



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

“Elaboración de paneles de hormigón prefabricado con fibras de caucho
incorporado proveniente de neumáticos fuera de uso”

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

Autores:

Mateo Sebastián Chazi Inga

CI: 0105852263

Mario Paúl Orellana González

CI: 0105609366

Director:

Ing. Daniel Estuardo Mogrovejo Carrasco M.Sc.Ph.D

CI:0301500476

Cuenca, Ecuador

Octubre - 2019



Resumen

En la búsqueda de alternativas a elementos constructivos que cumplan con parámetros de calidad, tanto en fabricación, como en funcionamiento, se plantea la utilización de paneles de hormigón, bajo un enfoque de construcciones sostenibles, que plantean la utilización de elementos reciclados o fuera de uso, para la elaboración de estos elementos. El presente proyecto de investigación tiene como finalidad analizar el comportamiento de paneles prefabricados no estructurales de hormigón alternativo, incorporando caucho proveniente de neumáticos fuera de uso, bajo condiciones normales de servicio y determinar si su utilización en proyectos de construcción es factible desde el punto de vista de la seguridad, economía, así como su implicancia en alcanzar una sostenibilidad medioambiental.

Mediante un proceso experimental, se desarrollaron ensayos a los agregados que conformaron las diferentes mezclas de hormigón, para verificar parámetros de calidad. Para definir el porcentaje óptimo de caucho, se consideró la incorporación de caucho en reemplazo de volumen de árido fino en diferentes porcentajes, seleccionando como porcentaje óptimo a la mezcla de hormigón que brindó una resistencia a compresión de 210 kg/cm^2 . Se analizó el comportamiento de los paneles en condiciones de servicio, ensayándose bajo cargas compresivas y transversales, se verificó su aprobación en obra en base a requerimientos de servicio.

Para analizar la factibilidad de los paneles, se comparó entre las mezclas de diseño alternativo y patrón, desde el punto de vista económico, así como en la reducción de consumo de energía y emisión de CO_2e , los cuales reflejaron una mejora en todos estos aspectos.

Palabras Claves:

Construcción Sostenible. Paneles no estructurales. Mampostería. Sostenibilidad Medioambiental.



Abstract

In the search for alternatives to construction elements that comply with quality parameters, both in manufacturing and in operation, the use of concrete panels is proposed, under a sustainable construction approach, which proposes the use of recycled or out-of-use elements, for the elaboration of these elements. The purpose of this research project is to analyze the behavior of prefabricated non-structural panels of alternative concrete, incorporating rubber from out-of-use tires, under normal service conditions and determine if its use in construction projects is feasible from the point of view of security, economy, as well as its implication in achieving environmental sustainability.

Through an experimental process, tests were carried out on the aggregates that formed the different concrete mixtures, to verify quality parameters. In order to define the optimum percentage of rubber, the incorporation of rubber in replacement of fine aggregate volume in different percentages was considered, selecting as an optimum percentage the concrete mixture that provided a compressive strength of 210 kg / cm². The behavior of the panels in service conditions was analyzed, tested under compressive and transverse loads, their approval on site was verified based on service requirements.

To analyze the feasibility of the panels, it was compared between the mixtures of alternative and standard design, from the economic point of view, as well as in the reduction of energy consumption and CO₂e emission, which reflected an improvement in all these aspects.

Keywords:

Sustainable Construction. Non-structural Panels. Masonry. Environmental Sustainability.



ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Planteamiento del problema.....	16
1.2 Justificación	16
1.3 Alcance	17
1.4 Hipótesis	17
1.5 Objetivos.....	17
1.5.1 Objetivo general.....	17
1.5.2 Objetivos específicos	18
2. MARCO TEORICO.....	19
2.1 CARACTERIZACION Y CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES PARA MEZCLAS DE HORMIGON	19
2.1.1 Granulometría	19
2.1.2 Masa Unitaria.....	20
2.1.3 Densidad relativa y Absorción.....	20
2.1.4 Porcentaje de espacios y Finos en el árido.....	22
2.1.5 Partículas desmenuzables en el árido.....	23
2.1.6 Abrasión del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la Máquina de los Ángeles.....	23
2.2 HORMIGÓN.....	24
2.2.1 Componentes del hormigón	24
2.3 DISEÑO DE LA MEZCLA DE HORMIGON PATRON.....	26
2.3.1 Elección del asentamiento.....	26
2.3.2 Cálculo del agua de mezclado y contenido de aire	27
2.3.3 Elección de la relación agua/cemento.....	27
2.3.4 Cálculo del contenido de cemento	28
2.3.5 Estimación del contenido de agregado mineral	28
2.3.6 Estimación del contenido de árido grueso	28
2.3.7 Estimación del contenido de árido fino.....	29
2.4 ELABORACIÓN DE MEZCLAS	29
2.4.1 Mezcla de hormigón patrón	29
2.4.2 Mezcla de hormigón alternativo	29
2.5 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO	29
2.5.1 Ensayo de resistencia a la compresión	30
2.5.2 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta.....	30
2.5.3 Módulo de elasticidad	31
2.5.4 Densidad del hormigón endurecido	32
2.6 PANELES	33
2.6.1 Historia de los paneles prefabricados de hormigón	33
2.6.2 Fabricación de los paneles	33
2.6.3 Tipos de paneles.....	34
2.6.4 Estabilidad estructural paneles no portantes	35
2.6.5 Forma y dimensiones de los paneles.....	36
2.6.6 Dimensiones de los paneles arquitectónicos	36
2.6.7 Elaboración de paneles	37
2.6.8 Ensayos en paneles	39
2.7 ANALISIS DE COSTOS.....	40
2.8 SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL	41
2.8.1 LEED	42
2.8.2 GREENROADS.....	43
2.8.3 PaLATE	44



3. METODOLOGÍA	45
3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS ARIDOS	45
3.1.1 Granulometría	45
3.1.1.1 Granulometría Árido Grueso	46
3.1.1.2 Granulometría Árido Fino.....	47
3.1.2 Masa Unitaria.....	47
3.1.3 Densidad Relativa y Absorción.....	49
3.1.3.1 Árido Fino.....	49
3.1.3.2 Árido Grueso.....	51
3.1.4 Porcentaje de espacios y finos en el árido.....	53
3.1.5 Partículas desmenuzables en el árido	53
3.1.6 Abrasión del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la Máquina de los Ángeles	53
3.1.7 Caracterización del material reciclado	54
3.1.7.1 Granulometría del caucho reciclado	54
3.1.7.2 Masa unitaria de la fibra de caucho	56
3.2 DISEÑO Y ELABORACION DE MEZCLAS	57
3.2.1 Mezcla de Hormigón Patrón	57
3.2.2 Mezcla de Hormigón Alternativo	57
3.2.3 Elaboración de especímenes de Hormigón	58
3.3 ENSAYOS DE HORMIGÓN ENDURECIDO	61
3.3.1 Ensayos de Resistencia a compresión.....	61
3.3.2 Ensayos de Resistencia a tracción indirecta.....	62
3.3.3 Ensayo de Módulo de elasticidad.....	62
3.3.4 Ensayos de Densidad del Hormigón endurecido	63
3.4 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE PANELES.....	64
3.4.1 Diseño del sistema de encofrado.....	64
3.4.2 Elaboración de paneles de hormigón	64
3.5 ENSAYO DE PANELES	66
3.5.1 Carga Compresiva.....	66
3.5.2 Carga Transversal	67
3.6 ANALISIS DE COSTOS.....	68
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	70
4.1 Caracterización y Control de calidad de los agregados para mezclas de hormigón.....	70
4.2 Ensayos de Resistencia a compresión.....	70
4.3 Ensayos Resistencia a tracción indirecta.....	72
4.4 Ensayo Módulo de Elasticidad.....	73
4.5 Ensayos Densidad Hormigón endurecido	75
4.6 Ensayo de los Paneles	78
4.6.1 Carga Compresiva.....	78
4.6.2 Carga Transversal	81
4.7 ANALISIS DE COSTOS.....	85
4.8 SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL	93
4.8.1 Análisis LEED	93
4.8.2 Análisis Greenroads	94
4.8.3 Análisis PaLATE	95
4.8.4 Escenario de aplicación.....	97
5. CONCLUSIONES	99
Referencias.....	101
Anexos	104



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de diseño del hormigón.....	26
Figura 2. Método de cuerda, Curva esfuerzo-deformación. Recuperado de (Kosmatka, 2004).....	31
Figura 3. Moldes prefabricados. Recuperado de (Sánchez J. F., 2010).....	34
Figura 4. Paneles prefabricados. Recuperado de (Sánchez J. F., 2010).....	34
Figura 5. Tipo de panel portante. Recuperado de (INTEMAC, 1999).....	35
Figura 6. Tipo de panel no portante. Recuperado de (INTEMAC, 1999).....	35
Figura 7. Tipo de paneles, abierto y cerrado. Recuperado de (INTEMAC, 1999).....	36
Figura 8. Transición de masas. Recuperado de (INTEMAC, 1999).....	36
Figura 9. Dimensiones del molde de encofrado.....	37
Figura 10. Método de aplicación de carga axial Recuperado de (NCMA, 2019).....	39
Figura 11. Método aplicación de carga transversal Recuperado de (NCMA, 2019).....	40
Figura 12. Certificación LEED.....	43
Figura 13. Granulometría Árido Grueso.....	45
Figura 14. Distribución granulométrica Árido Grueso.....	46
Figura 15 distribución granulométrica Árido Fino.....	47
Figura 16. Ensayo Masa Unitaria, árido grueso.....	48
Figura 17. Determinación del estado SSS, árido fino.....	50
Figura 18. Determinación del peso seco, árido fino.....	50
Figura 19. Determinación de la densidad, árido grueso.....	52
Figura 20. Máquina de los Ángeles.....	54
Figura 21. Muestra de caucho, tras granulometría.....	55
Figura 22. Granulometría Material Reciclado.....	56
Figura 23. Lavado del árido, a usar en las mezclas de hormigón.....	58
Figura 24. Obtención y mezcla del caucho con el agregado fino.....	59
Figura 25. Proceso de mezclado del hormigón.....	59
Figura 26. Medición de asentamiento.....	60
Figura 27. Cilindros, previo al vaciado de hormigón.....	60
Figura 28. Fraguado inicial de especímenes de hormigón.....	61
Figura 29. Ensayo de resistencia a compresión.....	61
Figura 30. Ensayo resistencia a la tracción.....	62
Figura 31 Ensayo de Módulo de elasticidad.....	63
Figura 32. Especímenes para densidad de hormigón endurecido.....	63
Figura 33. Preparación del sistema de encofrado.....	65
Figura 34. Vaciado y compactación de la mezcla de hormigón.....	65
Figura 35. Fraguado inicial y desencofrado de los paneles.....	66
Figura 36. Proceso de curado del hormigón.....	66
Figura 37. Método de ensayo, carga compresiva.....	67
Figura 38. Modo de ensayo, Carga Transversal.....	68
Figura 39: Dimensiones del edificio propuesto.....	68
Figura 40. Relación Resistencia-Edad hormigón.....	71
Figura 41. Curva Resistencia- Porcentaje de caucho.....	71
Figura 42. Comportamiento de hormigón alternativo-tracción.....	72
Figura 43. Comportamiento Módulo de Elasticidad, Hormigón patrón.....	74
Figura 44. Comportamiento Módulo de Elasticidad, Hormigón alternativo.....	74
Figura 45. Comportamiento Módulo de Elasticidad-Incorporación de caucho.....	75
Figura 46. Comportamiento de las diferentes mezclas de hormigón.....	75
Figura 47. Comparación Parámetros de absorción y vacíos con incorporación de caucho.....	76
Figura 48. Porosidad en especímenes de hormigón.....	77
Figura 49. Densidad del hormigón endurecido.....	77
Figura 50: Ciclos de carga paneles de hormigón patron.....	79
Figura 51: Ciclos de carga paneles de hormigón alternativo.....	80
Figura 52: Ciclos de carga panel de hormigón patron-A.....	80
Figura 53: Ciclos de carga del panel de hormigón patron número 1.....	81



Figura 54: Ciclos de carga del panel de hormigón patron número 2 81

Figura 55. Ciclo de Carga del panel de hormigón alternativo número 1 82

Figura 56: Ciclos de carga del panel de hormigón alternativo número 2 82

Figura 57: Analisis de carga versus deformación total, carga transversal 83

Figura 58. Análisis de carga versus deformación permanente, carga transversal..... 83

Figura 59. Relación Porcentaje de Caucho-Costo..... 88

Figura 60: ETABS Área de acero de refuerzo en vigas del edificio de hormigón tradicional..... 89

Figura 61: ETABS Área de acero de refuerzo en vigas del edificio de hormigón alternativo..... 90

Figura 62: ETABS Área de acero de refuerzo en columnas del edificio de hormigón tradicional..... 91

Figura 63: ETABS Área de acero de refuerzo en columnas del edificio de hormigón alternativo..... 91

Figura 64: Cantidad de hormigón requerido, mezclas de diseño. 92

Figura 65 Checklist LEED V4 93

Figura 66. Checklist Greenroads V2..... 94

Figura 67. Mezcla de diseño, hormigón tradicional..... 95

Figura 68. Análisis medioambiental de la mezcla de hormigón tradicional. 95

Figura 69. Mezcla de diseño, hormigón alternativo..... 96

Figura 70. Análisis Medioambiental de la mezcla de hormigón alternativo..... 96

Figura 71. Valores cotidianos de la reducción de CO₂e..... 97

Figura 72. Mezcla de diseño, viviendas sociales, elementos estructurales 97

Figura 73. Mezcla de diseño, viviendas sociales, paneles no estructurales 98

Figura 74. Valores cotidianos de la reducción de CO₂e, escenario aplicación 98



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Tamaño de la muestra de ensayo	19
Tabla 2 Masas por tamaños indicados para abrasión	24
Tabla 3 Asentamiento del hormigón	27
Tabla 4 Contenido de agua de mezclado del hormigón	27
Tabla 5 Resistencia requerida del hormigón a elaborar	28
Tabla 6 Relación agua/cemento de acuerdo a la resistencia requerida	28
Tabla 7 Volumen de agregado grueso para 1 m ³ de hormigón	28
Tabla 8 Factor de corrección.....	30
Tabla 9 Cargas Transversales a la rotura	40
Tabla 10 Deflexión en cargas transversales	40
Tabla 11 Granulometría árido grueso	46
Tabla 12 Granulometría árido fino.....	47
Tabla 13 Peso Volumétrico Seco Compacto (PVSC).....	49
Tabla 14 Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS).....	49
Tabla 15 Densidad y absorción árido fino	51
Tabla 16 Densidad y absorción árido grueso	52
Tabla 17 Porcentaje de espacios y finos	53
Tabla 18 Partículas desmenuzables.....	53
Tabla 19 Determinación de abrasión	54
Tabla 20 Granulometría Caucho	55
Tabla 21 Peso unitario o volumétrico del caucho	56
Tabla 22 Diseño de mezcla de hormigón patrón.....	57
Tabla 23 Dosificación de mezclas de hormigón alternativo	58
Tabla 24 Trabajabilidad	60
Tabla 25 Datos obtenidos ensayo densidad hormigón endurecido	64
Tabla 26 Diseño del encofrado	64
Tabla 27 Cargas de diseño	69
Tabla 28 Propiedades del hormigón de diseño	69
Tabla 29 Caracterización y Control de calidad de los agregados	70
Tabla 30 Ensayos resistencia-compresión	70
Tabla 31 Ensayos resistencia a tracción indirecta.....	72
Tabla 32 Determinación del Módulo de Elasticidad.....	73
Tabla 33 Parámetros de las mezclas de hormigón endurecido	76
Tabla 34 Criterio aceptación bajo cargas transversales	84
Tabla 35 Dimensiones de las vigas de cada piso, Hormigón Tradicional.....	85
Tabla 36 Dimensiones de las vigas de cada piso, Hormigón Alternativo.....	85
Tabla 37 Dimensiones de las columnas de cada piso, Hormigón Tradicional.....	86
Tabla 38 Dimensiones de las columnas de cada piso, Hormigón Alternativo.....	86
Tabla 39 Dimensiones de las zapatas, Hormigón Tradicional.....	86
Tabla 40 Dimensiones de las zapatas, Hormigón Alternativo.....	87
Tabla 41 Análisis de Precios Unitarios de la mezcla de hormigón alternativo.....	88
Tabla 42 Análisis de costos función resistencia.....	89
Tabla 43 Cantidad de hormigón requerido para cada alternativa de mezcla	89
Tabla 44 Cantidad de acero de refuerzo en vigas, para cada tipo de hormigón.....	90
Tabla 45 Cantidad de acero de refuerzo, columnas para cada tipo de hormigón.....	91
Tabla 46 Costo total reducción presupuesto	92
Tabla 47 Análisis Sostenibilidad Mediomambiental, edificio	96
Tabla 48 Análisis Sostenibilidad Medioambiental, viviendas sociales.....	98



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Mateo Sebastián Chazi Inga en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“Elaboración de paneles de hormigón prefabricado con fibras de caucho incorporado proveniente de neumáticos fuera de uso”**, 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, 25 de octubre de 2019

Mateo Sebastián Chazi Inga

C.I: 0105852263



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio
Institucional

Mario Paúl Orellana González en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación **“Elaboración de paneles de hormigón prefabricado con fibras de caucho incorporado proveniente de neumáticos fuera de uso”**, 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, 25 de octubre de 2019

Mario Paúl Orellana González

C.I: 0105609366



Cláusula de Propiedad Intelectual

Mateo Sebastián Chazi Inga, autor del trabajo de titulación "Elaboración de paneles de hormigón prefabricado con fibras de caucho incorporado proveniente de neumáticos fuera de uso", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 25 octubre de 2019



Mateo Sebastián Chazi Inga

C.I: 0105852263



Cláusula de Propiedad Intelectual

Mario Paúl Orellana González, autor del trabajo de titulación "Elaboración de paneles de hormigón prefabricado con fibras de caucho incorporado proveniente de neumáticos fuera de uso", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 25 octubre de 2019

Mario Paúl Orellana González

C.I: 0105609366



Dedicatoria

Agradezco a Dios, por ser mi guía y protección en este trascurso de mi vida, brindándome la sabiduría necesaria para cumplir mis metas. A mis padres Jorge y Diana, por ser un pilar fundamental, por ser mi fortaleza, pero sobre todo por haber confiado en mí, incluso cuando ni yo lo hacía.

A mis hermanos Nathaly y Oswaldo, así como a mi sobrino Tomás, por llenar mi vida de alegría y amor, pero sobre todo por motivarme a superar todas las adversidades que encontré en este largo transitar.

Mateo Sebastián Chazi Inga

Antes que nada, quiero darle gracias a Dios por darme las fuerzas de seguir adelante a pesar de las adversidades, también agradecerle a Dios por darme unos padres maravillosos, Mario y Sonia que han sido el mejor apoyo que tuve durante toda mi carrera, quienes me brindaron su apoyo en todos los aspectos y me guiaron a hacer las cosas bien.

A mi hermano Matías, quien es la alegría de mi vida, que con su carisma me motiva cada día a ser mejor e intentar ser el orgullo de él. A mis sobrinos y en especial a mi sobrina Kiara que con ternura y carismáticas palabras de aliento me daba una razón más para seguir esforzándome durante todo este tiempo.

A mi enamorada Carolina quien confió en mi desde un principio y estuvo ahí cuando más la necesitaba.

Mario Paul Orellana González



Agradecimiento

A la Universidad de Cuenca y sus docentes, por formarnos durante estos años y otorgarnos los conocimientos necesarios para nuestro desenvolvimiento personal y profesional.

A las empresas Durallanta S.A. y Hormicroto Cía. Ltda. por habernos brindado el material reciclado y los áridos, respectivamente, materiales necesarios e indispensables para realizar este proyecto de investigación.

A nuestro director de tesis, el ingeniero Daniel E. Mogrovejo C. M.Sc. Ph.D. por el apoyo manifestado desde un inicio, por el tiempo y dedicación que nos brindó para que pueda desarrollarse nuestro trabajo de titulación.

Al ingeniero Fabián Carrasco y a la ingeniera Diana Mora, por su apoyo y oportunas recomendaciones brindadas para que pueda ejecutar este proyecto investigativo.

A Bryan Coronel, por su oportuna colaboración y el apoyo que nos brindó para que este trabajo se desarrolle de manera satisfactoria.

Mateo Sebastián Chazi Inga

Mario Paul Orellana González



1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, un claro indicador de la prosperidad de un país es el desarrollo del sector constructivo, pues este refleja hasta cierto punto las condiciones de vida que poseen sus habitantes. De igual manera en un mundo cada vez más globalizado, se ha convertido en una prioridad el equilibrio entre el desarrollo económico y la construcción de proyectos de carácter civil, de tal manera que permitan satisfacer las más básicas necesidades de los seres humanos. Este desarrollo de la industria de la construcción, ha conllevado a la búsqueda de alternativas cada vez más eficientes en la sistematización de sus procesos, de igual forma en años recientes han tomado impulso diferentes iniciativas que se fundamentan en la reutilización de recursos, es así, que se ha planteado la incorporación de materiales reciclados como elementos constructivos. Estas iniciativas se sustentan en datos relacionados con el sector de la construcción pues se estima que utiliza cerca del 40% de las materias primas explotadas actualmente, alcanzando un valor de 3.000 millones de toneladas por año, y es debido a la continua extracción de materiales pétreos, la contaminación generada en este proceso va en aumento (Acevedo, Vásquez, & Ramírez, 2012). Dentro de las muchas alternativas vinculadas con la reutilización de materiales, los neumáticos fuera de uso son los que más han llamado la atención, es así que considerando los datos que presenta la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), las micropartículas de plásticos desprendidas de productos industriales como ropa sintética y neumáticos representan hasta el 30% de la basura que contamina los océanos (Agencia EFE, 2019).

En Ecuador, la realidad no cambia demasiado es así que de acuerdo al Ministerio del Ambiente (MAE), en el país se desechan anualmente 2'400.000 neumáticos, de los cuales la gran mayoría terminan en sitios en los que no reciben ningún tratamiento como en botaderos al aire libre ocupando un volumen de terreno, o en muchos casos son simplemente incinerados, convirtiéndose en factores altamente contaminantes. Ante esta situación que amenaza con convertirse en un problema de salud pública en el país se creó a mediados del 2018 el Sistema Ecuatoriano de Gestión Integral de Neumáticos Usados (Seginus), encargado de la recopilación, transporte, almacenamiento y disposición final de los neumáticos (Ministerio del Ambiente , 2019). Si bien las estrategias planteadas, como parte de una gestión de residuos, han tenido avances, este sigue siendo un problema que nos atañe a todos.

En la búsqueda de alternativas que se vinculen con sistemas constructivos, se ha identificado falencias en la elaboración de mampuestos, utilizados principalmente como separadores de espacios, los mismos que se fabrican en la mayoría de los casos bajo procesos puramente artesanales y que no cumplen con los requerimientos para este tipo de elementos, bajo condiciones normales de servicio. Por lo que en el presente trabajo de investigación se plantea reutilizar los neumáticos fuera de uso, incorporándolos en la mezcla de hormigón, para la elaboración de paneles prefabricados no estructurales, adquiriendo así un papel de mayor importancia en el ámbito de la construcción y que a su vez se convierta en una alternativa a la reducción de los contaminantes.

El proyecto se fundamenta en la elaboración de mezclas de hormigón, con la incorporación de caucho obtenido de neumáticos fuera de uso, en detrimento del árido fino, a fin de utilizarse en la fabricación de paneles no estructurales. Con esta finalidad se realizarán ensayos de



laboratorio, que permitan analizar los parámetros de los materiales a incorporarse en la mezcla de hormigón, evaluando su calidad y aplicabilidad, con el uso de la normativa ecuatoriana NTE INEN, así como de organismos internacionales debidamente acreditados. Estos ensayos permitirán alcanzar resultados que sirvan para realizar un análisis del comportamiento de esta alternativa constructiva, así como los beneficios que genera su uso no solo en el ámbito constructivo sino además considerando factores económicos y ambientales.

1.1 Planteamiento del problema.

En el país, los elementos de mampostería fabricados principalmente a partir de mortero o material arcilloso, son usados comúnmente como separados de espacios, los mismos que en la mayoría de los casos no están sometidos a un control tanto en su proceso de fabricación como en la calidad del elemento final. Sumada a esta problemática y en conjunto con los elevados costos que se pueden alcanzar en el ámbito de la construcción, se buscan alternativas o tecnologías que optimicen el proceso de elaboración de viviendas, edificios, entre otros. Actualmente con el desarrollo de la tecnología, los sistemas prefabricados han ganado terreno en la industria de la construcción, dado que es un método rápido y versátil, que brinda una gran libertad en el diseño, y que ofrecen soluciones para cubrir con los estándares relacionados a niveles de servicio, tanto en lo estructural como en lo arquitectónico. De igual forma al ser un sistema controlado y tecnificado se ahorra una cantidad significativa de materiales, mano de obra, así como una reducción en el costo de la infraestructura en general.

En la búsqueda de satisfacer necesidades de vivienda e infraestructura en el presente, pero teniendo en consideración que no se debe comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer las suyas, se constituye el concepto de construcción sustentable. En ella se busca combinar la aplicación de diferentes métodos y enfoques en conjunto con la exploración de estrategias sólidas en el ámbito de la construcción, planeación y desarrollo en lo concerniente a la sociedad y el medio ambiente. Una de las alternativas con mayor impacto se vincula principalmente con la incorporación de materiales reciclados o que no presentan una gestión de residuos adecuada, como un elemento incorporado, en procesos constructivos.

Es así que se propone utilizar el caucho de los neumáticos fuera de uso, como material incorporado en elementos constructivos, paneles no estructurales, de manera que brinden seguridad a la infraestructura, cumpliendo con los requerimientos de servicio, así como reducir los tiempos de construcción, lo que se refleja directamente con una reducción en los costos de la obra.

1.2 Justificación

Este trabajo de investigación, con carácter experimental se centra en la implementación de materiales reciclados como parte de elementos constructivos, de manera que permitan actuar como una alternativa a la gestión de residuos, al utilizar materiales en desuso. Desde el punto de vista constructivo se buscan alternativas que permitan reducir tiempos de construcción y que cumplan con requerimientos de control en cuanto a su elaboración, así como su comportamiento bajo condiciones de servicio, por lo que se ha planteado el uso de prefabricados, de igual manera se busca la reducción de costos de la infraestructura en general. Otro factor que se ha considerado es el alto consumo de materiales incorporados para la



elaboración de mezclas de hormigón lo que genera una excesiva explotación de materias primas, siendo la extracción de recursos naturales la principal causa de afecciones ambientales. Bajo estas premisas se ha planteado la elaboración y análisis del comportamiento de paneles no estructurales, con una mezcla de hormigón alternativo, con caucho incorporado, de tal forma que se presente como una alternativa constructiva, pero sobre todo que actúe como una medida para contribuir al beneficio técnico, económico y ambiental para la sociedad. Este último ha cobrado una mayor trascendencia debido a los altos niveles de contaminación, lo que conlleva a un aumento en los problemas de salud, amenazando sobremanera el desarrollo de la sociedad. Con esta finalidad se analizará la viabilidad técnica de este elemento constructivo, identificando las características físicas y mecánicas que adquiere esta mezcla de hormigón alternativo, bajo diferentes condiciones de ensayo que simulen cargas de servicio, de tal manera que se convierta en un aporte al desarrollo de materiales alternativos como elementos constructivos.

1.3 Alcance

El proyecto a realizar tiene como alcance mostrar una alternativa viable que brinde una mejor sostenibilidad en diferentes tipos de obra, planteándose como propósito el diseñar un hormigón alternativo con material reciclable (neumáticos fuera de uso) que cumpla con los requerimientos de resistencia para de esta manera elaborar paneles prefabricados que sirvan como separadores de espacios o pisos entre otras funciones. El proyecto a realizar viene dado con la intención de elaborar y diseñar paneles que sean amigables con el medio ambiente, es decir que ayuden con la contaminación lo que involucra minorar emisiones de dióxido de carbono, así como el efecto invernadero. De la misma manera se considera un factor de importancia en cualquier tipo de proyecto como lo es la reducción de costos, ya sea en rubros relacionados con el proceso de elaboración de los paneles, como en los tiempos de trabajo, abarcando diferentes factores que permitirán que la investigación adquiera un alcance económico, además de constructivo y ambiental.

1.4 Hipótesis

La utilización de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso (NFU) en la elaboración de paneles no estructurales de hormigón permite mejorar su comportamiento a fatiga bajo cargas cíclicas en comparación con un hormigón tradicional, así como su implicación como una alternativa de uso en sistemas de construcción desde un ámbito de sostenibilidad medioambiental, así como considerando factores económicos debido a las características de la mezcla que reflejen una reducción de costos de cualquier tipo de obra.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento de paneles prefabricados no estructurales de hormigón con inclusión de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso y definir su grado de sostenibilidad.



1.5.2 Objetivos específicos

- Evaluar las características físicas del agregado mineral y del agregado obtenido de las fibras de caucho de neumáticos fuera de uso (NFU).
- Diseñar y elaborar las mezclas de hormigones usando agregado mineral y usando desechos de caucho provenientes de NFU, incorporando en diferentes porcentajes.
- Determinar la capacidad a compresión y tracción en cilindros de hormigones con agregado mineral como muestra patrón y con incorporación de caucho, para asegurar el cumplimiento de las normativas pertinentes.
- Elaboración de paneles no estructurales de hormigón, y determinación de su capacidad bajo ensayos de carga compresiva y de cargas transversales, tanto de la mezcla de hormigón patrón como de la mezcla de hormigón alternativo con caucho incorporado.
- Estimar su sostenibilidad por el uso de caucho reciclado en la elaboración de hormigón en el sector de la construcción con el empleo de herramientas de análisis de costos y ciclos de vida del mismo.



2. MARCO TEORICO

2.1 CARACTERIZACION Y CONTROL DE CALIDAD DE MATERIALES PARA MEZCLAS DE HORMIGON

Se hace una descripción de los materiales a incorporarse en la mezcla de hormigón tanto para el caso de una mezcla de hormigón simple, como para la mezcla de hormigón alternativo, con caucho incorporado.

Para la dosificación de la mezcla de hormigón, es pertinente conocer las características físicas de los diferentes elementos a incorporarse, debido a que sus propiedades influirán tanto en las cantidades de diseño, así como el comportamiento de la mezcla de hormigón ante diferentes condiciones de ensayo. Debido a que se deben cumplir con requerimientos para realizar trabajos con hormigón, la norma (NTE INEN 0872, 2011), describe los ensayos obligatorios destinados a control para el uso, diseño y dosificación.

- Granulometría
- Masa Unitaria
- Densidad
- Absorción de Agua
- Porcentaje de Huecos
- Humedad superficial
- Contenido de materia orgánica

2.1.1 Granulometría

La granulometría es la composición, en porcentaje, de los diversos tamaños de agregado en una muestra (Niño Hernández, 2010). Para la elaboración de mezclas de hormigón, es fundamental una granulometría adecuada, la que consiste en la combinación conveniente de granos de diferente tamaño, que deben ocupar el mayor volumen dentro de la mezcla de hormigón. Se determina la distribución granulométrica de partículas de áridos fino y grueso, tras un proceso de tamizado, fundamentado en la norma (NTE INEN 0696, 2011).

El tamaño de la muestra para el ensayo granulométrico del árido grueso, se define de acuerdo a la tabla 1, de la norma de diseño.

Tabla 1
Tamaño de la muestra de ensayo.

Tamaño nominal máximo Aberturas cuadradas [mm]	Tamaño de la muestra del ensayo Mínimo [kg]
9.5	1
12.5	2
19.0	5
25.0	10
37.5	15
50.0	20
63.0	35
75.0	60
90.0	100
100.0	150
125.0	300

En cambio, para realizar un análisis granulométrico, del árido fino, se considera una cantidad representativa, es decir que se pueda generalizar el material más allá de una parte del mismo.



Los resultados obtenidos se expresarán en una gráfica que describa la distribución granulométrica. Sobre el eje de las ordenadas se representa el porcentaje acumulado que pasa a través de los tamices, en escala aritmética. Mientras en el eje de las abscisas se indica la abertura de las mallas de los tamices, generalmente expresado en escala logarítmica y algunas veces en escala aritmética (Apuntes Ingeniería civil, 2019).

2.1.2 Masa Unitaria

La relación entre la masa del material que cabe en un determinado recipiente y el volumen de ese, da una cifra llamada masa unitaria. Cuando el árido ha sido colocado por efecto de la gravedad se denomina masa unitaria suelta. Sin embargo, cuando el árido colocado ha sido apisonado en capas, con el uso de una varilla de compactación se denomina masa unitaria compactada (Niño Hernandez, 2010). La determinación tanto de la masa unitaria tanto suelta como de la compactada del árido fino y grueso se fundamenta en la norma (NTE INEN 0858, 2010).

Se conoce que la masa unitaria compacta es un índice para conocer la calidad del árido, dado que cuanto mejor sea la distribución granulométrica, mayor será su valor numérico. De igual manera en la presencia de partículas cuyas formas se aproxima a la cúbica o a la esférica, producen una mayor masa unitaria.

Los valores de las masas unitarias sueltas sirven para relacionarlas con la densidad y dar una idea del volumen natural de vacíos que produce el agregado en su acomodo. Se debe tener cuidado con un fenómeno que puede afectar los volúmenes de material durante el transporte y almacenamiento del árido fino, conocido como abultamiento o expansión, que consiste en un aumento del volumen para una determinada masa de árido, causado por la presión del agua entre partículas, cuando se encuentra húmeda, es decir, con agua libre en la superficie. Los términos para su determinación se han expuesto en la ecuación 1, indicada en la norma.

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

Ecuación 1

Donde:

M= masa unitaria del árido [kg/m³]
G= masa del árido más el molde [kg]
T= masa del molde [kg]
V=volumen del molde [m³]

2.1.3 Densidad relativa y Absorción

La densidad relativa de acuerdo a (NTE INEN 0856, 2010), se define como la razón entre la densidad del material y la densidad del agua destilada a una determinada temperatura, de igual forma se describe la densidad de un material, como la masa por unidad de volumen de un material.

Con el propósito de elaborar mezclas de hormigón se debe determinar la densidad de los agregados que se incorporarán de manera precisa, dado que entre partículas existen poros que pueden estar vacíos, parcialmente saturados o llenos de agua. Se diferencian dos tipos de poros, los saturables, que están en el exterior y los no saturables, que se encuentran en el interior de la partícula. Además, dadas las cavidades que presenta el árido, se puede determinar la porosidad, por medio del ensayo de absorción (Niño Hernandez, 2010). Se deben considerar



estos parámetros dado que influyen en el comportamiento de los materiales en el proceso de mezclado del hormigón, pues al incorporarse un material más poroso, se presentará una variación en la cantidad de agua incorporada, lo que se verá reflejado en una disminución de la resistencia mecánica del hormigón.

Árido Fino. Para determinar la densidad específica y absorción del árido fino, se siguió la norma (NTE INEN 0856, 2010).

Debido a que el árido fino tiene una influencia en el desempeño de una mezcla de hormigón, se debe considerar el análisis de características propias como el porcentaje de espacios o la presencia de partículas desmenuzables. A continuación, se exponen los términos descritos en la norma.

Densidad relativa, árido seco al horno (Densidad relativa SH)

$$Densidad\ relataiva, SH = \frac{A}{B + S - C}$$

Ecuación 2

Densidad relativa, saturado superficialmente seco (Densidad SSS)

$$Densidad\ relataiva, SH = \frac{S}{B + S - C}$$

Ecuación 3

Densidad relativa aparente

$$Densidad\ aparente = \frac{A}{B + A - C}$$

Ecuación 4

Densidad del árido seco al horno (Densidad SH): Es la relación entre la masa de las partículas secas al horno y su volumen, incluyendo el volumen de poros saturables y no saturables, pero excluyendo los vacíos entre partículas.

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

Ecuación 5

Densidad del árido saturado superficialmente seco (Densidad SSS): Es la relación entre la masa de las partículas en condición SSS y el volumen que ocupa ese material incluyendo el volumen de poros saturable y no saturable lleno de agua, sin incluir el vacío entre partículas.

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

Ecuación 6

Densidad aparente: Es la relación entre la masa de las partículas y el volumen que ocupa la porción impermeable de las partículas del árido.

$$Densidad\ SH \left[\frac{kg}{m^3} \right] = \frac{A * \rho}{B + A - C}$$

Ecuación 7

Absorción

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

Ecuación 8

Donde:

A= masa en aire de la muestra seca al horno [g]

B= masa del picnómetro lleno de agua, hasta la marca de calibración [g]



C=masa del picnómetro lleno con muestra y agua hasta la marca de calibración [g]

S=masa de la muestra saturada superficialmente seca [g]

ρ = peso específico del agua [kg/m³]

Árido Grueso. Para determinar la densidad específica y absorción del árido grueso, se siguió la norma NTE INEN 857, en la cual se describen los términos a continuación expresados. Los términos son similares a los expresados para los ensayos del árido fino.

Densidad relativa, árido seco al horno (Densidad relativa SH)

$$\text{Densidad relativa, SH} = \frac{A}{B - C}$$

Ecuación 9

Densidad relativa, saturado superficialmente seco (Densidad SSS)

$$\text{Densidad relativa, SH} = \frac{B}{B - C}$$

Ecuación 10

Densidad relativa aparente

$$\text{Densidad aparente} = \frac{A}{A - C}$$

Ecuación 11

Densidad del árido seco al horno (Densidad SH)

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

Ecuación 12

Densidad del árido saturado superficialmente seco (Densidad SSS)

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

Ecuación 13

Densidad aparente

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

Ecuación 14

Absorción

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

Ecuación 15

Donde:

A= masa en aire de la muestra seca [g]

B= masa en aire la muestra saturada superficialmente seca [g]

C=masa aparente en agua de la muestra saturada [g]

ρ = peso específico del agua [kg/m³]

2.1.4 Porcentaje de espacios y Finos en el árido

La excesiva presencia de tamaños muy pequeños en el árido afecta el comportamiento deseado de la mezcla de hormigón, influyendo en el proceso de fraguado así como en su resistencia mecánica, debido principalmente a la formación de una pasta fina que envuelve al agregado condicionando su adherencia (Niño Hernández, 2010).

En algunos casos se puede encontrar presencia de altos contenidos de materia orgánica en los agregados. Las menos perjudiciales son las de tipo visible, tales como ramas o raíces, ya que pueden ser fácilmente detectadas y removidas. El peligro más significativo recae en la presencia de materia orgánica no visible que se impregna o adhiere a los granos del agregado. La presencia de elevadas cantidades de ese tipo de sustancias puede interferir con las reacciones



químicas de la hidratación del cemento, así como resultar en un hormigón de menor resistencia debido a su influencia en la velocidad de reacción del cemento, ocasionando retrasos considerables en su tiempo normal de fraguado. Se siguió lo dispuesto por la norma (NTE INEN 0864, 1982), a continuación se expresan los términos.

$$Ev = \frac{V_1 + V_2 - V_3}{V_1} * 100$$

Ecuación 16

$$Finos = \frac{Vol. Finos}{V_1} * 100$$

Ecuación 17

Donde:

- Ev= Porcentaje de espacio de vacíos [%]
- V₁= Volumen de arena [cm³]
- V₂= Volumen de agua [cm³]
- V₃= Volumen mezcla luego de 24 horas [cm³]
- Vol. Finos= Volumen de Finos después de 24 horas. [cm³]
- Finos= Porcentaje de finos [%]

2.1.5 Partículas desmenuzables en el árido

Se debe limitar la presencia de partículas desmenuzables en la mezcla de hormigón dado que podrá afectar el comportamiento normal de la mezcla, más específicamente se pueden presentar problemas con la adhesión de los materiales. Para realizar este ensayo se siguió la norma (NTE INEN 0698, 2010). A continuación, se exponen los términos de interés.

$$P = \frac{M - R}{M} * 100$$

Ecuación 18

Donde:

- P= porcentaje de terrones de arcilla y partículas desmenuzables
- M= masa de la muestra de ensayo retenido por el tamiz # 16 [g]
- R= masa de la muestra de ensayo retenido por el tamiz # 20 [g]

2.1.6 Abrasión del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la Máquina de los Ángeles.

La dureza depende de la constitución mineralógica, estructura y procedencia del árido, la misma se puede determinar de manera indirecta por medio del ensayo de desgaste en la máquina de los ángeles. Este ensayo es una medida de la degradación de agregados minerales dado que se somete a una combinación de acciones como abrasión o atrición, impacto y pulimiento (Niño Hernández, 2010). Es por este motivo de la importancia de este ensayo, dado que es un indicador de la calidad relativa de los agregados a utilizarse en el diseño de la mezcla de hormigón. Para realizar este ensayo se siguió la norma (NTE INEN 0861, 2011).

