificación final		
Material	Peso	
Agregado grueso	13.8	Kg
Agregado fino	12.9	Kg
Agua	3.89	Kg
Cemento	6.71	Kg

Tabla 25: Dosificación para la elaboración del hormigón patrón.

Material	Peso	
Agregado grueso	13.8	Kg
Agregado fino natural 90%	11.615	Kg



Agregado fino reciclado 10%	1.29	Kg
Agua	3.89	Kg
Cemento	6.71	Kg

Tabla 26: Dosificación para mezcla con 10% de árido fino reciclado.

Material	Peso	
Agregado grueso	13.8	Kg
Agregado fino natural 85%	10.969	Kg
Agregado fino reciclado 15%	1.936	Kg
Agua	3.89	Kg
Cemento	6.71	Kg

Tabla 27: Dosificación para mezcla con 15% de árido fino reciclado.

Material	Peso	
Agregado grueso	13.8	Kg
Agregado fino natural 80%	10.324	Kg
Agregado fino reciclado 20%	2.581	Kg
Agua	3.89	Kg
Cemento	6.71	Kg

Tabla 28: Dosificación para mezcla con 20% de árido fino reciclado.

Material	Peso	
Agregado grueso	13.8	Kg
Agregado fino natural 75%	9.678	Kg
Agregado fino reciclado 25%	3.226	Kg
Agua	3.89	Kg
Cemento	6.71	Kg

Tabla 29: Dosificación para mezcla con 25% de árido fino reciclado.

Para la elaboración de las mezclas M1 y M2 se usó la dosificación final mostrada en la Tabla 25. Mientras que para las mezclas M3 y M7 se usó la dosificación de la Tabla 26, para las mezclas M4 y M8 la dosificación de la Tabla 27, para las mezclas M5 y M9 la dosificación de la Tabla 28 y para las mezclas M6 y M10 se empleó la dosificación de la Tabla 29, respectivamente.

3.3 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO



Después de elaborar las probetas y transcurridos los días necesarios de curado, tanto de la mezcla patrón como de las mezclas con reemplazo parcial del vidrio, se extraen las probetas desde la piscina de curado y se les deja secar a temperatura ambiente durante 30 min, antes de realizar los ensayos de laboratorio para procesar los datos y generar las gráficas y curvas de resistencia. Antes de realizar cualquier ensayo, se procedió a tomar las medidas de los cilindros, tanto de su altura como su diámetro superior, medio e inferior, esto para obtener los datos necesarios a ser introducidos en la prensa para su configuración previa a cada ensayo.



Ilustración 19: Especímenes antes de ser ensayados (fuente propia).

3.3.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN

De acuerdo a la norma INEN NTE 1573, se procede a realizar el ensayo de compresión en las probetas aplicando una carga axial a una velocidad determinada. Después de realizar el ensayo se determina la resistencia a la compresión de la probeta de hormigón, dividiendo la carga máxima alcanzada de la probeta para el área o la cara de aplicación de la probeta.

Para obtener un valor de resistencia final, se realizó un promedio entre las 3 probetas elaboradas para cada día de curado, mientras que si un valor se alejaba demasiado del promedio se procedió a eliminarlo para evitar inconsistencias.

Por ejemplo, para los 14 días a compresión del hormigón patrón, se realizaron 3 probetas, de las cuales, la muestra 1 y muestra 3 fueron tomadas como válidas ya que están dentro del rango, mientras que la muestra 2 se eliminó ya que se alejaba mucho del promedio. (Véase tabla 30). Así mismo, se procedió a realizar este mismo método para todas las muestras realizadas para el ensayo de compresión, los detalles se muestran en el Anexo 8. El valor a ser usado en la gráfica de resistencia a compresión es el que se encuentra con un color rojo.

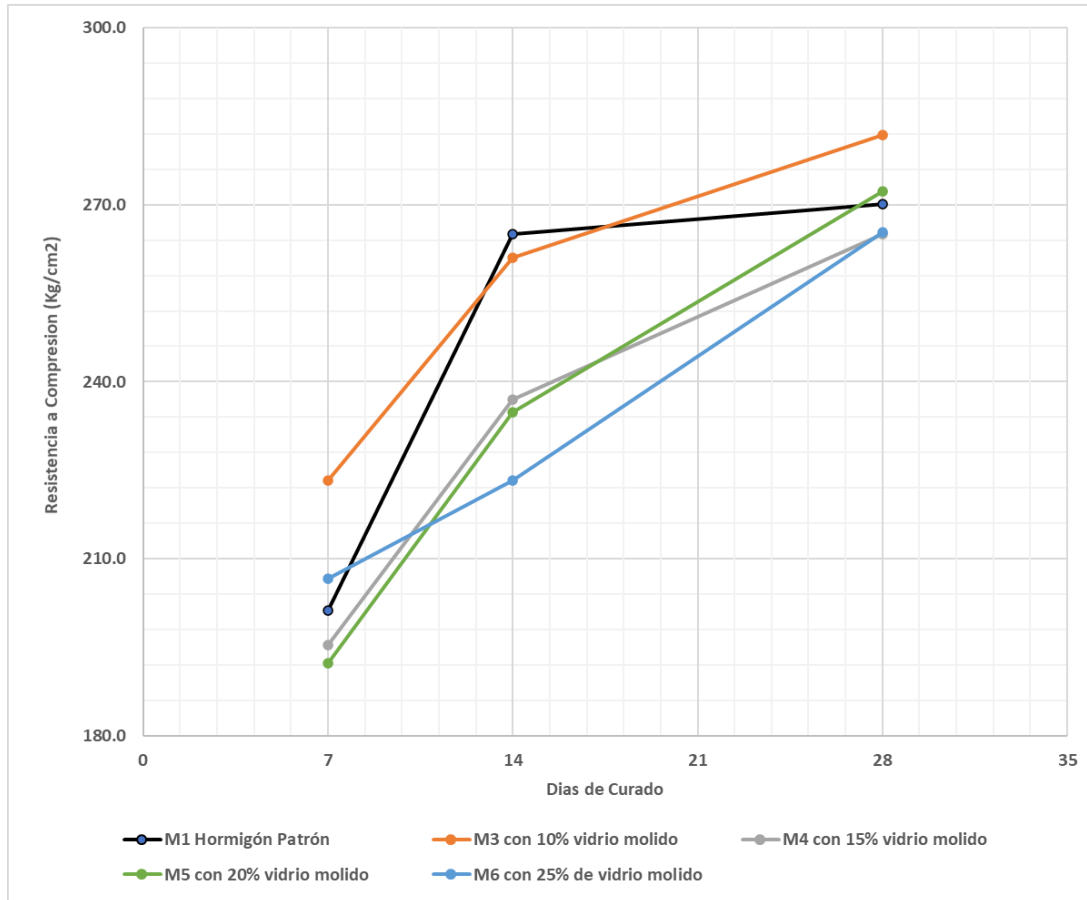
14 DÍAS COMPRESIÓN HP%			
# MUESTRA	FUERZA MAX.		
	KN	MPa	Kg/cm2
MUESTRA 1	203	25.8	262.997
MUESTRA 2	210	26.7	272.171
MUESTRA 3	200	25.5	259.939
PROM	204.333	26.000	265.036

Tabla 30: Resistencias de las 3 muestras para 14 días compresión HP.



Ilustración 20: Muestras de una misma mezcla para un día específico de curado (fuente propia).

En la Gráfica 5 se puede ver que las curvas no siguen una misma tendencia, esto es debido a la influencia de la cantidad de vidrio molido reemplazado en la mezcla y por el tiempo de curado alcanzado a los 28 días. Observamos que la mezcla M6 tiene una resistencia inicial alta pero finalmente su resistencia está por debajo de la mezcla del hormigón patrón, mientras que la mezcla M3 empieza con una resistencia inicial mayor a la del hormigón patrón y termina de la misma manera, con una resistencia final superior a la mezcla patrón. Esto indica que las resistencias obtenidas a los 28 días no serían las resistencias máximas que alcanzara el hormigón en base a la tendencia que se muestra en la gráfica, por lo que sería necesario extrapolar los datos para tener una idea de los valores a alcanzar después de más días de curado.



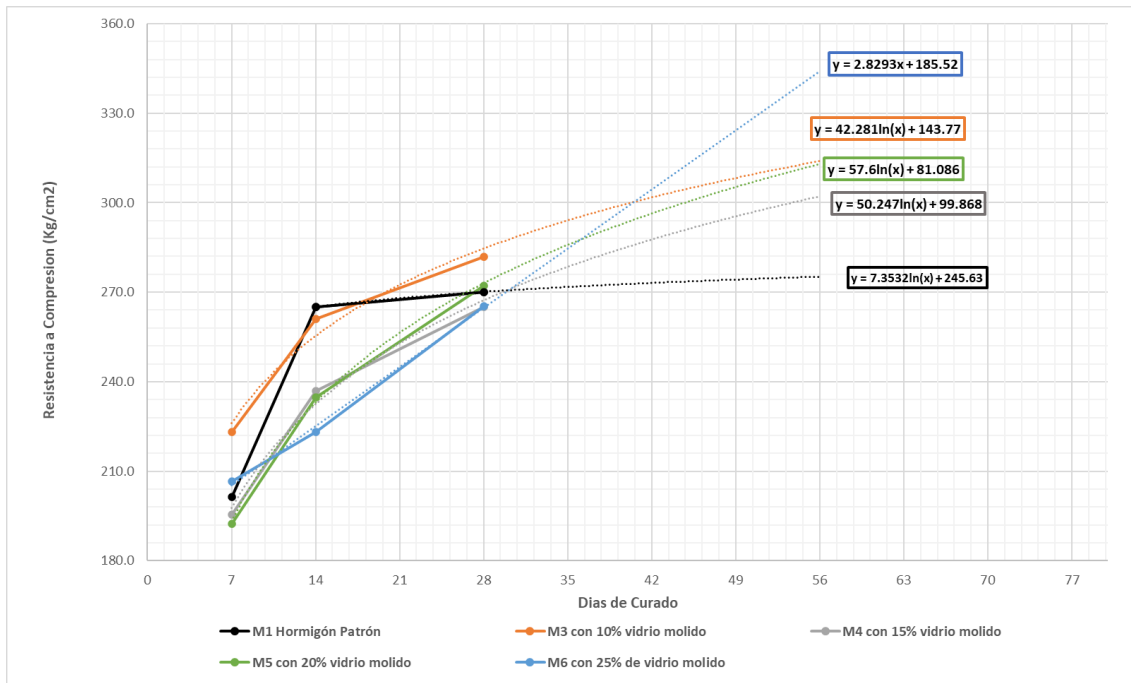
Gráfica 5: Resistencia a compresión de las probetas de hormigón.

Resistencia a compresión (Kg/cm2)					
Días	HP	10%	15%	20%	25%
7	201.3	223.2	195.4	192.3	206.6
14	265.0	261.0	237.0	234.8	223.2
28	270.1	281.9	265.0	272.2	265.4

Tabla 31: Valores de resistencia a compresión de las mezclas a distintos días de curado.

Como podemos ver en la gráfica 6, con una extrapolación de datos para 56 días de curado se tiene que todas las resistencias superan a la del hormigón patrón, esto puede deberse a que al incorporar vidrio a las mezclas queda un excedente de agua ya que el vidrio no tiene absorción, por lo que no interactúa con el agua, esto genera que el agua restante siga interactuando con el cemento por más tiempo generando hormigones de mayor resistencia a mayores días de curado. Además, se puede apreciar que, a mayor cantidad de vidrio usado, las gráficas tienden a crecer sin encontrar su asíntota que indique el punto de quiebre de las curvas, que demuestre la resistencia máxima alcanzada, estos son datos teóricos ya que para conocer los valores reales se deberían analizar las probetas a más días de curado y comprobar si la tendencia es correcta. Es decir, que los datos a los 28 días de

curado no serían datos suficientes para comprobar que exista un valor óptimo de vidrio a ser reemplazado, como podemos ver en la gráfica 6, todos los hormigones con la incorporación de vidrio superan al hormigón patrón a futuro.