La Máquina de Los Ángeles a utilizar en el ensayo debe cumplir con los requisitos especificados en la (NTE INEN 0860, 2011). Para determinar la masa indicada se considera la granulometría del agregado a utilizar y de acuerdo a lo indicado en tabla 2, se designan los valores del material que es retenido en cada tamiz.



Tabla 2

Masas por tamaños indicados para abrasión

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	1250 ± 25	---	---	---
25	19	1250 ± 25	---	---	---
19	12.5	1250 ± 25	2500 ± 10	---	---
12.5	9.5	1250 ± 25	2500 ± 10	---	---
9.5	6.3	---	---	2500 ± 10	---
6.3	4.75	---	---	2500 ± 10	---
4.75	2.36	---	---	---	5000 ± 10
Total		5000 ± 100	5000 ± 10	5000 ± 50	5000 ± 10

Para determinar el valor de degradación se considera la siguiente expresión.

$$D = \frac{B - C}{B} * 100$$

Ecuación 19

Donde:

D= valor de degradación, [%]

B= masa inicial de la muestra de ensayo [g]

R= masa de la muestra retenida por el tamiz de 1.70 mm [g]

2.2 HORMIGÓN

El hormigón es un material obtenido de la mezcla homogénea de agregados debidamente seleccionados y en proporciones adecuadas, con la pasta obtenida al añadir agua a un conglomerante, comúnmente cemento hidráulico. Se considera que la principal característica estructural del hormigón es resistir muy bien los esfuerzos a compresión (Tecnología del Hormigón Armado, 2019). Se conoce que tanto su resistencia a tracción como al esfuerzo cortante son relativamente bajas, por lo que se debe ser cuidadoso en su utilización, solo en aquellas situaciones en las que las sollicitaciones para estos esfuerzos sean bajas. (Sánchez N. , 2019).

2.2.1 Componentes del hormigón

Cemento

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 (Niño Hernández, 2010).

Agua

Es un ingrediente fundamental en la elaboración de hormigón debido a que desempeña una función importante en estado fresco y endurecido. Generalmente se hace referencia a su papel en cuanto a la cantidad para proveer una relación agua/cemento acorde con las necesidades de trabajabilidad y resistencia, pero su uso es más evidente, en el proceso del lavado de los áridos,



en la preparación de la mezcla o durante el curado del hormigón. No solamente su cantidad es importante, sino también su calidad química y física (Niño Hernadez, 2010). Es así que se describe a continuación el uso de acuerdo a su función.

Agua para el mezclado del hormigón

Como se indica se adiciona junto con los áridos y el cemento. Su función es la de producir junto con el cemento una pasta hidratada con una fluidez que permita la trabajabilidad de la mezcla de hormigón, cuando se encuentre en estado plástico.

Dependiendo de la cantidad de agua adicionada la fluidez de la pasta será mayor o menor y al endurecerse una cantidad del agua quedará fija como parte de la estructura y otra permanecerá como agua libre. Si la medida de agua de mezclado aumenta, la parte fija es la misma y por consiguiente el agua libre aumenta, con lo cual se aumenta la porosidad, debido a que, con el tiempo, esta agua libre se evapora dejando unos pequeños conductos en el interior del concreto endurecido. Con este aumento se disminuye la resistencia y aumentará la permeabilidad del hormigón. (Niño Hernadez, 2010).

Agua para el curado del hormigón

El agua utilizada en la mezcla, generalmente, es apta para el curado, sin embargo, la causa más común de las manchas en las superficies del hormigón, es por la presencia de una alta concentración relativa de hierro o materias orgánicas. De igual forma bajas concentraciones de estas impurezas pueden causar manchas si el agua fluye lentamente sobre el concreto y se evapora. No existe ningún método práctico y confiable que relacione las posibilidades de manchas con los contenidos de impurezas en el agua (Niño Hernadez, 2010).

Áridos grueso y fino

El árido es el mayor constituyente del hormigón, alcanzando más del 70 % del material en un metro cúbico de hormigón y es por el cual este es un material económico en la construcción. En la elaboración de hormigón de masa normal, usado en la mayoría de construcciones, los áridos frecuentemente son obtenidos de arenas naturales y depósitos de grava. Para su selección hay que tener presente que sus propiedades difieren considerablemente de una a otra. Cada una puede variar en la mineralogía de sus componentes o las condiciones físicas de sus partículas, tales como, la distribución de tamaños, la forma y la textura. Todos estos factores tienen un efecto en el comportamiento del hormigón (Niño Hernadez, 2010).

La forma de los áridos depende mucho del tipo de roca que lo originó, ya que para ciertas piedras resulta determinante el sistema de clivaje, las posibles fracturas en la roca y su estado de meteorización. Las arenas, por su propio origen geológico, suelen ser de forma redondeada, pero cabe recordar que es posible obtenerlas mediante trituración, y en este caso la forma también va a depender de modo importante del sistema o maquinaria que se use para la fragmentación de la roca original en la producción de arena.

Los áridos deben poseer por lo menos la misma resistencia y durabilidad que se exija al hormigón. No se deben emplear calizas blandas, feldespatos, yesos, piritas o rocas friables o porosas. Para la durabilidad en medios agresivos serán mejores los áridos silíceos, los procedentes de la trituración de rocas volcánicas o los de calizas sanas y densas (Niño Hernadez, 2010).



2.3 DISEÑO DE LA MEZCLA DE HORMIGON PATRON

Para el diseño de la mezcla de hormigón se utilizó el método descrito por (ACI 211, 2011), a fin de determinar la combinación más práctica, considerando los materiales que se dispone para producir una mezcla de hormigón que satisfaga los requisitos de comportamiento bajo condiciones de uso. En el documento (ACI 211, 2011) se resume el procedimiento de diseño de mezclas de hormigón en una secuencia para su correcta dosificación, la misma se presenta en la figura 1.

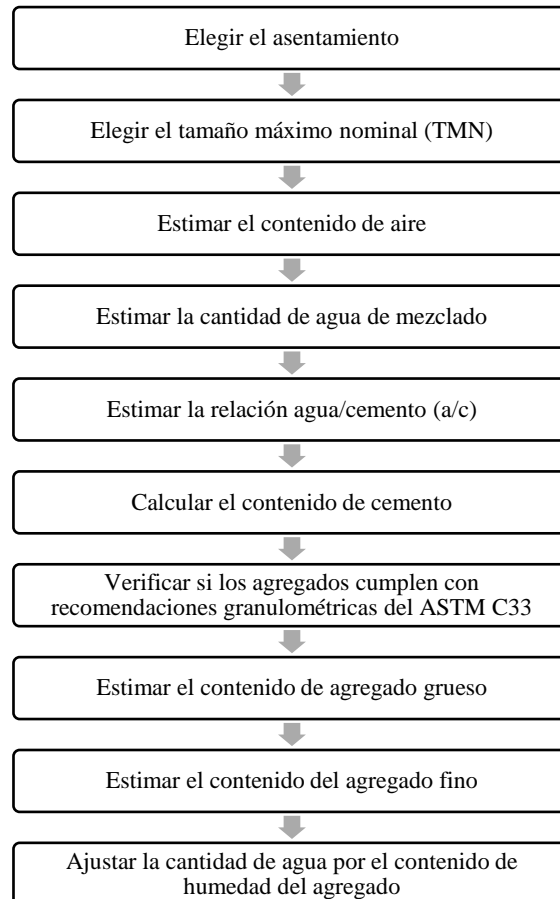


Figura 1. Proceso de diseño del hormigón

2.3.1 Elección del asentamiento

En primera instancia se determina el asentamiento el mismo que se define en función del tipo de construcción y de las condiciones de colocación de la mezcla de hormigón. En la tabla 3 se consideran estos factores.



Tabla 3
Asentamiento del hormigón

Asentamiento [cm]	Consistencia	Grado de trabajabilidad	Tipo de estructura y condiciones de colocación.
0 - 2	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia.
2 - 3.5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados con maquina mecánica
3.5 - 5	Semi-seca	Pequeño	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales.
5 - 10	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros con vibración.
10 - 15	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactarlo con demasiada vibración.

2.3.2 Cálculo del agua de mezclado y contenido de aire

Se define el tamaño máximo nominal en función de la curva granulométrica del árido. Para la determinación del contenido de aire se consideró un hormigón sin aire incluido. La tabla 4 hace referencia a lo dispuesto por el (ACI 211, 2011).

Tabla 4
Contenido de agua de mezclado del hormigón

Asentamiento [cm]	Agua, kg/m ³ de hormigón para los tamaños máximos nominales de agregado							
	9.5 [mm]	12.5 [mm]	19 [mm]	25 [mm]	38 [mm]	50 [mm]	75 [mm]	150 [mm]
	Hormigón sin aire incluido							
2.5 a 5	207	199	190	179	166	155	130	113
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	---
Cantidad de aire atrapado (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

2.3.3 Elección de la relación agua/cemento

La relación agua/cemento (*a/c*) es la razón existente entre el peso del agua con respecto al peso del cemento. Sin embargo, debido a las diferentes características entre áridos, así como de cementos, ante una misma relación *a/c*, se obtienen diferentes resistencias, por lo que un balance en esta relación, es lo idóneo, de manera que para una determinada cantidad de cemento incorporado en la mezcla se disponga de la suficiente cantidad de agua, de manera que permita desarrollar la resistencia especificada.

Debida a que las características del hormigón, no dependen únicamente de las cantidades de cada material seleccionadas, sino también del cuidado durante el proceso de preparación y curado de la mezcla. Estos factores están asociados a la experiencia de quien fabrica la mezcla. Debido a que no se conoce la desviación estándar, se debe incrementar la resistencia especificada *f'c*, en función de la tabla 5 obtenida del (ACI 211, 2011).



Tabla 5
Resistencia requerida del hormigón

Resistencia especificada [MPa]	Resistencia requerida [MPa]
$f'_c < 21$	$f'_{cr} = f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_{cr} = f'_c + 8.5$
$f'_c > 35$	$f'_{cr} = 1.1 * f'_{cr} + 5.0$

Una vez determinado el valor de f'_{cr} y dado que el hormigón no tendrá aire incluido, por lo que se procede con la selección de la relación agua/cemento, se hace uso de la tabla 6.

Tabla 6
Relación agua/cemento- resistencia requerida

Resistencia a la compresión a los 28 días [kg/cm ²]	Relación agua/cemento (por peso) Hormigón sin aire incluido
350	0.40
315	0.43
280	0.47
245	0.52
210	0.58

2.3.4 Cálculo del contenido de cemento

Para el cálculo de la cantidad de cemento por cada m³, se hace uso de los valores ya conocidos como la cantidad de agua, así como del valor de la relación a/c.

2.3.5 Estimación del contenido de agregado mineral

Un comportamiento adecuado del hormigón depende en gran medida de la granulometría de los áridos. Por lo cual antes de realizar la dosificación de la mezcla de hormigón se debe verificar que la distribución de tamaños tanto del árido fino como del grueso, estén dentro de los rangos establecidos, considerando la curva granulométrica obtenida por medio de ensayos y comparando con los parámetros de la norma (ASTM C33, 2003), o sus equivalentes. Es importante el cumplimiento de esta normativa, dado que el método ACI se utiliza siempre que se cumplan con las recomendaciones emitidas en dicha norma.

2.3.6 Estimación del contenido de árido grueso

A fin de considerar el contenido de árido grueso depende fundamentalmente del módulo de finura del árido fino, así como el tamaño máximo nominal (TMN) del agregado mineral. En la tabla 7, se expresa el volumen del árido grueso seco y compactado para 1 m³ de hormigón.

Tabla 7
Volumen de árido grueso para 1 m³ de hormigón

Tamaño máximo	Módulo de finura de la arena [MF]								
	0	1	2	2.4	2.75	3.1	4	5	6
3/8"	0.70	0.63	0.54	0.50	0.45	0.39	-	-	-
1/2"	0.74	0.69	0.61	0.57	0.53	0.48	0.3	-	-
3/4"	0.80	0.75	0.68	0.65	0.62	0.58	0.44	-	-
1"	0.82	0.78	0.72	0.69	0.66	0.63	0.51	0.21	-
1 1/2"	0.85	0.81	0.75	0.73	0.71	0.68	0.59	0.38	-
2"	0.87	0.83	0.79	0.76	0.74	0.71	0.64	0.47	-
3"	0.89	0.86	0.82	0.8	0.78	0.76	0.64	0.56	0.21
6"	0.93	0.91	0.87	0.86	0.84	0.82	0.76	0.66	0.51



2.3.7 Estimación del contenido de árido fino

Para establecer la cantidad de árido fino, se planteó el diseño para 1 m³ de hormigón, es por ello que se suma los volúmenes de todos los parámetros antes definidos y el faltante para obtener el metro cúbico, es el volumen de árido fino.

Con los parámetros ya calculados se realiza la dosificación de la primera mezcla de hormigón, para lo cual se considera la cantidad de agua que absorberán los agregados, debido a sus características físicas, así como la humedad que presentan, en instantes previos a la elaboración de la mezcla. De igual manera se debe realizar el ensayo del cono de Abrams de manera que se permita realizar la corrección por asentamiento verificando que se cumplan con los requerimientos de diseño.

2.4 ELABORACIÓN DE MEZCLAS

2.4.1 Mezcla de hormigón patrón

Para la elaboración de los especímenes de hormigón se sigue lo dispuesto por la norma (NTE INEN 1576, 2011). En primer lugar, los agregados minerales deben estar libres de impurezas, por lo que se deben someter a un proceso de lavado previo a su incorporación en la mezcla. De igual manera a fin de mantener una humedad uniforme en las diferentes mezclas de hormigón, se debe mantener un control del agua, especialmente para considerar factores como absorción del árido. Esta metodología se considera para evitar diferencias en la humedad de los áridos en cada una de las mezclas, de manera que el factor de variación sea únicamente la cantidad de material reciclado incorporado en la mezcla.

Se debe realizar el ensayo de consistencia, dado que se relaciona con el estado de fluidez de la mezcla, para determinar este parámetro se considera el ensayo del cono de Abrams, según lo dispuesto por la norma (ASTM C143, 2006) o sus similares.

2.4.2 Mezcla de hormigón alternativo

En cuanto a la elaboración de los especímenes de la mezcla de hormigón alternativo se plantea la incorporación de material reciclado por árido fino, reemplazándose en diferentes porcentajes de volumen de árido fino, a fin de seleccionar un porcentaje que satisfaga los requerimientos de diseño. El material reciclado es caucho proveniente de neumáticos fuera de uso, debido al objetivo de la investigación el material será incorporado en la mezcla, siempre que su tamaño se encuentre dentro de los rangos correspondientes al del árido fino. Los procesos de elaboración y curado de las mezclas será el mismo que en el caso de la mezcla de hormigón patrón. Todos los especímenes de las diferentes mezclas de hormigón, serán sometidos a un proceso de curado por inmersión en la piscina de los laboratorios de la Universidad de Cuenca, a fin de mantener condiciones de humedad y temperatura controladas.

2.5 PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

El hormigón endurecido por lo general tiene propiedades mecánicas que están relacionadas con la resistencia de la pasta endurecida, la resistencia del agregado y la adherencia entre la pasta y los agregados (Niño Hernández, 2010). En el desarrollo de esta investigación se plantea un análisis del comportamiento de la mezcla de hormigón con el uso de caucho reciclado proveniente de neumáticos fuera de uso, comparándose con una mezcla de hormigón simple o patrón. Los especímenes se ensayarán bajo condiciones de compresión y tracción indirecta, de



igual manera se realizarán ensayos para determinar su módulo de elasticidad, así como identificar propiedades como densidad y absorción.

2.5.1 Ensayo de resistencia a la compresión

Para determinar la resistencia a la compresión de especímenes de hormigón se consideró la norma (NTE INEN 1573, 2010). Se deben ensayar al menos 2 especímenes para cada edad del hormigón, según sea lo dispuesto.

El ensayo se lo debe realizar lo más pronto posible después de que cada espécimen haya sido retirado de su proceso de curado, procurando estar dentro de la tolerancia de tiempos para que los ensayos sean aceptados. Se aplica carga axial sobre las caras extremas del cilindro, para transmitir la carga de manera uniforme se utilizó neoprenos, de igual forma el cilindro debe de estar lo más centrado posible, evitando excentricidad en su aplicación, que afectara los resultados. Además, se debe controlar la velocidad de carga, aplicando sobre el espécimen a un rango de 0.25 MPa/s, hasta que el espécimen falle.

Para calcular la resistencia a la compresión del espécimen se divide la carga máxima soportada por el espécimen durante el ensayo, para el promedio del área de la sección transversal, expresando el resultado con una aproximación a 0.1 MPa. Si la relación de la longitud al diámetro del espécimen es de 1.75 o menos, se debe corregir el resultado obtenido, multiplicando por el factor de corrección apropiado, como se expresa en la tabla 8.

Tabla 8

<i>Factor de corrección</i>				
L/D	1.75	1.5	1.25	1.00
Factor:	0.98	0.96	0.93	0.87

2.5.2 Ensayo de resistencia a la tracción indirecta

La resistencia del hormigón a tracción axial, se obtiene mediante el ensayo de tracción indirecta en base a la norma (ASTM C496, 2006), este ensayo es comúnmente conocido como ensayo del método brasileño. El método consiste en la rotura de especímenes cilíndricos, sometidos a una fuerza de compresión aplicada en una banda estrecha en toda su longitud, en consecuencia, el resultado de la fuerza de tracción ortogonal resultante origina que la probeta se rompa a tracción. Se debe dibujar en cada cara una línea que marque un diámetro dentro del mismo plano axial, trazándose generatrices a lo largo del cilindro, que corresponden al plano de rotura. (Lleida, 2019). De acuerdo a la norma para precisión en los resultados se deben realizar como mínimo 2 ensayos. El hormigón endurecido debe presentar un proceso de curado bajo condiciones normalizadas de laboratorio y ensayado a los 28 días.

Para determinar la resistencia a tracción se aplica la siguiente ecuación:

$$T = \frac{2 * P}{\pi * L * D}$$

Ecuación 20

Donde:

- T= Resistencia a la tracción indirecta [kg/cm²]
- P= Carga máxima aplicada [kg]
- L= Longitud [cm]
- D= Diámetro [cm]

El valor obtenido para la tracción indirecta del hormigón mediante el ensayo brasileño es mayor que el correspondiente a la tracción axial, por lo que se admite la relación.

$$\text{Tracción axial} = 0.9 * \text{Tracción indirecta}$$

Ecuación 21

2.5.3 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es conocido como la relación entre el esfuerzo normal y la deformación unitaria registrada ante una carga, bajo el límite de proporcionalidad. Es una medida de la rigidez del material y su magnitud depende de la resistencia a compresión, que depende a su vez de las características de los materiales de la mezcla, determinados en el laboratorio (Kosmatka, 2004).

El módulo de elasticidad estático del hormigón se determina a partir de ensayos bajo condiciones de compresión a diferentes especímenes de hormigón. La norma en la cual se basa este ensayo corresponde a la (ASTM C469, 2014). Las deformaciones transversales y longitudinales son medidas continuamente durante la aplicación de la carga incremental (Topcu & Ugurlo, 2007). Se deben ensayar al menos 2 especímenes cilíndricos pertenecientes a la misma mezcla de diseño y edad del hormigón requerida.

Dentro de lo especificado, por la norma guía, el módulo de elasticidad estático E_c , se determinó bajo la metodología del módulo secante o cuerda, cuyo valor es variable en cada punto y se mide por la inclinación de la recta que une el origen con dicho punto, como se indica en la figura 2. Este método representa valores de módulo promedios para rangos de esfuerzo y se expresa de la siguiente manera.

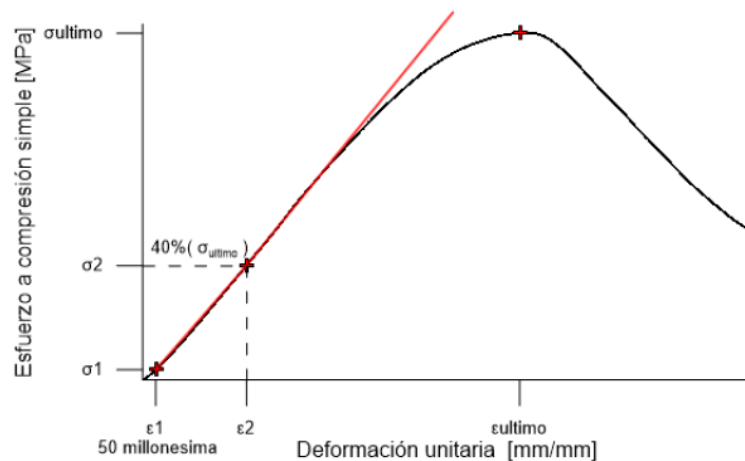


Figura 2. Método de cuerda, Curva esfuerzo-deformación. Recuperado de (Kosmatka, 2004)

$$E_c = \frac{S_1 - S_2}{\epsilon_2 - 0.000050}$$

Ecuación 22

Donde:

E_c = Módulo de elasticidad cuerda [MPa]

S_2 = Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última. [MPa]

S_1 = Esfuerzo correspondiente a la deformación unitaria longitudinal, ϵ_1 , de 50 millonésimas, [MPa]

ϵ_2 = Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S_2 , en millonésimas [μm]

Para cada uno de los especímenes ensayados, correspondientes a las diferentes mezclas de hormigón se obtendrá el valor del módulo de elasticidad, considerándose el promedio de los ensayos realizados. Los resultados obtenidos se comparan con lo mencionado en la (NEC-SE-HM, 2014), la cual indica para hormigones con agregados de densidad normal el módulo se



estima tal como sigue:

$$E_c = 4.7 * \sqrt{f'c}$$

Ecuación 23

Donde:

E_c = Módulo de elasticidad para hormigón [GPa]

$f'c$ = Resistencia a la compresión del hormigón [MPa]

2.5.4 Densidad del hormigón endurecido

Se considera que la durabilidad que presenta una estructura de hormigón, es su capacidad de soportar las condiciones físicas y químicas durante toda su vida útil. Es así que la porosidad es uno de los parámetros que más condicionan la durabilidad del hormigón, por lo que además de la presencia de poros en la masa, se debe analizar también la distribución de los agregados dentro de la mezcla (Estrada, 2016).

La formación de poros, los cuales en muchos de los casos se encuentran interconectados, puede facilitar el flujo de agua a través del hormigón, lo que a su vez influirá en una mayor absorción de agua. Estos parámetros deben ser analizados con cuidado pues influyen sobre manera en la densidad del hormigón. Es conocido que, con la reducción de la densidad, los especímenes de hormigón ven reducida su capacidad de soportar cargas, sin embargo, con este tipo de mezclas de hormigón alternativo, se pueden alcanzar estructuras mucho más livianas, por lo que encontrar una relación favorable, puede convertirse en una alternativa a sistemas de construcción eficientes.

Para determinar la densidad, porcentaje de absorción, así como el porcentaje de huecos en especímenes de concreto endurecido se siguió la norma planteada por la norma (ASTM C642, 2006). Se deben considerar al menos 2 especímenes de hormigón pertenecientes la misma mezcla de diseño. Los valores de masa a determinar de acuerdo a los procedimientos descritos, permiten determinar las siguientes expresiones.

Absorción después de inmersión, %

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

Ecuación 24

Absorción después de inmersión, y ebullición, %

$$Absorción, DIE = \frac{C - A}{A} * 100$$

Ecuación 25

Densidad seca global (bruta)

$$Densidad\ bruta = \frac{A}{C - D} * \rho = g_1$$

Ecuación 26

Densidad global (bruta) después de inmersión

$$Densidad\ bruta - inmersión = \frac{B}{C - D} * \rho$$

Ecuación 27

Densidad global (bruta) después de inmersión y ebullición

$$Densidad\ bruta - inmersión - ebullición = \frac{C}{C - D} * \rho$$

Ecuación 28



Densidad aparente:

$$\text{Densidad aparente} = \frac{A * \rho}{A - D} = g_2$$

Ecuación 29

Volumen de vacíos (espacio de poros permeables), %

$$\text{Volumen vacíos} = \frac{(g_2 - g_1)}{g_2} * 100$$

Ecuación 30

$$\text{Volumen vacíos} = \frac{C - A}{C - D} * 100$$

Ecuación 31

Donde:

A= masa de muestra seca al horno [g]

B= masa de muestra saturada de superficies seca después de inmersión [g]

C= masa de muestra saturada de superficies seca después de inmersión y ebullición [g]

D= masa sumergida aparente de la muestra suspendida en agua, después de inmersión y ebullición [g]

g_1 = densidad global (bruta) seca [kg/m^3]

g_2 = densidad aparente [kg/m^3]

ρ = peso específico del agua [kg/m^3]

2.6 PANELES

2.6.1 Historia de los paneles prefabricados de hormigón

El hormigón prefabricado es un material casi sin precedentes dentro del ámbito de la construcción. Aunque su uso comienza en el siglo XX, asociado principalmente con un avance en la tecnología. Esto permitió desarrollar un sistema constructivo tecnificado en el que la producción en masa era la meta, a finales del siglo XIX se elaboran los primeros paneles de hormigón, sin embargo, su uso se pierde hasta ser retomado a principio de los años 50, con la aparición del así llamado Modernismo. Bajo este contexto, los paneles prefabricados se desarrollaron en tiempos recientes, aunque es una idea tan antigua como el hormigón. Sin embargo, los paneles prefabricados de hormigón son el último elemento que se empleó para crear desde paredes, pisos hasta fachadas.

La prefabricación de paneles ha evolucionado de forma importante y al mismo tiempo ha discurrido por caminos muy diferentes, aunque en general se apura a una tendencia hacia unidades cada vez de mayor tamaño, y por lo tanto mayor peso (Sánchez J. F., 2010).

2.6.2 Fabricación de los paneles

El molde. El proceso de fabricación se inicia con la limpieza y preparación de los moldes a los que se les aplicará seguidamente un desencofrante. Los moldes para la fabricación de paneles de hormigón serán rígidos y contruidos con materiales compatibles con el hormigón, un ejemplo se aprecia en la figura 3. Los moldes tendrán un volumen estable, con aplicaciones repetidas, fácil manipulación, con una adherencia lo más reducida posible entre molde y hormigón, y de fácil limpieza e utilizable para varios paneles (Sánchez J. F., 2010).



Figura 3. Moldes prefabricados. Recuperado de (Sánchez J. F., 2010)

Amasado, hormigonado y compactación del hormigón. La dosificación del hormigón se ha determinado mediante ensayos con dosificaciones de prueba, bajo condiciones de laboratorio. Los ensayos se harán sobre todas las mezclas, siendo la mezcla tanto de hormigón patrón como la de hormigón alternativo. El hormigón se debió someter a un proceso de compactación adecuado, para disminuir el aire atrapado en las superficies verticales. El principal objeto de compactar el hormigón, es obtener un producto denso y homogéneo con superficies agradables, libres de imperfecciones. El tratamiento de acabado de los elementos y la rapidez del endurecimiento influye en la calidad del hormigón (Sánchez J. F., 2010). Un proceso tecnificado puede observarse en la figura 4.



Figura 4. Paneles prefabricados. Recuperado de (Sánchez J. F., 2010)

Los acabados. Las superficies acabadas de los paneles serán uniformes y estarán de acuerdo con las muestras aprobadas y establecidas por el proyectista (Sánchez J. F., 2010).

Proceso de curado. Para todos los métodos de fabricación, los procedimientos de curado están establecidos y controlados con el fin de evitar cualquier imperfección en el aspecto, tales como la falta de uniformidad, manchas o grietas superficiales. El curado del hormigón fresco por cualquier método exige la retención de humedad para permitir la hidratación del cemento o impedir la formación de fisuras superficiales debidas a la pérdida rápida de agua mientras el hormigón está en estado plástico. Este proceso se podrá realizar manteniendo húmedas todas las superficies, siendo el más utilizado, el curado por inmersión, sin embargo, como alternativa, se podrá considerar la protección de las superficies mediante recubrimientos plásticos (Sánchez J. F., 2010).

2.6.3 Tipos de paneles

Dependiendo de su función dentro del edificio, el revestimiento de hormigón o panel, puede ser diseñado como portante o no portante, ya sea de piel simple o piel doble.

2.6.3.1 Paneles resistentes o portantes

Los paneles portantes soportan y transmiten las cargas verticales de los pisos y la estructura.

También pueden contribuir a la estabilidad horizontal del edificio. Por ello se requiere un análisis adecuado para comprobar que la flexión y compresión combinadas son admisibles para el elemento (Sánchez J. F., 2010). Un ejemplo de este tipo de panel se expone en la figura 5.

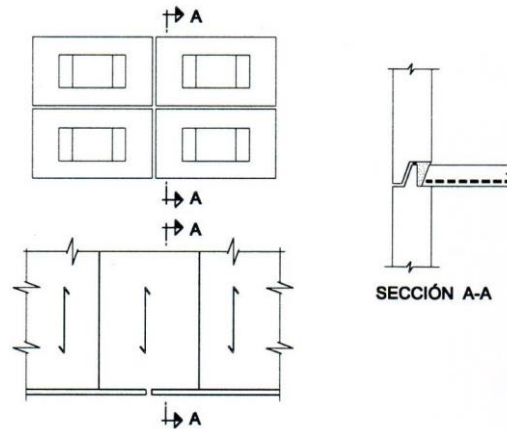


Figura 5. Tipo de panel portante. Recuperado de (INTEMAC, 1999)

2.6.3.2 Paneles no resistentes o autoportantes

Los paneles autoportantes están considerados para soportar cargas de viento y nieve, así como brindar la estabilidad horizontal. Estos elementos pueden suprimirse sin afectar a la estabilidad del conjunto ni a la estructura (Sánchez J. F., 2010). En la figura 6, se presenta un ejemplo de este tipo de panel.

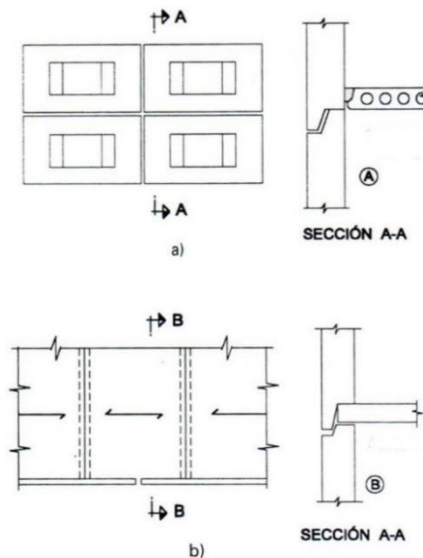


Figura 6. Tipo de panel no portante. Recuperado de (INTEMAC, 1999)

2.6.4 Estabilidad estructural paneles no portantes

2.6.4.1 Diseño estructural

El diseño de los paneles de hormigón prefabricado está fundamentado en dos estados de carga:

- Cargas de servicio, sobre elementos individuales y sobre estructuras.
- Cargas durante la manipulación y el montaje, antes de la instalación.

El diseño de la primera condición es responsabilidad del proyectista, en este ámbito influirá el peso y el tamaño de los paneles, ya que soportan su propio peso.

Debe considerarse la resistencia del hormigón ya que en el momento de desmoldar se puede

tener solo una fracción de la resistencia final estimada del proyecto. La edad del elemento suele ser muy inferior a los 28 días, por lo tanto, no puede contarse con la resistencia nominal del hormigón. Se recomienda una resistencia mínima en el momento de desmoldar de 10 MPa, y a los 28 días de 21 MPa para paneles no portantes y 35 MPa para paneles portantes. (Sánchez J. F., 2010).

2.6.5 Forma y dimensiones de los paneles

2.6.5.1 Formas de los paneles arquitectónicos

Una de las propiedades importantes del hormigón es su plasticidad, dando una amplia gama de formas posibles. Formas no limitadas solo a volúmenes cerrados en superficies planas sino también a formas redondeadas.

La forma de un panel prefabricado es una consideración económica importante. Un factor significativo puede ser si el panel es abierto o cerrado. Un módulo de ventana es un ejemplo típico de elemento cerrado. Este mismo elemento sin la parte inferior se considera un elemento abierto. Los paneles abiertos son generalmente más delicados y pueden necesitar rigidizadores temporales o fuertes soportes para su manipulación, aumentando su coste. Las combinaciones de formas cerradas y abiertas tienen una mayor rigidez (Sánchez J. F., 2010). En la figura 7, se aprecia de mejor manera los tipos de paneles.

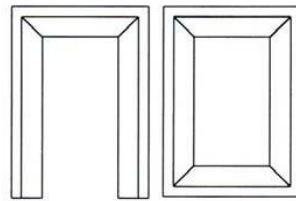


Figura 7. Tipo de paneles, abierto y cerrado. Recuperado de (INTEMAC, 1999)

La conexión entre dos masas de hormigón dentro de un mismo panel prefabricado es una consideración importante. Siempre que sea posible debe de ser gradual. Esto es necesario para reducir la posibilidad de rotura y mejorar la integridad estructural y el acabado del panel prefabricado (Sánchez J. F., 2010), tal como se indica en la figura 8.

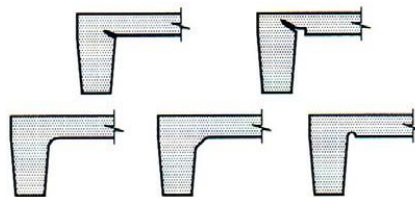


Figura 8. Transición de masas. Recuperado de (INTEMAC, 1999)

2.6.6 Dimensiones de los paneles arquitectónicos

Las dimensiones máximas de los paneles son específicas de cada fabricante y vienen principalmente limitadas por el transporte. Estas dimensiones máximas están en torno a 12.00 x 3.20 m. Las dimensiones óptimas son para altura de dos plantas y un múltiplo de un módulo de la base. Este último suele estar condicionado por el diseño del edificio. Aunque las dimensiones de los paneles autoportantes ser rigen por sus posibilidades de manipulación y transporte. Normalmente el peso de los paneles se debe limitar a 10 Toneladas.

2.6.7 Elaboración de paneles

Se describen los puntos concernientes al dimensionamiento, así como el diseño del encofrado, el proceso de elaboración de los mismos de manera que cumplan con los parámetros que rigen su comportamiento.

Dimensiones

Las dimensiones propuestas para los paneles, responden a condiciones como espesor, resistencia, así como facilidad de ensayo en laboratorio. Debido al tipo de prensa, el dimensionamiento máximo del panel alcanza los 70 cm. de largo, 40 cm. de ancho. En lo que respecta al espesor, se consideró 9 cm, siendo está una dimensión común en elementos que funcionan como elementos separadores de espacios, paredes o como sistemas de cerramiento. En la figura 9, se presenta un esquema del molde de encofrado utilizado para el proyecto.

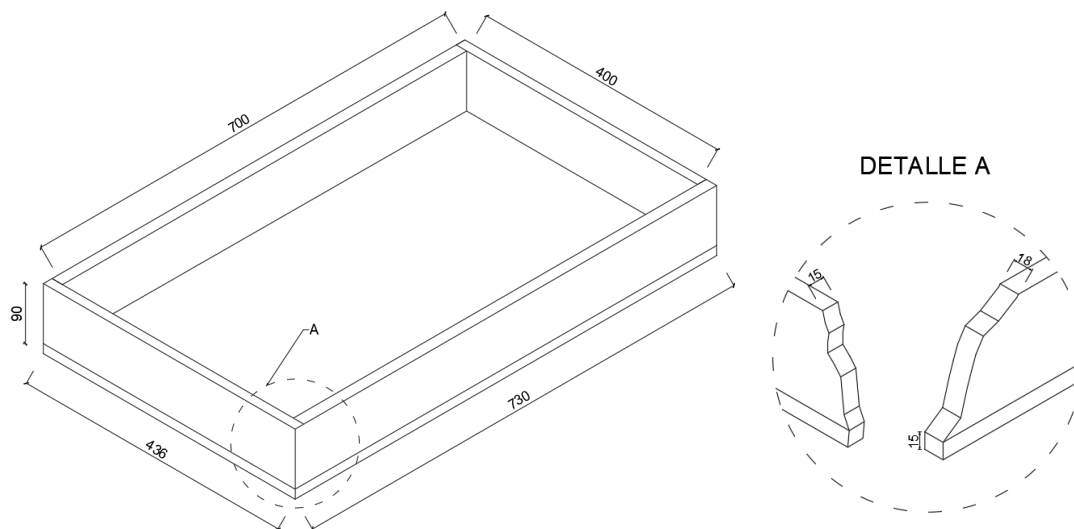


Figura 9. Dimensiones del molde de encofrado

Diseño del encofrado:

En el proceso de fabricación de los paneles y como una medida para evitar deformaciones en los paneles, se consideró un sistema de soporte para el hormigón en estado fresco, incluyendo los moldes que se encontraban en contacto con el hormigón, así como los elementos de soporte necesarios. Se tomó como guía la norma (ACI 347, 2004). La selección de los materiales adecuados para encofrado debe basarse en aspectos como precio, seguridad durante la construcción y la calidad del requerida en el producto acabado. Se consideró que el sistema de encofrado sea de madera, específicamente plywood, para lo cual se diseña bajo los métodos de esfuerzos de trabajo recomendados por la (APA, 2002). En primer lugar, se debe considerar la presión máxima del hormigón, la cual depende de factores tales como la velocidad de vaciado, temperatura del hormigón, asentamiento, el tipo de cemento, densidad del hormigón, método de vibración y altura del encofrado. Debido a las dimensiones que presentan los paneles, el factor más influyente es la altura del encofrado, por lo cual se determina la presión máxima del hormigón, expresada de acuerdo a la ecuación 32, tomada de la norma (ACI 347, 2004).

$$P = \gamma * g * h$$

Ecuación 32

Donde:

P= Presión máxima del hormigón (kN/m²)

Y= Peso específico del hormigón (kg/m³)



g = Gravedad, 9.81 (m/s²)

h = Altura de la capa de hormigón (m)

Posteriormente se debe determinar la presión que resiste el encofrado, de manera que el espesor seleccionado sea el adecuado para soportar el empuje generado por el hormigón en estado fresco. Se analiza bajo diferentes condiciones como flexión, cortante y por las deflexiones producidas, a fin de determinar la presión que gobierna el diseño.

Presión controlada por el esfuerzo de flexión:

$$W_b = \frac{10 * F_b * KS}{1000 * l_1^2}$$

Ecuación 33

Donde:

W_b = Carga uniforme (kN/m²)

F_b = Esfuerzo de flexión (kN/m²)

KS = Módulo de sección real (mm³/m)

l_1 = Claro, centro a centro de soportes (mm)

Presión controlada por esfuerzo cortante:

$$W_s = \frac{1.667 * F_s * \left(\frac{Ib}{Q}\right)}{1000 * l_2}$$

Ecuación 34

Donde:

W_s = Carga uniforme (kN/m²)

F_s = Esfuerzo cortante por laminación (kN/m²)

Ib/Q = Constante de cortante rodante (mm²/m)

l_2 = Claro, centro a centro de soportes (mm)

Presión basada en la deflexión:

Deflexión aceptable:

$$\Delta_{aceptable} = \frac{l_1}{360}$$

Ecuación 35

Deflexión por esfuerzo cortante:

$$\Delta_s = \frac{C * w * t^2 * 1000}{105.833 * E_e * I}$$

Ecuación 36

Donde:

Δ_s = Deflexión por esfuerzo cortante (mm)

C = Constante, igual a 120 para veta de cara transversal

E_e = Módulo de elasticidad, no ajustado (kN/m²)

t =Espesor de la madera contrachapada (mm)

I =Momento de inercia (mm⁴/m)

Desviación de flexión:

$$\Delta_b = \frac{w * l_3^4 * 1000}{145.25 * EI}$$

Ecuación 37

Donde:

Δ_b = Desviación de flexión (mm)

w = Carga uniforme (kN/m²)

l_3 = Abertura libre+ 6.4 mm para armazón (mm)

E =Módulo de elasticidad, ajustado (kN/m²)

I =Momento de inercia (mm⁴/m)

Presión aceptable:

$$W_{\Delta} = \frac{\Delta_{\text{aceptable}}}{\Delta_s + \Delta_b}$$

Ecuación 38

2.6.8 Ensayos en paneles

Con la elaboración de los paneles y su posterior ensayo, se pretende describir el comportamiento de los paneles no estructurales, tanto para la mezcla de hormigón patrón como la mezcla de hormigón alternativo, bajo procesos de carga cíclicas, los mismos que se encuentran comúnmente en condiciones de servicio. Todos estos criterios permitirán analizar la conveniencia de los paneles como un elemento constructivo.

Las cargas que actúan sobre paredes de mampostería pueden clasificarse como cargas verticales muertas y vivas, comúnmente llamadas cargas de gravedad y cargas laterales, debido a la presión del viento, terremoto, tierra o agua, etc.

Las cargas verticales pueden estar distribuidas aproximadamente de manera uniforme a lo largo de la longitud de la pared o puede incluir una o varias cargas concentradas que se transmiten a pequeñas áreas de la sección de la pared. Las cargas laterales pueden distribuirse uniformemente en la superficie vertical como en el caso del viento, o no uniformes de acuerdo con alguna función de otros factores, como cargas de terremotos o presión de fluido (National Concrete Masonry Association, 2019).

Para el ensayo de los paneles, se considera lo dispuesto por la Norma (ASTM E72, 2017). Los métodos de ensayo han sido seleccionados considerando las características de la prensa ubicada en el laboratorio de la Universidad de Cuenca. Bajo estas condiciones se dispuso que los elementos sean ensayados bajo condiciones de carga compresiva y carga transversal.

El ensayo bajo carga compresiva permite simular los efectos carga a los que será sometido un panel, considerándose principalmente el peso propio de cada elemento. Las pruebas de compresión se realizan con la línea de carga en el plano central del panel. Se aplica esta carga cuando la sección de la pared es geométrica y elásticamente simétrica con respecto a la línea central. En la figura 10, se puede apreciar la metodología de ensayo recomendada por la norma (ASTM E72, 2017), para cargas compresivas.

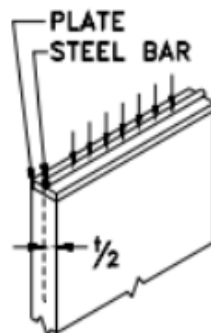


Figura 10. Método de aplicación de carga axial Recuperado de (NCMA, 2019)

Para su aprobación se debe analizar la carga de peso por área tributaria ejercida sobre el panel ensayado, al momento de integrarse a una vivienda, por lo que el valor del peso resultante del análisis de cargas, debe ser menor al valor de carga máxima, para que el panel sea aceptado.

De igual manera el ensayo para flexión pretende simular el comportamiento de un elemento de panel bajo el efecto de viento o fuerzas laterales, que puede soportar este elemento. En lo

dispuesto por la norma se ensayará especímenes apoyados en dos rodillos de acero, cada uno colocado a 15 cm de los extremos del panel. Se aplicará una carga lineal a $\frac{1}{4}$ de la longitud libre, de los apoyos del espécimen. En la figura 11, se puede observar la metodología, sugerida en la norma (ASTM E72, 2017), para ensayos bajo carga transversal.

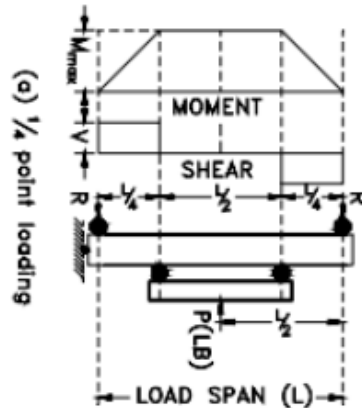


Figura 11. Método aplicación de carga transversal Recuperado de (NCMA, 2019)

Se propone una clasificación de los paneles, de acuerdo a las cargas transversales a la rotura y a la deformación producida, como se indica en las tablas 9 y 10, respectivamente.

Tabla 9

Cargas Transversales a la rotura

Grado	Carga a la Rotura [kgf/m]
No Clasifica	Menor a 500
1	500 - 1000
2	1001- 2000
3	2000 o más

Tabla 10

Deflexión en cargas transversales

Sub-Grado	Flecha [mm]
No Clasifica	Mayor a 100
A	50 - 100
B	25 - 50
C	25 o menos

2.7 ANALISIS DE COSTOS

El APU (Análisis de Precios Unitarios) es un modelo matemático que presenta un resultado, expresado en moneda, de una situación relacionada con una actividad sometida a un estudio detallado. También es una unidad dentro del concepto de obra, ya que la misma puede contener varios rubros a los cuales se asigna un presupuesto.

El presupuesto se define como la suma del producto del precio unitario multiplicado por la cantidad requerida. Cada presupuesto contiene uno o varias partidas. La partida hace referencia a una actividad a realizarse (Valera, 2017).

El APU está sometido al tiempo, influenciado por la inflación, al espacio, debido a la variación del costo de los insumos entre diferentes sitios y a las condiciones del entorno, como proveedores, usuarios y sus respectivas características, así como normativas vigentes, reguladas de acuerdo al sitio donde se realiza la obra.

La EPMMOP (Empresa Publica Metropolitana de Movilidad y Obras Publicas) indica que el



análisis de precios unitarios sirve para analizar el detalle de costos ya sean estos directos o indirectos. Los costos directos incluyen los cuatro componentes básicos: mano de obra, equipos de construcción, materiales y muy particularmente dadas las condiciones y ubicación geográfica del proyecto, el transporte, entre otros mientras que los costos indirectos se determinan en base a los gastos que debe incurrir el Contratista para la Licitación, preparación de la oferta, contratación, instalaciones, costos internos y externos a la obra, así como los imprevistos y utilidades (Pastrana, 2017).

Previo al análisis de los componentes de los costos directos en cada rubro, se establece la conformación de los equipos necesarios para la ejecución de las diferentes actividades, la cuadrilla de operadores y trabajadores y se calcula los rendimientos correspondientes. Igualmente se considera las dificultades particulares, la distancia a las canteras de agregados, la facilidad de obtención de los diferentes materiales básicos como son el cemento, el acero de refuerzo y otros materiales y todas las demás condiciones geográficas y climáticas que influyen en el análisis, de tal manera que este sea técnico y económico (Valera, 2017).

Para estudiar la influencia de la utilización de una mezcla de hormigón, en términos de economía de una obra se tiene previsto realizar un análisis del comportamiento de la estructura, enfocado en las dimensiones de las secciones de los elementos estructurales, así cantidades de acero. Para el diseño de las vigas y columnas se realizó el estudio en el software ETABS, siendo esta una herramienta muy usada y recomendada en temas de análisis de estructuras ya que brinda una guía en el dimensionamiento de secciones, así como su comportamiento ante cargas de servicio. En cuanto a la obtención de las dimensiones de las zapatas se realizó el pre dimensionamiento el mismo que depende del tipo de suelo donde se va a realizar la estructura y de igual manera el área tributaria al que aporta cada zapata.

En lo concerniente al análisis de las losas que se ocuparan en el edificio y determinar los espesores requeridos para que estos cumplan con los requerimientos, se utilizó las expresiones obtenidas del Código Ecuatoriano de la Construcción, de igual manera estas son establecidas en la norma ACI en el capítulo de Losas en una dirección, sección altura mínima genérica de la losa para hormigones tradicionales.

$$h_{min} \geq \frac{Lh(800 + 0.0712F_y)}{36000 + 5000\beta(1 + \beta s)}$$

Ecuación 39

$$h_{min} \leq \frac{Lh(800 + 0.0712F_y)}{36000}$$

Ecuación 40

Dónde:

h_{min} = Espesor mínimo requerido para la losa

L_h = Claro libre en la dirección larga del panel, medido de cara a cara de las columnas en losas sin vigas, y de cara a cara de las vigas en losas sostenidas sobre vigas.

F_y = Limite de fluencia

β = Relación de forma del panel, panel largo libre / panel lado corto.

βs = Relación entre la longitud de los bordes continuos de panel y su perímetro, valor de 1.

2.8 SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL

En los últimos años, a nivel mundial se ha experimentado una tendencia social muy comprometida con obtener una mayor sostenibilidad y un ahorro energético de cualquier



actividad concebible, especialmente en el ámbito de la construcción. Este enfoque se fundamenta en el hecho que la industria de la construcción emplea aproximadamente la mitad de los recursos que el hombre obtiene de la naturaleza, así como, más del 70% de la energía mundial se mueve alrededor de este sector de la economía (Rodríguez & Fernández, 2017), por lo que su influencia en el cambio climático es innegable.

Tendencias como Lean Construction o la construcción modular son alternativas en las que priman técnicas de edificación sostenible orientadas principalmente a maximizar el ahorro energético o la gestión de edificios y sus servicios (Rodríguez, 2017). Es así que se buscan técnicas y metodologías alternativas a procesos de construcción, que permitan unir diferentes actores que intervienen en un proyecto, de manera que se alcancen en primer lugar los objetivos básicos de un proyecto como economía y calidad, así como un desarrollo sostenible en armonía con el medio ambiente. Es por ello que ha surgido el término construcción sostenible el mismo que hace énfasis en un conjunto de medidas pasivas y activas, en diseño y construcción, que permite alcanzar los porcentajes mínimos de ahorro de agua y energía, encaminadas al mejoramiento de la calidad de vida de sus habitantes y al ejercicio de actuaciones con responsabilidad ambiental y social (Serrano, 2017).

Los criterios de sostenibilidad son apoyados con el uso de herramientas medioambientales, las mismas que se pueden clasificar como herramientas de calificación o de cálculo, en diferentes grados de sostenibilidad o como una técnica de ayuda para la toma de decisiones en la gestión de un proyecto. Estas herramientas se diferencian dado que aquellas de carácter de calificación, certifican o premian de acuerdo a un listado de ítems, las acciones de carácter sostenible que se llevaran a cabo a lo largo del ciclo de vida de una infraestructura, mientras que las herramientas calculadoras permiten obtener información sobre la cantidad de impacto ambiental generado en función de los procesos a desarrollarse.

Con el uso de bases de datos disponibles en CRISP (Construction and City Related Sustainability Indicators) del U.S. Department of Energy “Building Technologies Programs”, se pueden identificar varias herramientas de sostenibilidad que trabajan de por medio de sistemas de indicadores.

2.8.1 LEED

El sistema de clasificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), es un estándar nacional voluntario basado en el consenso para el desarrollo de edificios sostenibles de alto rendimiento. Es administrado por el Consejo de Construcción Ecológica de EE. UU., el cual proporciona una herramienta calificadora concebida como guía para la construcción de edificios saludables, eficientes y económicos (U.S. Green Building Council, 2019).

Este sistema utiliza puntos para evaluar el rendimiento del edificio de manera que se pueda cumplir con los objetivos de sostenibilidad. Los puntos son otorgados cuando se cumpla con alguna de las intenciones especificadas. Se considera que un edificio con certificación LEED puede recibir uno de los cuatro niveles de certificación para reconocer el grado de éxito. Se tiene una certificación LEED al obtener de 40 a 49 puntos. Existen además niveles de aprobación adicionales ya sean estos LEED Plata al obtener entre 50- 59 puntos, LEED Oro tras conseguir entre 60 – 79 puntos y finalmente LEED platino que se otorgan al obtener entre 80 y 110 puntos (U.S. Green Building Council, 2019). Para el cumplir con el proceso de certificación de una infraestructura, se deben cumplir una serie de pasos que han sido previstos

por el Consejo de Construcción Ecológica de EE. UU, detallados en la figura 12.

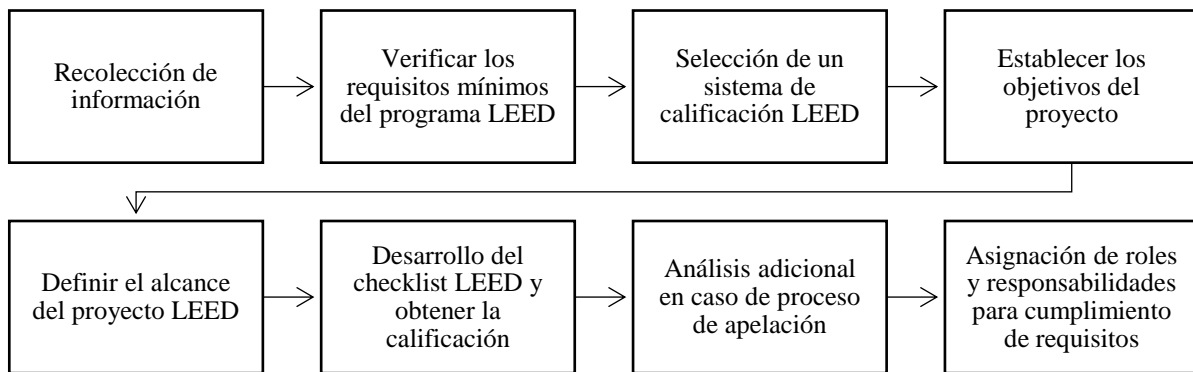


Figura 12. Certificación LEED

En este trabajo de investigación debido al planteamiento del uso mezclas de hormigón con caucho incorporado, para aplicarse en paneles no estructurales, el sistema de calificación LEED será el correspondiente a LEED v4 BD+C: Diseño y Construcción de Edificios (D+CE), dado que este sistema es válido para cualquier tipología de Nuevas Construcción.

Para este caso el checklist consta de 9 secciones o categorías de créditos: Proceso Integrador, Localización y Transporte, Parcelas Sostenibles, Eficiencia en Agua, Energía y Atmósfera, Materiales y Recursos, Calidad Ambiental Interior, Innovación y Prioridad Regional. Como se observa debido a las características del proyecto, se debe identificar las secciones que están relacionadas con el aprovechamiento de materiales reciclados en procesos constructivos y es así que se han seleccionado Materiales y Recursos y la sección de Innovación.

La categoría de Materiales y Recursos (MR), se enfoca en la minimizar la energía embebida y otros impactos asociados con la extracción, procesado, transporte, mantenimiento y eliminación de desechos de materiales de construcción, de manera que se planifique el ciclo de vida en el que se mejore el rendimiento y la eficiencia de los recursos (U.S. Green Building Council, 2019).

En cuanto a la sección de Innovación (In), debido a las nuevas tecnologías y la investigación científica empleadas en la estrategia de diseño de edificios, se reconoce las características de construcción innovadora, estrategias y prácticas de construcción sostenible (U.S. Green Building Council, 2019).

2.8.2 GREENROADS

Es una herramienta calificadora que permite cuantificar los atributos de un proyecto, tras superar expectativas de rendimiento en ámbitos como ambiental, económico y social por medio de un sistema de reconocimientos o recompensas. Esta herramienta es un compilado de prácticas que definen la sostenibilidad de un proyecto, las mismas que se encuentran enmarcadas en diferentes categorías que conforman un checklist, el cual puede desarrollarse con el uso de la versión on-line Greenroads V2 Project. Las categorías de análisis que utiliza esta herramienta, son descritas en el manual (Greenroads, 2019) y son las siguientes:

- *Requisitos del proyecto:* Actividades básicas de carácter obligatorias que se deben cumplir para que un proyecto se catalogue como sostenible. 12 requerimientos mínimos propuestos por Greenroads



- *Medio Ambiente y Agua:* Promueve las mejores prácticas ambientales relacionadas con el uso de la tierra, hábitat, agua y demás recursos ecológicos.
- *Actividades de construcción:* Promover las mejores prácticas en ámbitos ambientales, sociales y económicos para la construcción más allá de un cumplimiento mínimo.
- *Materiales y diseño:* Promover prácticas responsables para la administración de materiales con la finalidad de reducir costos, así como extender la vida útil de los elementos y reducir el proceso de mantenimiento.
- *Utilidades y controles:* Promover prácticas que permitan mejorar las operaciones, mejorar la movilidad, alcanzar sistemas eficientes y mejorar la experiencia del usuario.
- *Acceso y habitabilidad:* Promover las mejores prácticas para mejorar la calidad de vida, incluyendo aspectos como seguridad, salud humana, accesos, justicia social y creación de lugares.
- *Creatividad y esfuerzo:* Promover prácticas que sea únicas y que permitan superar las expectativas de rendimiento.

El proceso de certificación de un proyecto está en función de los puntos alcanzados, los mismo que dependiendo de la magnitud del proyecto se determinan como niveles de certificación o niveles de logro. La obtención de estos niveles es un reconocimiento oficial de Greenroads de que un proyecto ha cumplido con todos los requerimientos del proyecto y ha logrado los puntos suficientes. Los niveles de certificación son presentados a continuación:

Bronce:	40-49 puntos + 12 requisitos del proyecto
Plata:	50-59 puntos + 12 requisitos del proyecto
Oro:	60-79 puntos + 12 requisitos del proyecto
Evergreen:	+80 puntos + 12 requisitos del proyecto

2.8.3 PaLATE

The Pavement Life-cycle Assessment Tool for Environmental and Economic Effects (PaLATE) (University of California, Berkeley, 2019). Es un programa que a diferencia de las herramientas antes mencionadas, es una herramienta con características de calculadora, es decir que permite medir el impacto ambiental y económico principalmente en pavimentos y carreteras, sin embargo, debido a que permite medir factores como el consumo de energía y emisiones de CO₂, NO_x, PM₁₀, SO₂, CO por medio del CO₂ equivalente obtenido en análisis, se utilizará en este proyecto con el uso de caucho en mezclas de hormigón alternativo (University of California, Berkeley, 2019).

Dentro del programa también se incluye un análisis de ciclo de vida, que compara los costos asociados con procesos y materiales lo que permite tener una visión en la comparativa entre un hormigón patrón y un hormigón alternativo. Para lo cual se hará uso de información concerniente a características físicas de los materiales que intervienen, para este caso una mezcla de hormigón, así como cantidades de dosificación y desde luego el análisis de costos. Con la finalidad de evidenciar los resultados obtenidos se utilizará la calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero propuesta por (EPA, 2019), la misma que presenta en términos cotidianos la reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), expresándola en factores como: Emisiones de gases de efecto invernadero, Emisiones de CO₂ o las emisiones evitadas por la toma de una decisión.

3. METODOLOGÍA

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS ARIDOS

3.1.1 Granulometría

Para determinar la distribución granulométrica de las partículas del árido fino y grueso por un proceso de tamizado, se consideró la norma (NTE INEN 0696, 2011).

Equipo.

Balanzas. Con una precisión de 0.1 g

Tamices. Las mallas de tamices deben estar en condiciones adecuadas de manera que evite pérdida de material durante el proceso de cribado. En la serie gruesa se consideró el siguiente juego de tamices con las mallas 3/4", 1/2", 3/8", N°4, para la serie fina se consideró las siguientes mallas N° 4, N° 8, N° 16, N° 30, N° 50, N° 100 y N° 200.

Tamizadora mecánica.

Horno. Un equipo con las dimensiones requeridas, que permita mantener una temperatura uniforme de $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, de manera sostenida.

Materiales.

El tamaño de la muestra para el ensayo de árido grueso se define de acuerdo a la tabla 1, obtenida de la norma de diseño.

El tamaño máximo nominal (TMN), del árido grueso es de 19 mm, por lo que se consideró una muestra de aproximadamente 7 kg. Para el árido fino, se consideró una muestra de 1.5 kg.

Procedimiento

Tras un proceso de cuarteado del material se secó la muestra hasta obtener una masa constante. En base al dispuesto por la norma, se seleccionaron las mallas de tamices que permitan retener el material, de manera adecuada, ordenándose en forma decreciente según el tamaño de su abertura.

Se agitaron los tamices por medio de una tamizadora mecánica durante un período de tiempo aproximado de 5 minutos, se verificó además que los mismos no presenten imperfecciones que afecten los resultados del ensayo, el proceso se ejemplifica en la figura 13.



Figura 13. Granulometría Árido Grueso

Posteriormente se determinaron las masas retenidas en cada tamiz con el uso de una balanza.



El procedimiento anteriormente descrito fue considerado tanto para árido grueso como para árido fino. En las tablas 11 y 12 se presentan los resultados obtenidos para cada árido.

3.1.1.1 Granulometría Árido Grueso

En primera instancia, el tamaño del material retenido en cada tamiz no se encontró dentro de los rangos de aceptación dispuestos por organismos pertinentes, es por ello que se procedió a realizar la corrección de la granulometría de cada árido. Este proceso consistió en la selección de material, para cada porcentaje de árido retenido en las mallas, según el juego de tamices dispuesto en la norma. En el caso del árido grueso, por facilidad se seleccionaron porcentajes entre tamices, que cumplan con el límite inferior. En la tabla 11, se presentan los resultados del ensayo de granulometría para el árido grueso tras la corrección granulométrica.

Tabla 11

Granulometría árido grueso

Tamiz	Abertura [mm]	Peso retenido parcial [g]	Peso retenido corregido [g]	Peso retenido acumulado [g]	Porcentaje Retenido parcial [%]	Porcentaje Retenido acumulado [%]	Porcentaje Pasa [%]
2"	50.8	0	0	0	0	0	100
1 1/2 "	37.5	0	0	0	0	0	100
1"	25	0	0	0	0	0	100
3/4 "	19	997.1	997.1	997.1	14.2	14.2	90
1/2 "	12.5	4066.7	4063.9	5061	57.7	71.9	-
3/8"	9.5	1424.9	1424.9	6485.9	20.2	92.1	20
Nº4	4.75	546.4	546.4	7032.3	7.8	99.9	0.1
FONDO		5.1	5.1	7037.4	0.07	100	0
Peso inicial: 7037.4		7040.2	7037.4	-	100	-	-

Se puede observar la distribución granulométrica del árido en la figura 14, así como el rango de aceptación indicado en la norma. Debido a la distribución granulométrica inicial del árido grueso, se realizó una corrección en su distribución, asemejando al límite inferior.

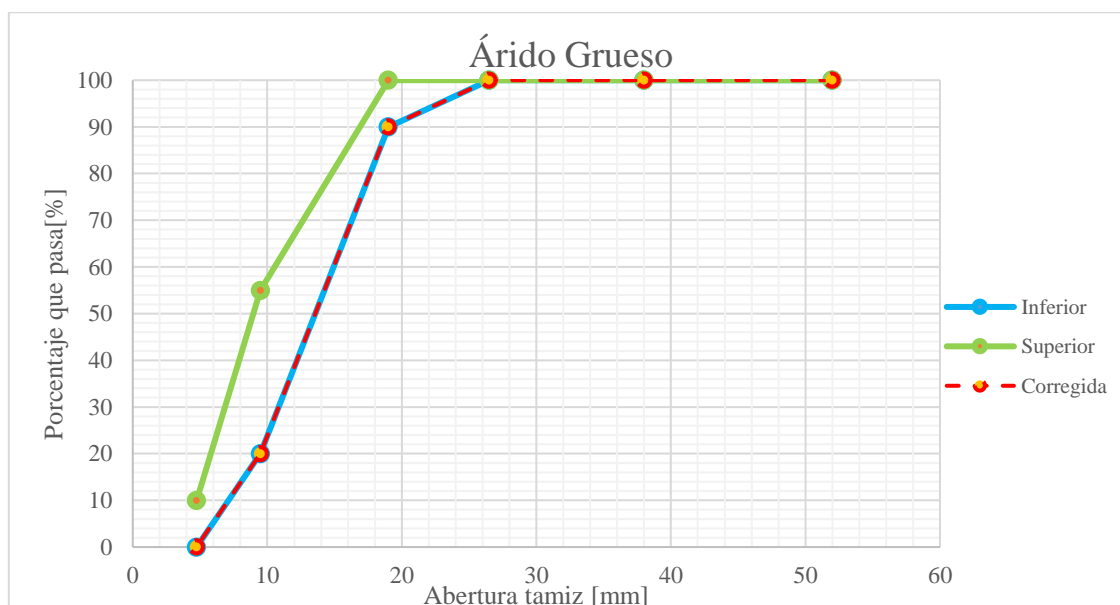


Figura 14. Distribución granulométrica Árido Grueso

3.1.1.2 Granulometría Árido Fino

Siguiendo la metodología descrita para el árido grueso, se verificó los rangos de aceptación de organismos pertinentes y se determinó que se debía realizar una corrección en la distribución de tamaños de la muestra del árido.

En la tabla 12, se presentan los resultados obtenidos para el ensayo de granulometría una vez realizado el proceso de corrección, de igual forma se puede observar en la figura 15, su distribución granulométrica en comparación con los rangos dispuestos por la norma guía.

Tabla 12
Granulometría árido fino

Tamiz	Abertura [mm]	Peso retenido parcial [g]	Peso retenido corregido [g]	Peso retenido acumulado [g]	Porcentaje Retenido parcial [%]	Porcentaje Retenido acumulado [%]	Porcentaje Pasa [%]
N°4	4.75	5.3	5.3	5.3	0.4	0.4	99.6
N°8	2.38	312	312	317.3	20.7	21.1	80
N°16	1.19	395.7	395.7	713	26.3	47.4	52.6
N°30	0.59	413	415.4	1128.4	27.6	75	25
N°50	0.3	298.8	298.8	1427.2	19.9	94.9	10
N°100	0.15	71.1	71.1	1498.3	4.7	99.6	2
N°200	0.07	2.6	2.6	1500.9	0.2	99.8	-
FONDO		3.1	3.1	1504	0.2	100	-
Peso inicial: 1504		1501.6	1504	-	100	-	-

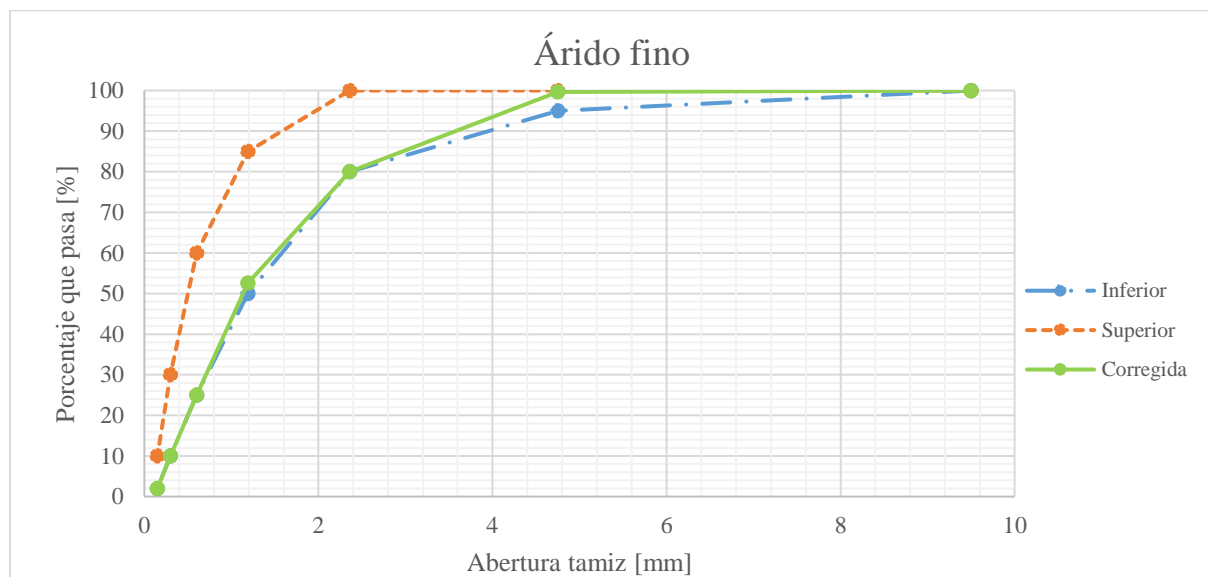


Figura 15 distribución granulométrica Árido Fino

3.1.2 Masa Unitaria

Para el ensayo cuya finalidad es la determinación de la masa unitaria suelta y compactada del árido fino y grueso se siguió la norma (NTE INEN 0858, 2010).

Equipo.

Balanzas. Con una precisión de 0.5 g

Varilla de compactación: Para este caso de acero y lisa con un diámetro de 16 mm y 600 mm de longitud.



Molde metálico: Que presente altura y diámetro aproximadamente iguales.

Horno. Un equipo con las dimensiones requeridas, que permita mantener una temperatura uniforme de $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, de manera sostenida.

Materiales.

Dado que no se da un valor específico de material para este ensayo, la cantidad está sujeta al criterio de los autores, para este caso se consideró una cantidad suficiente para llenar el molde metálico más un pequeño porcentaje para cubrir desperdicios. La muestra al momento de ensayarse estaba completamente seca presentando una masa constante.

Procedimiento.

En primer lugar, se realizó la calibración de los moldes, para ello se llenó los mismos con agua, determinándose su masa en esas condiciones, y se dividió para la densidad conocida del agua, la misma que se encuentra en función de la temperatura a la que se realizó el ensayo, de esta manera se determinó el volumen del molde.

Posteriormente se realizó un proceso de varillado, compactando la capa de agregado con 25 golpes uniformemente distribuidos sobre la superficie. Se siguió el mismo procedimiento para las 3 capas, finalmente se enrasó con la misma varilla. Se trató de ser cuidadoso al compactar la primera capa, dado que no se debe permitir que la varilla toque con fuerza el fondo del molde, de igual manera para la segunda y tercera capa se debe compactar con fuerza, pero sin penetrar en la capa anterior.

Una vez enrasado se registró el peso lleno y el peso del molde, como se detalla en la figura 16. Finalmente se determinó la masa de árido, determinándose la masa unitaria, al dividir para el volumen del recipiente (NTE INEN 0858, 2010).



Figura 16. Ensayo Masa Unitaria, árido grueso

Los resultados del ensayo de la determinación del peso volumétrico seco compactado se expresan la tabla 13.



Tabla 13
Peso Volumétrico Seco Compacto (PVSC)

Parámetro	Cantidad		Unidad
	Grueso	Fino	
Tipo de Árido	Grueso	Fino	-
Peso picnómetro	6173.1	2865.9	g
Peso vidrio	778.9	778.9	g
Peso pic. + vidrio	6952	3644.8	g
Peso pic. + vidrio+ agua	16631.1	6616.3	g
Temperatura de ensayo	18	18	°C
Densidad del agua	998.54	998.54	kg/m ³
Peso agua	9679.1	2971.5	g
Volumen picnómetro	0.00969325	0.00297584	m ³
ID.	Material suelto		
1	14750.6	4709	g
2	14731.1	4736	g
3	14723.4	4726	g
Promedio	14735	4723.7	g
PVSC	1520	1587	kg/m ³

El mismo procedimiento fue considerado para el caso de la masa unitaria suelta, con la variación de que en esta ocasión no se realizó el proceso de compactación. En la tabla 14, se pueden observar los resultados para el ensayo del peso volumétrico seco suelto.

Tabla 14
Determinación Peso Volumétrico Seco Suelto (PVSS)

Parámetro	Cantidad		Unidad
	Grueso	Fino	
Tipo de Árido	Grueso	Fino	-
Peso picnómetro	6173.1	2865.9	g
Peso vidrio	778.9	778.9	g
Peso pic. + vidrio	6952	3644.8	g
Peso pic. + vidrio+ agua	16631.1	6616.3	g
Temperatura de ensayo	18	18	°C
Densidad del agua	998.54	998.54	kg/m ³
Peso agua	9679.1	2971.5	g
Volumen picnómetro	0.009693	0.002975	m ³
Identificación	Material Suelto		
1	13230.5	4562.1	g
2	13254.3	4531.8	g
3	13253	4512.2	g
Promedio	13245.9	4535.4	g
PVSS	1367	1524	kg/m ³

3.1.3 Densidad Relativa y Absorción

Se realizó una consideración por separado para cada una de las muestras, analizándose individualmente para el árido fino y árido grueso.

3.1.3.1 Árido Fino. Para determinar la densidad específica y absorción del árido fino, se siguió la norma (NTE INEN 0856, 2010).

Equipo.

Balanzas. Con una precisión de 0.5 g

Molde cónico de metal de 40 ± 3 mm de diámetro en la parte superior, 90 ± 3 mm de diámetro en el fondo, con 75 ± 3 mm de altura.

Pisón metálico de 340 ± 15 gramos de peso y que tenga una sección circular de 25 ± 3 mm de diámetro.

Horno. Un equipo con las dimensiones requeridas, que permita mantener una temperatura uniforme de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, de manera sostenida.

Materiales.

Una muestra de aproximadamente 1000 gr de árido fino.

Procedimiento.

En primera instancia se preparó la muestra hasta alcanzar un estado SSS, bajo el siguiente procedimiento.

Se colocó la muestra en una bandeja, luego se la cubrió con agua dejándola reposar por $24 \text{ h} \pm 4 \text{ h}$. Transcurrido este periodo de tiempo, se eliminó el exceso de agua, evitando que se dé la pérdida de finos.

La muestra fue colocada en la cocineta, revolviéndola frecuentemente de manera que alcance un estado uniforme.

Con el uso del molde cónico y pisón se aplicó 25 golpes sobre la superficie del material dejando caer el pisón desde una altura aproximada de 1 cm, se niveló y se verificó que al levantar el molde se desmorone parcialmente, esto se observa en la figura 17.



Figura 17. Determinación del estado SSS, árido fino

Ensayo para determinar la densidad relativa y absorción.

Se llenó el picnómetro hasta la marca y se registró su peso.

Se eliminó las dos terceras partes del contenido de agua del picnómetro y se tomó 500 gramos de arena en condición saturada superficialmente seca (SSS), colocándola en el picnómetro llenándolo con agua hasta el borde.

Se agitó bien para eliminar las burbujas y se registró el peso del frasco con agua y material. Posteriormente se retiró el agua en exceso, y la arena contenida en el frasco se colocó en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ por un periodo de 24 horas.

Finalmente se registró el peso de la muestra seca al horno, como se observa en la figura 18.



Figura 18. Determinación del peso seco, árido fino



Como se indica en la tabla 15, se exponen los resultados del ensayo para determinación de la densidad y absorción del árido fino.

Tabla 15
Determinación de densidad y absorción

Parámetro		Cantidad	Unidad
Tipo de árido		Fino	-
Peso matraz + agua		657.2	g
Temperatura inicial del ensayo		20	°C
Material SSS		500	g
Temperatura final del ensayo		26	°C
Densidad del agua		996.59	kg/m ³
Peso matraz + agua + material SSS		960.7	g
Peso material seco al horno		480.1	g
Masas			
Masa seca al horno	A	480.1	g
Masa pic. Lleno	B	657.2	g
Masa pic. Material + agua	C	960.7	g
Masa en sss	S	500	g
Densidades y absorción			
Densidad relativa	SH	2.443	-
Densidad relativa	SSS	2.544	-
Densidad aparente	SSS	2.718	-
Densidad	SH	2435	kg/m ³
Densidad	SSS	2536	kg/m ³
Densidad aparente		2709	kg/m ³
Absorción		4.1	%

3.1.3.2 Árido Grueso. Para determinar la densidad específica y absorción del árido grueso, se consideró la norma (NTE INEN 0857, 2010).

Equipo.

Balanzas. Con una precisión de 0.5 g

Canastilla de alambre. Que presente un ancho y altura aproximadamente iguales, con una capacidad de entre 4 litros a 7 litros, además que permita mantener un árido con tamaño máximo nominal de 37.5 mm o menor.

Tanque. Recipiente donde se coloca la canastilla para realizar los ensayos.

Horno. Un equipo con las dimensiones requeridas, que permita mantener una temperatura uniforme de 110°C±5°C, de manera sostenida.

Procedimiento.

Se preparó la muestra hasta alcanzar un estado SSS, bajo el siguiente procedimiento.

Se colocó la muestra en una bandeja, se comprobó que sea una cantidad de material que cubra al menos las 2/3 partes del volumen de la canastilla. Posteriormente se sumergió la muestra en agua dejándola reposar por 24 h ± 4 h. Transcurrido este periodo, se eliminó el exceso de agua. Con el uso de una toalla, se eliminó la lámina visible de agua sobre la muestra. Dentro de este punto se debe evitar la evaporación de agua desde los poros, durante el proceso de secado.

Ensayo para determinar la densidad relativa y absorción.

Se registró el peso de la canastilla suspendida, posteriormente se colocó la muestra en estado SSS, en la canastilla suspendida, registrándose su peso combinado, como en la figura 19.



Figura 19. Determinación de la densidad, árido grueso

Posterior, se registró el peso de la masa aparente, al sumergir la muestra de ensayo, indicando conjuntamente la temperatura del agua.

Se retiró la muestra y se colocó en el horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ \text{C}$ por un periodo de 24 horas, transcurrido ese periodo de tiempo se determinó el peso de la muestra seca. A continuación, en la tabla 16, se pueden observar los resultados del ensayo antes dispuesto.

Tabla 16

Determinación de densidad y absorción

Parámetro	Cantidad	Unidad
Tipo de árido	Grueso	-
Peso canastilla aire	492.2	g
Peso material sss (suspendida)+canastilla	5946.9	g
Peso muestra sumergida+ canastilla	3813.3	g
Peso canastilla sumergida	435.2	g
Peso material seco al horno	5808.7	g
Temperatura	21	$^\circ\text{C}$
Densidad	987.97	kg/m^3
Masas		
Masa en aire, muestra seca al horno	A	5316.5 g
Masa en aire, muestra sss	B	5454.7 g
Masa aparente, muestra sss	C	3378.1 g
Densidades y absorción		
Densidad relativa	SH	2.560 -
Densidad relativa	SSS	2.626 -
Densidad aparente	SSS	2.742 -
Densidad	SH	2529 kg/m^3
Densidad	SSS	2595 kg/m^3
Densidad aparente		2710 kg/m^3
Absorción		2.6 %



3.1.4 Porcentaje de espacios y finos en el árido

Debido a que el árido fino tiene una influencia en el desempeño de la mezcla de hormigón, se debe considerar el análisis de características propias como el porcentaje de espacios o la presencia de partículas desmenuzables.

Equipo.

Probetas. Graduadas de 1000 cm³

Procedimiento.

En una probeta graduada de 1000 cm³ se colocó un volumen de agua, en otra probeta se colocó un volumen de arena determinado, se verificó que el volumen de agua sea mayor al de arena y que la suma de las dos sea menor a 1000 cm³, se registró los volúmenes correspondientes. Se colocó el volumen de agua en el de arena y se dejó reposar durante 24 horas. Se determinó la lectura de volumen transcurrido ese periodo. El resultado a este ensayo se observa detalladamente en la tabla 17.