Gráfica 6: Resistencia a compresión con una extrapolación a los 56 días de curado.

Resistencia a compresión (Kg/cm ²)					
Días	HP	10%	15%	20%	25%
7	201.3	223.2	195.4	192.3	206.6
14	265.0	261.0	237.0	234.8	223.2
28	270.1	281.9	265.0	272.2	265.4
56	275.3	314.0	302.1	312.9	344.0

Tabla 32: Valores de resistencia a compresión de las mezclas a distintos días de curado.

Como se puede apreciar en la gráficas y tablas anteriores, las resistencias finales a los 28 días de curado van desde los 265 Kg/cm² aproximadamente hasta los 282 Kg/cm², con lo que se podría calificar a los hormigones como de resistencias convencionales o estándares, es decir pueden ser considerados como hormigones estructurales ya que sobrepasan los 210 Kg/cm² que se detalla en la Normativa Ecuatoriana de la Construcción (NEC). En la tabla 32, podemos ver los datos extrapolados para los 56 días de curado, estos valores son teóricos ya que el alcance del trabajo de titulación fue planteado para obtener resistencias hasta los 28 días de curado. Esto nos indica que se debería analizar a futuro con pruebas reales si los valores coinciden con lo previsto, a mayores días de curado y con mayores porcentajes de vidrio en reemplazo parcial del árido fino.

Notablemente, se puede apreciar que la mezcla para un hormigón con un reemplazo de 10% de vidrio molido como árido fino mejora su resistencia a compresión a los 28 días de curado.

Después de realizar el ensayo de compresión a todas las probetas, se puede apreciar que la falla más representativa es la separación de los extremos superior e inferior de la muestra por el tratamiento incorrecto de la superficie del cilindro, estas fallas deben ser tratadas con mortero de azufre (Norma ASTM C 617) o colocando almohadillas de goma de neopreno antiadherente (Norma ASTM C 1231). Otras fallas visibles son las grietas verticales causadas por el mismo proceso de compresión y las grietas de adherencia entre el agregado grueso y el mortero. Como factor importante para minimizar los problemas anteriores es llenar el cilindro correctamente y brindar un efecto de curado continuo para mejorar la durabilidad, resistencia y estabilidad de volumen.



Ilustración 21: Tipos de fallas en las probetas ensayadas a Compresión (fuente propia).

3.3.2 RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA DE CILINDROS DE HORMIGÓN

De la misma manera como en el ensayo de compresión, se presentan los resultados del ensayo a tracción indirecta o compresión diametral en la Grafica 5. Para este ensayo se siguió la norma ASTM C 496, donde nos indica que a diferencia de la resistencia a compresión la velocidad de carga axial es de 0.9 MPa/min. Previo al

ensayo, se registró las medidas de cada probeta, así también se procedió a marcar cada probeta longitudinalmente para tener certeza de que el ensayo se estaba realizando correctamente, esto nos ayudó a tener una mejor visión del plano de falla.



Ilustración 22: Ensayo de tracción indirecta (fuente propia).

Así como en el ensayo de compresión, para este ensayo se realizó un promedio entre las 3 probetas elaboradas para cada día de curado para obtener una resistencia final, mientras que si el valor estaba muy lejos del promedio se eliminaba.

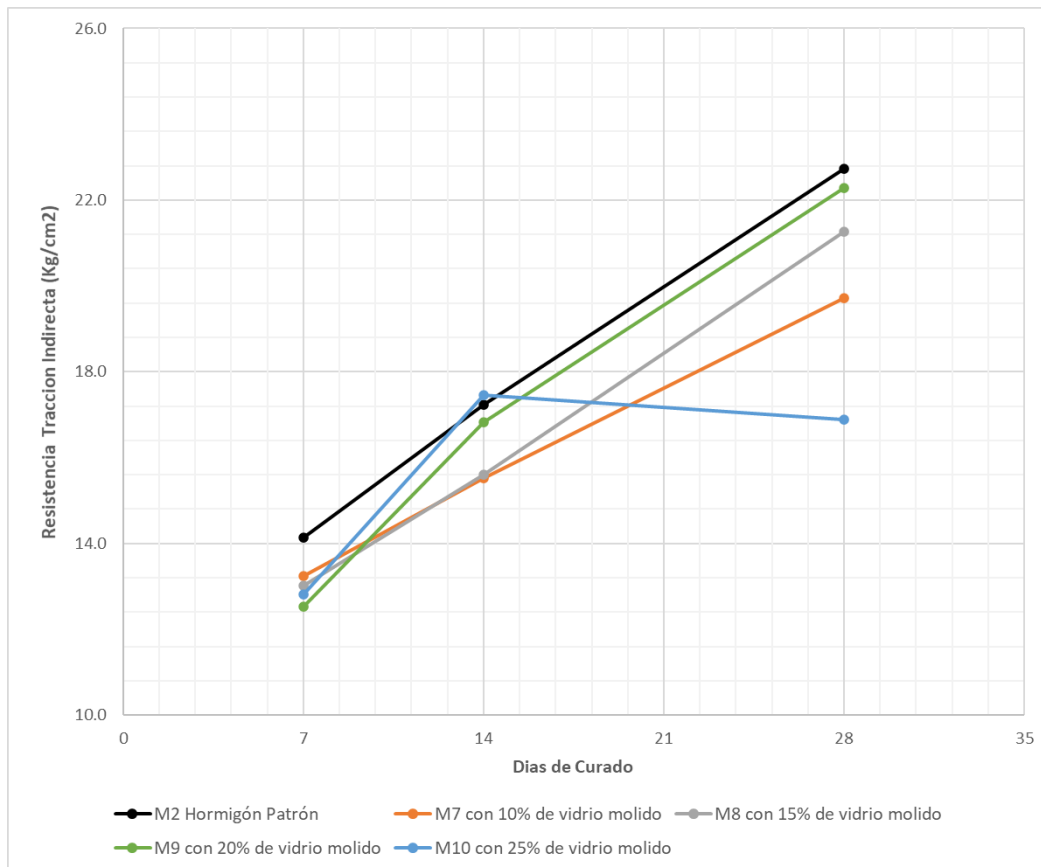
Como ejemplo tenemos, para los 28 días a tracción del hormigón patrón, se realizaron 3 probetas, de las cuales, la muestra 1 y muestra 2 fueron tomadas como validas ya que están dentro del rango, mientras que la muestra 3 se eliminó ya que se alejaba mucho del promedio. (Véase tabla 32). Así mismo, se procedió a realizar este mismo método para todas las muestras realizadas para el ensayo de compresión, los detalles se muestran en el Anexo 9. El valor en color rojo es el valor a ser usado para obtener la gráfica de resistencia a tracción indirecta de las probetas.

7 DÍAS TRACCION 25%			
# MUESTRA	FUERZA MAX.		
	KN	MPa	Kg/cm2
MUESTRA 1	41.8	1.33	13.558
MUESTRA 2	34.3	1.09	11.111
MUESTRA 3	42.5	1.35	13.761
PROM	39.533	1.257	12.810

Tabla 33: Resistencias de las 3 muestras para 7 días tracción con 25% de vidrio molido.



Observando la Grafica 7, podemos ver que ninguna mezcla está por encima de la mezcla patrón a los 28 días de curado, lo que nos dice que la utilización de vidrio molido en reemplazo parcial del árido fino, para la elaboración de probetas no es muy alentador, así como para la utilización en pavimentos. Como se indicó anteriormente el hormigón no es muy resistente a la tracción ya que solo puede llegar a alcanzar un 10% a un 15% de la resistencia a compresión por lo que esta característica no es muy usada en obra.



Gráfica 7: Resistencia a tracción indirecta de las probetas de hormigón.

Resistencia a tracción indirecta (Kg/cm ²)					
Días	HP	10%	15%	20%	25%
7	14.1	13.3	13.0	12.5	12.8
14	17.2	15.5	15.6	16.8	17.5
28	22.7	19.7	21.3	22.3	16.9

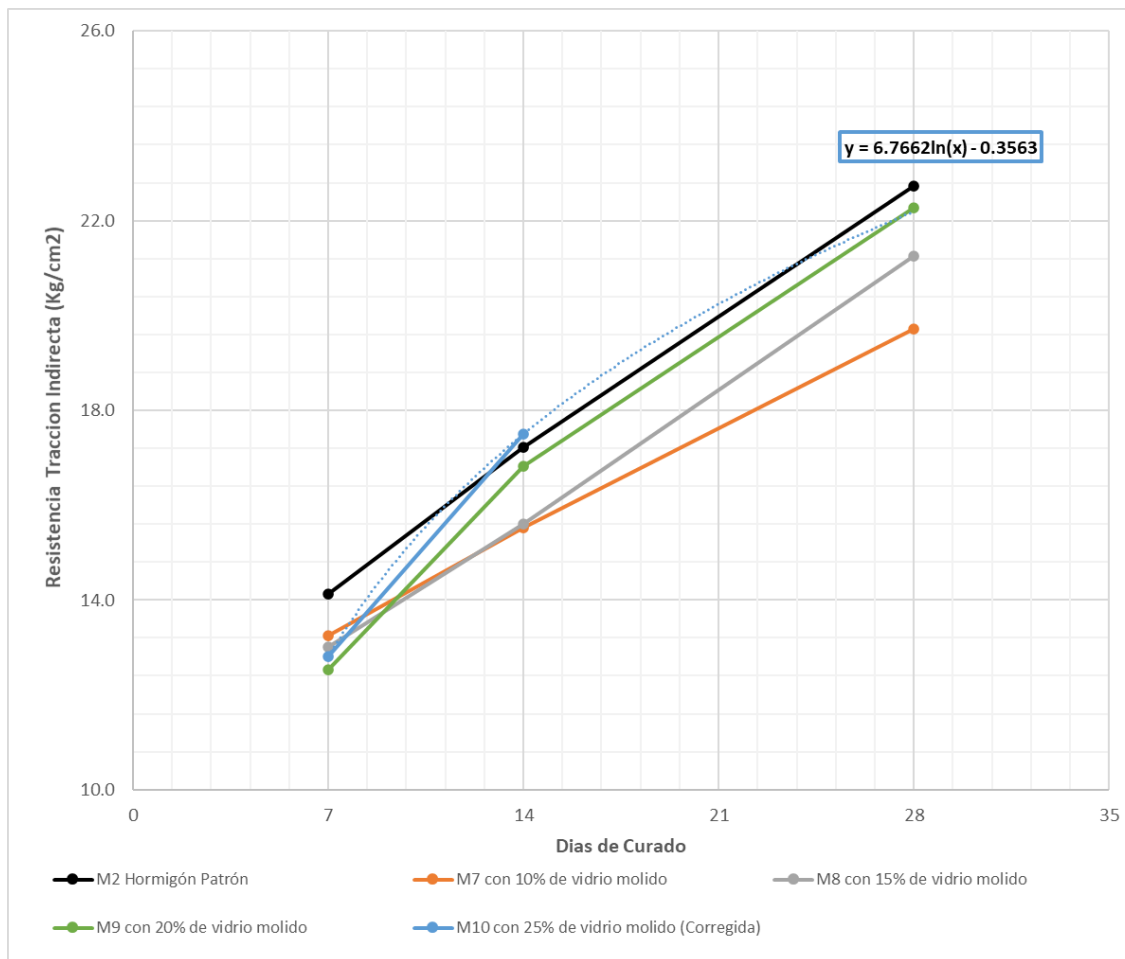
Tabla 34: Valores de resistencia a tracción indirecta de las mezclas a distintos días de curado.

Como podemos ver en la Tabla 34, las mezclas que proponen los mejores resultados es la de las mezclas M2 para el hormigón patrón como se esperaba ya que en el ensayo de tracción indirecta el agregado influye mucho más que la pasta, esto es, debido a que en este ensayo el agregado está bajo la influencia de mayores esfuerzos internos que la mezcla. Por lo que, las afecciones que se observan en

las mezclas con el uso de vidrio molido se deberían a que el vidrio tiene una superficie esmaltada o terminada, generando planos de falla, haciendo que la mezcla pierda adherencia y por consiguiente también pérdida resistencia.



Ilustración 23: Planos de falla en las probetas ensayadas a tracción indirecta (fuente propia).



Gráfica 8: Resistencia a tracción indirecta de las probetas de hormigón (Corregida).

Observando la Gráfica 7, nos podemos dar cuenta que la mezcla M10 presenta una inconsistencia a los 28 días de curado, pudiendo deberse a un error del operador, un error en la configuración de sensibilidad de la maquina o un error debido a la utilización incorrecta de la maquina; por lo que se procedió a eliminar este valor y graficar los resultados con la mezcla M10 corregida. En la gráfica 8, usando una extrapolación logarítmica se obtuvo que para los 28 días de curado podría alcanzar una resistencia a tracción indirecta de 22.2 kg/cm²; este sería un valor más real y coherente de acuerdo a la tendencia de las demás curvas graficadas.

Resistencia a tracción indirecta (Kg/cm2)					
Días	HP	10%	15%	20%	25%
7	14.1	13.3	13.0	12.5	12.8
14	17.2	15.5	15.6	16.8	17.5
28	22.7	19.7	21.3	22.3	22.2

Tabla 35: Valores de resistencia a tracción indirecta de las mezclas a distintos días de curado (Corregida).

Se puede apreciar que las mezclas no alcanzan un rango adecuado para considerarlas como hormigones con resistencias estándar en tracción, ya que están



por debajo del hormigón patrón en su resistencia final, representando apenas un 8% de las resistencias finales ensayadas a compresión.

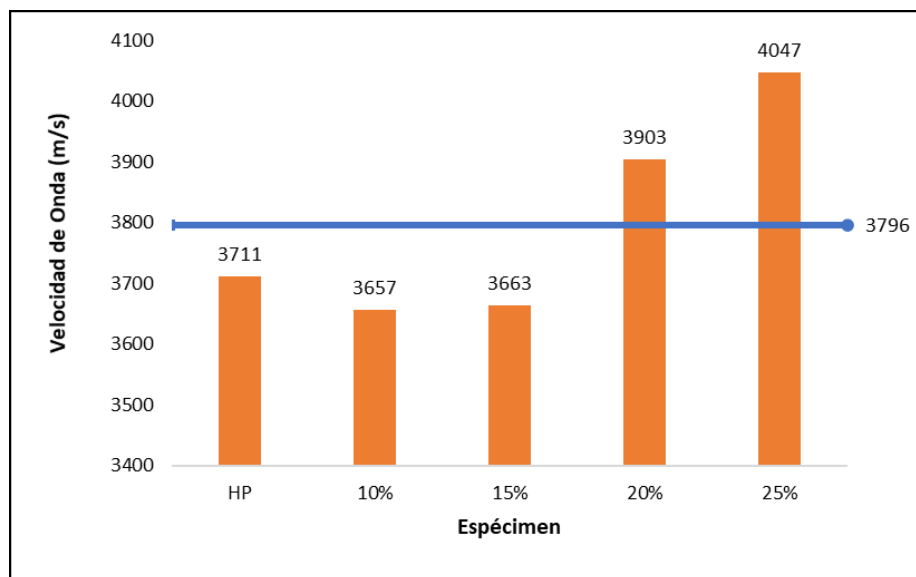
3.1 ANÁLISIS DE LA CALIDAD DEL HORMIGÓN MEDIANTE ENSAYOS NO DESTRUCTIVOS

3.1.1 ANÁLISIS MEDIANTE EL ENSAYO DE ULTRASONIDO

A continuación, se muestran los resultados cualitativos para determinar la calidad del hormigón a través de las velocidades de onda que se obtienen mediante el ensayo de ultrasonido. Los ensayos se realizaron para los especímenes a los 28 días de curado, porque a esta edad representa su máximo valor de resistencia.

Espécimen	Velocidad de Onda (m/s)	Condición del hormigón
HP	3711	Buena
10%	3657	Buena
15%	3663	Buena
20%	3903	Buena
25%	4047	Excelente

Tabla 36: Resultado del ensayo de ultrasonido a muestras de compresión.

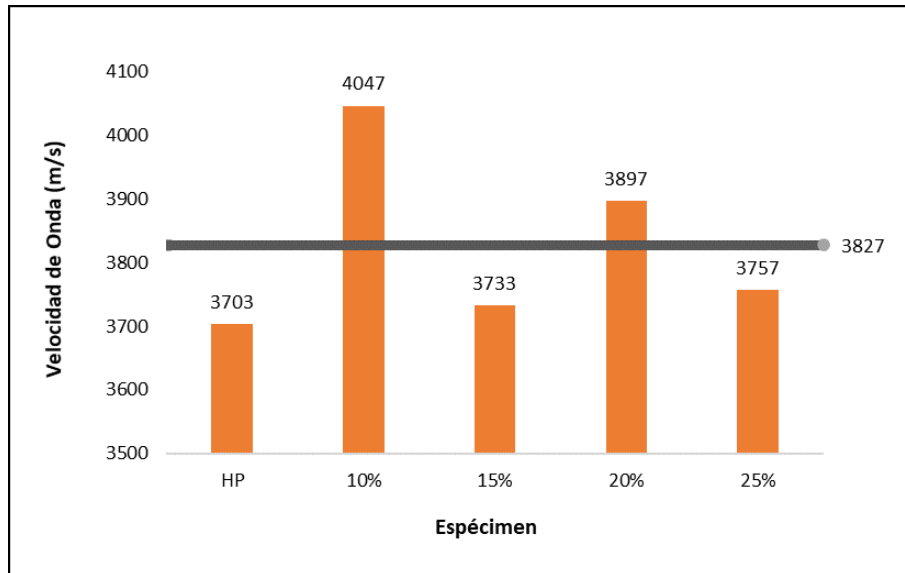


Gráfica 9: Ensayo de ultrasonido a muestras de compresión.

En la gráfica 9, podemos ver que los valores de la velocidad de onda tienden a crecer a mayor porcentaje de vidrio molido usado, también se muestra el promedio lineal entre todas las muestras, lo que nos indica que puede seguir aumentando los valores de velocidad de onda a mayor cantidad de vidrio.

Espécimen	Velocidad de Onda (m/s)	Condición del hormigón
HP	3703	Buena
10%	4047	Buena
15%	3733	Buena
20%	3897	Buena
25%	3757	Buena

Tabla 37: Resultado del ensayo de ultrasonido a muestras de tracción indirecta.



Gráfica 10: Ensayo de ultrasonido a muestras de tracción indirecta.

En la gráfica 10, se muestran los valores obtenidos por el ensayo de ultrasonido donde nos indica que los valores siempre son mayores al obtenido por el hormigón patrón. Estos valores no presentan una tendencia, lo cual puede deberse a la irregularidad en las caras de las probetas.

Un hormigón se encuentra en condición “Buena” siempre que la velocidad de onda este entre el rango de valores de 3650 a 4570 m/s según Leslie y Cheesman. Por lo tanto, con los datos obtenidos podemos decir que todas las mezclas para hormigones serian aceptables, debido a que se encuentran dentro del rango para catalogarlos como hormigones de “condición buena”. Cabe mencionar que el ensayo de ultrasonido no tiene una representación significativa en los resultados, ya que existe un gran margen de error en los resultados que dependen de varios factores como, el operador, las irregularidades en la superficie, la fuerza aplicada en los transductores, la calibración del equipo, la longitud de las probetas, etc.



Ilustración 24: Análisis de una probeta mediante el ensayo de ultrasonido (fuente propia).

3.2 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD

3.2.1 GREENROADS V2 ONLINE

Como la primera herramienta para el análisis de sostenibilidad se usó una herramienta calificadora como lo es Greenroads, con la cual mediante su herramienta de Checklist Online se logró establecer que, en el hipotético caso de utilización de los hormigones patrones y con la utilización de vidrio molido, en una infraestructura de plan vial con pavimento rígido se podría analizar dentro de un parámetro de sostenibilidad las diversas alternativas planteadas con el uso de vidrio molido como reemplazo parcial del árido fino.



Greenroads v2 Project Checklist

Project Name * <input type="text" value="Proyecto de Tesis"/>	City, State/Province, Country <input type="text" value="Cuenca, Azuay, Ecuador"/>	Project Manager <input type="text" value="Christian Auquilla y Daniel Pelae"/>																														
Project Budget (million USD) <input type="text"/>	Current Status <input type="text" value="Planning"/>																															
Target Score: Minimum Project Requirements not met <input type="text" value=""/> Bronze Silver Gold Evergreen Requirements: No	Materials & Design Attempting My Score	Creativity & Effort Attempting My Score																														
Email Send a complete copy of this checklist to yourself. Your email <input type="text" value="christian.auquillar@ucuenca"/>	<table border="0"> <tr> <td>MD-1 Preservation & Reuse 1-5 points</td> <td>Y</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>MD-2 Recycled & Recovered Content 1-5 points</td> <td>Y</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>MD-3 Environmental Product Declarations 2 points</td> <td>Y</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>MD-4 Health Product Declarations 2 points</td> <td>Y</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>MD-5 Local Materials 1-5 points</td> <td>Y</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>MD-6 Long-Life Design 1-5 points</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	MD-1 Preservation & Reuse 1-5 points	Y	1	MD-2 Recycled & Recovered Content 1-5 points	Y	1	MD-3 Environmental Product Declarations 2 points	Y	2	MD-4 Health Product Declarations 2 points	Y	2	MD-5 Local Materials 1-5 points	Y	5	MD-6 Long-Life Design 1-5 points			<table border="0"> <tr> <td>CE-1 Educated Team 1-2 points</td> <td>Y</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>CE-2 Innovative Ideas 1-5 points</td> <td>Y</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>CE-3 Enhanced Performance 1-5 points</td> <td>Y</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>CE-4 Local Values 1-3 points</td> <td></td> <td></td> </tr> </table>	CE-1 Educated Team 1-2 points	Y	2	CE-2 Innovative Ideas 1-5 points	Y	1	CE-3 Enhanced Performance 1-5 points	Y	5	CE-4 Local Values 1-3 points		
MD-1 Preservation & Reuse 1-5 points	Y	1																														
MD-2 Recycled & Recovered Content 1-5 points	Y	1																														
MD-3 Environmental Product Declarations 2 points	Y	2																														
MD-4 Health Product Declarations 2 points	Y	2																														
MD-5 Local Materials 1-5 points	Y	5																														
MD-6 Long-Life Design 1-5 points																																
CE-1 Educated Team 1-2 points	Y	2																														
CE-2 Innovative Ideas 1-5 points	Y	1																														
CE-3 Enhanced Performance 1-5 points	Y	5																														
CE-4 Local Values 1-3 points																																
<input type="button" value="SEND"/> <input type="button" value="Print"/>																																

Ilustración 25: Checklist de la mezcla patrón en Greenroads (Greenroads, 2020).