Tabla 17
Porcentaje de espacios y finos

Parámetros	Cantidad	Unidad	Norma	Obs.
Volumen arena V1	300	cm ³		
Volumen de agua V2	600	cm ³		
Volumen después V3	780	cm ³		
Volumen finos Vol. F	10	cm ³		
Espacios vacíos	40	%		
Finos	1.3	%	3 %	OK

3.1.5 Partículas desmenuzables en el árido

Para realizar este ensayo se siguió la norma (NTE INEN 0698, 2010).

Equipo.

Tamices. Mallas correspondientes al #4, # 16 y # 30

Procedimiento.

Se tamizó una muestra de arena entre los tamices #4 y #16, se realizó este proceso hasta que se registró un peso retenido en el tamiz # 16 de aproximadamente 200 gr. Este material se colocó en una bandeja y se desmenuzó ejerciendo presión entre los dedos. Se tamizó sobre la malla #20 y se registró el peso del material retenido por esta malla. Se presentan los resultados obtenidos en este ensayo en la tabla 18.

Tabla 18
Partículas desmenuzables

Parámetros	Cantidad	Unidad	Norma	Obs.
Material retenido por el #16	235.2	g		
Material retenido por el #20	233.8	g		
Partículas desmenuzables	0.6	%	3 %	OK

3.1.6 Abrasión del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm mediante el uso de la Máquina de los Ángeles

Para realizar este ensayo se consideró la norma (NTE INEN 0860, 2011).

Equipos

Máquina de Los Ángeles. Debe cumplir con los requisitos especificados en la (NTE INEN 0860, 2011).

Juego de tamices. Tamices de malla que se especifican en la norma guía.

Balanza. Con una precisión de 0.5 g

Carga. Consiste en 12 esferas de acero, que un diámetro aproximado de 47 mm y que presenten una masa entre 390 g y 445 g y que tengan una masa total de $5\,000\text{ g} \pm 25\text{ g}$.

Procedimiento

En primera instancia se determinó la gradación del material disponible, para lo cual se consideraron los resultados obtenidos para la granulometría de árido grueso, indicada en la tabla 2.

Tras definirse los rangos de peso en función de los tamaños especificados se colocó en la máquina la muestra a ensayar y la carga especificada, como se presenta en la figura 20. Se procedió a girar a una velocidad de entre 30 a 33 r/min, llegando a alcanzar 1 000 revoluciones.



Figura 20. Máquina de los Ángeles

Después del número prescrito de revoluciones, se descargó el material sobre una bandeja y se realizó una primera separación de la muestra con una abertura mayor que el de 1.70 mm. Luego se realizó un proceso de cribado de la porción fina al pasar por la malla de 1.70 mm. (NTE INEN 0696, 2011). Posteriormente, se lavó el material más grueso que 1.70 mm y se procedió a secarlo al horno a $110\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$ hasta obtener masa prácticamente constante y finalmente determinándose la masa. Los resultados obtenidos se expresan detalladamente en la tabla 19.

Tabla 19

<i>Determinación de abrasión</i>					
Tipo de Gradación	B			Norma	Obs.
Retenido	Pasante	Cantidad	Unidad		
3/4"	1/2"	2500.4	g		
1/2"	3/8"	2502	g		
Material máquina. de los ángeles		5002.4	g		
Material retenido en tamiz # 12		4248	g		
Abrasión		15	%	50.00 %	OK

3.1.7 Caracterización del material reciclado

3.1.7.1 Granulometría del caucho reciclado

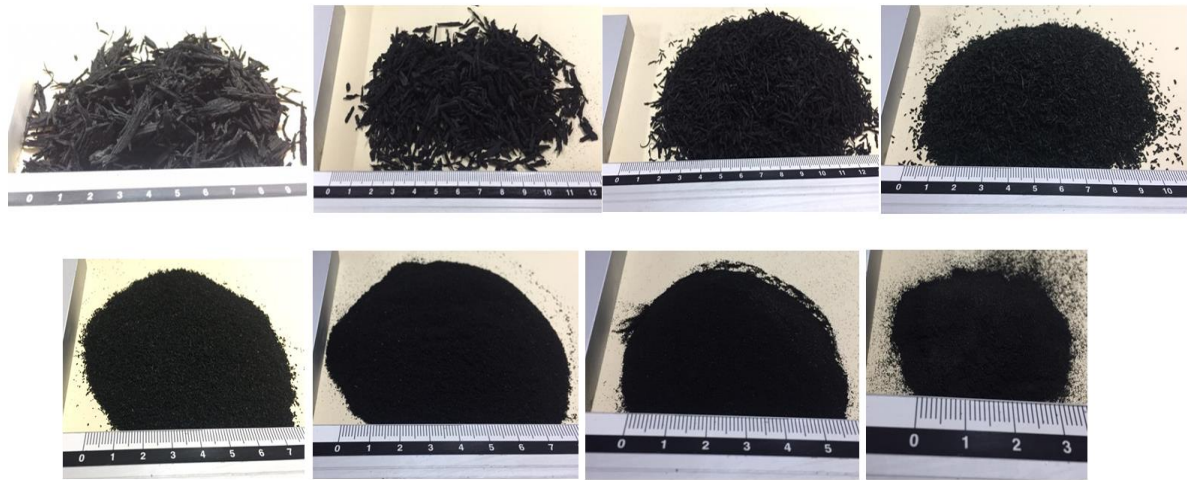
Debido a las características físicas del material reciclado y tras un análisis general se determinó que la mayoría de las fibras de caucho reciclado presentan tamaños inferiores a los 4.75 mm, malla N°4, por lo que el ensayo granulométrico se realizó siguiendo lo dispuestos por la norma,

(NTE INEN 0696, 2011), para árido fino. En la tabla 20, se puede apreciar los resultados obtenidos en la distribución granulométrica del material reciclado, en este caso, caucho.

Tabla 20
Granulometría Caucho

Tamiz	Abertura [mm]	Peso retenido parcial [g]	Peso retenido acumulado [g]	Porcentaje Retenido parcial [%]	Porcentaje Retenido acumulado [%]	Porcentaje Pasa [%]
N°4	4.75	46.9	46.9	13.4	13.4	86.6
N°8	2.38	94.2	141.1	26.9	40.2	59.8
N°16	1.19	138.6	279.7	39.5	79.8	20.2
N°30	0.59	51.1	330.8	14.6	94.4	5.6
N°50	0.3	9.3	340.1	2.7	97	3
N°100	0.15	6.5	346.6	1.9	98.8	1.2
N°200	0.07	3.4	350	0.9	99.9	0.1
FONDO	-	0.5	350.5	0.1	100	0
Peso inicial = 350.5		350.5	-	100	-	-

Se observa en la figura 21, la distribución del tamaño del material reciclado, después del ensayo granulométrico. Esto se hace más evidente al comparar con la información presentada en la figura 22, en la que se observa la distribución granulométrica del caucho. En los anexos se detalla el tamaño de las partículas de caucho.



La distribución del material tras someterse al ensayo de granulometría. Arriba de izquierda a derecha, material retenido en malla N°4, N°8, N°16y N°30. Abajo de izquierda a derecha, malla N°50, N°100, N°200y Fondo.

Figura 21. Muestra de caucho, tras granulometría

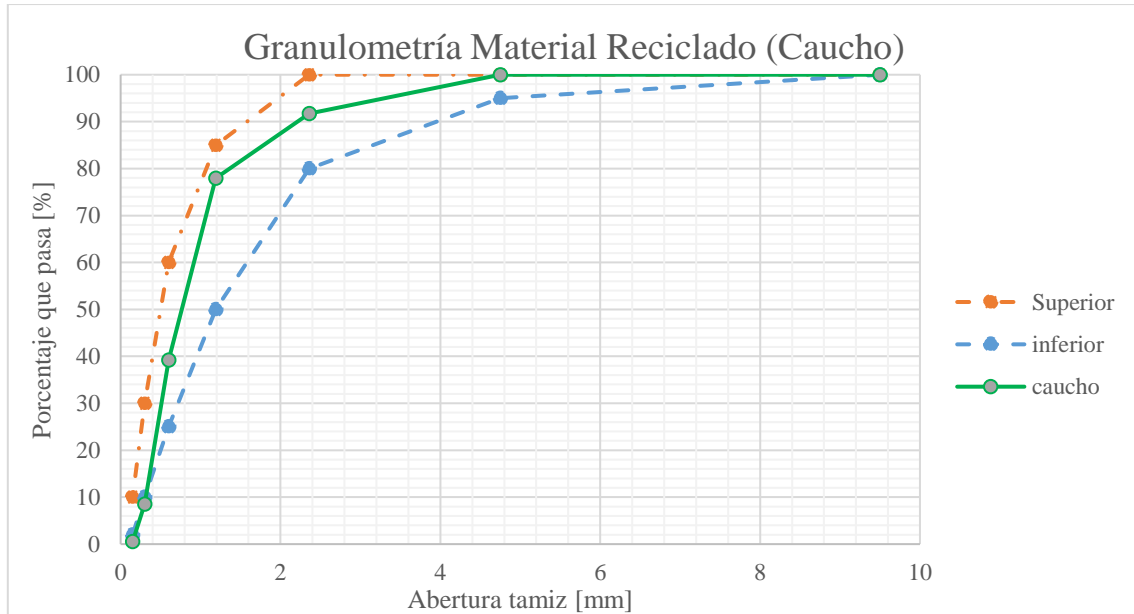


Figura 22. Granulometría Material Reciclado

3.1.7.2 Masa unitaria de la fibra de caucho

El procedimiento para la determinación de la masa unitaria de la fibra de caucho fue el mismo que se utilizó para el árido fino. Se determinó la determinación de la densidad suelta y compactada del agregado fino en base a la norma (NTE INEN 0858, 2010). Los resultados de este ensayo pueden observarse en la tabla 21. Este ensayo es de gran importancia, dado que permite determinar la densidad del caucho bajo condiciones en las que se reemplazará con el árido fino, lo que permitirá definir la dosificación de las diferentes mezclas de hormigón alternativo.

Tabla 21

Peso unitario o volumétrico del caucho

Parámetro	Cantidad	Unidad
Peso picnómetro	2858.4	g
Peso vidrio	776.8	g
Peso picnómetro + vidrio	3635.2	g
Peso picnómetro + vidrio+ agua	6595.5	g
Temperatura de ensayo	19	°C
Densidad del agua	998.49	kg/m ³
Peso agua	2960.3	g
Volumen picnómetro	0.00296	m ³

Identificación	Material Suelto		Unidad
	PVSS	Material Compactado PVSC	
1	1032.3	1298.6	g
2	1025.8	1306.5	g
3	1028.7	1276.7	g
Promedio	1028.9	1293.9	g
Resultado	347	436	kg/m ³



3.2 DISEÑO Y ELABORACION DE MEZCLAS

3.2.1 Mezcla de Hormigón Patrón

Tras el proceso de verificación del cumplimiento de las características del agregado bajo las premisas de la normativa ecuatoriana, así como de organismos autorizados como la ASTM, se realizó el diseño de una mezcla de hormigón patrón que será considerado como punto de comparación de las diferentes características para las mezclas que contengan material reciclado. Se debe mencionar que se realizó una corrección por asentamiento, dado que, la primera mezcla elaborada se presentó un asentamiento de 6 cm, marcándose una diferencia de 1.5 cm, en vista que el diseño se realizó para un asentamiento de 7.5 cm. La dosificación del hormigón patrón definitiva se indica en la tabla 22.

Tabla 22

Diseño de mezcla de hormigón patrón

Hormigón Patrón	Resistencia:	297 kg/cm ²
	Asentamiento:	Mezcla fluye
Materiales	Mezcla/ m ³	Materiales Mezcla
	Peso Seco [kg]	Peso Seco [kg]
Agua	275.83	5.200
Cemento	599.63	11.303
Árido Grueso	886.93	16.718
Árido Fino	617.61	11.642
Aire	0	0
TOTAL	2380	44.863

3.2.2 Mezcla de Hormigón Alternativo

En primer lugar se debe determinar un porcentaje de caucho que brinde una resistencia que sea la adecuada para elementos como paneles utilizados como muros o separadores de espacios, es así que de acuerdo a (Sukontasukkul, 2009) la resistencia mínima es de 18 MPa. Sin embargo, por motivos de seguridad se plantea una desviación de 2 MPa de manera que permita cumplir con los estándares de fabricación.

Se consideró diferentes porcentajes de caucho, la selección de los mismos se realizó considerando investigaciones previas. Para (Sukontasukkul, 2009) en su estudio se consideró 4 diferentes porcentajes de análisis, una muestra patrón y muestras alternativas con 10%, 20% y 30% de caucho incorporado, en reemplaza de árido fino. De igual manera (Holmes, Browne, & Montague, 2014), consideran porcentajes de 7.5% y 15% de caucho incorporado en detrimento de árido fino, como muestras alternativas de hormigón. Más autores pueden encontrarse en lo dispuesto por (Rashad, 2015) en donde se destaca (Bignozzi, Sandolini, 2006) quienes utilizan 22.2% y 33.3 %. Otro autor (Flores, Flores, & Hernández-Olivares, 2016), si bien hace un análisis de reemplazo de caucho por árido grueso considera valores para muestras alternativas de 20%, 40%, 60%, 80%, 100%.

Por lo mencionado se consideró inicialmente porcentajes del 5% y del 22%, esto dado que se tenía previsto que la mezcla de hormigón alternativo alcance los 210 kg/cm², en porcentajes cercanos al 20%, es así que el valor de 22% buscaba estar alejado de un valor esperado para dicha resistencia, de manera que se pueda diferenciar en cuanto al comportamiento entre una y

otra mezcla de hormigón.

Sin embargo, este no fue el comportamiento que se obtuvo al realizar los ensayos, es así que posteriormente se consideró un porcentaje del 40% y finalmente del 30% de caucho en reemplazo de volumen de árido fino. En la tabla 23, se puede observar la dosificación de las diferentes mezclas de hormigón alternativo.

Tabla 23
Dosificación de mezclas de hormigón alternativo

Porcentaje [%]	Peso [kg] por m ³						
	3/4"	3/8"	N°4	Arena	Caucho	Cemento	Agua
0	88.693	620.851	177.386	617.61	0	599.63	275.83
5	88.693	620.851	177.386	586.73	7.032	599.63	275.83
22	88.693	620.851	177.386	494.088	28.128	599.63	275.83
30	88.693	620.851	177.386	432.327	42.192	599.63	275.83
40	88.693	620.851	177.386	370.566	56.256	599.63	275.83

3.2.3 Elaboración de especímenes de Hormigón

El proceso descrito fue el desarrollado para la elaboración de cada uno de los especímenes de las diferentes mezclas de diseño. El agregado mineral previo a su utilización fue lavado y caracterizado en función a la granulometría de diseño, proceso que se observa en la figura 23. Con la finalidad de mantener la homogeneidad en cada una de las mezclas elaboradas, el agregado previo a su uso, fue sometido a un proceso de secado en horno, posteriormente colocado a enfriar a temperatura ambiente, con el propósito de simplificar la variabilidad de la cantidad de agua de diseño y humedad.



Figura 23. Lavado del árido, a usar en las mezclas de hormigón

En el caso de las mezclas en las que se incorporó material reciclado, este no fue sometido a ningún tipo de lavado, dado que se trató de mantener las condiciones en las que el material fue entregado por la empresa Durallanta S.A. tras su generación. Y se mezcló de manera uniforme con el árido fino, como se observa en la figura 24.



Figura 24. Obtención y mezcla del caucho con el agregado fino

El agua usada para la elaboración de las mezclas, así como para el proceso de curado de los especímenes de hormigón, es agua potable de la ciudad de Cuenca.

Para el proceso de elaboración de las mezclas de hormigón, y tras el pesado de los agregados de acuerdo a la dosificación elegida, se limpió y humedeció la máquina mezcladora de manera que no se pierda agua calculada para la hidratación del cemento, lo que afectaría el comportamiento de la mezcla, dado que variaría la relación agua/cemento.

Se colocó el árido grueso en su totalidad y se añadió la mitad de la cantidad de agua, dejándose mezclar por 1 minuto. A continuación, se agregó toda la cantidad de cemento y del árido fino, mezclándose por cerca de 4 minutos, mientras la cantidad restante de agua se colocó de manera paulatina.

Una vez finalizado el proceso de mezclado, se utilizó una parte de la mezcla para realizar el ensayo de trabajabilidad y el resto para la elaboración de los especímenes de hormigón, los cuales fueron utilizados para determinar las características del hormigón endurecido. El proceso de mezclado se ejemplifica en la figura 25.



Figura 25. Proceso de mezclado del hormigón

Para la realización del ensayo de asentamiento de la mezcla de hormigón, descrito por la norma (NTE INEN 1578, 2010). Determinación del asentamiento. Se colocó el cono de Abrams, sobre una superficie plana, y de un material no absorbente, en este caso metal. Se colocó el hormigón en el molde utilizado, con el uso de una cuchareta, de manera que se tenga una distribución uniforme. Se colocaron 3 capas hasta llenarlo. Cada capa fue compactada con 25 golpes utilizando una varilla de compactación.

Una vez llenado el cono de Abrams, se enrasó la superficie y con un movimiento vertical, se retiró el cono, y volteándolo se colocó la varilla de compactación en la parte superior y se midió el asentamiento de la mezcla de hormigón, este proceso se indica en la figura 26.



Figura 26. Medición de asentamiento

Los resultados del asentamiento en las diferentes mezclas de hormigón se aprecian en la tabla 24. El criterio de clasificación utilizado es el descrito por la norma del (ACI 211, 2011), en su manual de diseño. Este comportamiento se puede explicar debido a las características del caucho, dado que no es un material que absorbe agua, y al mantenerse la relación a/c, la cantidad de agua fue constante, lo que generaba un exceso de la misma en la mezcla.

Tabla 24*Trabajabilidad*

Porcentaje [%]	Asentamiento [cm]	Clasificación
0	7.5	Media
5	9	Media
22	12.3	Húmeda
30	13.4	Húmeda
40	14.5	Húmeda

Para el llenado de los moldes se usó como referencia la norma (NTE INEN 1576, 2011) y se utilizó moldes de 100 x 200 mm, así como todos los implementos descritos en la norma.

Como se indica en la figura 27, con la finalidad de garantizar la hermeticidad de la mezcla en el proceso de curado inicial, se apretó bien los pernos y posterior se engrasó en el interior para que, al momento de desmoldar, el cilindro de hormigón no resulte dañado.



Figura 27. Cilindros, previo al vaciado de hormigón

La colocación de la mezcla de hormigón en el molde cilíndrico se hizo en dos capas de aproximadamente igual altura, cada una de ellas compactadas con una varilla lisa, aplicando 25 golpes sobre toda la superficie. Luego de que cada capa fue compactada, se golpeó el exterior del molde 15 veces con un martillo de goma. Estos golpes se dan con el propósito de cerrar cualquier agujero dejado por la varilla y eliminar burbujas de aire.

Posteriormente se dejó que el hormigón fragüe por un periodo de 24 horas, como se enseña en la figura 28. Luego se desmoldó y se colocaron los especímenes en la piscina de curado. Todos los especímenes de las diferentes mezclas de hormigón, fueron sometidos a un proceso de

curado por inmersión en la piscina de los laboratorios de la Universidad de Cuenca, a fin de mantener condiciones de humedad y temperatura controladas para garantizar una completa hidratación del cemento.



Figura 28. Fraguado inicial de especímenes de hormigón

3.3 ENSAYOS DE HORMIGÓN ENDURECIDO

3.3.1 Ensayos de Resistencia a compresión.

El ensayo como se ha mencionado se realizó bajo lo dispuesto por la norma (NTE INEN 1573, 2010).

Equipo.

Máquina de ensayo. Una máquina de ensayo debe tener una suficiente capacidad y que permita disponer una velocidad de carga media de 0.25 ± 0.05 MPa.

Procedimiento.

Se realizaron los ensayos de compresión de especímenes, tan pronto se extrajeron de las piscinas de curado. Fueron colocados con la cara endurecida hacia arriba, sobre la mesa de la máquina, verificando que las caras de contacto estén limpias, así como cerciorándose del alineamiento del eje del espécimen con el centro de carga del bloque. Se aplicó la carga de compresión hasta que el indicador de carga empezó a decrecer, presentándose un patrón de fractura. Un ejemplo de este ensayo se presenta en la figura 29.

Se ensayaron 8 especímenes para cada mezcla de diseño. A una edad del hormigón de 3 días se ensayó 1 espécimen, mientras que para una edad de 7 y 14 días se ensayaron 2 cilindros, finalmente para una edad del hormigón de 28 días se ensayaron 3 cilindros. En los anexos se presentan los ensayos realizados para todos los especímenes de hormigón.



Figura 29. Ensayo de resistencia a compresión

3.3.2 Ensayos de Resistencia a tracción indirecta

El ensayo se realizó bajo lo dispuesto por la norma (ASTM C496, 2006).

Equipo.

Máquina de ensayo. Una máquina de ensayo debe tener una suficiente capacidad y que permita disponer una velocidad de carga media de 0.25 ± 0.05 MPa.

Procedimiento.

Se marcaron líneas diametrales en cada cara de los especímenes, así como una línea en el plano axial de los especímenes, esto como guía para verificar que la aplicación de carga sea el correcto. Se colocaron placas de acero a lo largo de la longitud del cilindro de manera que se aplique carga de manera uniforme en toda la distancia. Se ensayó hasta que los especímenes presentaron un patrón de fractura. Un ejemplo de este tipo de ensayo se presenta en la figura 30, desde la colocación del espécimen de hormigón hasta una falla típica a lo largo del plano axial. Se ensayaron 2 especímenes por cada mezcla de diseño a una edad del hormigón de 28 días. En anexos se puede encontrar de manera detallada todos los ensayos realizados.



Figura 30. Ensayo resistencia a la tracción.

3.3.3 Ensayo de Módulo de elasticidad.

El ensayo se consideró bajo lo dispuesto por la norma (ASTM C469, 2014).

Equipo.

Máquina de ensayo. Una máquina de ensayo debe tener una suficiente capacidad y que permita disponer una velocidad de carga media de 0.25 ± 0.05 MPa.

Deflexómetros: Dispositivo de medición de deflexión graduado a 0.001 pulgadas o 0.025 mm.

Procedimiento.

Tras la toma de datos de resistencia a compresión de cada espécimen ensayado, basado en la norma (NTE INEN 1573, 2010), se colocó un equipo de medición de deformación en la platina o bloque de apoyo inferior de la máquina de ensayo. Se alineó cuidadosamente el eje del espécimen con el centro de la rótula del cabezal superior de apoyo. Se aplicó carga al espécimen por lo menos dos veces, descartando el registro de datos durante la primera carga. Un ejemplo de este tipo de ensayo se presenta en la figura 31. Se ensayaron 3 especímenes por cada mezcla de diseño, todos a una edad del hormigón de 28 días.



Figura 31 Ensayo de Módulo de elasticidad

3.3.4 Ensayos de Densidad del Hormigón endurecido

Para determinar la densidad, porcentaje de absorción, así como porcentaje de huecos en especímenes de concreto endurecido se siguió la norma (ASTM C642, 2006).

Equipo.

Balanzas. Con una precisión de 0.5 g

Cocineta. Un equipo que permita alcanzar la ebullición del agua y mantenerla de manera controlada.

Horno. Un equipo con las dimensiones requeridas, que permita mantener una temperatura uniforme de $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, de manera sostenida.

Procedimiento.

Se tomaron los cilindros correspondientes a cada mezcla de hormigón, y con una maquina cortadora de hormigón se consiguieron especímenes cuya altura promedio fueron de 5 cm. Los especímenes para este ensayo, se presentan en la figura 32.



Figura 32. Especímenes para densidad de hormigón endurecido

Se determinó la masa de los especímenes secos, los cuales fueron secados en un horno por un periodo de 24 horas o hasta obtener una masa constante a temperatura de $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$, se dejó enfriar al aire seco y se registró su masa.

Posteriormente se introdujo los especímenes en un recipiente de manera que se encontrasen sumergidos completamente, permaneciendo en ese estado por cerca de 48 horas, transcurrido ese periodo de tiempo se registró la masa de cada uno de los especímenes.

A continuación, en un recipiente adecuado, que permitió que todos los especímenes se encuentren cubiertos en su totalidad, se procedió a hervir por un periodo de 5 horas, transcurrido ese tiempo se dejó enfriar naturalmente por un lapso de 14 horas aproximadamente, para luego anotar su peso.

Finalmente, a cada uno de los especímenes ensayados con ayuda de una canastilla, se los suspendió dentro de un recipiente con agua y se registró su masa aparente. Los valores



obtenidos en el ensayo se presentan detalladamente en la tabla 25.

Tabla 25

Datos obtenidos ensayo densidad hormigón endurecido

Porcentaje [%]	Masa seca al horno [g]	Masa saturada después de inmersión [g]	Masa saturada después de ebullición en agua [g]	Masa sumergida Aparente [g]
Identificación	A	B	C	D
0	851.3	924.2	915.7	532.9
	853.2	930	919.4	533.1
5	925.3	1010.4	942.3	517.1
	826.4	903.3	941.9	563.8
22	948.5	1036.5	1032.2	580.3
	862.6	943.1	933.3	531.7
30	889.1	976	969.7	543.9
	851.7	930.6	924.1	512.7
40	857.1	938.2	924.2	513.2
	840	928.3	930	504.7
	822.6	905.2	893.5	494.9

3.4 DISEÑO Y ELABORACIÓN DE PANELES

3.4.1 Diseño del sistema de encofrado

Para el molde que actuará como un sistema de encofrado, se consideró dos tipos de elementos, ancho y largo, esto debido a la geometría del panel, en la tabla 26, se expresan los valores considerados para determinar la idoneidad de cada elemento.

Tabla 26

Diseño del encofrado

Parámetros	Ancho	Largo	Unidades	
Presión máxima hormigón		2.119	kN/m ²	
Espesor de madera contrachapada	15.1	18.3	mm	
Espaciamiento entre soportes	415	715	mm	
Modulo Elasticidad ajustado	E	11375100	kN/m ²	
Modulo Elasticidad	E _e	10341000	kN/m ²	
Esfuerzo de flexión	F _b	13305	kN/m ²	
Esfuerzo cortante-laminación	F _s	496	kN/m ²	
Inercia	I	156583.549	239607.129	mm ⁴ /m
Sección efectiva de módulo	KS	18072.899	22979.952	mm ³ /m
Constante al cortante	Ib/Q	10557.125	12710.936	mm ² /m
Claro, centro a centro	l ₁	415	715	mm
Espesor soporte nominal	e _s	0	0	mm
Abertura libre	l ₂	415	715	mm
Abertura libre + 6.4 mm	l ₃	421.4	721.4	mm
Presión esfuerzo flexión	W _b	13.962	5.980	kN/m ²
Presión esfuerzo cortante	W _s	21.034	14.699	kN/m ²
	Δ aceptable	1.153	1.986	mm
Presión basada en la deflexión	Δs cortante	0.02749	0.07834	mm
	Δb	0.12188	0.68412	mm
Presión aceptable	WΔ	7.716	2.605	kN/m ²
Observación	Cumple	OK	OK	

3.4.2 Elaboración de paneles de hormigón

Debido a que muchas de las propiedades exigibles a un hormigón en estado endurecido dependen de sus propiedades en estado fresco, controlar el comportamiento del hormigón en este estado es primordial. El estado fresco se define como el tiempo que transcurre entre el momento que se puso en contacto el agua con el cemento hasta cuando el hormigón comienza

a rigidizarse (Mora, 2017). Se elaboraron 5 paneles para cada una de las mezclas de diseño, tanto para la mezcla de hormigón patrón como para la mezcla de hormigón alternativo. Como proceso de preparación antes de la colocación del hormigón, se limpiaron y colocaron los encofrados en un sitio seguro de manera que ofrezcan la terminación deseada para el hormigón endurecido. En este caso, los encofrados de madera, se aceitaron antes de la colocación del hormigón de manera que estos no absorban el agua de la mezcla y no se hinchen. Debido a que se contaba con 5 moldes únicamente, tras el desencofrado del molde una vez transcurrido el fraguado inicial de los paneles, los moldes se armaron nuevamente, este proceso se describe en la figura 33.



Figura 33. Preparación del sistema de encofrado

Para la colocación el hormigón se depositó de forma continua lo más cerca posible de su posición final, para evitar la segregación. Se colocó el hormigón en capas horizontales de espesor uniforme y cada capa se consolidó totalmente antes de la colocación de la siguiente capa. Se consideró una velocidad de colocación lo suficientemente rápida para que el hormigón colocado no haya fraguado cuando se coloque la capa próxima. Esta colocación oportuna previene juntas y planos de debilidad (juntas frías). El proceso de vaciado y compactación del hormigón se expone en la figura 34.

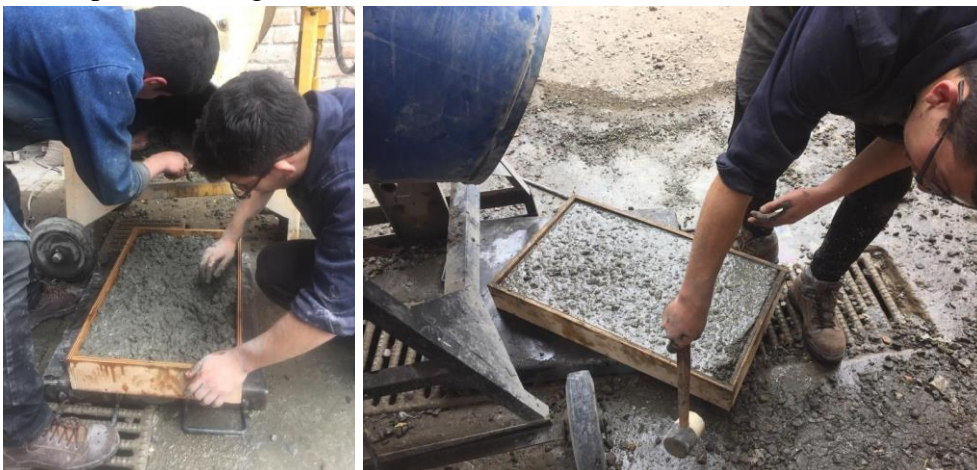


Figura 34. Vaciado y compactación de la mezcla de hormigón

Tras un periodo de 24 horas se desencofró, los moldes de paneles, el proceso antes descrito puede observarse en la figura 35. Se corroboró que no existía fisuramiento en la superficie de los paneles, por efectos de retracción.



Figura 35. Fraguado inicial y desencofrado de los paneles

El curado del hormigón, debido a las dimensiones de los paneles, se optó por un método que mantiene una presencia permanente de agua en la superficie, por medio de un sistema de inmersión en las instalaciones de la Universidad de Cuenca. El curado de los paneles de hormigón se indica en la figura 36.



Figura 36. Proceso de curado del hormigón

3.5 ENSAYO DE PANELES

Para las condiciones de carga que se consideraron se trató de obtener el suficiente número de lecturas de manera que se pueda determinar la curva carga-deformación, así como el comportamiento de los especímenes ante ciclos de carga y descarga, con la finalidad de simular la fatiga que sufrirán los elementos en condiciones normales de servicio. Al momento de aplicar cargas en los paneles, se siguió el siguiente procedimiento. Una vez determinada la carga inicial se aumentó carga hasta el primer incremento, manteniéndose constante hasta registrar su deformación, posteriormente se disminuyó hasta la carga inicial y se registró nuevamente la deformación. Luego se aumentó la carga hasta el segundo incremento registrándose nuevamente la deformación, se siguió esta secuencia hasta el punto en que falló el panel. A continuación, se exponen parámetros propios de cada uno de los ensayos.

3.5.1 Carga Compresiva

Los ensayos fueron considerados bajo lo indicado por la norma (ASTM E72, 2017).

Equipo.

Prensa Hidráulica: Con la capacidad para ejercer carga sobre el elemento de forma adecuada.

Deflexómetro: Dispositivo de medición de deflexión graduado a 0.001 pulgadas o 0.025 mm.

Procedimiento.

Se ensayaron los paneles como si fuesen una columna, tal como se indicada en la figura 37 verificando que tenga la estabilidad suficiente para conseguir que la carga se aplique de manera axial. Se aplicó carga sobre una placa de acero que fue colocada en la parte superior del panel, a lo largo de una línea paralela a la cara interna del panel y a la mitad del espesor considerando desde la cara interna.

Se registró la deformación en secciones que se consideraron de importancia. siendo estas la medida de deformación en su mayor dimensión, por un acortamiento debido a la compresión que sufren los especímenes, en los ensayos se definió como deformación 1. De igual forma se registró deformaciones en la cara principal del panel, esto para obtener datos sobre el abultamiento que sufría el panel, registrándose como deformación 2 y finalmente en la parte media de su dimensión más corta, es decir en el medio del espesor, registrándose como deformación 3, de igual manera con la finalidad de registrar el abultamiento de los paneles bajo un proceso de fatiga. Se registraron 3 ensayos de carga compresiva, para cada una de las mezclas de diseño del hormigón, se registró la deformación manteniendo estable la carga por un periodo de 2 minutos aproximadamente. Se aplicó carga en ciclos en función del intervalo planificado, hasta los valores límites de la prensa, o hasta la falla de los paneles.



1. Deflexómetro que registra la deformación 1, correspondiente a su mayor dimensión.
2. Deflexómetro utilizado para marcar la deformación 2, en la cara principal del panel.
3. Deflexómetro utilizado para marcar la deformación 3, en el espesor del panel.

Figura 37. Método de ensayo, carga compresiva.

3.5.2 Carga Transversal

Para estos ensayos se consideró lo dispuesto en la norma (ASTM E72, 2017).

Equipo.

Prensa Hidráulica: Con la capacidad para ejercer carga sobre el elemento de forma adecuada.

Deflexómetro: Dispositivo de medición de deflexión graduado a 0.001 pulgadas o 0.025 mm.

Procedimiento.

Los paneles previos a su ensayo fueron colocados tal como se indica en la figura 38. Se colocaron dos rodillos de acero con la finalidad que actúen como apoyos. Para este método se

utilizó la carga de dos puntos, la misma implicó aplicar dos cargas iguales, cada una a 10 cm de los rodillos de apoyo los mismos que se colocaron a 15 cm del borde de los paneles, en la mayor de sus dimensiones. Para esta metodología de ensayo se colocaron deformímetros en la sección media del panel a una distancia de 3 cm desde el borde, de manera que nos permitió determinar la deformación a medida que se ejercían los ciclos de carga y descarga. Para el proceso de lectura y registro de las medidas de deformación, la carga se mantuvo estable por un periodo de 2 minutos aproximadamente. Se ensayaron 2 paneles por cada diseño de mezcla de hormigón.

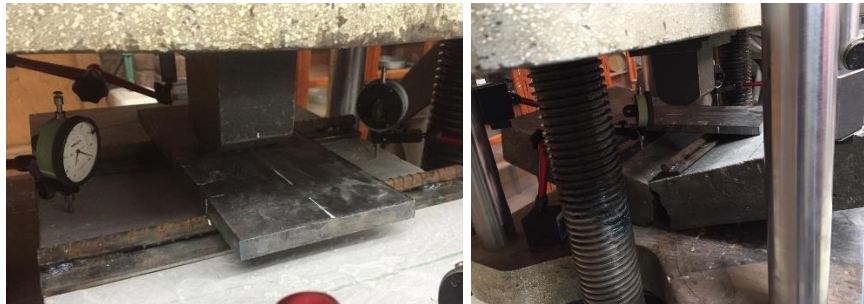


Figura 38. Modo de ensayo, Carga Transversal

3.6 ANALISIS DE COSTOS

Para realizar un análisis de precios, considerando las diferentes mezclas de hormigón tanto para un hormigón simple como para un hormigón alternativo, se consideró la utilización de paneles prefabricados en un edificio de 5 pisos, de manera que se obtenga el costo de la construcción. Para ello se analizará el caso de que se ocupase un hormigón de 210 kg/cm^2 con una mezcla de hormigón alternativo con caucho, y un hormigón simple. Además, se busca observar la relación en reducción de costos, que implica utilizar un material menos denso, no solo al considerar el uso de paneles, sino también una disminución de costos vinculados con una reducción de las secciones de los elementos estructurales como lo son vigas, columnas, zapatas y losas.

Para el diseño del edificio se utilizó como herramienta de trabajo el software ETABS, en el cual se estableció un edificio con características de un hormigón que se utiliza comúnmente y de igual manera otro diseño con el uso de un hormigón alternativo. Las dimensiones utilizadas fueron las que se muestran a continuación en la figura 39.

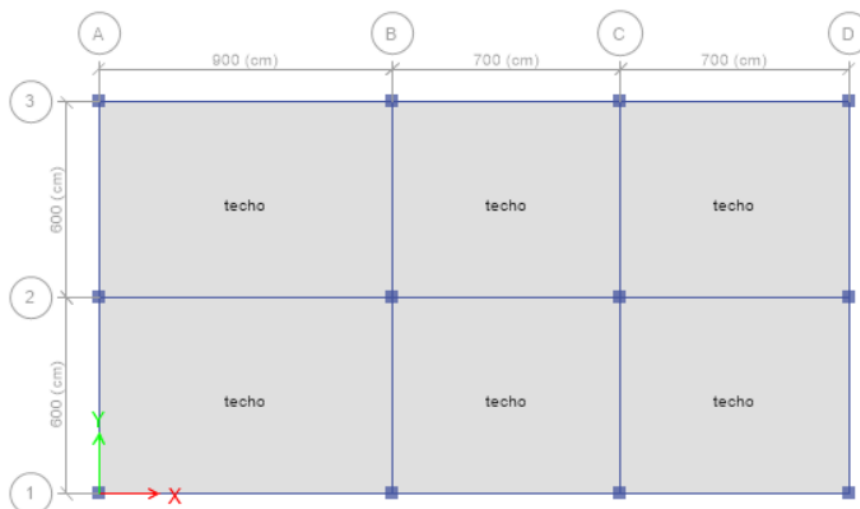


Figura 39: Dimensiones del edificio propuesto

Se estableció que la altura entre cada uno de los pisos sea de 3 metros respectivamente.



Una vez colocadas las dimensiones entre luces y el número de vanos del edificio en el software ETABS se deben colocar las cargas a las cuales estará sometido el mismo, siendo las mostradas en la tabla 27.

Tabla 27
Cargas de diseño

Tipo de cargas sometidas en el edificio	Valor	Unidades
Carga viva	240.00	kg/m ²
Carga muerta de losas, columnas, vigas, zapatas, etc.	450.00	kg/m ²
Carga de techo	100.00	kg/m ²
Carga muerta de paredes por metro lineal	con caucho	kg/cm
(densidad*espesor*altura entre pisos)	sin caucho	kg/cm

Posteriormente se procedió a ingresar los datos del hormigón que será colocado en vigas, columnas y zapatas para el estudio y dimensionamiento de los mismos, esto datos se indican en la tabla 28.

Tabla 28
Propiedades del hormigón de diseño

Datos del hormigón	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad del hormigón	233928.19	kg/cm ²
Resistencia del hormigón	240.00	kg/cm ²
Densidad del hormigón	2300.00	kg/m ³
Módulo de poisson	0.20	-

Una vez colocados todos los datos del hormigón a utilizar en el edificio y las cargas que se producen y se establecen para el diseño se analizó la cantidad de acero requerido en las vigas de cada uno de los pisos, así mismo como las columnas y las dimensiones en las mismas de tal manera que cumplan con las cargas establecidas desde un principio.

El estudio de precios unitarios es de acuerdo al costo de los materiales, mano de obra y herramientas que se obtuvieron en la cámara de la construcción del presente año, donde se indica el costo del mismo por metro cubico en obra.