Greenroads v2 Project Checklist

Project Name * <input type="text" value="Proyecto de Tesis"/>	City, State/Province, Country <input type="text" value="Cuenca, Azuay, Ecuador"/>	Project Manager <input type="text" value="Christian Auquilla y Daniel Pelae"/>
Project Budget (million USD) <input type="text"/>	Current Status <input type="text" value="Planning"/>	



Target Score: Minimum
Project Requirements not met

Bronze Silver Gold Evergreen
Requirements: No

Email
Send a complete copy of this checklist to yourself.

Your email
christian.auquillar@ucuenca

SEND **Print**

Materials & Design	Attempting	My Score	Creativity & Effort	Attempting	My Score
MD-1 Preservation & Reuse 1-5 points	Y	5	CE-1 Educated Team 1-2 points	Y	2
MD-2 Recycled & Recovered Content 1-5 points	Y	2	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	Y	2
MD-5 Local Materials 1-5 points	Y	5			
MD-6 Long-Life Design 1-5 points					

Ilustración 26: Checklist de la mezcla con un 10% de agregado reciclado en Greenroads (Greenroads, 2020).

Home > Rating System > Greenroads v2 Project Checklist

Greenroads v2 Project Checklist

Project Name *
Proyecto de Tesis

City, State/Province, Country
Cuenca, Azuay, Ecuador

Project Manager
Christian Auquilla y Daniel Pelae

Project Budget (million USD)

Current Status
Planning

Target Score: Minimum
Project Requirements not met

Bronze Silver Gold Evergreen
Requirements: No

Email
Send a complete copy of this checklist to yourself.

Your email
christian.auquillar@ucuenca

SEND **Print**

Materials & Design	Attempting	My Score	Creativity & Effort	Attempting	My Score
MD-1 Preservation & Reuse 1-5 points	Y	5	CE-1 Educated Team 1-2 points	Y	2
MD-2 Recycled & Recovered Content 1-5 points	Y	3	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	Y	2
MD-5 Local Materials 1-5 points	Y	5			
MD-6 Long-Life Design 1-5 points					

Ilustración 27: Checklist de la mezcla con un 15% de agregado reciclado en Greenroads (Greenroads, 2020).



Greenroads v2 Project Checklist

Project Name *

City, State/Province, Country

Project Manager

Project Budget (million USD)

Current Status

Target Score: Minimum
 Project Requirements not met

Bronze Silver Gold Evergreen
Requirements: No

Email
 Send a complete copy of this checklist to yourself.

Your email

SEND **Print**

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

Ilustración 28: Checklist de la mezcla con un 20% de agregado reciclado en Greenroads (Greenroads, 2020).

Greenroads v2 Project Checklist

Project Name *

City, State/Province, Country

Project Manager

Project Budget (million USD)

Current Status

Target Score: Minimum
 Project Requirements not met

Bronze Silver Gold Evergreen
Requirements: No

Email
 Send a complete copy of this checklist to yourself.

Your email

SEND **Print**

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

Ilustración 29: Checklist de la mezcla con un 25% de agregado reciclado en Greenroads (Greenroads, 2020).



Como podemos ver en las ilustraciones anteriores, el uso de vidrio molido en reemplazo parcial del árido fino, contribuye desde los 29 puntos hasta los 32 puntos de los 40 puntos mínimos para que un proyecto pueda para alcanzar una certificación nivel Bronze (nivel más bajo), mientras que el hormigón patrón alcanza 19 puntos de los 40 requeridos, por lo que el uso de materiales reciclados es ampliamente viable en términos de sostenibilidad. Cabe mencionar que los puntos alcanzados únicamente pertenecen a 2 de las 8 categorías que tiene Greenroads dentro de su Project Checklist, lo que significa que el proyecto aporta al medioambiente, haciendo que este se encuentre dentro de los parámetros de proyectos sostenibles, además de que al momento de ampliar el uso de más categorías se podría conseguir un aumento en el puntaje final, lo que beneficiaría al proyecto para conseguir una certificación de nivel más alto.

3.2.2 LEED V4 CHECKLIST

LEED (Liderazgo en Energía y Diseño Ambiental) es una herramienta computacional calificadora, por la que por medio de su Checklist LEED V4 ofrece certificaciones a las nuevas construcciones de edificios. Las 2 categorías a ser usadas para la evaluación son la de Materiales y Recursos y la de Innovación, que juntas representan un 45% del total de puntos necesarios para una certificación. Pudimos establecer que en las 2 categorías para una nueva construcción y renovaciones importantes el hormigón patrón cumple con 8 puntos de los 40 puntos necesarios para que la obra obtenga una certificación LEED, mientras que la mezcla con un porcentaje parcial de agregado fino reciclado obtuvo 17 puntos. Este valor resultante nos indica que la mezcla con agregado reciclado si logra alcanzar una mejora a nivel medio ambiental, lo que aporta un valor importante para obtener la certificación LEED, que es reconocida a nivel internacional. Cabe mencionar que, para las mezclas con vidrio molido como parte del agregado reciclado, únicamente se realizó una muestra, esto debido a que, el puntaje final no dependía de los distintos porcentajes de vidrio molido en la mezcla.



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

Project Checklist

Project Name: Proyecto de Tesis

Date: 4/2/2021

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			Credit Building Life-Cycle Impact Reduction	5
2			Credit Building Product Disclosure and Optimization - Environmental Product Declarations	2
0			Credit Building Product Disclosure and Optimization - Sourcing of Raw Materials	2
2			Credit Building Product Disclosure and Optimization - Material Ingredients	2
2			Credit Construction and Demolition Waste Management	2
1	0	0	Innovation	6
1			Credit Innovation	5
0			Credit LEED Accredited Professional	1



8	0	0	TOTALS	Possible Points:	110
----------	----------	----------	---------------	------------------	------------

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

Ilustración 30: Project Checklist para una certificación LEED de la mezcla de hormigón patrón.



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

Project Checklist

Project Name: Proyecto de Tesis

Date: 4/2/2021

13	0	0	Materials and Resources	13
-----------	----------	----------	--------------------------------	-----------

Y		Prereq	Storage and Collection of Recyclables	Required
Y		Prereq	Construction and Demolition Waste Management Planning	Required
5		Credit	Building Life-Cycle Impact Reduction	5
2		Credit	Building Product Disclosure and Optimization - Environmental Product Declarations	2
2		Credit	Building Product Disclosure and Optimization - Sourcing of Raw Materials	2
2		Credit	Building Product Disclosure and Optimization - Material Ingredients	2
2		Credit	Construction and Demolition Waste Management	2

4	0	0	Innovation	6
----------	----------	----------	-------------------	----------

4		Credit	Innovation	5
0		Credit	LEED Accredited Professional	1

17	0	0	TOTALS	Possible Points:	110
-----------	----------	----------	---------------	------------------	------------

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

Ilustración 31: Project Checklist para una certificación LEED de la mezcla de hormigón con un porcentaje de vidrio molido como agregado fino.

3.2.3 PALATE V2.2

PALATE es una herramienta computacional calculadora por lo que requiere valores específicos para la obtención de resultados de consumo de energía y de emisión de CO₂. Para nuestro caso los valores a ser ingresados corresponden a los necesarios para la elaboración de 1m³ de hormigón, tomando como referencia los datos obtenidos de la Tabla 23.

	Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site		
			Unit	tons/CY	CY	tons	Distance (mi)	Mode
PCC Pavements	Ripio	3.20		0.28	0.88	20	Truck
	Arena	1.90		0.43	0.82	20	Truck
	Cemento	1.27		0.34	0.43	15	Truck
	Agua	0.84		0.30	0.25		
	Total: PCC to site	2.03			2.38	0	Truck

Ilustración 32: Entrada de datos de la mezcla del hormigón patrón en PaLate V2.2.



		Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	2.7	391
	Materials Transportation	0.1	6
	Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	2.7	391
	Materials Transportation	0.1	6
	Equipment	0.0	0
Total		2.8	397

Ilustración 33: Resultados en PaLate V2.2 de la mezcla de hormigón patrón.

	Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site	
	Unit	tons/CY	CY	tons	One-Way Only	
					Distance (mi)	Mode
PCC Pavements	Ripio	3.20	0.28	0.88	20	Truck
	Arena	1.90	0.39	0.74	20	Truck
	Cemento	1.27	0.34	0.43	15	Truck
	Vidrio Molido	2.11	0.04	0.09	10	Truck
	Agua	0.84	0.30	0.25		
	Total: PCC to site	2.03		2.39	0	Truck

Ilustración 34: Entrada de datos de la mezcla con 10% de vidrio molido en PaLate V2.2.

		Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	2.7	390
	Materials Transportation	0.1	6
	Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	2.7	390
	Materials Transportation	0.1	6
	Equipment	0.0	0
Total		2.8	396

Ilustración 35: Resultados en PaLate V2.2 de la mezcla con 10% de vidrio molido.



Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site One-Way Only		
		Unit	tons/CY	CY	tons	Distance (mi)	Mode
Ripio	3.20		0.28	0.88	20	Truck
Arena	1.90		0.37	0.69	20	Truck
Cemento	1.27		0.34	0.43	15	Truck
Vidrio Molido	2.11		0.06	0.14	10	Truck
Agua	0.84		0.30	0.25		
Total: PCC to site	2.03			2.39	0	Truck

Ilustración 36: Entrada de datos de la mezcla con 15% de vidrio molido en PaLate V2.2.

		Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	2.7	389
	Materials Transportation	0.1	6
	Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	2.7	389
	Materials Transportation	0.1	6
	Equipment	0.0	0
Total		2.8	395

Ilustración 37: Resultados en PaLate V2.2 de la mezcla con 15% de vidrio molido.

	Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site One-Way Only	
			Unit	tons/CY	CY	tons	Distance (mi)	Mode
PCC Pavements	Ripio	3.20	0.28	0.88	20	Truck
	Arena	1.90	0.34	0.65	20	Truck
	Cemento	1.27	0.34	0.43	15	Truck
	Vidrio Molido	2.11	0.09	0.18	10	Truck
	Agua	0.84	0.30	0.25		
	Total: PCC to site	2.03			2.40	0	Truck

Ilustración 38: Entrada de datos de la mezcla con 20% de vidrio molido en PaLate V2.2.



		Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	2.7	389
	Materials Transportation	0.1	6
	Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	2.7	389
	Materials Transportation	0.1	6
	Equipment	0.0	0
Total		2.8	395

Ilustración 39: Resultados en PaLate V2.2 de la mezcla con 20% de vidrio molido.

	Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site One-Way Only	
	Unit	tons/CY	CY	tons	Distance (mi)	Mode
PCC Pavements	Ripio	3.20	0.28	0.88	20	Truck
	Arena	1.90	0.32	0.61	20	Truck
	Cemento	1.27	0.34	0.43	15	Truck
	Vidrio Molido	2.11	0.11	0.23	10	Truck
	Agua	0.84	0.30	0.25		
	Total: PCC to site	2.03		2.40		0	Truck

Ilustración 40: Entrada de datos de la mezcla con 25% de vidrio molido en PaLate V2.2.

		Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	2.7	388
	Materials Transportation	0.1	6
	Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	2.7	388
	Materials Transportation	0.1	6
	Equipment	0.0	0
Total		2.8	394

Ilustración 41: Resultados en PaLate V2.2 de la mezcla con 25% de vidrio molido.

Mezcla	Para 1m ³		Para 50m ³		Para 100m ³		Para 5000m ³	
	Energía Consumida (GJ)	CO ₂ e (Kg)	Energía Consumida (GJ)	CO ₂ e (Kg)	Energía Consumida (GJ)	CO ₂ e (Kg)	Energía Consumida (GJ)	CO ₂ e (Kg)
Hormigón Patrón	2.8	397	140	19900	280	39700	2800	1985000



Hormigón con 10% de vidrio molido	2.8	396	140	19800	280	39600	2800	1980000
Hormigón con 15% de vidrio molido	2.8	395	140	19700	280	39500	2800	1975000
Hormigón con 20% de vidrio molido	2.8	395	140	19700	280	39500	2800	1975000
Hormigón con 25% de vidrio molido	2.8	394	140	19650	280	39400	2800	1970000

Tabla 38: Resumen de resultados para distintas cantidades de mezcla.

Como podemos observar en la Tabla 38, los resultados cuantitativos de acuerdo al impacto ambiental dados por la herramienta PaLate, nos indica que para la elaboración de la mezcla del hormigón patrón como para cualquier otra mezcla con la incorporación de vidrio molido, se consume la misma cantidad de energía, esto debido a que durante el proceso de fabricación siempre se va a necesitar la energía mínima necesaria para producir un hormigón, ya que no se toma en cuenta la energía producida para cada elemento de la mezcla. En cambio, en la emisión de gases podemos ver que, si existe una diferencia en las distintas mezclas de hormigón con vidrio molido con respecto a la mezcla del hormigón patrón, siendo el hormigón que tiene un 25% de vidrio molido en reemplazo parcial del agregado fino el que tiene esta diferencia cada vez más significativa a medida que se incrementa la cantidad de hormigón a producir. De esta manera se puede decir que las emisiones de CO₂e en una obra grande (5000m³) disminuyen hasta en un 0.8%, y aunque no parezca un valor muy elevado, la emisión de 15000 Kg corresponde más o menos a que 1.5 vehículos livianos dejen de circular.

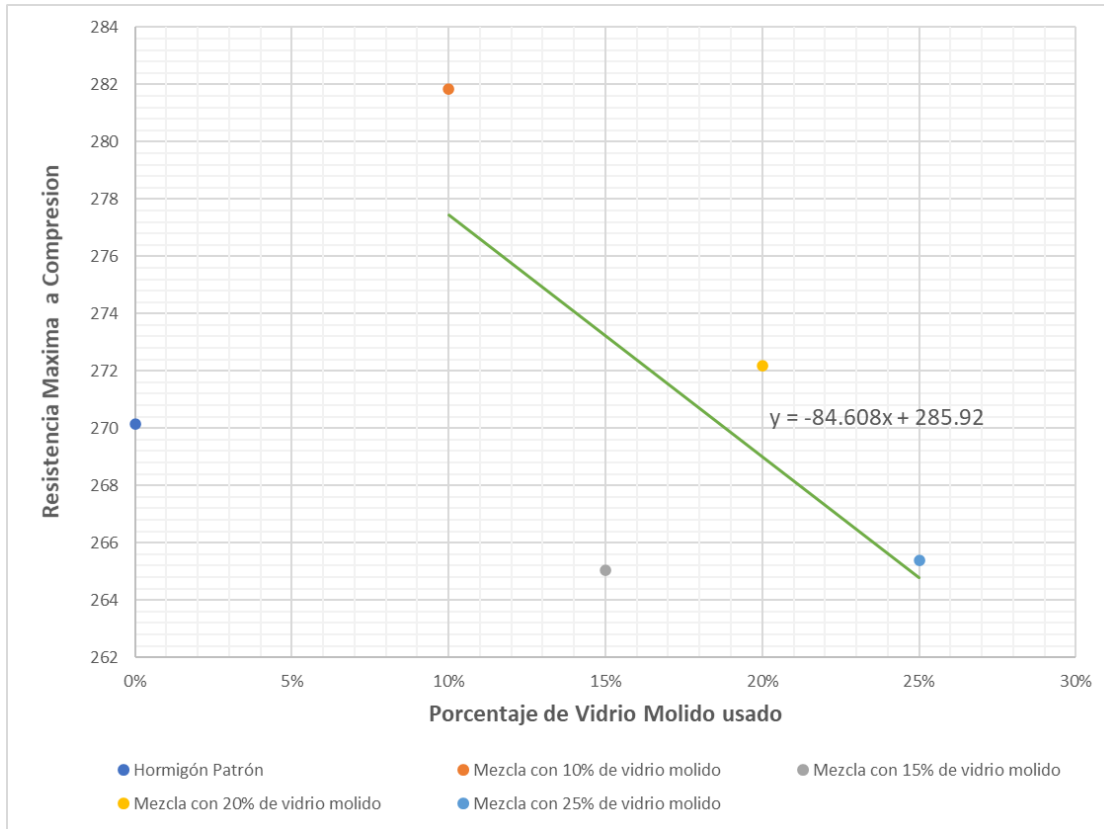
3.3 PORCENTAJES ÓPTIMOS

3.3.1 PORCENTAJE ÓPTIMO EN TÉRMINOS FÍSICO – MECÁNICO

En la Gráfica 11 se muestran los valores de resistencia máxima a compresión y los porcentajes de vidrio molido usados para las mezclas del hormigón, mediante estos puntos se puede establecer una línea de tendencia la cual puede ser usada para obtener el porcentaje óptimo para que la mezcla alcance al hormigón patrón, es decir mediante la ecuación establecida se puede encontrar el porcentaje de vidrio molido justo para obtener la misma resistencia del hormigón patrón, sin alterar sus características físico – mecánicas. Cabe mencionar que los resultados de resistencias máximas son únicamente a los 28 días de curado, por lo que el valor de porcentaje óptimo es únicamente para estos valores, como se mencionó anteriormente se debería analizar las muestras para más días de curado y observar



si más valores alcanzan o sobrepasan los del hormigón patrón para obtener mejores resultados en el porcentaje óptimo.



Gráfica 11: Porcentaje óptimo en términos de resistencia a compresión y porcentaje de vidrio.

A través de la ecuación $y = -84.608x + 285.82$ se obtiene el valor de 18.7% que sería el porcentaje óptimo de vidrio molido a los 28 días de curado que debe ser reemplazado en lugar del agregado fino, para alcanzar una resistencia a compresión igual a 270 Kg/cm².

3.3.2 PORCENTAJE ÓPTIMO EN TÉRMINOS DE SOSTENIBILIDAD

Para obtener el porcentaje óptimo en términos de sostenibilidad, recurrimos a la tabla 37, que presenta los resultados presentados por las herramientas de evaluación ambiental.

Mezclas	Herramientas ambientales			
	Greenroads (Puntos)	LEED (Puntos)	PaLate (CO ₂ e Kg) 1m ³	PaLate (CO ₂ e Kg) 5000m ³
Hormigón Patrón	19	8	397	1985000



Hormigón con 10% de vidrio molido	29	17	396	1980000
Hormigón con 15% de vidrio molido	30	17	395	1975000
Hormigón con 20% de vidrio molido	31	17	395	1975000
Hormigón con 25% de vidrio molido	32	17	394	1970000

Tabla 39: Resumen de resultados en términos de sostenibilidad.

La Tabla 39 nos muestra los valores obtenidos en cada programa usado, ya sea calculador o calificador, por lo que es un buen indicador de que la mezcla con un 25% de vidrio molido en reemplazo parcial del árido fino es la que más beneficios medioambientales tiene. Esto nos indica que la mejor mezcla en términos ambientales no es la mejor mezcla en términos físico mecánicos, pero que aun así aporta un gran valor al parámetro medioambiental para obtener certificaciones y reducir emisiones durante su elaboración.



4 CAPITULO 4: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Se analizó la factibilidad y sostenibilidad de las distintas mezclas, para el diseño de un hormigón con el uso de distintos porcentajes de vidrio molido como reemplazo parcial del agregado fino, con lo que se pudo concluir en este trabajo que si es factible el uso del vidrio molido en la elaboración de hormigones ya que se puede alcanzar y superar las propiedades mecánicas de un hormigón patrón de resistencia de 270 Kg/cm² en términos de resistencia a la compresión y tracción indirecta. También, se determinó que los hormigones alternativos cumplen con todos los requerimientos establecidos por las diferentes normativas, además de que, de acuerdo al parámetro de sostenibilidad, se logró elaborar hormigones que emiten menos gases al ambiente durante su elaboración, con lo que se puede decir que se encontró una alternativa que disminuye costos y además que son amigables con el medio ambiente.

4.1.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

Para la caracterización de los agregados naturales se comprobó que cumplan con la norma ASTM C33, teniendo para el agregado grueso un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " , así como también para el árido fino se obtuvo un valor de módulo de finura de 3.26 y para el vidrio molido un valor de 3.31 siendo mayor al valor de la arena en un 0.15%, con lo que se puede comprobar que ambos materiales pueden ser considerados como una arena gruesa ya que están en el rango entre 2.5 a 3.5. Además de que en el país se debe comprobar que la curva granulométrica de todos los agregados se encuentre dentro de los límites establecidos por la norma ecuatoriana NTE INEN 872.

En el caso de la granulometría del vidrio molido se pudo apreciar que no cumplía ciertos límites establecidos dentro de las normas, esto se debe a que para lograr que el vidrio pase por el tamiz #4 y considerarlo como árido fino, se tuvo que triturar varias veces lo que genero un excedente de material fino que pasaba el tamiz #200, es decir que sobrepaso el límite de la norma que dice que debe ser 0% para su límite superior e inferior, mientras que se tenía un 2.17%, lo que es considerado como polvo teniendo que descartarlo. Además de que se notó una ausencia de material retenido sobre el tamiz #16, que según la norma debería estar entre el 50 y 85% de material, pero se obtuvo únicamente un 48.67%; por lo que se tuvo que agregar material triturado individualmente después de la granulometría para evitar que la granulometría sea muy imprecisa. Cabe recalcar que las inconsistencias en la granulometría no son de gran importancia, esto debido a que cuando se realizó la elaboración de los hormigones se procedió a realizar un intercambio exacto entre



el porcentaje de arena a ser reemplazado con el del vidrio molido, es decir, que para cada porcentaje de arena a ser reemplazado se realizó la granulometría del mismo y se intercambié con vidrio molido en medidas exactas para cada peso retenido sobre cada tamiz, haciendo que no exista variabilidad en el peso final del agregado fino para la mezcla.

Para el caso de los ensayos de densidad, absorción y degradación; el agregado grueso cumplió con todos los parámetros necesarios establecidos en las normativas, siendo apto para su uso en la elaboración de hormigones. Por otra parte, el árido fino natural, mostro que la absorción estaba por debajo del rango normal, que es entre 2% y un 6%, con un valor de 1.2%, por lo cual se tuvo que hacer esta consideración para el diseño final de la dosificación. Sin embargo, para el vidrio molido no existe algún ensayo específico para obtener su densidad o absorción, entonces se realizó los mismos ensayos que fueron utilizados en el agregado fino natural para la obtención de estas características, pero con cierta inseguridad, porque la absorción del vidrio es casi nula con un valor de 0.03%, y debíamos llevar el material a un estado SSS, dando como resultado que la densidad era de 2.52 g/cm^3 y si se encontraba dentro del rango establecido entre 2.4 y 2.9 g/cm^3 .

4.1.1 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE LAS MEZCLAS PARA LOS HORMIGONES

Para el diseño de la dosificación del hormigón patrón se comprobó que cumpla con todas las normativas, tanto para su dosificación final como en la caracterización de cada uno de los componentes. Una vez comprobado esto se revisó que cumplan con los parámetros recomendados por la bibliografía. En el diseño de la mezcla para el hormigón patrón se utilizó una relación $a/c = 0.58$, que trabajo de manera muy adecuada consiguiendo una consistencia fluida en la mezcla.