Según los valores obtenidos en la página de Insucons el mismo que proporciona los costos actualizados de materiales, mano de obra y maquinaria de construcción indica que el metro cubico de hormigón simple de 210 kg/cm² tiene un costo de \$119.53 por lo que para poder obtener una relación de costos total se necesita conocer las dimensiones de vigas, columnas y zapatas haciendo relación en cantidad de metros cúbicos que se utilizan utilizando el hormigón normal así como el hormigón alternativo con incorporación de caucho ya que la clave de este estudio es que el hormigón alternativo tiene una menor densidad al hormigón patrón, lo que implica menores dimensiones en vigas, columnas y zapatas, sobre todo al analizar la losas, puesto que son los elementos que tiene mayor volumen de hormigón, de igual manera se analiza la disminución en la cuantía de acero, reflejándose en una reducción de costo del proyecto.



4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Caracterización y Control de calidad de los agregados para mezclas de hormigón

Para la verificación de que los agregados que se incorporaron en las diferentes mezclas de hormigón, cumplieran con todos los parámetros de calidad, se realizaron una serie de ensayos dispuestos en la norma (NTE INEN 0872, 2011), los mismos que se expresan de forma resumida en la tabla 29. De igual forma estos ensayos fueron de utilidad para la dosificación de las mezclas de hormigón.

Tabla 29

Caracterización y Control de calidad de los agregados

Ensayo	Árido grueso	Árido fino	Caucho reciclado	Unidades
Granulometría ¹	Cumple	Cumple	Cumple	-
Peso volumétrico seco compacto	1520	1587	436	kg/m ³
Peso volumétrico seco suelto	1367	1524	347	kg/m ³
Densidad relativa seca	2529	2435	-	kg/m ³
Densidad relativa sss	2595	2536	-	kg/m ³
Densidad aparente	2710	2709	-	kg/m ³
Absorción	2.6	4.1	-	%
Porcentaje de espacios	-	40.0	-	%
Porcentaje de finos ²	-	1.3	-	%
Partículas desmenuzables ³	0.6	-	-	%
Abrasión ⁴	15	-	-	%

1. En el ensayo de granulometría para su aprobación se consideró el rango de aceptación para cada árido, descrito en la NTE INEN 0696

2. De acuerdo con NTE INEN 0864, para su aprobación el porcentaje de finos debe ser inferior al 3%.

3. En lo descrito por la NTE INEN 0698, para su aprobación, la cantidad de partículas desmenuzables debe ser inferior al 3 %.

4. Lo dispuesto por la NTE INEN 0860, para su aprobación, la abrasión debe ser menor al 50%.

4.2 Ensayos de Resistencia a compresión

Todos los especímenes tanto de la mezcla del hormigón patrón como de la mezcla de hormigón alternativo, se ensayaron bajo condiciones de resistencia a compresión a diferentes edades, considerándose a los 7, 14 y 28 días. En los anexos se podrán encontrar las tablas con los resultados obtenidos para cada uno de los especímenes. Todos estos resultados pueden observarse de manera resumida en la tabla 30.

Tabla 30

<i>Ensayos resistencia-compresión</i>			
Porcentaje [%]	Resistencia [kg/cm ²]		
	Edad [días]		
	7	14	28
0	228.5	282.5	309
5	199.5	229	270
22	175	215.5	241
30	147.5	189.5	215
40	113.5	137.5	152

Se comparó el comportamiento de los especímenes de hormigón, considerando los valores de sus resistencias a la compresión, en función de la edad del hormigón, esto se observa detalladamente en la figura 40.

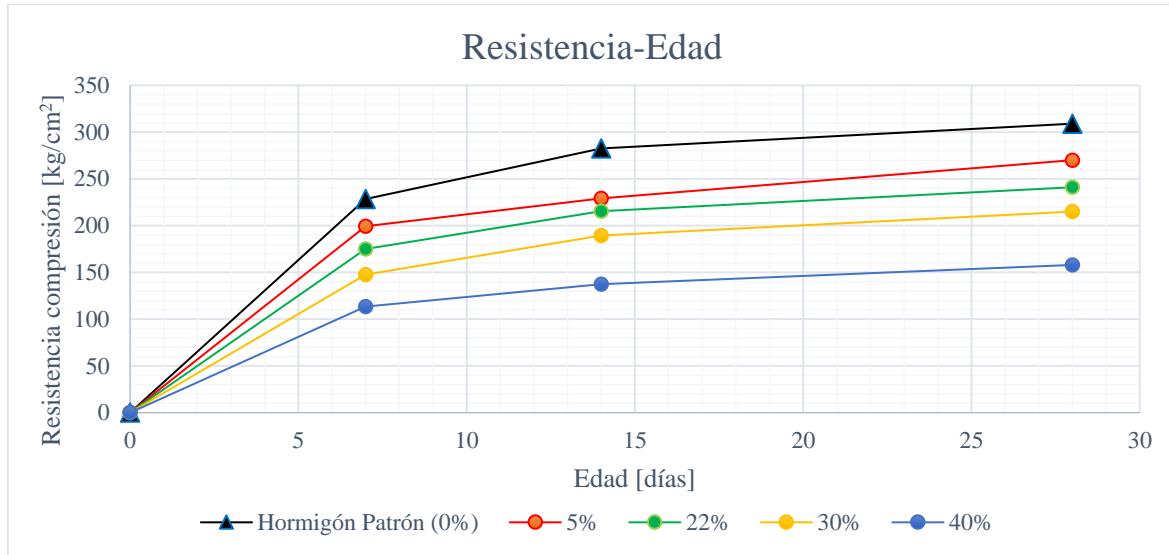


Figura 40. Relación Resistencia-Edad hormigón

Debido a que el parámetro más influyente en cuanto a la selección del porcentaje óptimo de caucho es la resistencia a compresión, se buscó la relación más favorable entre el porcentaje de caucho incorporado en la mezcla y la resistencia a la compresión marcada a los 28 días. Esta relación se puede apreciar gráficamente en la figura 41. De igual manera se puede observar los porcentajes de caucho incorporado para las resistencias a la compresión más comunes, siendo definido un límite superior para una resistencia a la compresión de 240 kg/cm² y 180 kg/cm² como la resistencia para el límite inferior. Como se puede notar para una resistencia a la compresión de 210 kg/cm², considerada como el valor de resistencia base, el porcentaje de caucho incorporado en la mezcla de hormigón fue de 30.6 %. Dada la diferencia se consideró a la muestra del 30% como la mezcla de hormigón alternativo.

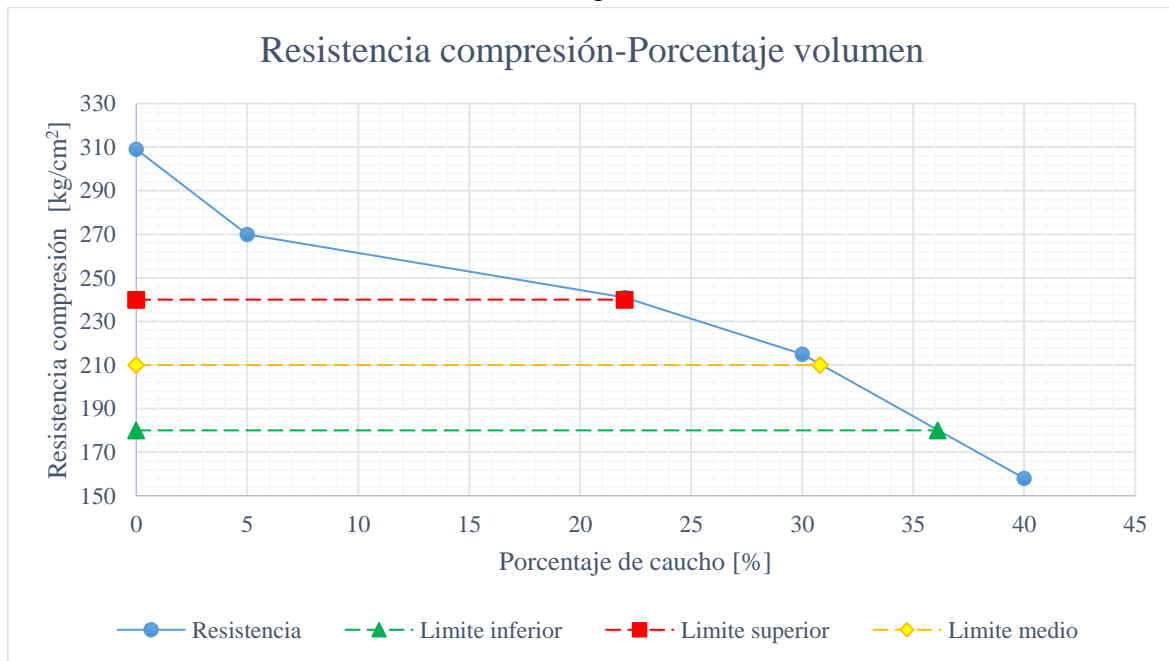


Figura 41. Curva Resistencia-Porcentaje de caucho

Es notable la reducción de la resistencia en las muestras de hormigón alternativo en comparación con la muestra patrón, esto se deben a los siguientes factores.

Existe una falta de adhesión entre las fibras o partículas de caucho y la pasta cementante lo que provoca que la matriz del hormigón no sea del todo homogénea. Es así que al aplicar carga los esfuerzos no se distribuyen de manera uniforme, lo que termina por generar fisuras, que se forman más rápido alrededor de cada fibra o partícula caucho y bajo momentos de carga estas fisuras se expanden a lo largo de toda la matriz, acelerando el proceso de falla del hormigón. Un factor que pueden afectar el comportamiento de los especímenes del hormigón alternativo, son las características del caucho, dado que al presentar una menor densidad que el agregado fino, este tiende a moverse hacia la superficie por lo que, al considerarse una distribución de partículas no homogéneas, se presenta una mayor cantidad de vacíos, lo que a la postre terminen por influir en el comportamiento de los especímenes bajo condiciones de compresión. De igual forma el caucho al ser un material que presenta una menor rigidez en comparación con los demás materiales incorporados en la mezcla, su presencia reducirá la rigidez del hormigón lo que a su vez reducirá su capacidad para soportar carga.

4.3 Ensayos Resistencia a tracción indirecta

Los ensayos realizados bajo esta condición de carga, presentaron las mismas condiciones para todos los especímenes de hormigón ensayados, teniendo todos estos una edad de 28 días. En los anexos se pueden observar los resultados de los ensayos obtenidos, en la tabla 31, se presenta un resumen de los mismos.

Tabla 31
Ensayos resistencia a tracción indirecta

Porcentaje [%]	Tracción indirecta [kg/cm ²]	Relación Tracción-Compresión	Tracción axial [kg/cm ²]	Relación Tracción-Compresión
0	25.82	8.36	23.24	7.52
5	24.84	9.2	22.35	8.28
22	26.23	10.88	23.6	9.79
30	23.66	11	21.29	9.9
40	17.84	11.29	16.05	10.16

De igual manera en la figura 42, se puede observar el comportamiento de los especímenes de las distintas mezclas de hormigón alternativo, comparando la resistencia a tracción indirecta [TI], con el porcentaje de caucho incorporado, así como la relación entre la resistencia a tracción indirecta y el ensayo de resistencia a compresión [RC].

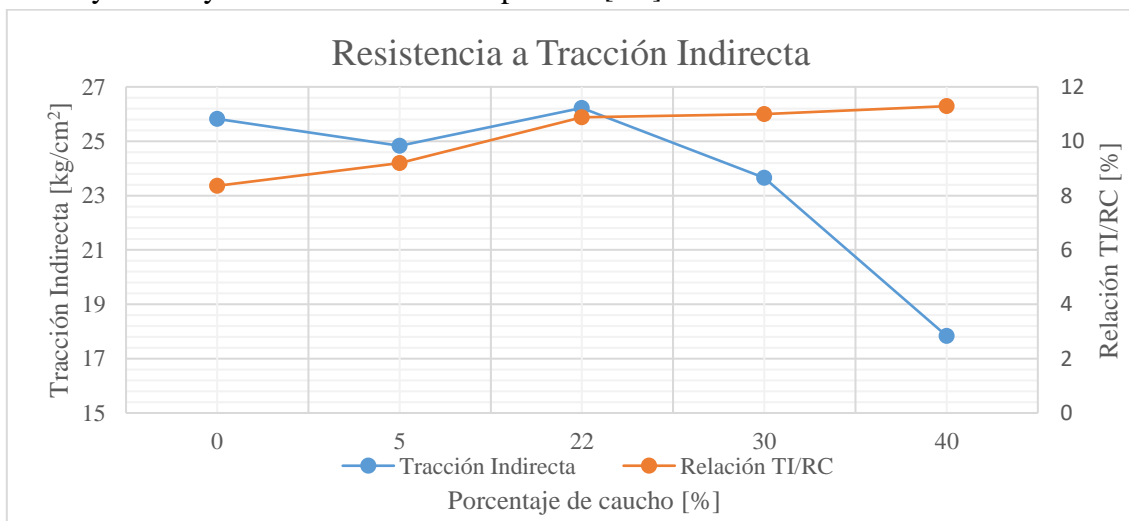


Figura 42. Comportamiento de hormigón alternativo-tracción



Los resultados representados, muestran una reducción de la resistencia a tracción a medida que aumenta el porcentaje de caucho incorporado, este comportamiento es debido a la baja resistencia a la tensión del hormigón respecto a la resistencia a compresión, es así que ante bajos esfuerzos y previo a que el hormigón alcance su resistencia máxima la falla se dará en la zona a compresión. Por lo que el factor predominante en la falla continúa siendo la adhesión entre las partículas o fibras de caucho y la pasta cementante. Sin embargo, también se puede notar el incremento en la relación entre esfuerzo a tracción indirecta y a compresión esto debido en gran medida a que el caucho presenta propiedades de ductilidad más alta que los agregados por lo que su absorción de energía es mayor. Es así que los especímenes de hormigón alternativo soportaron cargas incluso después de alcanzar una fractura, manifestándose como desplazamientos significativos.

Se puede observar el comportamiento de los especímenes ensayados para un porcentaje de caucho del 22%, así como en muestras del 5%, alcanzando una resistencia a la tracción mayor incluso que la marcada por las muestras correspondientes a la mezcla de hormigón patrón, como se mencionó esto se debe a que el caucho al ser un material más dúctil que el árido fino y que al incorporarse en pequeñas cantidades puede mejorar las propiedades elásticas del hormigón sin perjudicar la adherencia entre los agregados y la pasta cementante.

4.4 Ensayo Módulo de Elasticidad

Los valores de la resistencia a compresión, así como del módulo de elasticidad ensayados para cada espécimen se expresa en la tabla 32, de igual manera se indica el módulo de elasticidad teórico de acuerdo a la resistencia a compresión. Dado que el valor teórico indicado en la (NEC-SE-HM, 2014), se expresa en MPa, así como los ensayos de resistencia a compresión, se indican en kg/cm^2 , a fin de unificar las unidades, se presentan los resultados de la siguiente manera.

Tabla 32
Determinación del Módulo de Elasticidad

Porcentaje [%]	Resistencia [Kg/cm^2]				Módulo de Elasticidad [Kg/cm^2]				
	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio	Teórico
0	316	302	309	309	259176.62	225636.81	230275.72	238363.05	265118.23
5	260	269	281	270	211645.84	216701	222398.18	216915.01	247090.6
22	239	243	-	241	188989.6	188426.21	-	188707.91	233517.31
30	209	222	214	215	169833.45	181652.61	177787.77	176424.61	220515.57
40	158	151	147	152	154321.67	152780.77	152157.42	153086.62	186114.2

Porcentaje [%]	Resistencia [MPa]				Módulo de Elasticidad [MPa]				
	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio	Teórico
0	30.63	30.27	30.89	30.6	25416.45	22127.33	22582.25	23375.35	25999.12
5	25.63	26.48	27.63	26.58	20755.29	21251.03	21809.73	21272.02	24231.22
22	23.92	23.55	-	23.74	18533.48	18478.23	-	18505.86	22900.14
30	20.62	21.83	21.06	21.17	16654.91	17813.97	17434.96	17301.28	21625.11
40	15.77	14.97	14.51	15.08	15133.73	14982.62	14921.49	15012.62	18251.50

Dado que se hará una comparación del comportamiento de las diferentes mezclas de hormigón, específicamente entre un hormigón patrón y otro correspondiente a una mezcla de hormigón alternativo, que, de acuerdo a los ensayos previos, corresponde a un reemplazo del 30% del volumen del árido fino por material reciclado, en este caso caucho. Es así que se presentan las siguientes figuras, en las cuales se hace una comparativa entre el ensayo realizado para cada

especímen y el módulo de elasticidad teórico, a fin de observar el comportamiento de los especímenes bajo condición de carga.

En la figura 43, se puede apreciar el comportamiento de los especímenes de la mezcla de hormigón patrón, en comparación con el módulo de elasticidad teórico [E_c].

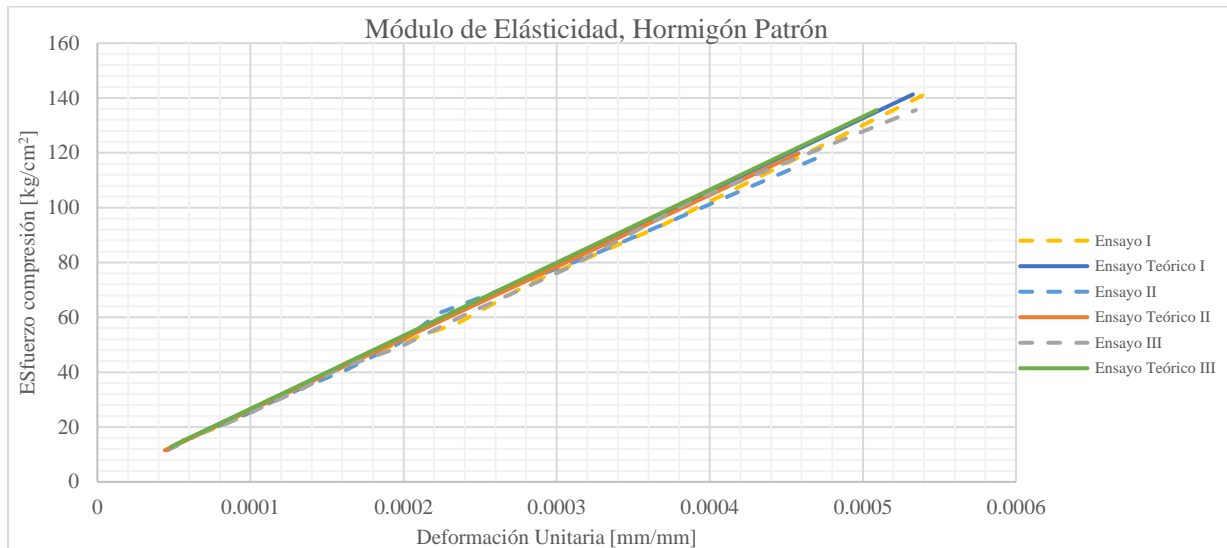


Figura 43. Comportamiento Módulo de Elasticidad, Hormigón patrón

De igual manera se puede observar en la figura 44, el comportamiento de los especímenes de la mezcla de hormigón alternativo, para este caso en el que se consideró el 30% de reemplazo del volumen del árido fino, comparándolo con el módulo de elasticidad teórico [E_c].

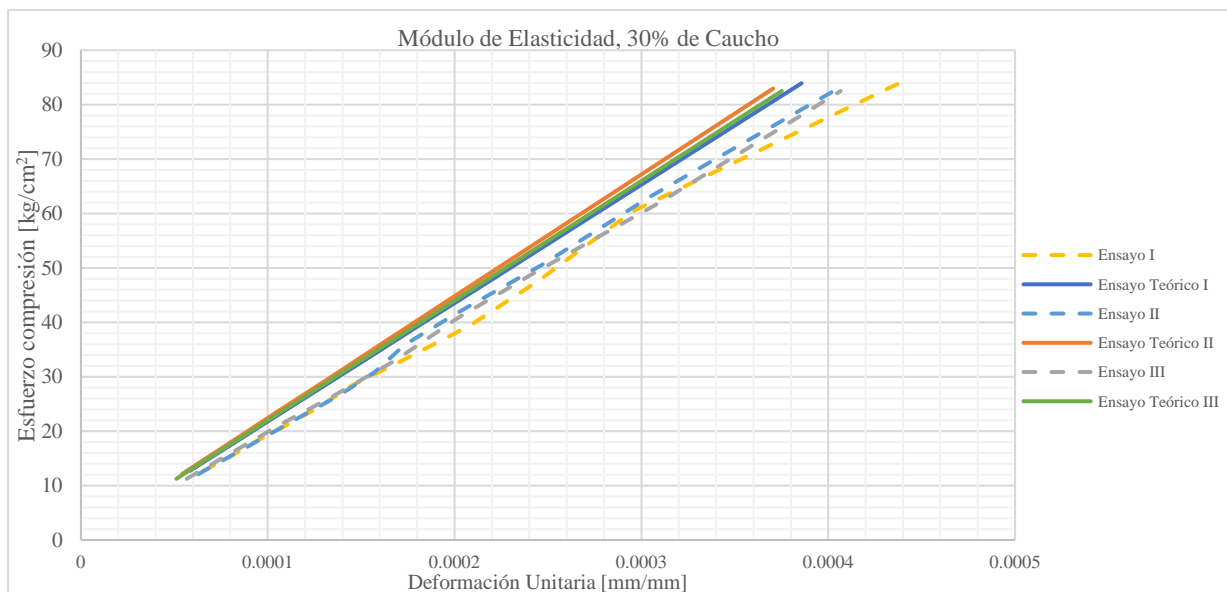


Figura 44. Comportamiento Módulo de Elasticidad, Hormigón alternativo

Se puede observar en la figura 45, la disminución del módulo de elasticidad en cada mezcla de hormigón a medida que aumenta la cantidad de caucho incorporado. Esto debido a que la microestructura del hormigón presenta una estructura compacta que se comporta de diferente manera durante el proceso de carga y es así que el valor del módulo de elasticidad puede afectarse por factores como la composición de la mezcla hormigón, tipo de agregado utilizado, edad del hormigón o las dimensiones de los especímenes.

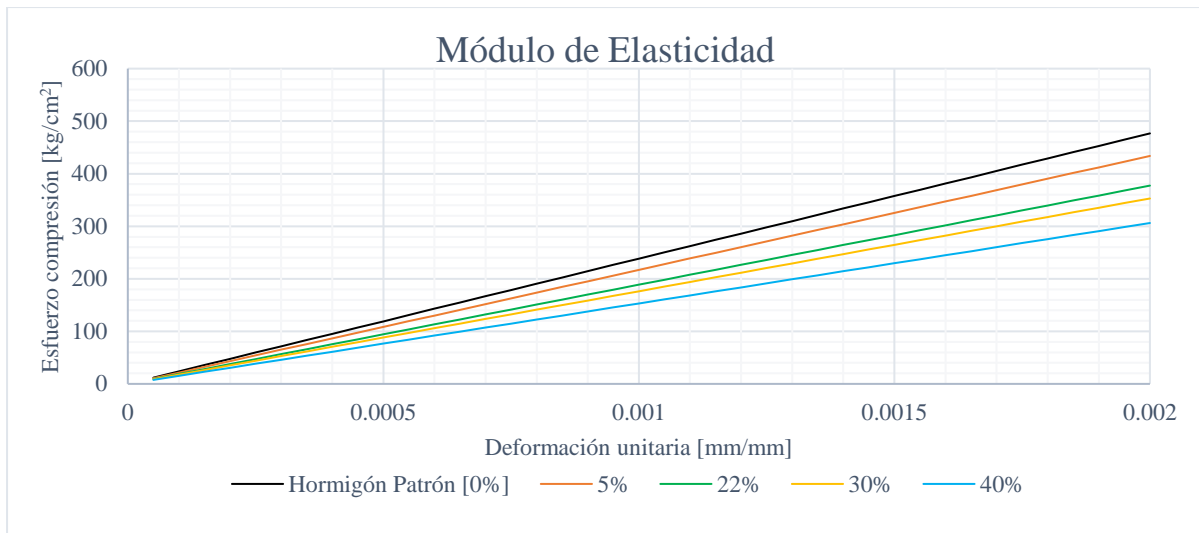


Figura 45. Comportamiento Módulo de Elasticidad-Incorporación de caucho

Es en la figura 46, en la cual se presenta las diferentes curvas de esfuerzo vs deformación, correspondientes a las múltiples mezclas de hormigón, se puede observar que el comportamiento de los especímenes tiene una parte inicial relativamente elástica y lineal en la cual el esfuerzo y deformación unitaria son proporcionales, alcanzando el esfuerzo máximo, luego puede observarse una inclinación hacia la horizontal hasta la falla del espécimen. Este aspecto se hace mucho más visible en especímenes con un mayor porcentaje de hormigón, es así que una vez superado el pico de esfuerzo, los especímenes continuaron recibiendo carga después de la rotura. Este comportamiento es similar al experimentado por materiales rígidos, los cuales presentan un comportamiento plástico después de la falla. Esta energía plástica se define como la cantidad de energía requerida para producir una deformación específica después del rango elástico, el cual incrementa la habilidad del material de soportar cargas después de la formación de fisuras (Estrada, 2016).

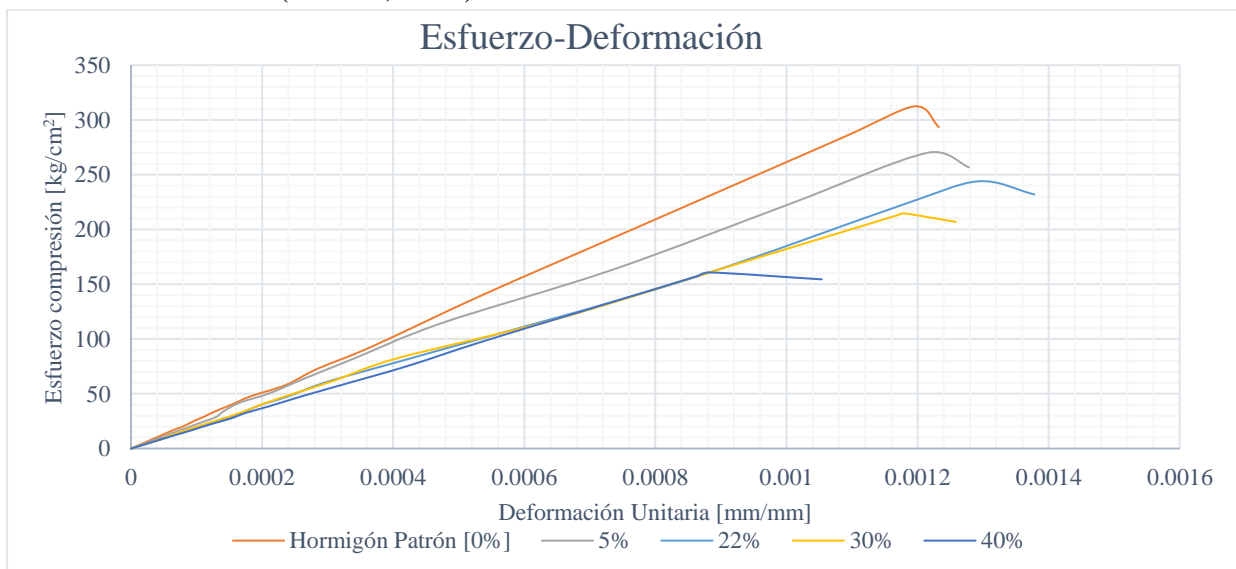


Figura 46. Comportamiento de las diferentes mezclas de hormigón

4.5 Ensayos Densidad Hormigón endurecido

Dentro de los parámetros más representativos, acorde a lo planteado como objetivos del proyecto están la densidad seca, la absorción y el volumen de vacíos, los mismos que se pueden

observar descriptos en la tabla 33.

Tabla 33
Parámetros de las mezclas de hormigón endurecido

Porcentaje [%]	Absorción después de inmersión [%]	Densidad seca global [kg/m ³]	Volumen de vacíos [%]
0	8.8	2214	16.9
5	9.2	2178	17.3
22	9.3	2121	18
30	9.5	2077	18.3
40	10	2039	18.4

Lo expuesto se puede observar gráficamente, en la figura 47, en la cual se encuentran las gráficas de comparación entre las propiedades del hormigón y el porcentaje de caucho incorporado en la mezcla, más específicamente centrándonos en la absorción y el volumen de vacíos en las distintas mezclas de hormigón.

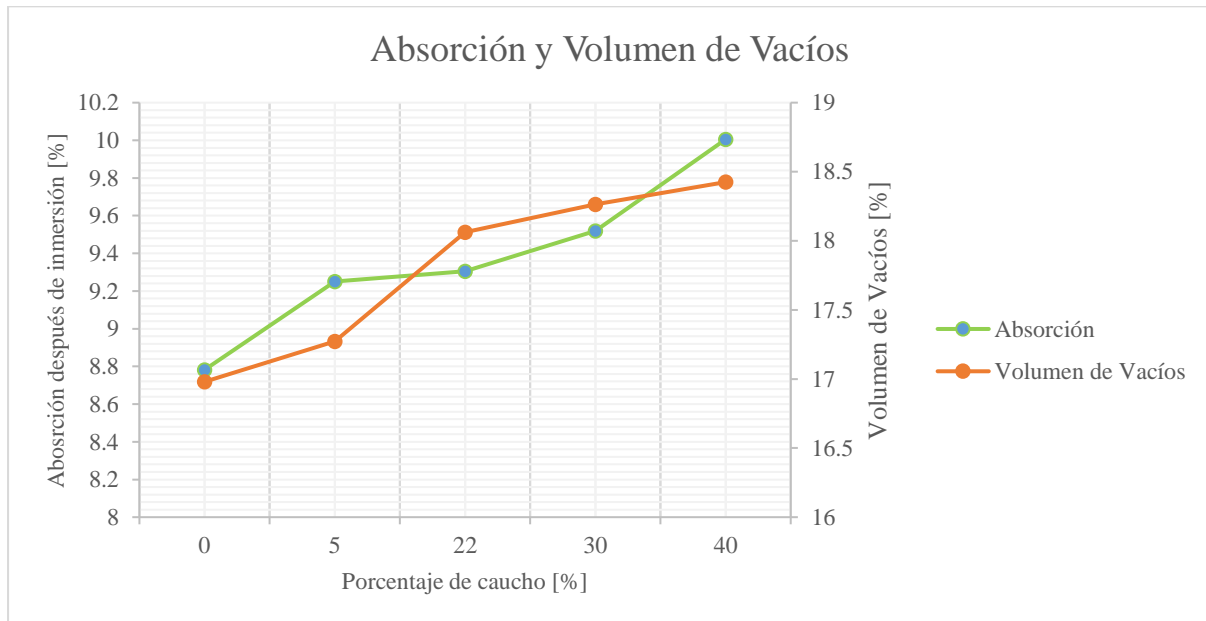


Figura 47. Comparación Parámetros de absorción y vacíos con incorporación de caucho

Se nota que el porcentaje de absorción aumenta en la medida en que aumenta el porcentaje de caucho incorporado en la mezcla, esto se debe en gran parte a la disminución de la adherencia entre la pasta de cemento y el árido, lo que genera que la masa del hormigón forme una mayor cantidad de vías o poros que facilita a su vez el aumento de la absorción. Este fenómeno se puede apreciar al observar la figura 48, que corresponde a especímenes fallados después del ensayo a tracción indirecta, en los anexos se puede observar de forma más detallada la distribución del caucho en los especímenes de hormigón.



De izquierda a derecha, hormigón patrón (0%), 5%, 22%, 30% y 40% de inclusión de caucho en reemplazo de volumen de árido fino.
Figura 48. Porosidad en especímenes de hormigón

Bajo la misma premisa se realizó el análisis entre la densidad de las mezclas y el porcentaje de caucho incorporado, en función de los datos expuestos en la tabla 33 y evidenciados en la figura 49.

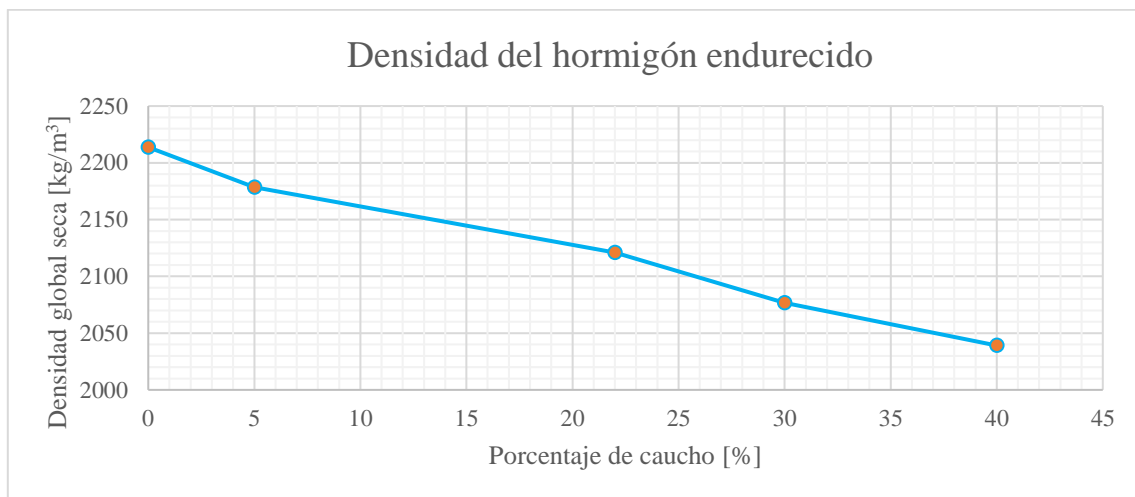


Figura 49. Densidad del hormigón endurecido

Se observa una disminución de la densidad de los especímenes a medida que aumenta el porcentaje de caucho incorporado en la mezcla. Este comportamiento puede deberse en primer lugar al hecho de que el caucho es un material con una densidad mucho menor que la del árido fino, por lo que existe una disminución en la densidad del agregado fino total incorporado en la mezcla. Otro factor que se asocia a este comportamiento es la naturaleza del caucho, esto debido a que este material presenta una afinidad de atrapar aire, tal como indica (Feranda & Cecche, 2005), lo que se puede evidenciar con el aumento en la formación de vacíos, tal como se evidencia en la figura 47. Si bien el hecho de observarse una reducción en la densidad de las mezclas de hormigón alternativo es ventajoso, dado que en el caso de incorporarse como elementos separadores de espacios en edificaciones, se reduciría las cargas que se transmiten a elementos estructurales, lo que puede reflejarse en una reducción de secciones y a su vez en una reducción de costos. Sin embargo, se debe considerar que al tener un elemento menos denso su capacidad para soportar cargas es mucho menor, esto se evidencia en las figuras 41 y 42, de los ensayos de resistencia a la compresión y la tracción indirecta, respectivamente, por lo que su uso se limitará a elementos autoportantes. El uso experimental de la mezcla alternativa en el comportamiento de elementos de hormigón armado esta fuera del alcance de este proyecto.



4.6 Ensayo de los Paneles

Se ensayaron los paneles bajo condiciones de carga compresiva y de carga transversal con la finalidad de simular escenarios normales de servicio y determinar su comportamiento ante un proceso de fatiga en ciclos de cargas y descargas.

4.6.1 Carga Compresiva

Bajo esta condición de ensayo, se registraron los datos de deformación en los 3 puntos antes mencionados, así como las cargas aplicadas a lo largo del tiempo.

En la figura 50, se puede observar el comportamiento que presentan los paneles de mezcla de hormigón patrón [H°P], así como la deformación en 3 de sus secciones. En el registro de la deformación 1, se aprecia que, ante cargas cíclicas bajas, la diferencia entre deformaciones totales y residuales es menor, esto se relaciona con un proceso de reacomodo que sufren los especímenes hasta que se aplica o distribuye la carga completamente, atribuido a irregularidades en la superficie del panel o un desnivel en la máquina usada para aplicar carga. Sin embargo, a medida que aumenta la carga aplicada sobre el panel, se aprecia de mejor manera el aumento en las deformaciones residuales debido al nivel de tensión que sufre, es decir después de cada ciclo de carga-descarga, se acumula una deformación adicional permanente. Este comportamiento está relacionado con la fatiga del hormigón, el cual a su vez está gobernado por un proceso de microfisuración interna que se refleja en un marco macroscópico, en la modificación de las propiedades mecánicas del hormigón, particularmente en la reducción de la rigidez y desde luego un aumento en las deformaciones tanto totales como residuales. Es por ello que ante la aplicación de cargas cada vez mayores, la capacidad del hormigón para soportar procesos de fatiga disminuye, esto debido al crecimiento de fisuras, que ante la aplicación repetida de carga conlleva a la propagación de las mismas, hasta una rotura o falla del material, esto además expresado, en un aumento en las deformaciones residuales.

Al considerar el comportamiento indicado por la deformación 2 y 3, se aclara que, en el eje de las ordenadas, el signo negativo implica un abultamiento. Específicamente al analizar la deformación 2, se aprecia que ante cargas cíclicas bajas presenta una cierta irregularidad similar al comportamiento descrito en las lecturas de la deformación 1. A medida que aumentaron las cargas se aprecia que los paneles sufren un abultamiento, en esta sección. Esto se asocia a la forma en la que se aplica la carga, en este caso unidireccional, por lo que se genera una cierta libertad en el movimiento del panel, deformándose en otras direcciones, sin restricciones.

En el análisis de la deformación 3, se puede apreciar que el panel empezó a contraerse, lo que es un comportamiento relacionado con el abultamiento registrado en la deformación 2. En este caso, sin embargo, no se presentó una mayor diferencia en la deformación del panel, ante el efecto de cargas cíclicas, registrándose valores mucho más constantes.

Se debe aclarar que, debido a temas de seguridad, durante el ensayo la prensa aplicó carga hasta un valor cercano al 60% de su capacidad máxima, por lo que los paneles no alcanzaron la falla.

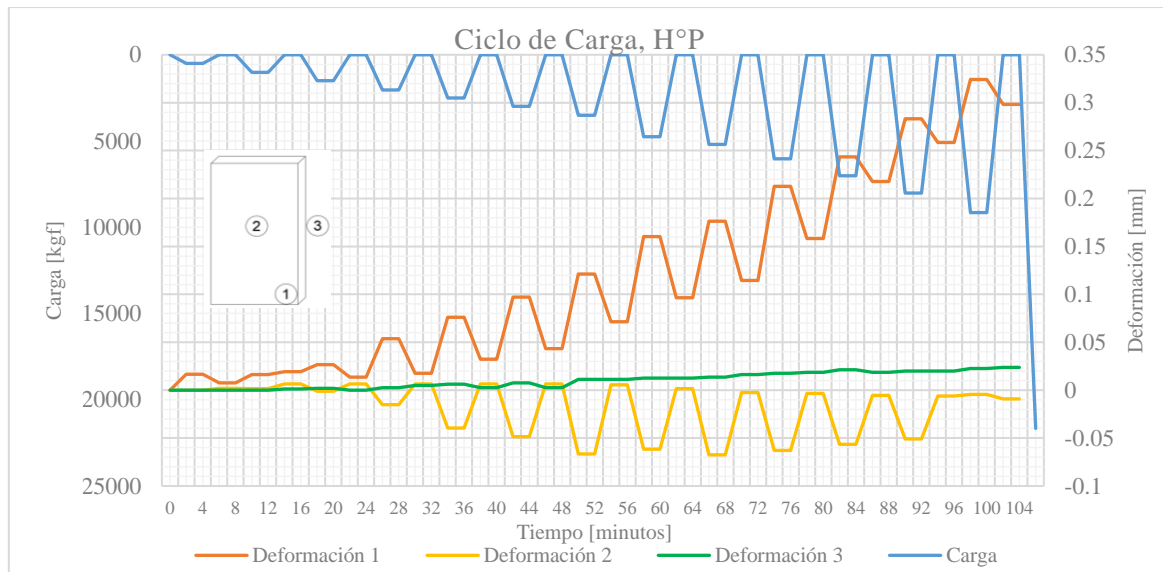


Figura 50: Ciclos de carga paneles de hormigón patrón

Siguiendo la metodología de ensayo antes mencionada, se observa en la figura 51, el comportamiento para paneles de mezcla hormigón alternativo [H°A]. En este tipo de paneles es más notable el aumento en las deformaciones totales que experimentan los paneles a medida que se aplican mayores cargas, fundamentalmente en lo marcado por las lecturas de la deformación 1.