Durante la elaboración de las probetas se pudo observar que la trabajabilidad del hormigón aumentaba levemente, según aumentaba el porcentaje de vidrio molido agregado a la mezcla, esto se debe a que el vidrio no posee la misma capacidad de absorción que tienen los agregados naturales ya que la absorción es casi nula en el vidrio, por lo que esto hace que exista un excedente de agua que no reacciona con el cemento, ni con los áridos, haciendo que la mezcla resulte un poco líquida. En el hormigón patrón se pudo obtener una consistencia blanda de 60mm, que según el rango establecido nos dice que para que cumpla esta consistencia debe estar entre 60 mm a 90 mm de asentamiento con el cono de Abrams. Para los hormigones con vidrio molido aumentaba la consistencia, pero se puede decir que siempre tendrá una consistencia blanda ya que nunca sobrepaso los 90 mm en el



ensayo de asentamiento. En base a esto, se puede proponer realizar ensayos con una disminución en la relación a/c, esto para evitar el excedente de agua en la mezcla, con lo cual lograríamos hormigones con mayores resistencias, pero manteniendo la misma cantidad de áridos usados.

4.1.2 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

Para comprobar la factibilidad del hormigón se sometió las probetas a distintos ensayos como son los de resistencia a compresión y resistencia a tracción indirecta realizados a los 7, 14 y 28 días de curado, con los cuales se obtuvo finalmente que todas las mezclas realizadas sobrepasan los 21 MPa de resistencia a compresión a los 28 días de curado, es decir, que todas las mezclas podrían ser consideradas como mezclas para hormigones estructurales como indica la Norma Ecuatoriana para la Construcción (NEC). El mejor rendimiento obtenido en el ensayo de compresión a los 28 días de curado, para los hormigones con la incorporación de vidrio molido, fue la mezcla que incorporaba un 10% de vidrio molido en reemplazo parcial del agregado fino, obteniendo una resistencia final de 28.2 MPa, un 4.4% de mejor resistencia que el hormigón patrón que tenía 27 MPa, de resistencia a compresión; mientras que la mezcla con el rendimiento más bajo fue la que incorporaba un 15% de vidrio molido con 26.5 MPa, es decir tuvo un valor de resistencia 1.85% menor que el hormigón patrón.

Al observar el comportamiento de las curvas de resistencia a la compresión, se pudo ver que a mayor cantidad de vidrio molido usado, la curva de resistencia tendía a crecer de forma lineal, mientras que, a menor porcentaje de vidrio, la curva más se aproximaba a la curva dada por el hormigón patrón, con lo que se puede decir que los hormigones con incorporación de vidrio molido aun no alcanzaban sus máximas resistencias, por lo que se debe realizar más ensayos a mayores tiempos para comprobar si esto es correcto.

Por otro lado, para el ensayo de resistencia a tracción indirecta se pudo comprobar que todas las resistencias finales a tracción de las mezclas de hormigones alternativos se encuentran por debajo de la resistencia final dada por el hormigón patrón que tiene un valor de 22.7 MPa, a los 28 días de curado. La mezcla con agregado reciclado que obtuvo el mejor desempeño fue la mezcla que tenía un 20% de vidrio molido alcanzando una resistencia a tracción final de 22.3 MPa, es decir un 0.15% menor en términos de resistencia a tracción con respecto a la resistencia alcanzada por el hormigón patrón. Estos resultados pueden deberse a que el vidrio tiene una mala adherencia por que posee una superficie lisa, lo que genera un plano



de falla mayor, ya que en este ensayo el agregado influye mucho más que la pasta de cemento, por estar sometido a mayores esfuerzos internos.

Finalmente, con el ensayo no destructivo de ultrasonido pudimos comprobar los resultados obtenidos en la resistencia a compresión, esto mediante la clasificación presentada por Leslie and Cheesman usando la velocidad de pulso. La calidad de los todos los hormigones ensayados fue buena, tanto para los hormigones patrones como para los hormigones ensayados a compresión y tracción ya que todos se encuentran en el rango de 3650 a 4570 m/s en cuanto a la velocidad de onda. Hay que mencionar que el ensayo de ultrasonido fue realizado únicamente a los hormigones con 28 días de curado, esto debido a que a esa edad representan los máximos valores de resistencia.

4.1.3 ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD

El uso de herramientas calificadoras y calculadoras para evaluar la sostenibilidad del hormigón pueden darnos un importante valor de lo que sería usarlo en proyectos a gran escala. En el caso de la herramienta computacional calificadora, Greenroads, que evalúa la sostenibilidad de una infraestructura vial, obtuvimos que para el caso en que se agregue un 25% de vidrio molido en reemplazo parcial del árido fino contribuye con 32 puntos de los de los 40 puntos mínimos requeridos para una certificación de nivel Bronce, siendo la mezcla que más puntos obtuvo, ya que la mezcla patrón alcanzo 19 puntos.

Por otro lado, mediante LEED y su herramienta computacional para construcciones nuevas y renovaciones importantes, pudimos obtener que, para el uso de vidrio molido en un reemplazo parcial de agregado fino, ya sea en cualquier porcentaje, se obtenía 17 puntos de los 19 puntos máximos que se podían obtener en las dos de sus ocho categorías contempladas (Materiales y Recursos; e Innovación) lo que nos indica que se obtuvo un 45% de los puntos mínimos necesarios para obtener una certificación (40 a 49 puntos). Entonces, podemos decir que los puntos alcanzados son un aporte significativo, ya que casi es la mitad de puntos necesarios, tomando en cuenta que solo se evaluaron en dos de las ocho categorías que contiene LEED.

Mediante la herramienta calculadora PaLate se pudo cuantificar el impacto ambiental que se produce con la emisión de gases durante la elaboración de los hormigones alternativos como del hormigón patrón, con lo que para la elaboración de 5000 m³ de hormigón como un ejemplo, se tuvo que la emisión de gases podría reducirse hasta en 15000 Kg de CO₂ emitidos al ambiente. Este valor fue incrementando a medida que el porcentaje de vidrio molido a usar iba aumentando,



es decir a mayor uso de material reciclado, mayor cantidad de gases emitidos se reducían.

Podemos decir que el uso de material reciclado es una gran alternativa ya que los resultados dados por las herramientas usadas son alentadores, esto a que se puede lograr certificaciones reconocidas internacionalmente y así mismo reducir la contaminación que se genera al medio ambiente durante una construcción, se puede lograr causar un gran impacto ambiental con el uso de materiales reciclados como un sustituto a los agregados de un hormigón tradicional que genera grandes cantidades de desechos y emisiones al ambiente.

4.1.4 PORCENTAJES ÓPTIMOS DE VIDRIO MOLIDO

Para obtener un porcentaje optimo, primero se analizó los resultados dados en la resistencia a la compresión a los 28 días de curado, en donde el mejor porcentaje de vidrio molido a ser usado es el que reemplaza un 10% del agregado fino natural ya que no solo mantiene las características del hormigón patrón, sino que las mejora alcanzando un 4.4% de resistencia mayor, pero se buscaba un porcentaje optimo, que sería el que mantiene las mismas características del hormigón patrón, el cual es de 18.7% de vidrio molido obtenido mediante probabilidad, con una línea de tendencia lo que demuestra que es un resultado confiable. Este valor de porcentaje óptimo es teórico, es decir que no se sabe si es el valor óptimo real, debido a que las curvas mostradas presentan una tendencia de crecimiento a mayores días de curado, por lo que mediante una extrapolación se pudo demostrar que el porcentaje de 10% de vidrio molido usado no era el único que alcanzaba y mejoraba la resistencia dada por el hormigón patrón, sino que todos los porcentajes de vidrio a usar podrían superar esta resistencia a los 56 días de curado, con lo cual para obtener un porcentaje optimo se debería disminuir la relación a/c y aumentar el porcentaje de vidrio molido a usar en las mezclas, además de probar las mezclas a mayores días de curado.

Así mismo, se analizó los resultados para tracción indirecta a los 28 días de curado, en donde ninguna de las mezclas alternativas alcanzo la resistencia dada por el hormigón patrón, pero se obtuvo un valor muy cercano con un valor menor en un 0.15% usando el 20% de vidrio molido. Entonces se puede concluir que el porcentaje optimo en términos físico – mecánicos es el uso de un 18.7% de vidrio molido en reemplazo parcial del agregado fino natural, ya que este debería mantener las propiedades físicas del hormigón patrón y también sus propiedades mecánicas, en términos de resistencia a la compresión alcanzando 270 Kg/cm² y en tracción 22.7 Kg/cm².



En términos de sostenibilidad, se encontró que para todas las herramientas usadas el porcentaje óptimo sería el que mayor cantidad de agregado reciclado se usaba en la mezcla, por lo que se puede decir que la mezcla con un 25% de vidrio molido es el que mejor beneficio medioambiental presenta, lo que nos indica que la mejor mezcla en términos de sostenibilidad y que ayudan al medio ambiente no es la mejor en los términos físico – mecánicos. Pero también se pudo observar que para cualquier mezcla que incorpore un porcentaje de vidrio molido se aporta un valor significativo para la obtención de certificaciones ambientales, así como también aporta de manera significativa en la reducción de emisiones al ambiente.

Finalmente, se puede concluir que el porcentaje óptimo de vidrio molido en reemplazo parcial del árido fino sería el que incorpora a su mezcla un 18.7%, ya que este cumple con todas las especificaciones físico – mecánicas que tiene el hormigón patrón a los 28 días de curado, establecidos en el alcance del trabajo de titulación y que también aporta de manera muy significativa al cuidado del medioambiente reduciendo emisiones y aprovechando el uso de desechos perjudiciales.

4.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda continuar investigando sobre el tema realizando ensayos de resistencia de probetas a un mayor tiempo de curado, el tiempo recomendado es de 56 días, esto para comprobar si a una mayor cantidad de vidrio la resistencia aumenta como se vio en la tendencia de las gráficas en los ensayos a compresión.

Se recomienda también realizar ensayos de resistencia con probetas corrigiendo la relación agua/cemento de las mezclas, ya que el árido reciclado al no absorber agua como los áridos naturales, existe un sobrante de agua el cual podría ser retirado y ganar resistencia en las mezclas.

Al momento de romper en pedazos más pequeños y en la molienda del vidrio, debe usarse siempre implementos de protección adecuados como guantes gruesos, gafas y mascarillas, ya que el vidrio al ser molido desprende un polvo muy fino que puede perjudicar la salud.

Al momento de almacenar los áridos y el cemento, buscar un lugar propicio sin que se altere sus condiciones de humedad.

Usar agregados en el mismo grado de humedad, en nuestro caso fue cero de humedad, ayuda en el diseño del hormigón, así como también en la elaboración del mismo.

Preparar moldes e implementos con anticipación, esto evita percances que durante la fundición de las probetas de hormigón se puedan dar, como el secado de la mezcla antes de ser colocada en los moldes.

Se debe seguir a cabalidad las normativas para elaboración y colocación en moldes de los especímenes de hormigón, el varillado y compactación de los especímenes



se debe realizar lo más uniforme posible en cada fundición, para así obtener menor porosidad en las muestras ya que esto afecta a los resultados a obtener de los ensayos mecánicos.

Estar preparados en cuanto a las condiciones climáticas de la región, ya que una fuerte lluvia puede alterar la relación agua/cemento al momento de fundir el hormigón en la concretera al aire libre.

Al momento de la fabricación de especímenes con vidrio, revisar la cantidad de agua ya que debido a la impermeabilidad del vidrio se obtienen mezclas con mayor trabajabilidad.

Antes de ensayar los especímenes así sea para compresión o tracción indirecta estos se deben secar, es recomendable media hora de descanso del cilindro sobre una de sus caras y otra media hora sobre la otra cara, así se evita la acumulación de agua proveniente del curado y que puedan provocar fallas innecesarias.

Para los especímenes a ser ensayados en tracción indirecta se recomienda realizar un marcado correcto de las líneas de centro donde van a ser colocados los esfuerzos, ya que un apoyo mal colocado puede provocar una falla con resultado no confiable.