Bajo este análisis se nota que las deformaciones residuales son menores, es decir el alargamiento permanente una vez que ha cesado la aplicación de cargas disminuye, en comparación con las deformaciones presentadas por los paneles elaborados con mezcla de hormigón patrón. Sin embargo, se aprecian que las deformaciones totales son mucho más marcadas, este comportamiento se relaciona con la presencia de caucho en la mezcla de hormigón, el mismo que por su naturaleza, al ser un elemento constituido por largas cadenas poliméricas, tiene la propiedad de ser extremadamente elástico y tiende a recuperar su forma inicial luego de retirarse la carga, por lo que se le considera como un buen disipador de energía. Es así que se considera que esta mezcla de hormigón presenta una mayor capacidad de deformación, pero además presenta una mayor disipación de esa energía de deformación total, lo que se refleja en una mayor capacidad para soportar cargas cíclicas antes de alcanzar la falla, por lo que podemos afirmar que se observa una mayor energía de deformación que se puede recuperar de un cuerpo deformado una vez ha cesado la causa de deformación, un concepto relacionado con la resiliencia de los materiales en este caso de los paneles.

De igual manera se analizó el comportamiento de los paneles ante cargas compresivas en la sección más grande, en la cual se registraron lecturas correspondientes a las deformaciones indicadas en la figura 51, como deformación 2. En el mismo se registra un comportamiento similar al registrado en los paneles con mezcla de hormigón patrón, al observarse un proceso de abultamiento en esta sección, sin embargo, en comparación, los paneles de mezcla alternativa presentaron mayores deformaciones totales, así como una mayor disipación de energía, esto asociado a lo antes mencionado, que este tipo de paneles presentan una mayor relación entre el esfuerzo y la deformación, es decir resiliencia del material.

En cuanto a la deformación presentada en la sección del espesor del panel, marcado como deformación 3, este en cargas iniciales presentó una tendencia a contraerse, y a medida que las

cargas aumentaron estos paneles empezaron a abultarse. En comparativa con los paneles de mezcla de hormigón patrón estos presentaron deformaciones permanentes muchos menores, siguiendo la misma tendencia marcada en las lecturas anteriores.

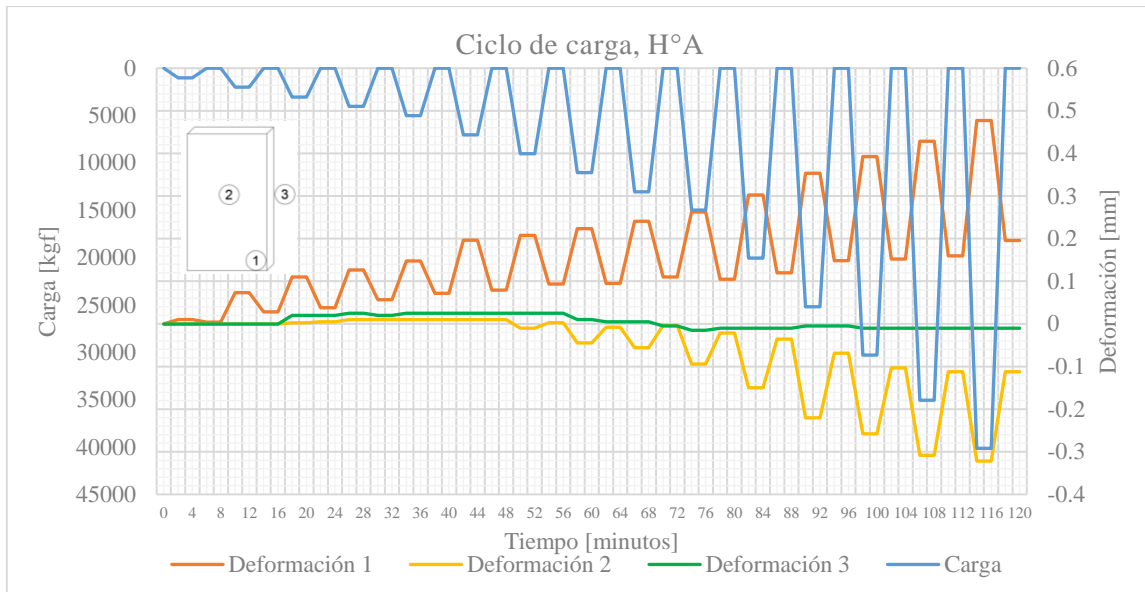


Figura 51: Ciclos de carga paneles de hormigón alternativo

Con la finalidad de hacer una comparación entre paneles de las dos mezclas de diseño, se optó por considerar un panel de hormigón simple que fue ensayado hasta alcanzar cargas similares al panel de hormigón alternativo, como se indica en la figura 52. Se observa un comportamiento similar al marcado en la figura 50, correspondiente al promedio de los 2 paneles restantes para este tipo de mezcla. Notamos una disminución en la capacidad de disipar energía a medida que aumentan las cargas aplicadas, observándose deformaciones totales cada vez mayores, acompañadas con deformaciones permanentes igual de grandes. Además, se aprecia que este panel presentó un comportamiento diferente en la cara principal, atribuido principalmente a problemas con los deformímetros debido a errores en su colocación. En cuanto a lo marcado por la deformación 3, este presentó un comportamiento prácticamente constante a lo largo del tiempo de ensayo independiente de la aplicación de cargas cíclicas.

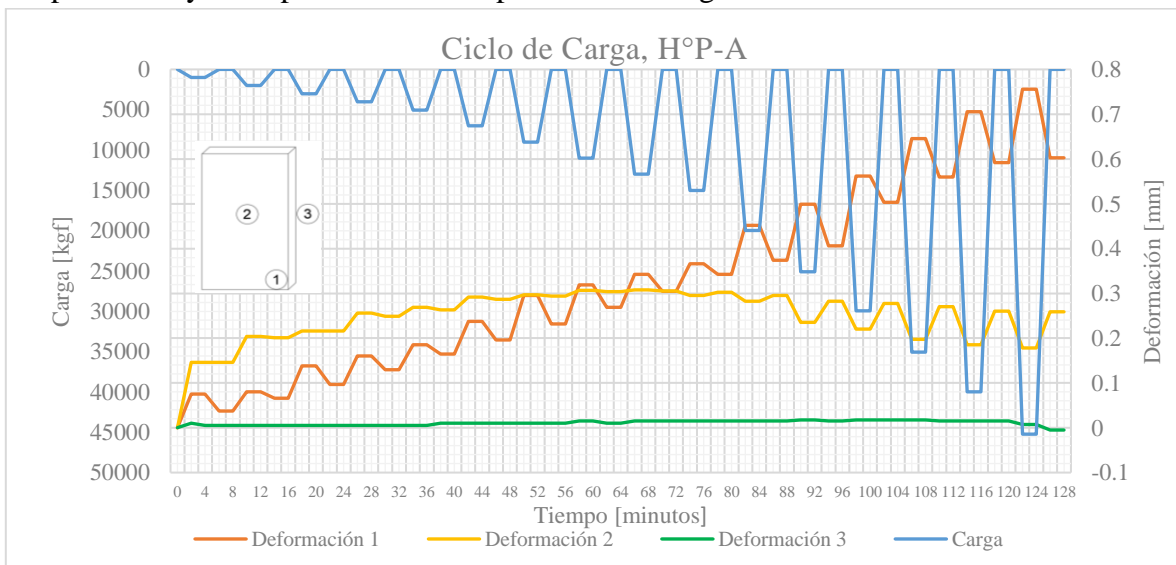


Figura 52: Ciclos de carga panel de hormigón patrón-A

4.6.2 Carga Transversal

En esta metodología de ensayo se registraron valores de deformación en la longitud media, con la finalidad de obtener registros a medida que se aplica la carga. Se ensayaron dos paneles para cada mezcla de diseño.

En la figura 53, se observa la aplicación de cargas cíclicas en el transcurso del tiempo, sobre un panel de hormigón de mezcla patrón [H°P-1]. Se indica la deformación marcada en la longitud media y al igual que en el caso de cargas compresivas, ante la aplicación de cargas cíclicas bajas, este tipo de paneles presentan un comportamiento irregular lo que puede atribuirse al proceso de estabilización de la carga sobre los paneles. Igualmente, se observa que a medida que se aumentaron las cargas aplicadas, se presentó un marcado aumento en las deformaciones residuales, lo que es un indicativo de un aumento en la microfisuración interna del hormigón, antes de la rotura.

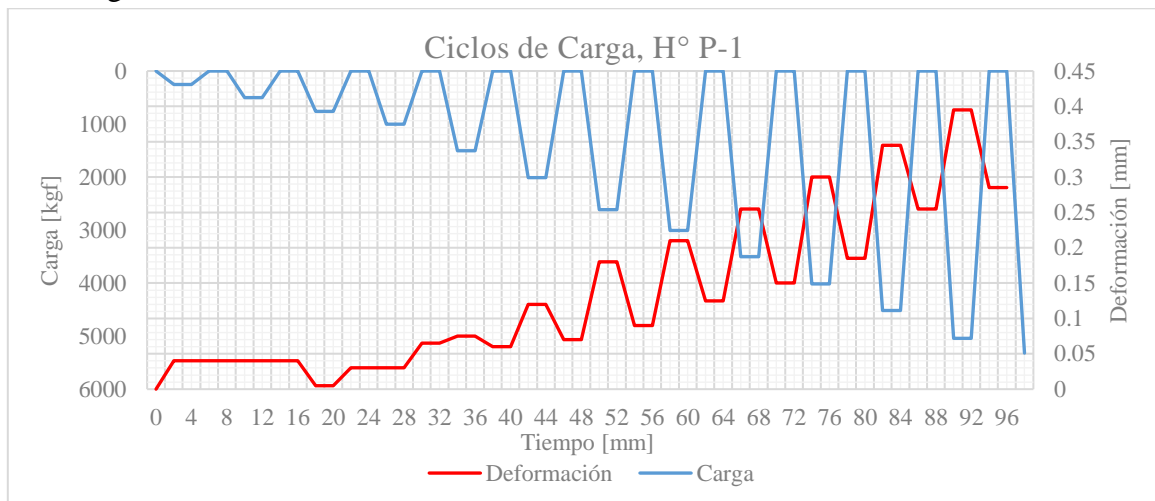


Figura 53: Ciclos de carga del panel de hormigón patrón número 1

Vale destacar que, bajo esta condición de ensayo, se aplicó carga hasta que los paneles fallaron, como se observa en anexos, es así que los datos de deformación se tomaron hasta valores que no representaban un peligro para los equipos. Un comportamiento similar se presenta en la figura 54, correspondiente de igual manera a un panel de hormigón de mezcla patrón [H°P-2]

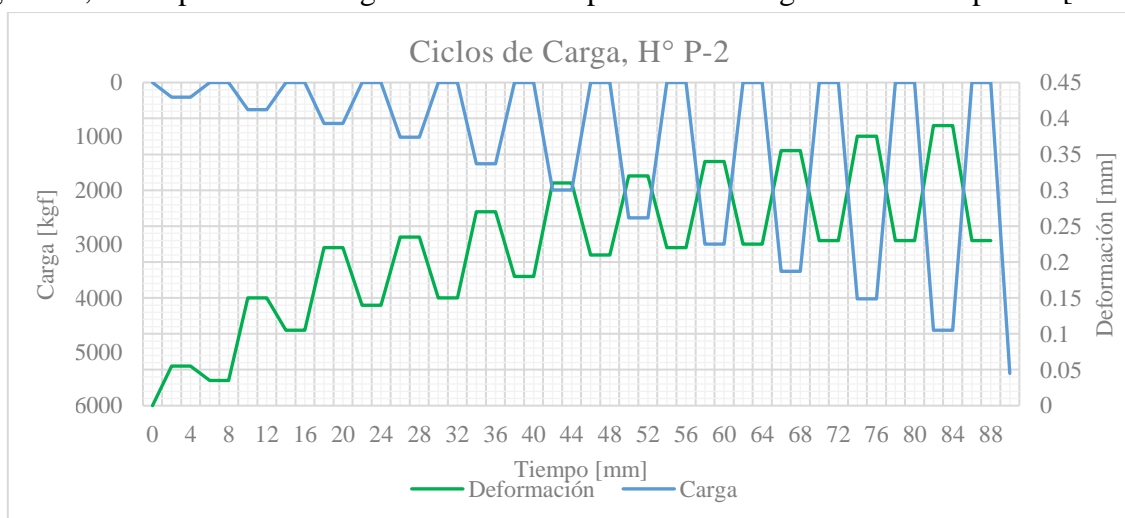


Figura 54: Ciclos de carga del panel de hormigón patrón número 2

Siguiendo la metodología en este caso, para los paneles de hormigón alternativo [H°A-1], se analizó el comportamiento bajo condiciones de carga cíclica, presentado en la figura 55. En la misma se observan deformaciones totales mucho más notables que en comparación de los paneles con mezclas de hormigón patrón, además los intervalos de variación entre deformaciones totales y permanentes son mayores, así como presentan un comportamiento más homogéneo, esto al igual que el caso de los ensayos bajo cargas compresivas refleja que el hecho de incorporar caucho en la mezcla, brindó a la misma una mayor capacidad de disipación de energía, asociado a un material con propiedades elásticas como lo es el caucho, por lo que se puede considerar que existe una mejora en el comportamiento de este tipo de paneles, ante efectos de carga cíclica, previo a su rotura por un proceso de fatiga.

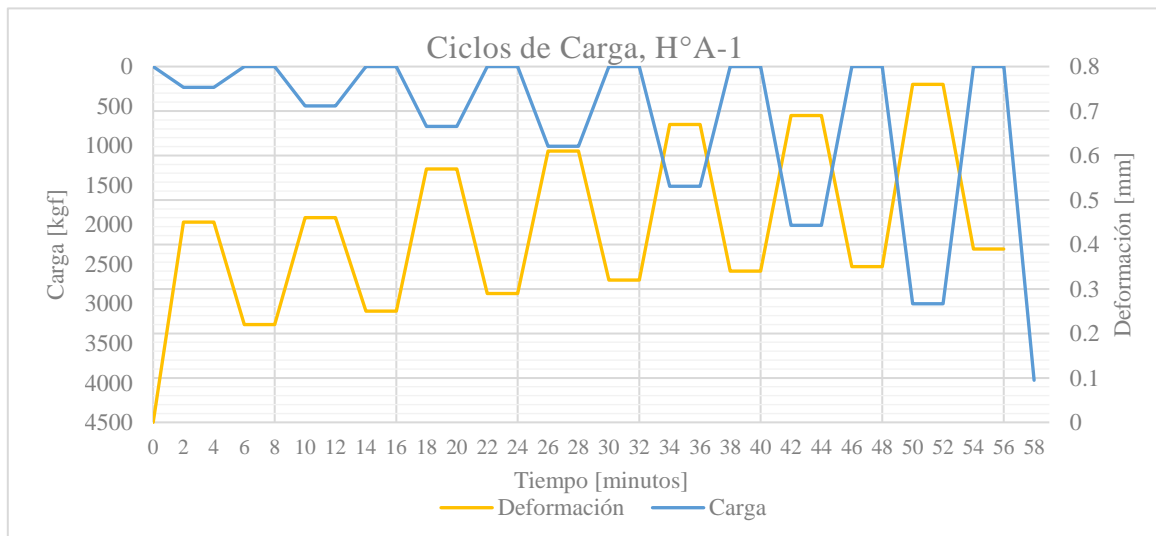


Figura 55. Ciclo de Carga del panel de hormigón alternativo número 1

De la misma manera se observa este comportamiento en un panel de hormigón alternativo, [H° A-2], indicado en la figura 56. En este panel es incluso más notable la diferencia entre las deformaciones totales bajo cargas y las deformaciones permanentes, lo que refleja que estos paneles presentan un aumento su resiliencia, en comparación con un panel elaborado con una mezcla de hormigón patrón.

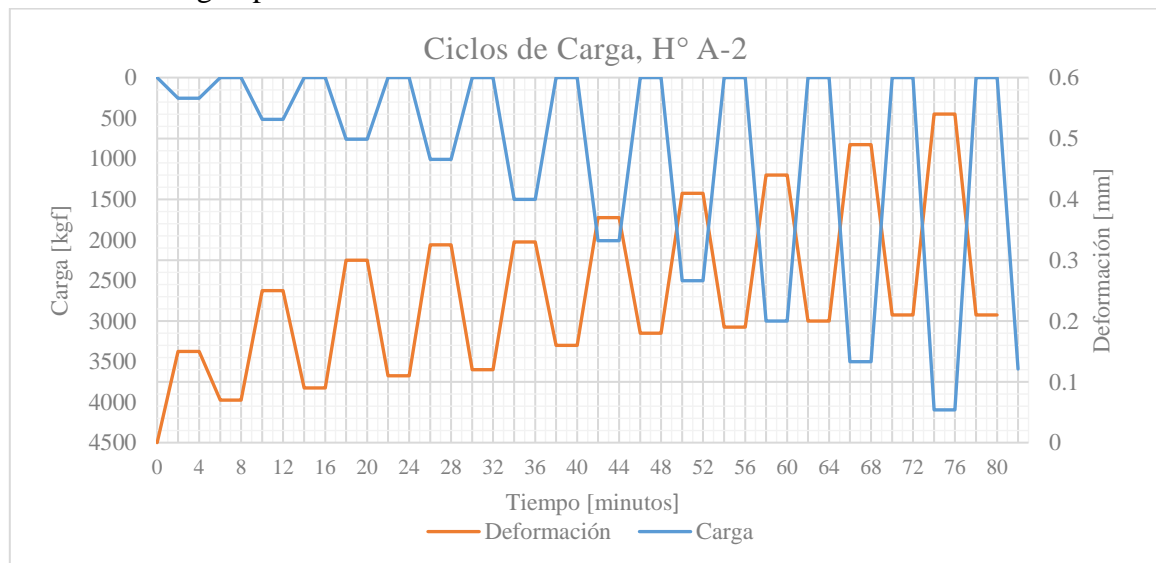


Figura 56: Ciclos de carga del panel de hormigón alternativo número 2

Como se indicó, los paneles ensayados bajo esta condición de carga alcanzaron la falla bajo condiciones de carga cíclica, siendo estos valores máximos de carga inferiores al que se produciría por una rotura estática del material. En la figura 57, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los paneles, en ella se observa una comparación entre la carga aplicada y la deformación total. Para los paneles con mezcla de hormigón patrón se ha denominado como [HP] y para paneles elaborados con la mezcla de hormigón alternativo se ha denominado [HA].

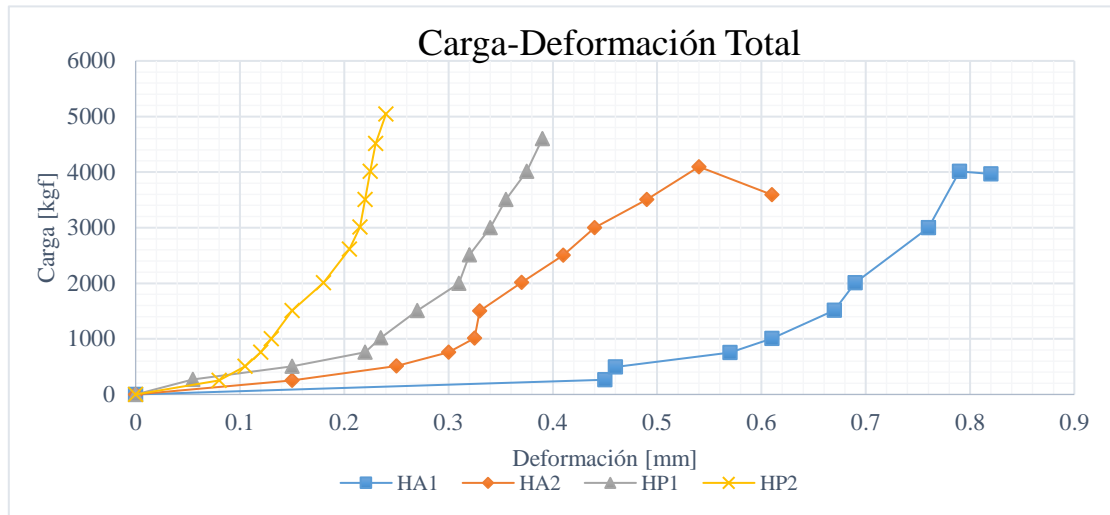


Figura 57: Analisis de carga versus deformación total, carga transversal

En consideración de los resultados obtenidos en los ensayos concernientes a módulo de elasticidad, en los que los especímenes que contenían caucho podían soportar carga incluso después de alcanzada la falla, se verificó el mismo comportamiento esta vez al ensayar paneles bajo cargas transversales. Debido a que las cargas a las que se alcanzó la falla fueron similares, se pudo comparar que los paneles elaborados con una mezcla de hormigón alternativo presentaban mayores deformaciones totales, sin embargo, también presentaban una mejor disipación de energía al presentar deformaciones permanentes similares con los observados en los ensayos de los paneles de mezcla de hormigón patrón, como se indica en la figura 58, en la que se expresa como [HA] para definir los hormigones alternativos y [HP] para la mezcla patrón.

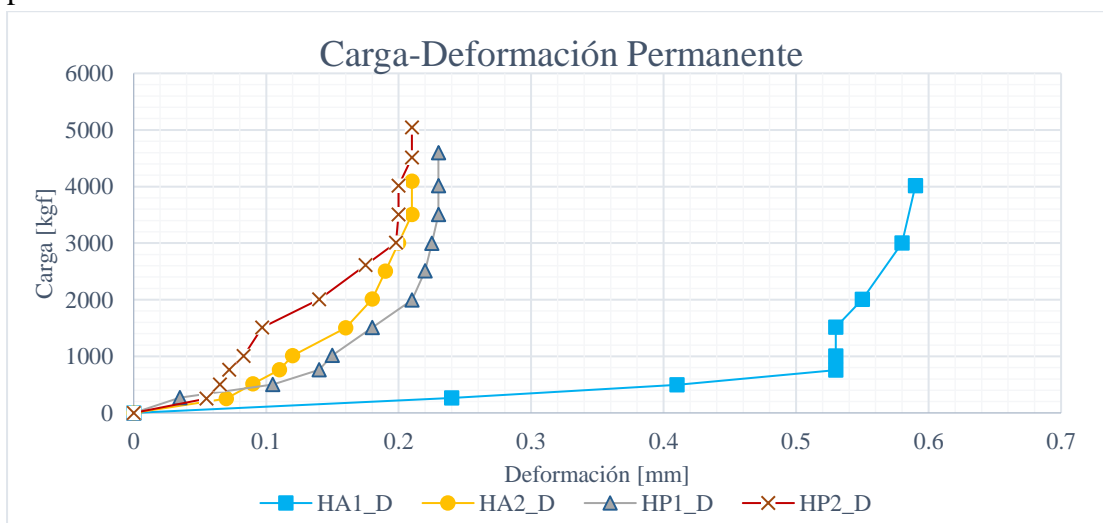


Figura 58. Análisis de carga versus deformación permanente, carga transversal



De acuerdo a (Rochel, 2002), en su estudio sobre el comportamiento de los elementos no estructurales, en estructuras aporricadas, estos deben presentar una capacidad de disipación de energía adecuada, de manera que eviten su deterioro ante cargas cíclicas, es así que en función de los ensayos realizados se observa una mejora en cuanto al comportamiento ante fatiga de los paneles de hormigón alternativo. De igual manera se debe verificar que estos elementos tengan la capacidad de soportar las cargas sin fallar por aplastamiento, condiciones que se presentan de forma detallada en la tabla 34, en la cual se ha considerado un criterio de aceptación de los paneles.

De la misma manera se considera que los elementos de mampostería deben presentar la suficiente resistencia a fuerzas laterales como resultado de presiones del viento, aceleraciones sísmicas, etc. Estas presiones o cargas laterales deben ser resistidas por mecanismos relacionados con la resistencia a tensión de los paneles. Es así que (Carrillo & González, 2017) en base a la experiencia obtenida en sismos, se ha demostrado que los muros de mampostería no se comportan adecuadamente cuando están sometidos a cargas cíclicas actuando dentro y fuera de su plano. Esto debido a su poca capacidad de disipar energía, por el hecho de subestimar las aceleraciones o demanda sísmica, que actúan fuera del plano.

Pese a que los muros de mampostería se catalogan como elementos no estructurales, estos logran alterar significativamente el comportamiento global de las estructuras, dado que en el caso de estar en contacto con los elementos que conforman el pórtico, se incrementa sustancialmente la rigidez de la edificación.

Si bien se mantiene como un criterio de diseño, que elementos divisorios deben separarse de la estructura para que al momento de deformarse como consecuencia de un sismo no se vean afectados, por lo que se requiere que sean lo suficientemente flexibles para resistir las deformaciones que la estructura les impone. En el caso que los muros de mampostería estén conectados al sistema estructural, el comportamiento del edificio frente a cargas laterales se verá afectado, debido al cambio de rigidez, variando las aceleraciones a las que se somete estos elementos no estructurales en caso de estar separadas de la estructura.

Es por ello que para analizar el comportamiento de los paneles ante condiciones de servicio se ha considerado el criterio de aceptación indicado en las tablas 9 y 10, correspondientes a cargas transversales a la rotura y la deflexión bajo la misma condición, usado para la validación de elementos no estructurales.

Esta metodología de ensayo entrega un criterio para clasificar los paneles, de acuerdo a lo indicado se refleja que tanto los paneles elaborados para las diferentes mezclas de hormigón, son aptos para su uso en construcción, los resultados, se expresan en la tabla 34.

Tabla 34
Criterio aceptación bajo cargas transversales

Identificación	Carga a la rotura [kgf]	Grado	Flecha [mm]	Sub-Grado	Clasificación
HA1	3967	2	0.39	C	2C
HA2	3594	2	0.21	C	2C
HP1	5401	3	0.29	C	3C
HP2	5320	3	0.22	C	3C



4.7 ANALISIS DE COSTOS

Las dimensiones que se obtuvieron en el software ETABS para las vigas, considerando las mezclas de diseño, se expresan en la tabla 35 y 36 para la mezcla de hormigón patrón y alternativa respectivamente.

Tabla 35
Dimensiones de las vigas de cada piso, Hormigón Tradicional

Vanos	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso	Techo
A--B	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
1 B--C	40x60cm	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm
C--D	40x60cm	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm
A--B	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
2 B--C	40x60cm	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm
C--D	40x60cm	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm
A--B	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
3 B--C	40x60cm	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm
C--D	40x60cm	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm
A 3--2	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	30x40cm
2--1	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
B 3--2	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
2--1	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
C 3--2	40x60cm	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm
2--1	40x60cm	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm
D 3--2	40x60cm	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm
2--1	40x60cm	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm

Fuente: Autores

Tabla 36
Dimensiones de las vigas de cada piso, Hormigón Alternativo

Vanos	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso	Techo
A--B	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
1 B--C	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm	30x40cm
C--D	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm	30x40cm
A--B	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
2 B--C	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm	30x40cm
C--D	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm	30x40cm
A--B	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
3 B--C	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm	30x40cm
C--D	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm	30x40cm
A 3--2	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
2--1	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
B 3--2	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
2--1	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm	40x60cm
C 3--2	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm	30x40cm
2--1	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm	30x40cm
D 3--2	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm	30x40cm
2--1	40x60cm	40x60cm	35x50cm	35x50cm	30x40cm	30x40cm

Fuente: Autores

Se puede observar que las dimensiones de las vigas si disminuyen desde el tercer piso y por ende el volumen de hormigón a utilizar disminuye, siendo este un volumen total de 1.17m³.

Para las columnas las dimensiones que nos brindó el software ETABS fueron las que se muestran en la tabla a continuación.



Tabla 37

Dimensiones de las columnas de cada piso, Hormigón Tradicional

Vanos	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso
1--A	70x70cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	50x50cm
1--B	70x70cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	50x50cm
1--C	70x70cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	50x50cm
1--D	70x70cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	50x50cm
2--A	70x70cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	50x50cm
2--B	70x70cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	50x50cm
2--C	70x70cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	50x50cm
2--D	70x70cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	50x50cm
3--A	70x70cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	50x50cm
3--B	70x70cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	50x50cm
3--C	70x70cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	50x50cm
3--D	70x70cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	50x50cm

Fuente: Autores

Tabla 38

Dimensiones de las columnas de cada piso, Hormigón Alternativo

Vanos	1er Piso	2do Piso	3er Piso	4to Piso	5to Piso
1--A	60x60cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	40X40cm
1--B	60x60cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	40X40cm
1--C	60x60cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	40X40cm
1--D	60x60cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	40X40cm
2--A	60x60cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	40X40cm
2--B	60x60cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	40X40cm
2--C	60x60cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	40X40cm
2--D	60x60cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	40X40cm
3--A	60x60cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	40X40cm
3--B	60x60cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	40X40cm
3--C	60x60cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	40X40cm
3--D	60x60cm	60x60cm	50x50cm	50x50cm	40X40cm

Fuente: Autores

Se puede observar que las dimensiones de las columnas si disminuyen desde el primer piso y por ende el volumen de hormigón a utilizar disminuye siendo este un volumen total de $0.94m^3$. Mientras que para las zapatas el dimensionamiento se establece tomando en cuenta algunas suposiciones como la que el suelo tiene una capacidad de 2.0 kg/cm^2 lo que hace que no cambie el dimensionamiento y sirva para comparación ya que lo que cambia es la carga que producen las paredes, en la siguiente tabla se puede observar como varían las dimensiones de las zapatas.

Tabla 39

Dimensiones de las zapatas, Hormigón Tradicional

Zapatas	Área Tributaria [m ²]	Carga [kg]	Dimensiones [cm]	Dimensión seleccionada [cm]
zapata 1-A	13.50	90720.00	212.98	220x220cm
zapata 2-A	27.00	181440.00	301.20	310x310cm
zapata 3-A	13.50	90720.00	212.98	220x220cm
zapata 1-B	24.00	161280.00	283.97	290x290cm
zapata 2-B	48.00	322560.00	401.60	410x410cm
zapata 3-B	24.00	161280.00	283.97	290x290cm
zapata 1-C	21.00	141120.00	265.63	270x270cm
zapata 2-C	42.00	282240.00	375.66	380x380cm
zapata 3-C	21.00	141120.00	265.63	270x270cm
zapata 1-D	10.50	70560.00	187.83	190x190cm
zapata 2-D	21.00	141120.00	265.63	270x270cm
zapata 3-D	10.50	70560.00	187.83	190x190cm

Fuente: Autores



Tabla 40
Dimensiones de las zapatas, Hormigón Alternativo

Zapatas	Área Tributaria [m ²]	Carga [kg]	Dimensiones [cm]	Dimensión seleccionada [cm]
zapata 1-A	13.50	85598.05	206.88	210x210cm
zapata 2-A	27.00	171196.10	292.57	300x300cm
zapata 3-A	13.50	85598.05	206.88	210x210cm
zapata 1-B	24.00	152174.31	275.84	280x280cm
zapata 2-B	48.00	304348.62	390.10	400x400cm
zapata 3-B	24.00	152174.31	275.84	280x280cm
zapata 1-C	21.00	133152.52	258.02	260x260cm
zapata 2-C	42.00	266305.04	364.90	370x370cm
zapata 3-C	21.00	133152.52	258.02	260x260cm
zapata 1-D	10.50	66576.26	182.45	190x190cm
zapata 2-D	21.00	133152.52	258.02	260x260cm
zapata 3-D	10.50	66576.26	182.45	190x190cm

Fuente: Autores

Como se puede observar en la mayoría de las zapatas, la carga de los paneles hace que las zapatas cuadradas varíen 10 cm, lo que involucra una reducción del volumen de hormigón y por ende menos costos a la obra. El volumen que disminuye en las zapatas es de 0.21m³ respectivamente, en el caso de que la profundidad de desplante para todas las zapatas sea de 1 metro. Una vez obtenida la reducción de volumen de hormigón se tiene el precio unitario de la mezcla alternativa con incorporación de caucho, para de esta manera obtener el costo que implica su utilización.

Utilizando las ecuaciones 39 y 40 se obtiene el rango del espesor mínimo de la losa y el espesor máximo al que podría tener este.

$$h_{min} \geq \frac{(9m)(800 + 0.0712 * 4200)}{36000 + 5000(6/3.20)(1 + 1)} = 0.18m = 18cm$$

$$h_{min} \leq \frac{(9m)(800 + 0.0712 * 4200)}{36000} = 0.27m = 27cm$$

De acuerdo al criterio de ingeniería y de seguridad de la losa se puede tomar la media para espesores de la losa de hormigón tradicional o patrón la misma que sería de 23cm respectivamente, mientras que para el hormigón alternativo con incorporación de caucho tomando el valor mínimo ya estaríamos del lado de seguridad pero para tomar medidas preventivas como se lo hizo con el hormigón patrón se tomara un espesor de 20cm que de igual manera cumple con el Código y la norma ACI para el diseño de losas.

Al ocupar esta diferencia de espesores en cada tipo de hormigón ya sea tradicional o alternativo se puede obtener que la diferencia de hormigón debido a la menor densidad y por ende las cargas de servicio es considerable, se disminuiría la cantidad de hormigón requerido para losas siendo esta una reducción de 59.62m³.

Para el caso de las paredes exteriores del edificio se consideró los espesores obtenidos en las losas ya que las cargas ejercidas sobre estas tienen una relación con el peso que produce las vigas, columnas y losas sobre el mismo y ya que en el hormigón alternativo en todas las secciones disminuye las dimensiones el espesor lo hará de igual manera por lo que se obtuvo una reducción de 37.80m³ de hormigón requerido.



Tabla 41

Análisis de Precios Unitarios de la mezcla de hormigón alternativo

Materiales	Unidad	Cantidad Requerida	Precio Productivo	Costo Total [\$]
Cemento Guapán (Saco 50kg)	saco	11.99	7.60	91.14
Arena	m ³	0.19	18.00	3.42
Ripio 3/4"	m ³	0.34	19.00	6.46
Agua	m ³	0.27	0.85	0.23
Mano de Obra				
Peón	Hora	1	3.58	3.58
Albañil	Hora	1	3.62	3.62
Maestro de obra	Hora	1	4.01	4.01
Equipo, maquinaria y herramientas				
Concretera 1 saco	Hora	1	3.15	3.15
Vibrador de manguera	Hora	1	1.80	1.80
Herramientas varias	Hora	1	0.40	0.40
Costo total de m³ de hormigón con 30% de caucho colocado en obra				117.81

Debido a los requerimientos que se pueden presentar en obra, las diferentes mezclas de hormigón alternativo, pueden ser utilizadas, por lo que la consideración de costos en relación con la cantidad de material reciclado incorporado en mezcla se presenta en la figura 59.

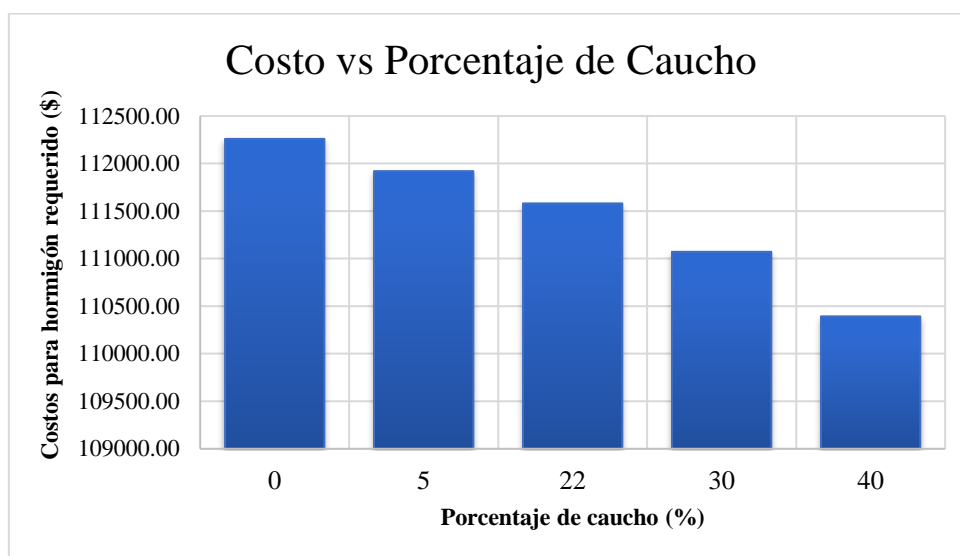


Figura 59. Relación Porcentaje de Caucho-Costo

De igual forma observando la tabla 42, se presenta la variación del costo del hormigón de acuerdo a la resistencia a la compresión, la misma que varía en función de la cantidad de material reciclado incorporado en la mezcla, como se nota en la figura 59. Por lo que podemos notar que el precio aumenta a medida que el porcentaje de caucho disminuye y como es evidente también aumenta cuando se requiere mayor resistencia del hormigón, en la tabla se expone el costo del hormigón para los 942.804m³ que se requieren para la construcción del edificio respectivamente.

Tabla 42
Análisis de costos función de resistencia

Porcentaje Caucho [%]	Costo Total [\$]	Resistencia Compresión [Kg/cm ²]
0	112259.67	308.85
5	111920.26	270
22	111580.85	241.08
30	111071.74	215.09
40	110392.92	158.02

De acuerdo al diseño analizado se pudo calcular que el volumen de hormigón que disminuye construyendo un edificio con la utilización de una mezcla de hormigón alternativo es de 2.32m³ el mismo que se refleja en una reducción del costo de la infraestructura en un valor de \$273.32. Como me puede observar en la tabla 43 se muestra como disminuye considerablemente la cantidad de hormigón requerido para el uso de hormigón tradicional como para el alternativo, es decir en el caso de construir el edificio con el hormigón alternativo con incorporación de caucho minorarían las dimensiones de vigas, zapatas, columnas y espesor de paredes exteriores y losas siendo un decremento o reducción de 99.736m³ de hormigón que representa el 10.58% del hormigón requerido total en la obra.

Tabla 43
Cantidad de hormigón requerido para cada alternativa de mezcla

	Hormigón Tradicional [m ³]	Hormigón Alternativo [m ³]	Ahorro Hormigón [m ³]
Losas	457.056	397.44	59.616
Paredes exteriores	289.8	252	37.8
Vigas	112.32	111.15	1.17
Columnas	70.56	69.62	0.94
Zapatas	13.068	12.858	0.21
Hormigón total requerido [m ³]	942.804	843.068	99.736

Con la ayuda del software ETABS, se obtuvo la cantidad de acero que se necesita de refuerzo en vigas y columnas como se muestra en la figura 60, para el caso de incorporarse una mezcla de hormigón tradicional. De igual manera se observa en la figura 61, el caso en el que se utilice una mezcla de hormigón alternativo.