Para los especímenes a ser ensayados en compresión se recomienda observar el estado de las placas de neopreno, ya que estas pueden estar en mal estado y hacer que la muestra se ladee al momento de realizar el ensayo y por consiguiente provoque una falla prematura.

Se recomienda que, para cada ensayo, ya sea a compresión o tracción indirecta, revisar con el operador la calibración y configuración del equipo a utilizar, ya que puede haberse variado la velocidad u otros factores según cada ensayo.



5 CAPITULO 5: BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, M., & Barrios, G. (2018). Producción de árido reciclado. Caribeña de Ciencias Sociales, (mayo).
- 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.
- Cabello, F. J. A. (2007). El impacto ambiental en la construcción industrial: criterios para una construcción sostenible. UNED. Universidad Nacional de Educación a Distancia (España).
- Calderón, Á. N. (2014). Uso y fomento del árido reciclado en hormigón estructural como oportunidad de mejora medioambiental y económica. Aplicación a la
- Castañeda, B., & Raúl, N. (2013). Propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos con agregado reciclado.
- Carrillo, 2016 «ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN AL EMPLEAR VIDRIO RECICLADO MOLIDO EN REEMPLAZO PARCIAL DEL AGREGADO FINO.», p. 114.
- M. Rodríguez y M. Ruiz, «Evaluación del desempeño de un hormigón con incorporación de vidrio reciclado finamente molido en reemplazo de cemento mediante ensayos de laboratorio», vol. 3, n.o 2, p. 8, 2016.
- V. Flores-Alés, V. Jiménez-Bayarri, y A. Pérez-Fargallo, «Influencia de la incorporación de vidrio triturado en las propiedades y el comportamiento a alta temperatura de morteros de cemento», Bol. Soc. Esp. Cerámica Vidr., abr. 2018.
- Almeida y Trujillo, «Principios básicos de la construcción sostenible utilizando vidrio triturado en la elaboración de hormigones», p. 248, 18 de abril del 2017
- C. Artega, «ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DEL VIDRIO MOLIDO EN HORMIGONES GRADO H15, H20, Y H30», Universidad Austral de Chile.
- Marcelo Castillo, "Investigación de la Utilización del Vidrio Molido como Material de Construcción y Técnicas Constructivas.", World Wildlife Fund (WWF), Isla Santa Cruz, Galápagos Ecuador, Informe 2, 21 junio. 2010.
- Y. Jani y W. Hogland, «Waste glass in the production of cement and concrete – A review», *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 2, n.º 3, pp. 1767-1775, sep. 2014.
- J. Cassar y J. Camilleri, «Utilisation of imploded glass in structural concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 29, pp. 299-307, abr. 2012.
- S. de Castro y J. de Brito, «Evaluation of the durability of concrete made with crushed glass aggregates», *J. Clean. Prod.*, vol. 41, pp. 7-14, feb. 2013.



- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). "Cemento Portland. Requisitos." Ecuador. NTE INEN 152, Sep. 2012.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). "Hormigón y Áridos
- "Propiedades Generales del Vidrio." [Abril. 21, 2016]
- INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. Capítulo 9 Vidrio. Primera Edición 2015 NEC. QUITO-ECUADOR: INEN.
- ACI, 1979. ACI Manual of Concrete Practice, 1979. American Concrete Institute.
- AASHTO, Standard Specifications for transportation materials and method of sampling and testing.
- AASHTO, Road test Report and pavement Research.
- ASTM – American Society for Testing and Materials, Standard Specifications and Practice for Soils and Aggregates
- Y. Shao, T. Lefort, S. Moras and D. Rodríguez, "Studies on concrete containing ground waste glass," Cement and Concrete Research, vol. 30, pp. 91-100, 2000.
- ACI 211. (1991). ACI 211.1, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal,
- Heavy Weight and Mass Concrete.
- Aguilar Sarmiento, E. E. (2015). Modelo de una planeación estratégica aplicada en la producción de pegantes y morteros en HORMICRETO CIA. LTDA.
- Aïtcin, P. (2008). Concreto de Alto Desempeño, Ciencia y Tecnología. 1º.
- ASTM. (2003). C09. ASTM C33-03, Standard Specification for Concrete Aggregates.
- ASTM 1602, C. (2012). Standard Specification for Mixing Water Used in the Hydraulic Cement Concrete.
- ASTM C150. (2012). Standard Specification for Portland Cement. ASTM International, West Conshohocken, Pennsylvania.
- ASTM C470. (2012). Standard Specifications for Molds for Forming Concrete Test Cylinders Vertically.
- ASTM C496. (1996). Método de prueba estándar para determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de hormigón.
- Astm, D. (2004). 422. *Standard test method for measurement of particle size analysis of soils. ASTM, Philadelphia, Pennsylvania, USA.*
- Niño Hernandez, J. (2010). Tecnología de concreto (Tercera Ed.). ASOCRETO.
- D. Hidalgo y R. Calderón. "Obtención de Adoquines Fabricados Con Vidrio Reciclado como Agregado." Tesis de Título, Ing. Mecánico, Facultad de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2013.



- C. Catalan. “Estudio de la Influencia del Vidrio Molido en Hormigones Grado H15, H20 y H30.” Tesis de título, Ingeniero Civil en Obras Civiles, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile, 2013.
- Roz-Ud-Din Nassar and Parviz Soroushian. (2011, Oct.). “Strength and durability of recycled aggregate concrete containing milled glass as partial replacement for cement.” *Construction and Building Materials J.*
- Parviz Soroushian. “Towards Broad use of Recycled Glass Concrete on MSU Campus.” [Marzo 12, 2016]
- Kosmatka E., et al. (2004) *Diseño y control de mezclas de concreto.*
- Sabnis, G. M. (Ed.). (2011). *Green building with concrete: Sustainable design and construction.* Boca Raton, FL: CRC Press.
- Mamlouk M.S., Zaniewski J.P. (2009). *Materiales para ingeniería civil*, 2da edición.
- I. Morán, D. Clavijo, M. Orrala (2009). *Proyecto de reingeniería de procesos de una recicladora de vidrios en la ciudad de guayaquil.* Guayaquil - Ecuador



6 CAPITULO 7: ANEXOS

Anexo 1

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido(g)	Peso retenido acumulado (g)	%retenido	%rete. Acumulado	%Pasa
1 "	25.00	0.00	0.00	0.00	0	100.00
3/4"	19.00	216.80	216.80	2.14	2.14	97.86
1/2"	12.50	2639.30	2856.10	26.00	28.14	71.86
3/8"	9.50	2195.20	5051.30	21.63	49.77	50.23
4	4.75	4334.60	9385.90	42.71	92.48	7.52
Fondo	0.00	763.70	10149.60	7.52	100	0.00
Total (g)		10149.6				

Tabla 40: Distribución granulométrica del agregado grueso.

Anexo 2

Tamiz	Abertura(mm)	Peso retenido (g)	Pes. Ret. acum (g)	%retenido	%rete. Acum	%pasa
#8	2.36	83.04	738.10	17.46	17.46	82.54
#10	2	18.85	756.95	3.96	21.42	78.58
#16	1.18	76.07	833.02	15.99	37.41	62.59
#30	0.6	130.06	963.08	27.34	64.75	35.25
#50	0.3	107.35	1070.43	22.57	87.32	12.68
#100	0.15	49.55	1119.98	10.42	97.74	2.26
#200	0.075	9.44	1129.42	1.98	99.72	0.28
Fondo		1.33	1130.75	0.28	100.00	0.00
Total (g)		475.69		100.00		

Tabla 41: Distribución granulométrica del agregado fino.

Anexo 3

Tamiz	Abertura(mm)	Peso retenido (g)	Pes. Ret. acum (g)	%retenido	%rete. Acum	%pasa
#8	2.36	254.00	738.10	12.71	12.71	87.29
#10	2	189.62	927.72	9.49	22.19	77.81
#16	1.18	582.41	1510.13	29.13	51.33	48.67
#30	0.6	372.43	1882.56	18.63	69.96	30.04
#50	0.3	263.35	2145.91	13.17	83.13	16.87



#100	0.15	173.80	2319.71	8.69	91.82	8.18
#200	0.075	120.00	2439.71	6.00	97.83	2.17
Fondo		43.44	2483.15	2.17	100.00	0.00
Total (g)		1999.05		100.00		

Tabla 42: Distribución granulométrica del vidrio molido.

Anexo 4

Peso arena SSS (g)	500	S
Peso matraz (g)	154.8	
Matraz +Agua(g)	650.9	B
M.+Agua+Arena(g)	954.8	C
Temperatura (°C)	22	
Arena SSS para absorción(g)	500	Sabs
Arena seca absorción(g)	494.2	Aabs
Arena seca(g)	445.1	A
Densidad relativa (SH) (kg/m3)	2264.086	
Densidad relativa (SSS) (kg/m3)	2543.345	
Densidad aparente (kg/m3)	3144.386	
Densidad Relativa (SH)	2.6976	
Densidad relativa (sss)	25497	
Densidad relativa aparente (sss)	3.1523	
Absorción	1.174	

Tabla 43: Densidad y absorción del agregado fino.

Anexo 5

Canasta susp. suspendida (g)	1019	
Árido en aire SSS (g)	3676.6	B
Ca. + Árido Sumergidos (g)	2825.3	
Ca. Sin árido sumergido (g)	893.3	
Árido seco (g)	3626.3	A
Masa aparente de muestra sum. (g)	1932	C
Densidad (SH) (kg/m3)	2073.39	
Densidad (SSS) (kg/m3)	2102.15	
Densidad aparente (kg/m3)	2134.94	
Densidad Relativa (SH)	2.0786	
Densidad relativa (sss)	2.1075	



Densidad relativa aparente (sss)	2.1403	
Absorción	1.387	
Masa Unitaria	1416.33	

Tabla 44: Densidad, absorción y masa unitaria del agregado grueso.

Anexo 6

TABLA 2. Gradación de las muestras de ensayo

Tamaño de las aberturas de tamiz (mm) (aberturas cuadradas)		Masa por tamaños indicada (g)			
Pasante de	Retenido en	Gradación			
		A	B	C	D
37,5	25,0	1 250 ± 25	---	---	---
25,0	19,0	1 250 ± 25	---	---	---
19,0	12,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	---	---
12,5	9,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	---	---
9,5	6,3	---	---	2 500 ± 10	---
6,3	4,75	---	---	2 500 ± 10	---
4,75	2,36	---	---	---	5 000 ± 10
	Total	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

Tabla 45: Gradación de las muestras de ensayo para abrasión (NTE INEN 860).

TABLA 1. Especificaciones para la carga

Gradación	Número de esferas	Masa de la carga (g)
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Tabla 46: Especificaciones para la carga en el ensayo de abrasión (NTE INEN 860).

Anexo 7

Humedad inicial de los áridos 0%			
Requisitos de resistencia			
f'c	270	kg/cm²	
f'c	27	MPa	
Relación a/c			
Hormigón no aireado			



a/c	0.58	
Valor de árido grueso por volumen		
Módulo de finura	3.260947256	
TMN	3/4	
Volumen de árido grueso compactado (Tabla 7.5)	0.53	
Densidad árido grueso	2073.39	kg/m ³
Absorción	0.0139	
masa unitaria	1416.33	kg
ARIDO GRUESO	750.6549	kg/m³
Contenido porcentual de aire		
Tabla 13	2	%
Grado de asentamiento		
máximo	7.5	cm
mínimo	2.5	cm
promedio	7.5	cm
Agua de diseño		
Tabla 14	205	kg/m ³
Reducción de agua	12	kg/m ³
AGUA	193	kg/m³
Cantidad de cemento		
Cemento calculado	332.76	kg/m ³
Cemento para diseño	333	kg/m³
Densidad cemento	2.9	g/cm ³
	2900	kg/m ³
Cantidad de arena		
Volumen aire	0.02	m ³
Volumen agua	0.193	m ³
Volumen cemento	0.115	m ³
Volumen árido grueso	0.362	m ³
Volumen arena	0.310	m ³
Densidad arena	2264.09	kg/m ³
ARENA	702.16	kg/m³
Absorción	0.011736139	

Tabla 47: Parámetros considerados para el diseño de 1m³ de hormigón.



Anexo 8

7 DÍAS COMPRESION HP%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	160	19.7	200.815				
MUESTRA 2	137	16.8	171.254	Se elimina			
MUESTRA 3	161	19.8	201.835				
PROM	152.667	18.767	201.325				
14 DÍAS COMPRESION HP%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	203	25.8	262.997				
MUESTRA 2	210	26.7	272.171				
MUESTRA 3	200	25.5	259.939				
PROM	204.333	26.000	265.036				
28 DÍAS COMPRESION HP%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.			ULTRASONIDO			
	KN	MPa	Kg/cm ²	t [us]	l [m]	v [m/s]	
MUESTRA 1	220	27	275.23	56	0.203	3630	
MUESTRA 2	212	26	265.04	56	0.203	3630	
MUESTRA 3	206	25.3	257.90	56.1	0.203	3620	Se elimina
PROM	212.667	26.100	270.10	56.033	0.203	3626.667	

Tabla 48: Resultados finales de todas las muestras del hormigón patrón a compresión.

7 DÍAS COMPRESION 10%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	170	21.5	219.164				
MUESTRA 2	149	18.4	187.564	Se elimina			
MUESTRA 3	175	22.3	227.319				



PROM	164.667	20.733	223.200				
14 DÍAS COMPRESION 10%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	145	18.5	188.583	Se elimina			
MUESTRA 2	198	25.2	256.881				
MUESTRA 3	204	26	265.036				
PROM	182.333	23.233	261.000				
28 DÍAS COMPRESION 10%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.			ULTRASONIDO			
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	221	27.4	279.31	53.9	0.2	3710	
MUESTRA 2	202	24.8	252.80	55.9	0.2	3580	Se elimina
MUESTRA 3	227	27.9	284.40	55.7	0.2	3590	
PROM	216.667	26.700	281.90	55.167	0.200	3626.667	

Tabla 49: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 10% de vidrio molido a compresión.

7 DÍAS COMPRESION 15%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	147	18.3	186.544				
MUESTRA 2	159	19.8	201.835				
MUESTRA 3	156	19.4	197.757				
PROM	154	19.167	195.379				
14 DÍAS COMPRESION 15%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	191	24.3	247.706				
MUESTRA 2	174	22.2	226.300				
MUESTRA 3	150	19.1	194.699	Se elimina			
PROM	171.667	21.867	237.000				



28 DÍAS COMPRESION 15%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.			ULTRASONIDO			
	KN	MPa	Kg/cm ²	t [us]	l [m]	v [m/s]	
MUESTRA 1	206	26.1	266.06	52.4	0.2	3820	
MUESTRA 2	180	22.1	225.28	54.4	0.2	3580	Se elimina
MUESTRA 3	211	25.9	264.02	56.4	0.2	3590	
PROM	199	24.700	265.00	54.4	0.2	3663.333	

Tabla 50: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 15% de vidrio molido a compresión.

7 DÍAS COMPRESION 20%									
# MUESTRA	FUERZA MAX.								
	KN	MPa	Kg/cm ²						
MUESTRA 1	157	19.3	196.738						
MUESTRA 2	152	18.7	190.622						
MUESTRA 3	151	18.6	189.602						
PROM	153.333	18.867	192.321						
14 DÍAS COMPRESION 20%									
# MUESTRA	FUERZA MAX.								
	KN	MPa	Kg/cm ²						
MUESTRA 1	191	24.3	247.706						
MUESTRA 2	176	22.4	228.338						
MUESTRA 3	176	22.4	228.338						
PROM	181	23.033	234.794						
28 DÍAS COMPRESION 20%									
# MUESTRA	FUERZA MAX.			ULTRASONIDO					
	KN	MPa	Kg/cm ²	t [us]	l [m]	v [m/s]			
MUESTRA 1	208	26.5	270.13	52.2	0.2	3830			
MUESTRA 2	213	27.1	276.25	51.2	0.2	3910			
MUESTRA 3	208	26.5	270.13	50.4	0.2	3970			
PROM	209.667	26.700	272.17	51.267	0.200	3903.333			

Tabla 51: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 20% de vidrio molido a compresión.

7 DÍAS COMPRESION 25%									
# MUESTRA	FUERZA MAX.								
	KN	MPa	Kg/cm ²						
MUESTRA 1	156	19.9	202.854						
MUESTRA 2	161	20.5	208.970						
MUESTRA 3	160	20.4	207.951						
PROM	159	20.267	206.592						



14 DÍAS COMPRESION 25%						
# MUESTRA	FUERZA MAX.					
	KN	MPa	Kg/cm2			
MUESTRA 1	151	19.2	195.719			
MUESTRA 2	172	21.9	223.242			
MUESTRA 3	172	21.9	223.242			
PROM	165	21	214.067			
28 DÍAS COMPRESION 25%						
# MUESTRA	FUERZA MAX.			ULTRASONIDO		
	KN	MPa	Kg/cm2	t [us]	l [m]	v [m/s]
MUESTRA 1	216	27.5	280.33	49.4	0.2	4050
MUESTRA 2	199	25.3	257.90	49.8	0.2	4020
MUESTRA 3	199	25.3	257.90	49.2	0.2	4070
PROM	204.667	26.033	265.38	49.467	0.200	4046.667

Tabla 52: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 25% de vidrio molido a compresión.

Anexo 9

7 DÍAS TRACCION HP%						
# MUESTRA	FUERZA MAX.					
	KN	MPa	Kg/cm ²			
MUESTRA 1	47.1	1.47	14.985			
MUESTRA 2	40.9	1.3	13.252			
MUESTRA 3	44.5	1.39	14.169			
PROM	44.167	1.387	14.135			
14 DÍAS TRACCION HP%						
# MUESTRA	FUERZA MAX.					
	KN	MPa	Kg/cm ²			
MUESTRA 1	46.1	1.44	14.679	Se elimina		
MUESTRA 2	58.8	1.84	18.756			
MUESTRA 3	49.3	1.54	15.698			
PROM	51.4	1.607	17.200			
28 DÍAS TRACCION HP%						
# MUESTRA	FUERZA MAX.			ULTRASONIDO		
	KN	MPa	Kg/cm ²	t [us]	l [m]	v [m/s]



MUESTRA 1	74.4	2.37	24.16	55.6	0.203	3650	
MUESTRA 2	65.8	2.09	21.30	54.6	0.203	3720	
MUESTRA 3	59	1.88	19.16	54.3	0.203	3740	Se elimina
PROM	66.4	2.113	22.70	54.833	0.203	3703	

Tabla 53: Resultados finales de todas las muestras del hormigón patrón a tracción.

7 DÍAS TRACCION 10%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	43.7	1.39	14.169				
MUESTRA 2	41.9	1.33	13.558				
MUESTRA 3	37.2	1.18	12.029				
PROM	40.933	1.3	13.252				
14 DÍAS TRACCION 10%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	50.1	1.59	16.208				
MUESTRA 2	48.8	1.55	15.800				
MUESTRA 3	44.9	1.43	14.577				
PROM	47.933	1.523	15.528				
28 DÍAS TRACCION 10%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.			ULTRASONIDO			
	KN	MPa	Kg/cm ²	t [us]	l [m]	v [m/s]	
MUESTRA 1	44.6	1.42	14.48	49.3	0.2	4060	Se elimina
MUESTRA 2	69	2.2	22.43	49.6	0.2	4030	
MUESTRA 3	52.4	1.67	17.02	49.4	0.2	4050	
PROM	55.333	1.763	19.70	49.433	0.200	4046.667	

Tabla 54: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 10% de vidrio molido a tracción.

7 DÍAS TRACCION 15%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						



	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	44.1	1.4	14.271				
MUESTRA 2	37.9	1.21	12.334				
MUESTRA 3	39	1.22	12.436				
PROM	40.333	1.277	13.014				
14 DÍAS TRACCION 15%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	32.9	1.05	10.703	Se elimina			
MUESTRA 2	48.4	1.54	15.698				
MUESTRA 3	47.6	1.52	15.494				
PROM	42.967	1.370	15.600				
28 DÍAS TRACCION 15%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.			ULTRASONIDO			
	KN	MPa	Kg/cm ²	t [us]	l [m]	v [m/s]	
MUESTRA 1	68.3	2.27	23.14	52.5	0.2	3810	
MUESTRA 2	57.1	1.9	19.37	54.6	0.2	3670	
MUESTRA 3	47.5	1.51	15.39	53.8	0.2	3720	Se elimina
PROM	57.633	1.893	21.30	53.633	0.200	3733.333	

Tabla 55: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 15% de vidrio molido a tracción.

7 DÍAS TRACCION 20%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	38.3	1.22	12.436				
MUESTRA 2	41.4	1.32	13.456				
MUESTRA 3	36	1.15	11.723				
PROM	38.567	1.230	12.538				
14 DÍAS TRACCION 20%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				



MUESTRA 1	43.3	1.38	14.067				
MUESTRA 2	47.9	1.52	15.494				
MUESTRA 3	64.4	2.05	20.897				
PROM	51.867	1.650	16.820				
28 DÍAS TRACCION 20%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.			ULTRASONIDO			
	KN	MPa	Kg/cm ²	t [us]	l [m]	v [m/s]	
MUESTRA 1	57.5	1.83	18.65	52.7	0.2	3800	
MUESTRA 2	47.2	1.5	15.29	50.3	0.2	3980	Se elimina
MUESTRA 3	79.8	2.54	25.89	51.2	0.2	3910	
PROM	61.5	1.957	22.30	51.4	0.2	3896.667	

Tabla 56: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 20% de vidrio molido a tracción.

7 DÍAS TRACCION 25%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	41.8	1.33	13.558				
MUESTRA 2	34.3	1.09	11.111				
MUESTRA 3	42.5	1.35	13.761				
PROM	39.533	1.257	12.810				
14 DÍAS TRACCION 25%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.						
	KN	MPa	Kg/cm ²				
MUESTRA 1	51.2	1.63	16.616				
MUESTRA 2	57	1.81	18.451				
MUESTRA 3	53.4	1.7	17.329				
PROM	53.867	1.713	17.465				
28 DÍAS TRACCION 25%							
# MUESTRA	FUERZA MAX.			ULTRASONIDO			
	KN	MPa	Kg/cm ²	t [us]	l [m]	v [m/s]	
MUESTRA 1	47.4	1.51	15.39	53.4	0.2	3750	
MUESTRA 2	51.7	1.65	16.82	53.6	0.2	3730	
MUESTRA 3	57	1.81	18.45	52.8	0.2	3790	
PROM	52.033	1.657	16.90	53.267	0.200	3756.667	

Tabla 57: Resultados finales de todas las muestras del hormigón con 25% de vidrio molido a tracción.

Anexo 10



Ilustración 42: Elementos de hormigón de distintas mezclas ensayados a los 7 días para compresión.



Ilustración 43: Elementos de hormigón de distintas mezclas ensayados a los 14 días para compresión.



Ilustración 44: Elementos de hormigón de distintas mezclas ensayados a los 28 días para compresión.

Anexo 11



Ilustración 45: Elementos de hormigón de distintas mezclas ensayados a los 7 días para tracción.



Ilustración 46: Elementos de hormigón de distintas mezclas ensayados a los 14 días para tracción.



Ilustración 47: Elementos de hormigón de distintas mezclas ensayados a los 28 días para tracción.