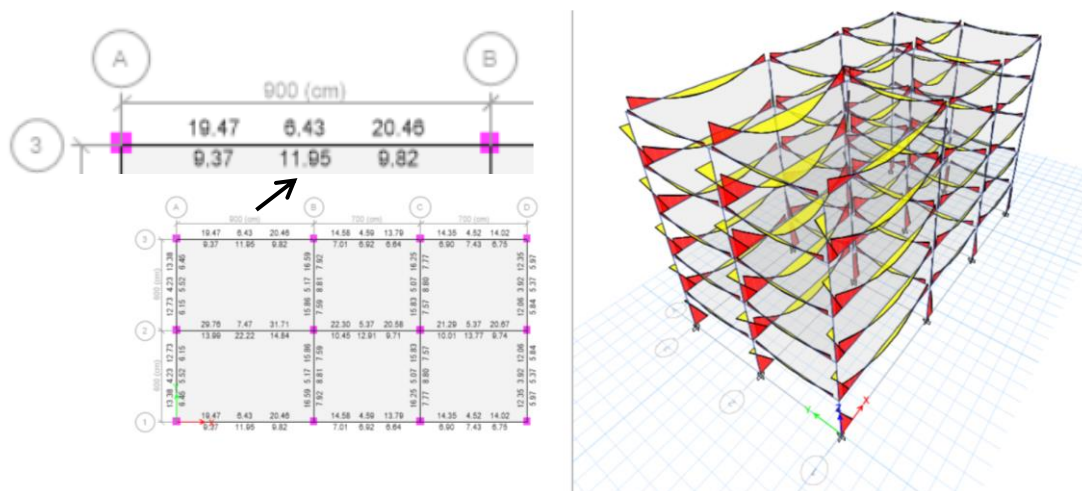


Figura 60: ETABS Área de acero de refuerzo en vigas del edificio de hormigón tradicional

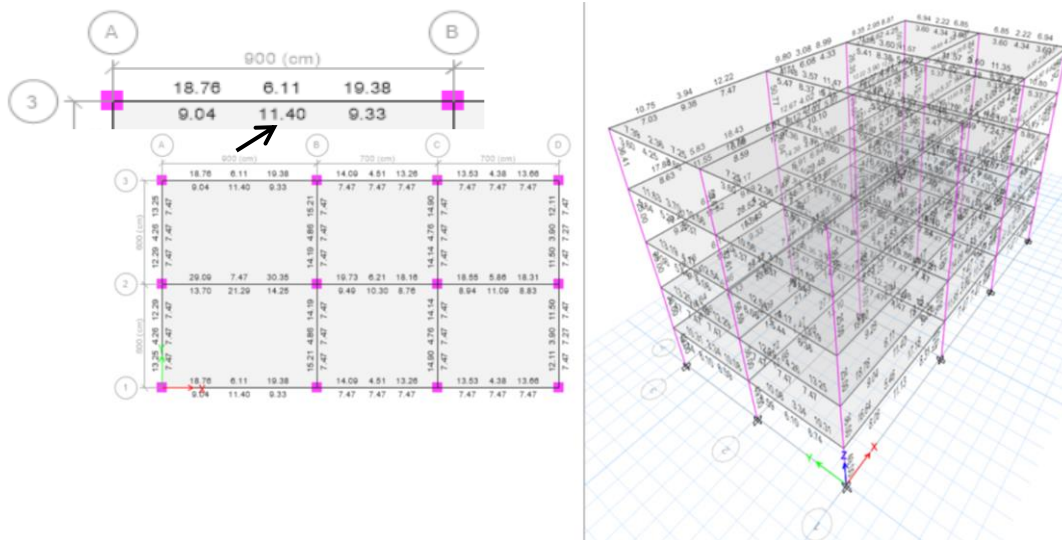


Figura 61: ETABS Área de acero de refuerzo en vigas del edificio de hormigón alternativo

De acuerdo a las figuras presentadas, podemos notar que la cantidad de acero de refuerzo es menor en el edificio que se diseña con hormigón alternativo. De acuerdo a estos valores que nos brindó el software ETABS podemos obtener la cantidad de acero requerida en todo el edificio para vigas siendo los resultados mostrados en la tabla 44.

Tabla 44

Cantidad de acero de refuerzo, vigas para cada tipo de hormigón

Vigas	Acero de refuerzo [cm ²]	
	Hormigón Tradicional	Hormigón Alternativo
1er piso	947.53	937.63
2do piso	947.53	937.63
3er piso	1064.9	1054.918
4to piso	1087.36	1073.44
5to piso	1001.02	987.01
techo	841.98	766.33
Total	5890.32	5756.96

Como se puede ver en la tabla anterior la cantidad de acero de refuerzo en el edificio con hormigón alternativo es menor al edificio diseñado con el hormigón tradicional. La diferencia del área requerida entre el uno y el otro es de 133.36cm². El área mencionada equivale a 43 varillas de 20mm de diámetro. Según la APU el costo por 50kg de las varillas corrugadas de 20mm es de \$40.11. Según ADELCA la varilla corrugada de 20mm de diámetro y 12m de longitud tiene un peso de 29.592kg por lo que el costo de las 43 varillas sería de \$1020.76 respectivamente. Para el cálculo del acero de refuerzo de las columnas también se usó el software ETABS como se muestran en las figuras 62 y 63, para el caso de hormigón tradicional y hormigón alternativo, respectivamente.

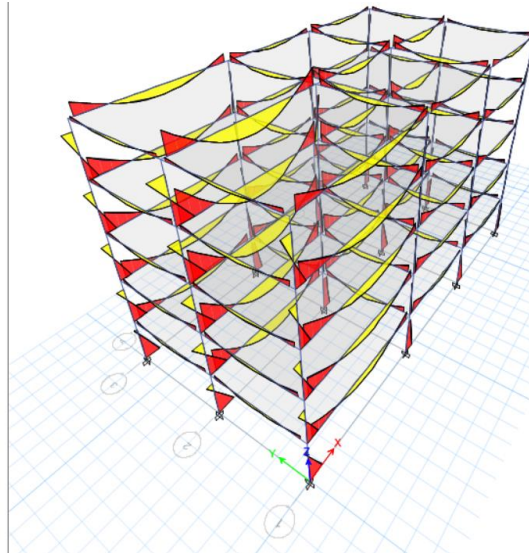
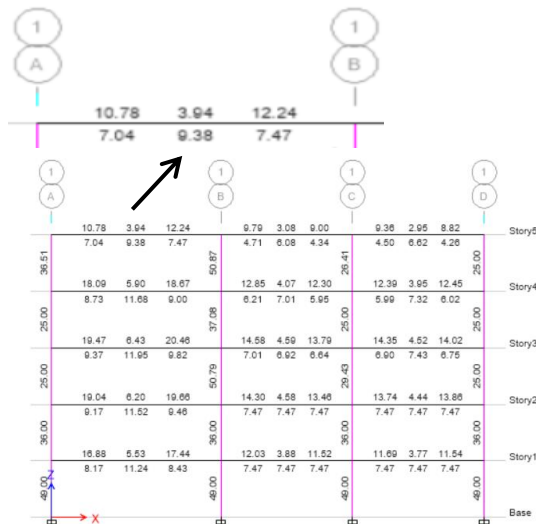


Figura 62: ETABS Área de acero de refuerzo en columnas del edificio de hormigón tradicional

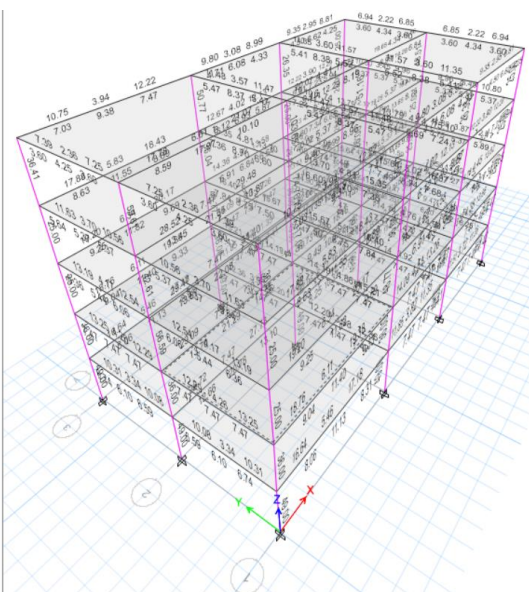
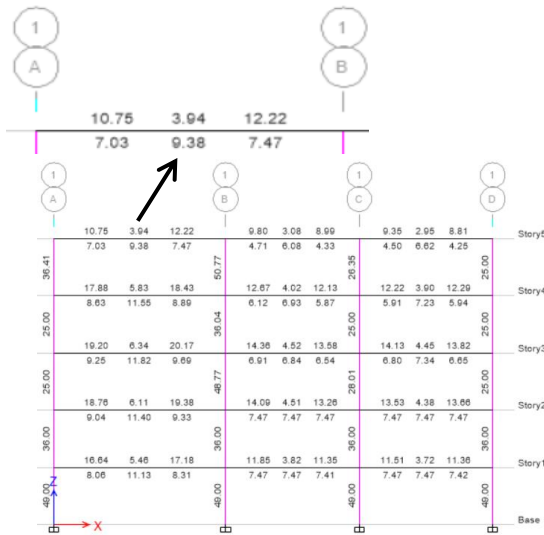


Figura 63: ETABS Área de acero de refuerzo en columnas del edificio de hormigón alternativo

Se nota de igual manera que la cantidad de acero de refuerzo es menor en el edificio que se diseña con hormigón alternativo. En función a los valores obtenidos por el software ETABS, podemos obtener la cantidad de acero requerida en todo el edificio para columnas, como se observa en la tabla 45.

Tabla 45
Cantidad de acero de refuerzo, columnas para cada tipo de hormigón

Columna	Acero de refuerzo [cm ²]	
	Hormigón Tradicional	Hormigón Alternativo
eje A	589.42	586.63
eje B	833.83	821.62
eje C	552.17	546.4
eje D	504.83	503.51
eje 1	721.09	714.35
eje 2	1041.09	1025.47
eje 3	721.09	716.35
Total	4963.52	4914.33



Como se puede ver en la tabla anterior la cantidad de acero de refuerzo en el edificio con una mezcla de hormigón alternativo es menor al edificio diseñado con el hormigón tradicional. La diferencia del área requerida entre el uno y el otro es de 49.19cm². El área mencionada equivale a 16 varillas de 20mm de diámetro. Según la APU el costo por 50kg de las varillas corrugadas de 20mm es de \$40.11. En ADELCA la varilla corrugada de 20mm de diámetro y 12m de longitud tiene un peso de 29.592kg por lo que el costo de las 16 varillas sería de \$379.82.

El estudio de la cantidad de acero de las zapatas es de acuerdo a la cuantía mínima que se considera con respecto a sus dimensiones, ya que la mayoría de zapatas tienen una diferencia de 10cm por lado se puede tener una relación que el acero en diferencia entre la columna y las zapatas es de aproximadamente el doble por lo que se considera que minoraría el acero de refuerzo en aproximadamente 24.60cm² la cual equivale a un costo de \$189.91.

Tomando en consideración costos que es un tema muy importante y primordial al momento de tomar una elección entre dos alternativas se observa que la disminución de costos de las losas del piso equivale a \$7,098.95 mientras que el hormigón minorado en las paredes equivale a \$4,500.85 respectivamente la misma que es una cantidad considerable para tomar una elección al momento de construir una edificación.

La tabla de resultados finales en comparación del edificio con una mezcla de hormigón alternativo y uno con el uso de una mezcla de hormigón tradicional se indica en la tabla 46.

Tabla 46
Costo total reducción propuesto

Disminución de Costos		
Acero de refuerzo	Vigas	\$ 1,020.76
	Zapatas	\$ 189.91
	Columnas	\$ 379.82
Hormigón	Vigas	\$ 137.84
	Zapatas	\$ 24.74
	Columnas	\$ 110.74
	Losas	\$ 7,098.95
	Paredes	\$ 4,500.85
Ahorro Total		\$ 13,463.61

En la figura 64, podemos observar cómo varía la cantidad de hormigón requerido en el ejemplo impuesto del edificio.

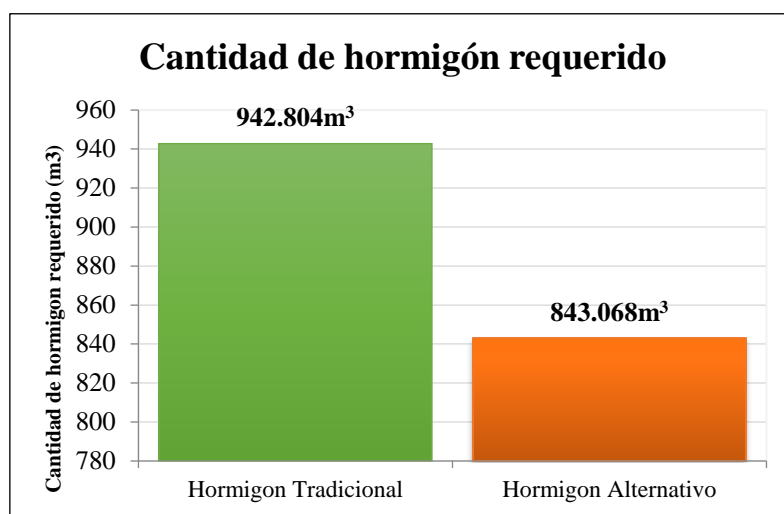


Figura 64: Cantidad de hormigón requerido, mezclas de diseño.

En vista de la importancia de cubrir las necesidades de toda la población, y enfocada en aquella que se considera más vulnerable, debido a la falta de infraestructura de vivienda, el gobierno del Ecuador entregó 1400 viviendas sociales en noviembre de 2018 (Radio Pública, 2019), se puede relacionar que cada casa ocupa el volumen relacionado a 1 piso del edificio propuesto por lo que de acuerdo a esta relación mencionada el gobierno se hubiera ahorrado un total de \$3,769,640 en la construcción de las 1400 viviendas.

4.8 SOSTENIBILIDAD MEDIOAMBIENTAL

4.8.1 Análisis LEED

Con el uso del checklist de LEED V4, se comparó el grado de sostenibilidad entre una mezcla de hormigón patrón y una correspondiente a un hormigón alternativo. En vista de que se analizó la utilización de una mezcla en la elaboración de elementos, se ha considerado dos categorías, para las que en la figura 65, se expresa la calificación obtenida en función a los parámetros considerados en este análisis, los mismo que pueden encontrarse en la Guía LEED v4 para Diseño y Construcción de edificios.



Figura 65 Checklist LEED V4

Para una nueva construcción y renovaciones importantes, el uso de material reciclado en este caso, caucho incorporado en mezclas de hormigón, aporta 16 puntos de los 40 puntos mínimos para obtener una certificación LEED, mientras que en el caso de utilizar una mezcla de hormigón este aporta 9 puntos.

El aporte de los mismos se expresa en 11 puntos de 13 posibles en la categoría Materiales y Recursos para una mezcla de hormigón alternativo mientras que para una mezcla de hormigón patrón se registró 8 puntos. De igual manera para la categoría de Innovación para una mezcla de hormigón alternativo se registró 5 de 6 puntos posibles, mientras que para un hormigón tradicional apenas 1. Esto debido a que la metodología LEED premia el uso de materiales reciclados o recuperados siempre que su uso no genere un riesgo. De igual manera busca incentivar la aplicación de estrategias constructivas innovadoras, pero sobre todo que alcancen una eficiencia ambiental en cuanto a su uso o incorporación.

4.8.2 Análisis Greenroads

Previamente se definió las categorías de análisis en las que se podía evaluar la incorporación de caucho en mezclas de hormigón. En este caso y con el uso de la versión on-line Greenroads V2 Project, se realizó una comparativa entre la utilización de una mezcla de hormigón alternativo y una mezcla de hormigón patrón o tradicional. En primer lugar, se consideró que las categorías en las que el proyecto tenía trascendencia, se seleccionó las categorías Materials and Design, y la categoría Creativity and Effort.

En análisis por lo dispuesto para cada ítem se registró para la categoría Materials and Design 19 de 24 puntos posibles en el caso de la utilización de una mezcla de hormigón patrón, mientras que para el caso de utilización de una mezcla de hormigón tradicional se obtuvo 14 de 24 puntos. En cuanto al análisis para la categoría de Creativity and Effort se registraron 10 puntos de 15 posibles, para la mezcla de hormigón alternativo, mientras que para la muestra tradicional se obtuvo 5 de 15 posibles.

Finalmente se puede considerar que el uso de una mezcla de hormigón con caucho incorporado aporta 29 puntos de los 40 requeridos para la obtención de una certificación Bronce, mientras que para la alternativa de una mezcla de hormigón patrón esta aporta 19 puntos de los 40 esperados. Esto puede apreciarse de manera detallada en la figura 66.

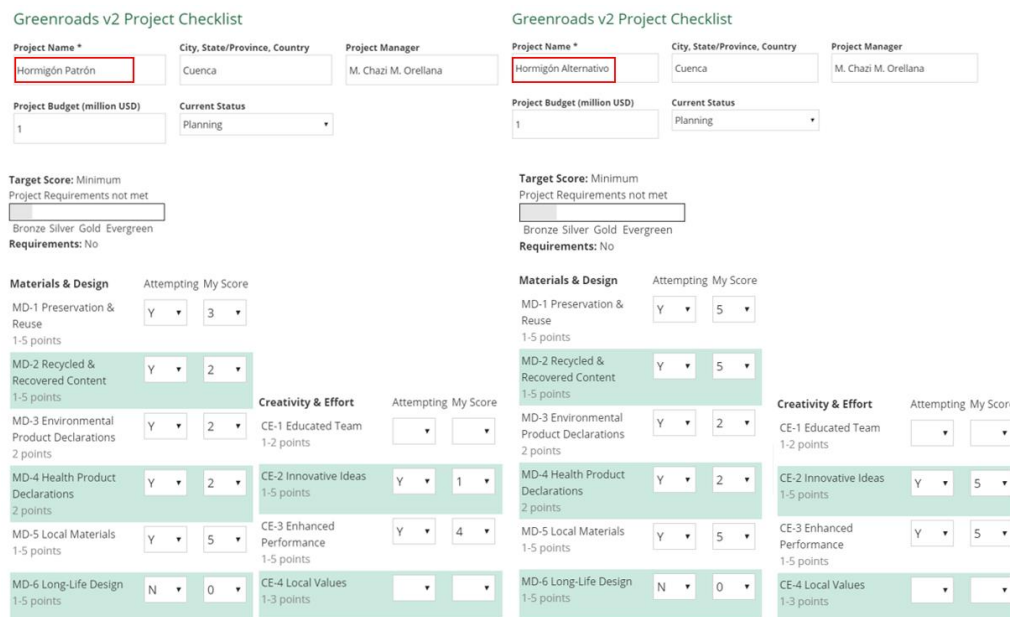


Figura 66. Checklist Greenroads V2

Como se observa en el análisis de sostenibilidad con el uso de herramientas calificadoras, la utilización de mezclas de hormigón en las que se incorpora materiales reciclados, presenta mejores resultados. Esto debido en parte a que está es una alternativa vinculada con un concepto de construcciones sostenibles, iniciativas que buscan alcanzar un desarrollo de la mano de una correcta gestión de residuos, es por ello que se premia la incorporación de materiales que han sido desechados o recuperados, todo esto con la finalidad de desarrollar estrategias que permitan una mejora en el impacto ambiental que genera la industria de la construcción, que en el último tiempo está cada vez más comprometida con alcanzar un desarrollo de la mano de la sostenibilidad ambiental.

4.8.3 Análisis PaLATE

Se utilizó esta herramienta debido a su capacidad como calculadora para entregar valores acerca del consumo de energía de una actividad, o un proceso, así como datos sobre emisiones en dióxido de carbono equivalente (CO₂e). Para realizar un análisis detallado de la sostenibilidad que implica la incorporación de paneles no estructurales, considerando diferentes mezclas de hormigón, se plantea el estudio por separado tanto de los paneles como separadores de espacios y además un estudio de la variación en la cantidad de hormigón, que supone la incorporación de un panel elaborado con una mezcla de hormigón que presenta una menor densidad y que se refleja en la reducción de la sección de elementos estructurales.

En este análisis intervienen factores propios de cada agregado como su densidad, o la dosificación de la mezcla, de igual manera influye la distancia entre el sitio de explotación de los áridos, hasta un lugar en el que se tiene previsto una fábrica dedicada a la elaboración de prefabricados. Para este caso, se consideró la cantera de Rokazul ubicada en el descanso, así como la planta de la compañía Unión Cementera Nacional, UCEM S.A. ubicada en Guapán, provincia del Cañar, mientras que se consideró la ubicación de la fábrica en el parque industrial de la ciudad de Cuenca.

4.8.3.1 Uso de hormigón tradicional

Se considera en primer lugar la mezcla de diseño tradicional, que se utilizará en elementos estructurales, es así que los valores considerados para este caso se observan en la tabla 43. De igual manera se tiene en cuenta las cantidades utilizadas únicamente para los paneles. En la figura 67, se presentan los datos ingresados en la herramienta, para esta metodología específica.

Cantidades, hormigón tradicional, elementos estructurales.							Cantidades, hormigón tradicional, paneles no estructurales.						
Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site			Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site		
		tons/CY	CY	tons	Distance (mi)	Mode			tons/CY	CY	tons	Distance (mi)	Mode
Rock	2.32	0	1	0	Truck	Rock	2.32	0	1	0	Truck		
Gravel	1.15	800	920	11	Truck	Gravel	1.15	261	300	11	Truck		
Sand	1.28	500	640	11	Truck	Sand	1.28	163	209	11	Truck		
Cement	2.52	246	620	19	Truck	Cement	2.52	80	202	19	Truck		
Concrete Additives	0.84	0	0	0	Truck	Concrete Additives	0.84	0	0	0	Truck		
Coal Fly Ash	2.20	0	0	0	Truck	Coal Fly Ash	2.20	0	0	0	Truck		
Coal Bottom Ash	2.00	0	0	0	Truck	Coal Bottom Ash	2.00	0	0	0	Truck		
Blast Furnace Slag	2.15	0	0	0	Truck	Blast Furnace Slag	2.15	0	0	0	Truck		
Foundry Sand	1.49	0	0	0	Truck	Foundry Sand	1.49	0	0	0	Truck		
Glass Cullet	1.93	0	0	0	Truck	Glass Cullet	1.93	0	0	0	Truck		
Water	0.84	340	285	0	Truck	Water	0.84	111	93	0	Truck		
Steel Reinforcing Bars	6.62	0	0	0	Truck	Steel Reinforcing Bars	6.62	0	0	0	Truck		
Total: PCC to site	1.95	2467	2467	0	Truck	Total: PCC to site	1.95	805	805	0	Truck		

Figura 67. Mezcla de diseño, hormigón tradicional.

En relación a la dosificación propuesta se obtuvo resultados del análisis medioambiental, los cuales se indican en la figura 68. En ella se observa principalmente el consumo de energía que conllevaría elaborar paneles de hormigón patrón, así como la emisión de gases, en este caso CO₂e, al realizar la misma actividad. Para el caso de elementos estructurales, se consume 3738.1 GJ de energía, así como se emiten 552591 kg de CO₂e, mientras que en el mismo análisis para los paneles se obtuvo los siguientes resultados 1206.9 GJ de energía y 179009 kg de CO₂e.

Elementos estructurales.				Paneles no estructurales.			
		Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP			Energy [GJ]	CO ₂ e [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	3,647.0	546,269	Initial Construction	Materials Production	1,185.4	177,529
	Materials Transportation	65.9	4,545		Materials Transportation	21.4	1,480
	Equipment	0.0	0		Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0	Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0		Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0		Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	3,647.0	546,269	Total	Materials Production	1,185.4	177,529
	Materials Transportation	65.9	4,545		Materials Transportation	21.4	1,480
	Equipment	0.0	0		Equipment	0.0	0
	Total	3,712.9	550,814		Total	1,206.9	179,009

Figura 68. Análisis medioambiental de la mezcla de hormigón tradicional.

4.8.3.2 Uso de hormigón alternativo

Se siguió la metodología descrita anteriormente, esta vez para el análisis del uso de paneles con mezcla de hormigón alternativo, como separadores de espacios, en la misma edificación. Para este análisis se consideró que, al incorporarse un material reciclado en la mezcla, la obtención de este producto está ya cubierto. Como se indica en la figura 69, se presentan los datos utilizados para la mezcla de diseño de hormigón alternativo.

Cantidades, hormigón alternativo, elementos estructurales.							Cantidades, hormigón alternativo, paneles no estructurales.						
Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site			Material	Density	PCC		Materials Transport To (or From) Site		
		tons/CY	CY	tons	One-Way Only				tons/CY	CY	tons	One-Way Only	
					Distance (mi)	Mode						Distance (mi)	Mode
Rock	2.32	0	1	0	Truck	Rock	2.32	0	1	0	Truck		
Gravel	1.15	716	823	11	Truck	Gravel	1.15	761	300	11	Truck		
Sand	1.28	447	579	11	Truck	Sand	1.28	114	146	11	Truck		
Cement	2.52	220	555	19	Truck	Cement	2.52	80	202	19	Truck		
Concrete Additives	0.84	0	0	0	Truck	Concrete Additives	0.84	0	0	0	Truck		
Coal Fly Ash	2.20	0	0	0	Truck	Coal Fly Ash	2.20	0	0	0	Truck		
Coal Bottom Ash	2.00	0	0	0	Truck	Coal Bottom Ash	2.00	0	0	0	Truck		
Blast Furnace Slag	2.15	0	0	0	Truck	Blast Furnace Slag	2.15	0	0	0	Truck		
Foundry Sand	1.49	0	0	0	Truck	Foundry Sand	1.49	0	0	0	Truck		
Glass Cullet	1.93	0	0	0	Truck	Glass Cullet	1.93	0	0	0	Truck		
Water	0.84	304	255			Water	0.84	111	93				
Steel Reinforcing Bars	6.62	0	0	0	Truck	Steel Reinforcing Bars	6.62	0	0	0	Truck		
Total PCC to site	1.95	0	2202			Total PCC to site	1.95	0	742				

Figura 69. Mezcla de diseño, hormigón alternativo

Los resultados del análisis medioambiental para esta mezcla de diseño alternativo se presentan en la figura 70, Para el caso en el que se considera únicamente los paneles, se indica un consumo de energía de 1195.2 GJ y una cantidad de emisión de 178200 kg CO_{2e}. Mientras que, en el caso de los elementos estructurales, si bien se usa una mezcla de hormigón tradicional, se puede observar una reducción en la cantidad de hormigón debido a elementos que presenta una menor densidad, lo que se refleja en menor cargas de servicio, en cuanto al análisis medioambiental, esta alternativa presentó un consumo de energía de 3320.5 GJ y una cantidad de 492600 kg CO_{2e}.

Elementos estructurales.				Paneles no estructurales.			
		Energy [GJ]	CO _{2e} [kg] = GWP			Energy [GJ]	CO _{2e} [kg] = GWP
Initial Construction	Materials Production	3,261.6	488,539	Initial Construction	Materials Production	1,175.3	176,829
	Materials Transportation	58.9	4,064		Materials Transportation	19.9	1,371
	Equipment	0.0	0		Equipment	0.0	0
Maintenance	Materials Production	0.0	0	Maintenance	Materials Production	0.0	0
	Materials Transportation	0.0	0		Materials Transportation	0.0	0
	Equipment	0.0	0		Equipment	0.0	0
Total	Materials Production	3,261.6	488,539	Total	Materials Production	1,175.3	176,829
	Materials Transportation	58.9	4,064		Materials Transportation	19.9	1,371
	Equipment	0.0	0		Equipment	0.0	0
Total		3,320.5	492,600	Total		1,195.2	178,200

Figura 70. Análisis Medioambiental de la mezcla de hormigón alternativo

A fin de analizar la sostenibilidad en toda la edificación, se sumará las cantidades de energía consumidas, así como la cantidad de emisiones de CO_{2e}. Estos valores se presentan de forma detallada en la tabla 47.

Tabla 47

Análisis Sostenibilidad Medioambiental, edificio

Tipo	Hormigón Tradicional		Hormigón Alternativo	
	Energía [GJ]	Consumo CO _{2e} [kg]	Energía [GJ]	Consumo CO _{2e} [kg]
Estructurales	3712.9	550814	3320.5	492600
Paneles	1206.9	179009	1195.2	178200
Total	4919.8	729823	4515.7	670800

Se observa una reducción en el consumo de energía de 404.1 GJ, de igual manera se presenta una disminución en la emisión CO_{2e} de 59023 kg, al considera utilizar una mezcla de hormigón alternativo. Con la ayuda de la herramienta calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero propuesta por (EPA, 2019), se relacionaron estos con valores cotidianos, tal como se puede observar en la figura 71.



Figura 71. Valores cotidianos de la reducción de CO₂e

Si bien estos valores indican una tendencia hacia la utilización de materiales reciclados como una clave para alcanzar la sostenibilidad ambiental en el sector de la construcción, se consideró plantear el escenario de la utilización de paneles en el proyecto de vivienda social antes mencionado.

4.8.4 Escenario de aplicación

Se consideró el uso de paneles de hormigón con caucho incorporado en viviendas sociales, de manera que permita comparara la variación en el consumo de energía, así como la emisión de CO₂e. Al igual que en el análisis del edificio se analizó en principio la reducción en la cantidad de hormigón utilizado en elementos estructurales, los datos se presentan en la figura 72.

Cantidad, hormigón tradicional elementos estructurales.					Cantidad, hormigón alternativo, elementos estructurales.					
	Material	Density	PCC			Material	Density	PCC		
	Unit	tons/CY	CY	tons		Unit	tons/CY	CY	tons	
PCC Pavements	Rock	2.32	0	1	PCC Pavements	Rock	2.32	0	1	
	Gravel	1.15	224063	257672		Gravel	1.15	200360	230414	
	Sand	1.28	140085	179309		Sand	1.28	125266	160340	
	Cement	2.52	68945	173742		Cement	2.52	61652	155363	
	Concrete Additives	0.84	0	0		Concrete Additives	0.84	0	0	
	Coal Fly Ash	2.20	0	0		Coal Fly Ash	2.20	0	0	
	Coal Bottom Ash	2.00	0	0		Coal Bottom Ash	2.00	0	0	
	Blast Furnace Slag	2.15	0	0		Blast Furnace Slag	2.15	0	0	
	Foundry Sand	1.49	0	0		Foundry Sand	1.49	0	0	
	Glass Cullet	1.93	0	0		Glass Cullet	1.93	0	0	
	Water	0.84	95145	79922		Water	0.84	85080	71467	
	Steel Reinforcing Bars	6.62	0	0		Steel Reinforcing Bars	6.62	0	0	
	Total: PCC to site	1.95		690646			Total: PCC to site	1.95		617585

Figura 72. Mezcla de diseño, viviendas sociales, elementos estructurales

El mismo proceso se siguió para el caso del uso de paneles no estructurales con las diferentes mezclas de hormigón, estos datos se presentan de forma detallada en la figura 73.

Cantidades, hormigón tradicional paneles no estructurales.					Cantidades, hormigón alternativo, paneles no estructurales.				
	Material	Density	PCC			Material	Density	PCC	
	Unit	tons/CY	CY	tons		Unit	tons/CY	CY	tons
PCC Pavements	Rock	2.32	0	1	PCC Pavements	Rock	2.32	0	1
	Gravel	1.15	27913	32099		Gravel	1.15	27913	32099
	Sand	1.28	17451	22337		Sand	1.28	12202	15619
	Cement	2.52	8589	21644		Cement	2.52	8589	21644
	Concrete Additives	0.84	0	0		Concrete Additives	0.84	0	0
	Coal Fly Ash	2.20	0	0		Coal Fly Ash	2.20	0	0
	Coal Bottom Ash	2.00	0	0		Coal Bottom Ash	2.00	0	0
	Blast Furnace Slag	2.15	0	0		Blast Furnace Slag	2.15	0	0
	Foundry Sand	1.49	0	0		Foundry Sand	1.49	0	0
	Glass Cullet	1.93	0	0		Glass Cullet	1.93	0	0
	Water	0.84	11853	9956		Water	0.84	11853	9956
	Steel Reinforcing Bars	6.62	0	0		Steel Reinforcing Bars	6.62	0	0
	Total: PCC to site	1.95		86038		Total: PCC to site	1.95		79319

Figura 73. Mezcla de diseño, viviendas sociales, paneles no estructurales

Al comparar el consumo de energía y las emisiones de CO₂e, entre las dos mezclas de hormigón se consideró tanto los elementos estructurales como los paneles, a fin de obtener un análisis más realista. En la tabla 48, se presentan los valores obtenidos para la aplicación a 1400 viviendas sociales.

Tabla 48

Análisis Sostenibilidad Medioambiental, viviendas sociales

Tipo	Hormigón Tradicional		Hormigón Alternativo	
	Energía [GJ]	Consumo CO ₂ e [kg]	Energía [GJ]	Consumo CO ₂ e [kg]
Estructurales	1039708.7	154245897	929721.3	137928724
Paneles	129521	19215059	128269.5	19128385
Total	1169229.7	173460956	1057990.8	157057109

Se aprecia una considerable reducción en cuanto a consumo de energía de 111238.9 GJ y en cuanto a la emisión de CO₂e, también se observa una reducción significativa de 16403847 kg. De igual manera con el uso de la calculadora de equivalencias de gases de efecto invernadero propuesta por (EPA, 2019), se relacionaron con valores cotidianos. A continuación, en la figura 73 se deja ver valores equivalentes para la cantidad de emisiones de CO₂e, reducidas al incorporar paneles de hormigón con caucho incorporado.

Emisiones de gases de efecto invernadero



Emisiones de CO₂ de



Emisiones de gases de efecto invernadero evitadas por



Figura 74. Valores cotidianos de la reducción de CO₂e, escenario aplicación



5. CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis realizado para conocer el comportamiento de paneles prefabricados no estructurales de hormigón con inclusión de caucho reciclado de neumáticos fuera de uso se puede concluir que esta alternativa es significativamente sostenible y adecuada para su utilización en la industria de la construcción.

Previo al diseño de las diferentes mezclas de hormigón, se realizó la caracterización de los agregados, conforme los rangos establecidos en las normas ASTM e INEN como un proceso de control de calidad. Debido a las características de los áridos se realizó una corrección granulométrica a fin de que cumplan con los requerimientos establecidos, sin embargo, los resultados del estudio de los áridos indican que son aptos para su incorporación en mezclas de hormigón.

El comportamiento de las mezclas de diseño fue analizado en base al estudio de las propiedades mecánicas del hormigón endurecido. Se observó una reducción de la resistencia a la compresión en las mezclas de hormigón alternativo del 30.42%, mientras que, en la resistencia a la tracción indirecta, se redujo en 8.37% en la medida que aumentó la cantidad de material reciclado incorporado en la mezcla de hormigón, esto es atribuido principalmente a la pérdida de adherencia entre la pasta cementante y los agregados al incorporarse caucho en la mezcla. La pérdida de homogeneidad de la matriz del hormigón acelera el proceso de formación de fallas, lo que influye en la capacidad para soportar condiciones de carga.

Respecto al ensayo en el que se analizó el módulo de elasticidad del hormigón ante condiciones de cargas cíclicas, se observa que en los especímenes en los que se incorporó caucho, una vez que se alcanzó el máximo esfuerzo, los mismos continuaron soportando carga, pese a la formación de fisuras. El comportamiento elástico del hormigón alternativo se evidenció también en la metodología de fallas de los especímenes con diferente mezcla de hormigón, para el caso del hormigón patrón se presentaron fallas en zonas específicas en las que se evidenció desprendimiento de pedazos del cilindro, mientras que en especímenes con hormigón alternativo donde las fallas fueron más suaves y distribuidas a lo largo del cilindro.

Al momento de analizar la densidad del hormigón endurecido, se observó que en especímenes elaborados con una mezcla de hormigón alternativo este parámetro disminuyó un 6.19%, en relación con la densidad de un hormigón de mezcla patrón. La disminución de la densidad del hormigón con incorporación de caucho es porque gran parte de las partículas de caucho que se incorporaron en reemplazo de las partículas de arena, presentan una menor densidad, de igual forma debido a la naturaleza del caucho y como se constató se pierde la adherencia lo que genera un aumento en el volumen de vacíos y porosidad en la matriz del hormigón.

Se consideró la resistencia como el principal parámetro para definir la dosificación de la mezcla de hormigón alternativo, seleccionando aquella que alcanzó los 210 kg/cm², con un 30% de caucho incorporado. Los paneles de la mezcla de diseño tanto del hormigón patrón como del hormigón alternativo, ensayados bajo cargas compresivas como transversales fueron sometidos a criterios de aceptación obteniendo una clasificación 3C y 2C respectivamente, lo que indican que son aptos para utilizarse como elementos constructivos, específicamente como elementos



de mampostería o separadores de espacios.

En cuanto al comportamiento que presentaron los paneles bajo cargas cíclicas, se observa que aquellos diseñados con una mezcla de hormigón patrón soportaron mayores cargas a la rotura o falla que los paneles elaborados con una mezcla de hormigón alternativo, sin embargo, estos últimos demostraron tener una mayor resiliencia, es decir una mayor capacidad para disipar energía, esta conducta es evidente en deformaciones residuales muchas menores, pese a que se observaron mayores deformaciones totales, por lo que estos paneles tiene una mejor respuesta a procesos de carga y descarga o fatiga, por lo que este tipo de elementos se comportaran de manera adecuada ante efectos de cargas sísmicas.

El análisis de costos que se realizó haciendo referencia a la construcción de un edificio de 5 pisos, concluyó en la reducción de aproximadamente 14 mil dólares en costo de materiales (hormigón y acero), además se evidencio que las secciones de elementos como vigas, columnas y zapatas se redujeron, de igual manera los espesores de las losas y paredes, esto debido a la disminución de la carga muerta, relacionado con el uso de materiales menos densos, como el caso de los paneles de hormigón alternativo. De igual forma se evidencia una considerable reducción de costos en rubros relacionados a la mano de obra, debido principalmente a una reducción en los tiempos de construcción.

Además, se planteó un escenario de aplicación, en el que se consideró una alternativa de uso en relación de las viviendas sociales realizadas en Ecuador en el año 2018. Se observa que en el supuesto de utilizar la alternativa de hormigón con incorporación de caucho se pudo haber ahorrado alrededor de 4 millones de dólares, siendo una cantidad considerable que permitiría el desarrollo en otras áreas de interés. De la misma manera que el tiempo de construcción hubiese sido mucho menor, lo que implica otro rubro en el que se reflejaría una reducción en costos. Por lo que se puede concluir que este hormigón es una opción innovadora y al mismo tiempo económica en términos de construcción.

De acuerdo al análisis realizado en el tema medio ambiental con el uso de diferentes herramientas se obtuvo un resultado cualitativo y cuantitativo respectivamente. Para el análisis cualitativo realizado en las herramientas LEED y GREENROADS se pudo obtener resultados favorables en el tema de innovación ya que esta propuesta de paneles prefabricados con incorporación de caucho es una idea nueva en la construcción de diferentes tipos de obras, como división de espacios, pisos, paredes entre otros. En el análisis cuantitativo realizado en la herramienta PALATE se obtuvo resultados prometedores para la utilización de caucho en el hormigón ya que este material reciclable en la mezcla hace que las emisiones de CO_{2e} sean mucho menores al igual que la cantidad de energía que se utiliza en la construcción de los paneles, haciendo relación con las construcciones que realizo el estado de 1400 casas se obtuvo que si se hubiera utilizado esta alternativa de hormigón se disminuyen una cantidad de emisiones de CO_{2e}, que equivalen a retirar del parque automotor 3483 vehículos durante un año, o disminuir 1845825 galones de gasolina consumidas, mostrando que el uso de una mezcla de hormigón alternativo con caucho incorporado es una alternativa significativamente sostenible desde el punto de vista medioambiental, de la salud pública, así como que brinde una alternativa que permita alcanzar el desarrollo en las construcciones sostenibles.



Referencias

- Acevedo, H., Vásquez, A., & Ramírez, D. (2012). Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. *Gestión y Ambiente*, 105-117.
- ACI 211. (2011). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal Heavy Weight and Mass Concrete.
- ACI 347. (2004). Guía de Encofrado para Hormigón.
- Agencia EFE. (22 de 9 de 2019). <https://www.efe.com/efe/espana/1>. Obtenido de <https://www.efe.com/efe/espana/sociedad/las-microparticulas-de-plastico-son-el-30-sopas-basura-en-los-mares/10004-3186612>
- APA, T. E. (2002). Encofrado de Hormigón.
- Apuntes Ingeniería civil. (2 de 8 de 2019). Apuntes ingeniería. Obtenido de <https://apuntesingenierocivil.blogspot.com/2011/03/curva-granulometrica.html>
- ASTM C143. (2006). Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete.
- ASTM C33. (2003). Standard Specification for Concrete Aggregates.
- ASTM C469. (2014). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression.
- ASTM C496. (2006). Determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos de hormigón.
- ASTM C642. (2006). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.
- ASTM E72. (2017). Standard Test Methods of Conducting Strength Test of panels for Building Construction.
- Carrillo, J., & González, G. (2017). Modelación Inelástica de pórticos de concreto con mampostería no reforzada. *ISSN*, 229-239.
- EPA. (2 de Octubre de 2019). Energy and the Environment . Obtenido de <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator>
- Estrada, J. C. (2016). Estudio de propiedades físico mecánicas y de durabilidad de hormigón con caucho.
- Feranda, A., & Cecche, R. (2005). Effects of spheroid and fiber like waste-tire rubbers on interrelation of strength to porosity in rubberized cement and mortars. *Construction and Building Materials*.
- Flores, N., Flores, D., & Hernández-Olivares, F. (2016). Influence of fibers partially coated with rubber from tire recycling as aggregate on the acoustical properties or rubberized concrete. *Construction and Building Materials*.
- Greenroads. (2019). Rating System V2.
- Holmes, N., Browne, A., & Montague, C. (2014). Acoustic properties of concrete panels with crumb rubber as a fine aggregate replacement. *Construction and Building Materials*, 195-204.
- INEC. (2015). Base de Datos Censos.
- INTEMAC. (1999). Prefabricación de edificios y naves industriales.
- Kosmatka, S. (2004). Diseño y control de mezclas de concreto.
- Lleida, I. T. (23 de Julio de 2019). Construmatica. Obtenido de [https://www.construmatica.com/construpedia/AP-_017._Resistencia_a_Tracci%C3%B3n_Indirecta_\(Ensayo_Brasile%C3%B1o\)._Hormig%C3%B3n_Endurecido](https://www.construmatica.com/construpedia/AP-_017._Resistencia_a_Tracci%C3%B3n_Indirecta_(Ensayo_Brasile%C3%B1o)._Hormig%C3%B3n_Endurecido)
- Ministerio del Ambiente . (22 de Septiembre de 2019). Ministerio del Ambiente. Obtenido de <http://www.ambiente.gob.ec/1-500-000-unidades-de-neumaticos-fuera-de-uso-se-recuperaron-en-ecuador-en-dos-anos/>



- Mora, D. (2017). Retracción de Hormigón y Curado.
- National Concrete Masonry Association. (29 de Septiembre de 2019). Structural Testing of Concrete Masonry Assemblages. Obtenido de <https://ncma.org/resource/structural-testing-of-concrete-masonry-assemblages/>
- NEC-SE-HM. (2014). Norma Ecuatoriana de la Construcción: Estructuras de Hormigón Armado.
- Niño Hernandez, J. (2010). Tecnología del Concreto. Asocreto.
- NTE INEN 0696. (2011). Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.
- NTE INEN 0698. (2010). Determinación del contenido de terrones de arcillas y partículas desmenuzables.
- NTE INEN 0856. (2010). Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino.
- NTE INEN 0857. (2010). Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.
- NTE INEN 0858. (2010). Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico) y el porcentaje de vacíos.
- NTE INEN 0860. (2011). Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles.
- NTE INEN 0861. (2011). Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas mayores a 19 mm mediante el uso de la máquina de los Ángeles.
- NTE INEN 0864. (1982). Árido fino para hormigón. Determinación del porcentaje de partículas en suspensión.
- NTE INEN 0872. (2011). Árido para hormigón. Requisitos.
- NTE INEN 1573. (2010). Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.
- NTE INEN 1576. (2011). Hormigón de cemento hidráulico. Elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo.
- NTE INEN 1578. (2010). Hormigón de cemento hidráulico. Determinación del asentamiento.
- Pastrana, A. J. (2017). Monografias.com. Obtenido de <https://www.monografias.com/trabajos93/modulo-contabilidad-costos/modulo-contabilidad-costos.shtml>
- Radio Pública. (2 de Octubre de 2019). Pública Fm. Obtenido de <https://www.publicafm.ec/noticias/actualidad/1/presidente-ecuador-viviendas-sociales>
- Rashad, A. (2015). A comprehensive overview about recycling rubber as fine aggregate replacement in tradition cementitious materials. *International Journal of Sustainable Built Environment*.
- Rochel, R. (2002). Influencia de los muros de mampostería en el comportamiento de las estructuras aporticadas. *Universidad EAFIT*, 71-79.
- Rodriguez, F., & Fernández, F. (2017). *Ingeniería Sostenible: Nuevos objetivos en los proyectos de construcción*. VirtualPro.
- Rodríguez, J. (2017). ¿Hacia dónde van las tendencias en ingeniería? *Inventum*, 8.
- Sánchez, J. F. (2010). Paneles Prefabricados de Hormigón en Fachadas.
- Sánchez, N. (18 de Mayo de 2019). Civilgeeks. Obtenido de <https://civilgeeks.com/2013/11/27/comportamiento-y-caracteristicas-del-hormigon-concreto/>
- Serrano, A. (2017). *Construcción sostenible: nuevos objetivos para la ingeniería civil*.
- Sukontasukkul, P. (2009). Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel. *Construction and Building Materials*, 1084-1092.
- Tecnología del Hormigón Armado. (2019). Obtenido de <http://tecnologiadelhormigonarmado.blogspot.com/p/caracteristicasmecanicas-la-principal.html>

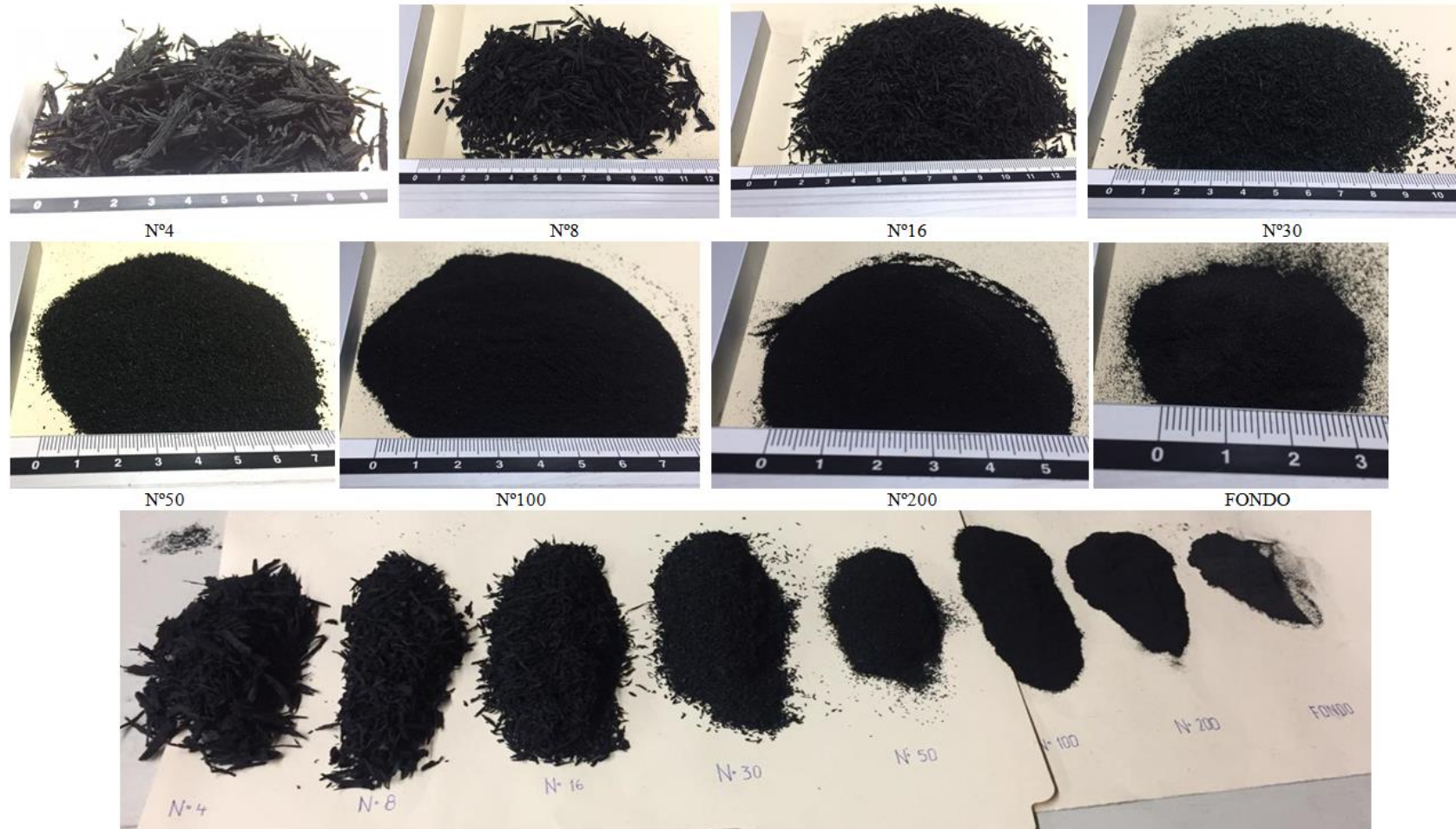


Universidad de Cuenca

- Topcu, B., & Ugurlo, A. (2007). Elasticity theory of concrete and prediction fo Static E-modulus for dam Concrete using composite models.
- U.S. Green Building Council. (9 de Septiembre de 2019). LEED. Obtenido de <https://new.usgbc.org/>
- University of California, Berkeley. (16 de Septiembre de 2019). Consortium on Green Design and Manufacturing. Obtenido de <http://faculty.ce.berkeley.edu/horvath/palate.html>
- Valera, F. (2017). Monografias.com. Obtenido de <https://www.monografias.com/trabajos75/analisis-precios-unitarios/analisis-precios-unitarios.shtml#Comentarios>



Universidad de Cuenca
Anexos



Se aprecia la variación del tamaño de las diferentes fibras de caucho incorporadas en las mezclas de diseño. En la parte superior de izquierda a derecha se aprecia las fibras retenidas en los tamices N°4, N°8, N°16 y N°30. En la parte media se aprecia el material retenido en las mallas N°50 N°100, N°200 y fondo. En la parte inferior se aprecia una comparativa de los diferentes tamaños de caucho, esta imagen no refleja la cantidad de material retenido en cada tamiz.



ENSAYOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN Y TRACCIÓN INDIRECTA

ENSAYO RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN															ENSAYO RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA					
MUESTRA DE HORMIGÓN SIMPLE	Edad	3 días		7 días				14 días				28 días				Edad	28 días			
	Identificación	#8		#4		#9		#7		#6		#2		#5		Identificación	#3		#1	
	Parámetros	Datos	Prom	Dato	Prom	Datos	Prom.	Datos	Prom	Datos	Prom	Datos	Prom	Datos	Prom	Parámetros	Datos	Prom	Datos	Prom
	Diámetro superior [cm]	10.13			10.1		10.13		10.05		10.12		10.13		10.16	Diámetro superior [cm]	10.8	10.59	10.49	10.6
		10.17	10.16	10.14	10.11	10.14	10.14	10.06	10.06	10.14	10.13	10.12	10.13	10.17	10.16		10.42		10.66	
		10.18		10.1		10.15		10.06		10.14		10.13		10.15			10.63		10.78	
	Diámetro inferior [cm]	10.15			10.12		10.15		10.07		10.15		10.14		10.15	Diámetro inferior [cm]	10.71	20	10.64	19.83
		10.18	10.15	10.13	10.12	10.16	10.16	10.07	10.07	10.14	10.14	10.13	10.14	10.16	10.15		10.47		10.61	
		10.13		10.12		10.17		10.06		10.13		10.14		10.15			10.51		10.42	
	Altura [cm]	20.1			19.9		19.9		20.1		20		20		20.1	Altura [cm]	20	20	19.9	19.83
20.1		20.13	19.9	19.88	20	19.93	20	20.07	20	20.03	20.1	20.07	20.1	20.07	20.1		20.07		19.7	
20.2			19.85		19.9		20.1		20.1		20.1		20		20		19.8			
Relación L/D	1.981299213		1.96636993		1.965483235		1.995029821		1.977295163		1.98124383		1.975393701		Relación L/D	1.888574127		1.870754717		
Área [cm ²]	81.073		80.277		80.754		79.485		80.595		80.595		81.073		Área [cm ²]	88.081		88.247		
Peso [g]	3701.8		3684.8		3711.1		3679.1		3723.2		3749.9		3742.6		Peso [g]	4054.2		4037.8		
Fuerza [kgf]	13914		17522		19490		22537		22739		25528		24572		Fuerza [kgf]	7320.7		9787.4		
Resistencia [kg/cm ²]	172		218		241		284		282		317		303		Tracción indirecta [kg/cm ²]	22		29.64		
Corrección	0.999		0.997		0.997		1		0.998		0.998		0.998		Tracción indirecta prom	25.82				
Resistencia corregida [kg/cm ²]	171		217		240		284		281		316		302		Tracción axial (kg/cm ²)	23.24				
Resistencia promedio [kg/cm ²]	8.36		228.5		282.5		282.5		309		309		309		Porcentaje Tr indirecta	9.2				
															Porcentaje Tr axial	7.52				





MUESTRA DE 5% DE VOLUMEN	ENSAYO RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN														ENSAYO RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA					
	Edad	7 días				14 días				28 días						Edad	28 días			
	Identificación	#9		#7		#3		#8		#2		#4		#1		Identificación	#6		#10	
	Parámetros	Datos	Prom	Dato	Prom	Datos	Prom.	Datos	Prom	Datos	Prom	Datos	Prom	Datos	Prom	Parámetros	Datos	Prom	Datos	ProM
	Diámetro superior [cm]	10.12		10.14		10.12		10.13		10.12		10.15		10.15		Diámetro superior [cm]	10.78	10.66	10.83	10.62
	10.1	10.11	10.12	10.13	10.14	10.13	10.15	10.13	10.14	10.13	10.14	10.14	10.14	10.14	10.57		10.14			
	10.12		10.13		10.13		10.12		10.12		10.12		10.14		10.6		10.74			
Diámetro inferior [cm]	10.12		10.1		10.17		10.13		10.1		10.09		10.13		Diámetro inferior [cm]	10.66	19.85	10.33	20.15	
	10.13	10.13	10.1	10.11	10.17	10.18	10.17	10.14	10.13	10.12	10.12	10.1	10.14	10.14		10.71		10.85		
	10.13		10.12		10.21		10.13		10.12		10.1		10.14			10.64		10.81		
Altura [cm]	20.2		20		20.3		20.2		20		20		20		Altura [cm]	19.8	19.85	20.2	20.15	
	20.1	20.13	20	20	20.2	20.23	20.2	20.17	20.1	20.1	20	20	20	20		19.8		20.1		
	20.1		20		20.2		20.1		20.2		20		20.1			19.9		20.2		
Relación L/D	1.991097923		1.974333662		1.9970385		1.991115499		1.984205331		1.972386588		1.975345168		Relación L/D	1.862101313		1.897363465		
Área [cm ²]	80.277		80.595		80.595		80.595		80.595		80.754		80.754		Área [cm ²]	89.249		88.581		
Peso [g]	3689.3		3674.7		3711.8		3703		3677.2		3653.2		3663.2		Peso [g]	4017.1		4040.9		
Fuerza [kgf]	16485.9		15774.9		18477		18576.5		21054.6		21790.9		22765.1		Fuerza [kgf]	7390.2		9222.8		
Resistencia [kg/cm ²]	205		196		229		230		261		270		282		Tracción indirecta [kg/cm ²]	22.23		27.44		
Corrección	0.999		0.998		1		0.999		0.999		0.998		0.998		Tracción indirecta prom	24.835				
Resistencia corregida [kg/cm ²]	204		195		229		229		260		269		281		Tracción axial (kg/cm ²)	22.35				
Resistencia promedio [kg/cm ²]	199.5				229				270						Porcentaje Tr indirecta	9.2				
															Porcentaje Tr axial	8.28				





ENSAYO RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN														ENSAYO RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA						
MUESTRA DE 22% VOLUMEN	Edad	3 días		7 días				14 días				28 días				Edad	28 días			
	Identificación	# 3		#2		#4		#1		#6		#5		#7		Identificación	#8		#9	
	Parámetros	Datos	Prom.	Datos	Prom.	Datos	Prom.	Datos	Prom.	Datos	Prom.	Datos	Prom.	Datos	Prom.	Parámetros	Datos	Promedio	Datos	Promedio
	Diámetro superior [cm]	10.09		10.14		10.12		10.12		10.12		10.12		10.15		Diámetro superior [cm]	10.47	10.7	10.51	10.71
		10.12	10.1	10.15	10.15	10.13	10.13	10.12	10.117	10.12	10.12	10.14	10.13	10.13	10.14		10.76		10.84	
		10.1		10.15		10.13		10.11		10.13		10.14		10.13			10.8		10.87	
	Diámetro inferior [cm]	10.14		10.16		10.13		10.12		10.13		10.15		10.15		Diámetro inferior [cm]	10.63	19.8	10.8	20.08
		10.13	10.12	10.16	10.16	10.13	10.13	10.11	10.12	10.12	10.13	10.15	10.15	10.14	10.14		10.67		10.43	
		10.1		10.15		10.12		10.13		10.13		10.16		10.13			10.84		10.82	
	Altura [cm]	20		20.2		20.1		20		20.4		20		20.1		Altura [cm]	19.7	19.8	20.1	20.08
20.1		20.07	20.2	20.23	20.1	20.1	20.1	20.07	20.3	20.33	20	20	20.2	20.13	19.8		20.2			
20.1			20.3		20.1		20.1		20.3		20		20.1		19.8		20.1			
Relación L/D	1.987128713		1.993103448		1.984205331		1.983789661		2.008893281		1.974333662		1.985207101		Relación L/D	1.85046729		1.874883287		
Área [cm2]	80.118		80.914		80.595		80.388		80.436		80.595		80.754		Área [cm2]	89.92		90.088		
Peso [g]	3631.8		3683.6		3632		3636.4		3723.2		3563.6		3654.9		Peso [g]	3949.3		3966.4		
Fuerza [kgf]	7163.1		14514.9		13947.5		17415.2		17319		19357.7		19699.6		Fuerza [kgf]	8369.5		9222.8		
Resistencia [kg/cm2]	89		179		173		217		215		240		244		Tracción indirecta [kg/cm2]	25.15		27.3		
Corrección	0.999		0.999		0.999		0.999		1.001		0.998		0.999		Tracción indirecta prom	26.225				
Resistencia corregida [kg/cm2]	88		178		172		216		215		239		243		Tracción axial (kg/cm2)	23.6				
Resistencia promedio [kg/cm2]	88		175				215.5				241				Resist. Compresión 28[kg/cm2]	241				
																Porcentaje Tr indirecta	10.88			





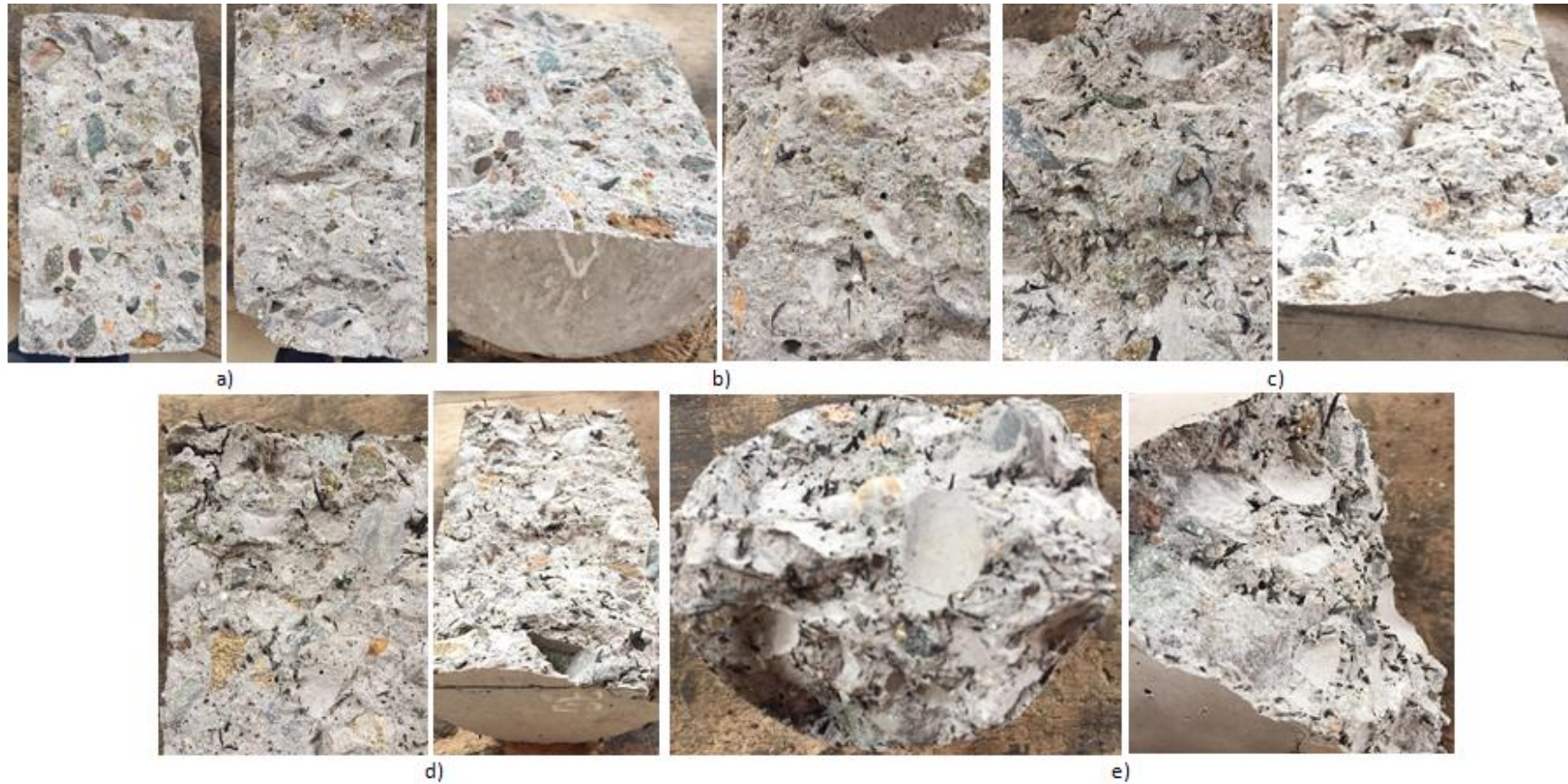
MUESTRA DE 30% VOLUMEN	ENSAYO RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN														ENSAYO RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA					
	Edad	7 días				14 días				28 días						Edad	28 días			
	Identificación	#6		#2		#7		#3		#4		#5		#8		Identificación	#9		#10	
	Parámetros	Datos	Prom	Dato	Prom	Datos	Prom.	Datos	Prom	Datos	Prom	Datos	Prom	Datos	Prom	Parámetros	Datos	Prom	Datos	ProM
Diámetro superior [cm]	10.18		10.16		10.12		10.11		10.11		10.14		10.16		10.63	10.8	10.53	10.82	10.67	
	10.15	10.16	10.14	10.15	10.16	10.14	10.13	10.12	10.1	10.1	10.12	10.13	10.13	10.14						
	10.15		10.15		10.15		10.13		10.1		10.14		10.13							
Diámetro inferior [cm]	10.14		10.11		10.11		10.13		10.17		10.14		10.15		10.63	10.7	10.66	10.53	19.75	
	10.14	10.14	10.14	10.13	10.14	10.11	10.11	10.13	10.14	10.16	10.14	10.14	10.13	10.14						
	10.13		10.14		10.09		10.16		10.16		10.14		10.15							
Altura [cm]	20		20		20.1		20		20		20.1		20		19.95	19.6	19.7	19.6	19.75	
	20	20	19.9	20	20.1	20.07	20.1	20.07	20	20.03	20	20.1	20	20						
	20		20.1		20		20.1		20.1		20.2		20							
Relación L/D	1.968503937		1.97044335		1.979289941		1.983201581		1.983168317		1.984205331		1.972386588		Relación L/D	1.876763876		1.850984067		
Área [cm ²]	81.073		80.914		80.754		80.436		80.118		80.595		80.754		Área [cm ²]	88.748		89.417		
Peso [g]	3662.8		3646.3		3590.7		3592.2		3618.5		3578.4		3656.1		Peso [g]	3963.1		3771.2		
Fuerza [kgf]	11679.3		12395.2		15048		15668.7		16852.7		17948.9		17344.2		Fuerza [kgf]	7780		7930		
Resistencia [kg/cm ²]	144		153		186		195		210		223		215		Tracción indirecta [kg/cm ²]	23.36		23.96		
Corrección	0.997		0.998		0.998		0.999		0.999		0.999		0.998		Tracción indirecta prom	23.66				
Resistencia corregida [kg/cm ²]	143		152		185		194		209		222		214		Tracción axial (kg/cm ²)	21.29				
Resistencia promedio [kg/cm ²]	147.5				189.5				215						Porcentaje Tr indirecta	11				
															Porcentaje Tr axial	9.9				



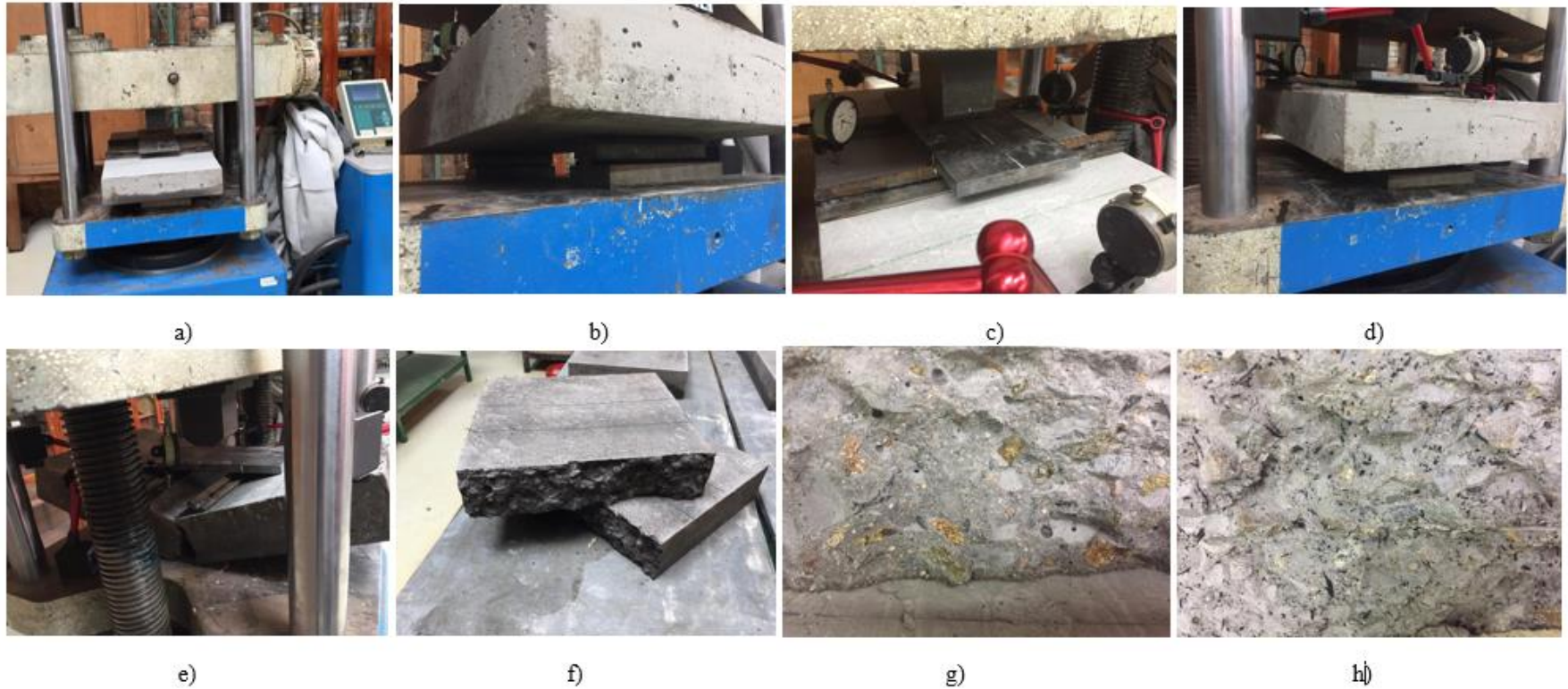


MUESTRA DE 40% VOLUMEN	ENSAYO RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN													ENSAYO RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA						
	Edad	7 días				14 días				28 días					Edad	28 días				
	Identificación	#3		#4		#6		#8		#5		#2		#7	Identificación	#1		#9		
	Parámetros	Datos	Prom	Dato	Prom	Datos	Prom.	Datos	Prom	Datos	Prom	Datos	Prom	Datos	Prom	Parámetros	Datos	Prom	Datos	ProM
Diámetro superior [cm]	10.14		10.11		10.14		10.14		10.12		10.14		10.12	10.13	Diámetro superior [cm]	10.11	10.12	10.65	10.63	
	10.13	10.14	10.16	10.13	10.12	10.13	10.13	10.13	10.14	10.13	10.14	10.13	10.14			10.14		10.10		10.5
	10.16		10.11		10.14		10.12		10.14		10.11		10.12					10.12		10.78
Diámetro inferior [cm]	10.11		10.1		10.14		10.14		10.13		10.13		10.14	10.14	Diámetro inferior [cm]	10.12	10.12	10.65	10.63	
	10.09	10.11	10.16	10.13	10.11	10.14	10.17	10.16	10.15	10.14	10.14	10.14	10.15			10.12		10.5		
	10.13		10.13		10.16		10.17		10.14		10.14		10.12					10.13		10.72
Altura [cm]	20		20		19.9		20		20.1		20		20	20.07	Altura [cm]	19.9	19.93	19.8	19.88	
	19.9	19.93	20.1	20.07	19.9	19.93	19.9	19.93	20	20.03	20.1	20.03	20.1			20.1		19.8		
	19.9		20.1		20		19.9		20		20		20.1					19.9		19.9
Relación L/D	1.965483235		1.98124383		1.967423495		1.967423495		1.977295163		1.977295163		1.98124383		Relación L/D	1.969367589		1.870178739		
Área [cm ²]	80.754		80.595		80.595		80.595		80.595		80.595		80.595		Área [cm ²]	80.436		88.748		
Peso [g]	3528		3553.4		3551.8		3557.6		3558.1		3563.2		3553.2		Peso [g]	3565		4265.3		
Fuerza [kgf]	9543.5		8922		10839.1		11507.5		12854.4		12282.9		11927.5		Fuerza [kgf]	5702.5		5865.3		
Resistencia [kg/cm ²]	118		111		134		143		159		152		148		Tracción indirecta [kg/cm ²]	18		17.67		
Corrección	0.997		0.998		0.997		0.997		0.998		0.998		0.998		Tracción indirecta prom	17.835				
Resistencia corregida [kg/cm ²]	117		110		133		142		158		151		147		Tracción axial (kg/cm ²)	16.05				
Resistencia promedio [kg/cm ²]	113.5				137.5				152					Porcentaje Tr indirecta	11.29					
														Porcentaje Tr axial	10.16					





La imagen a) corresponde a un cilindro de la mezcla de hormigón patrón, en el que se observa escasa presencia de poros o vacíos en el espécimen, en la imagen b) se aprecia un aumento, aunque no significativo de vacíos en la masa de hormigón, esto dado que trata de un espécimen en el que se incorporó 5% de caucho. Se observa el aumento de la porosidad a medida que aumenta la cantidad de caucho incorporado en la mezcla, la imagen c) corresponde a una incorporación del 22%, la imagen d) al 30% y la imagen e) es la de un espécimen en el que se incorporó 40% de caucho en reemplazo de volumen de árido fino.



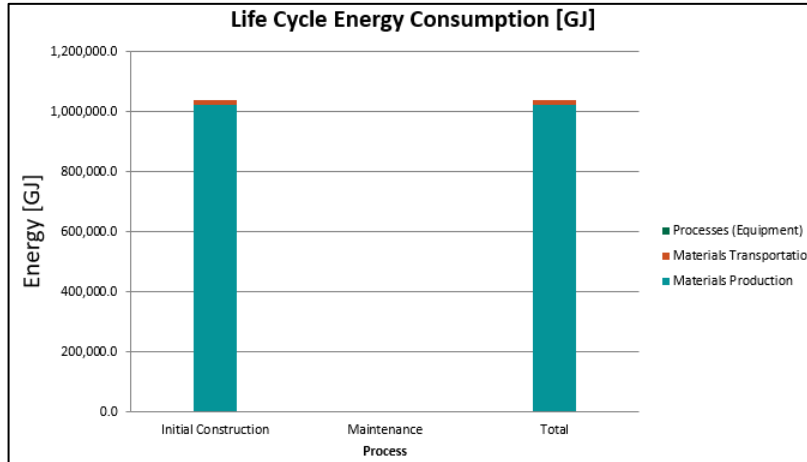
La imagen a) corresponde a un panel colocado sobre la prensa en la disposición antes mencionada para su aplicación de carga. En la imagen b) se indican los rodillos utilizados que ejercían como apoyos de los paneles, los mismos se colocaron a 15 cm del borde. La imagen c) y la imagen d) presentan un panel previo a ser ensayado, y recibiendo carga respectivamente, sobre el cual se colocaron los deformímetros con la finalidad de medir la deflexión del panel a medida que se aplicaba las cargas cíclicas. En la imagen e) se puede apreciar un panel que ha fallado, partiéndose a lo largo de su sección media, como se espera bajo una condición de ensayo a flexión, esto es más visible en la imagen f). En la imagen g) se observa la cara de un panel que ha fallado, perteneciente a una mezcla de hormigón patrón. Por el contrario, en la imagen h) se observa un panel perteneciente a la mezcla de hormigón alternativo, es evidente la presencia de caucho en este último.



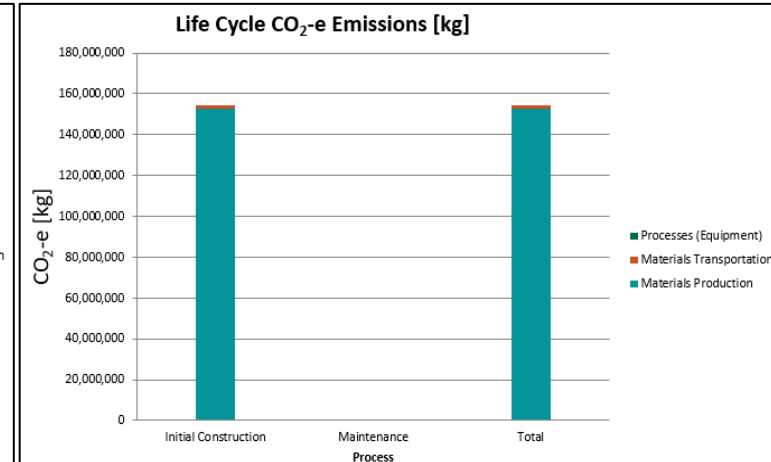
En la imagen a) se muestra como fueron colocados los deformímetros para obtener deformaciones frontales y conocer la deformación que se produce en la prensa al ejercer la carga. En la imagen b) se muestra como se colocaron los deformímetros para obtener la deformación de compresión en las caras laterales del panel. En el literal c) se muestra lo mencionado en el literal b) y la pantalla donde se muestra la carga a la que se realiza cada ciclo. En la imagen d) se muestra como la carga establecida en el último ciclo del hormigón patrón produce una falla en la esquina del panel. En la imagen e) se muestra como quedo el panel luego del ensayo a compresión del hormigón patrón. En las imágenes f) y g) se indica cómo se pandeo el hormigón luego del ensayo, es decir de qué manera se bombeo el mismo luego de realizar los ciclos de carga y descarga.



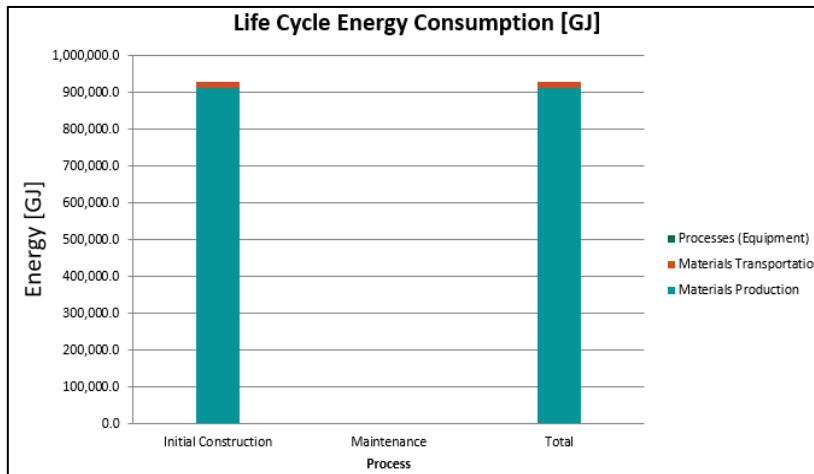
Universidad de Cuenca



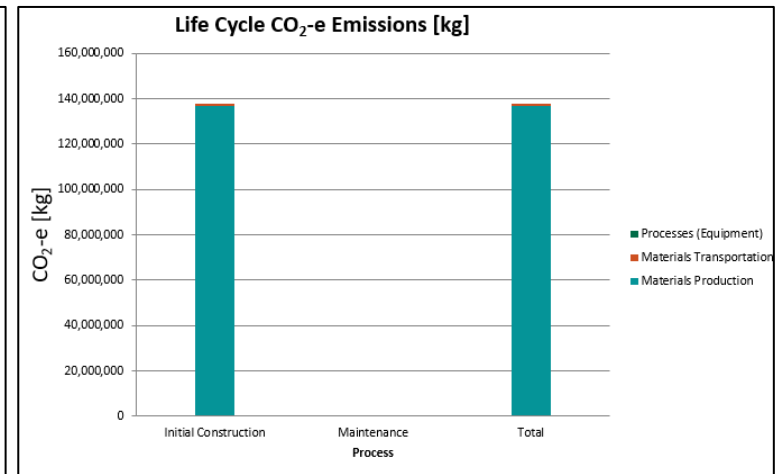
a)



b)



c)



d)

En la imagen a) se indica el consumo de energía para el ejemplo de aplicación, correspondiente a 1400 viviendas de interés social, considerando paneles con una mezcla de hormigón patrón, mientras que en la imagen b) se aprecia la emisión de Dióxido de Carbono equivalente CO₂e, para la mezcla de hormigón patrón. En la imagen c) se observa el consumo de energía para una mezcla de hormigón alternativo mientras que en la imagen d) se observa la emisión de Dióxido de Carbono equivalente CO₂e.