



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA

CARRERA: INGENIERÍA CIVIL
INFORME FINAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de:
INGENIERO CIVIL

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:
DISEÑO DE HORMIGONES

TÍTULO:
EVALUACIÓN DEL USO DE ÁRIDOS RECICLADOS
PROVENIENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y
DEMOLICIÓN (RCD) PARA LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES
NO ESTRUCTURALES

ELABORADO POR:
Arboleda Briones Daniel Alexander

TUTOR:
Ing. Alexi Oscar Morán Guzmán, Mg

MANTA – MANABÍ – ECUADOR

Agosto 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

Como tutor académico de la carrera de Ingeniería Civil en la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico lo siguiente:

He supervisado y orientado la elaboración del trabajo de titulación, completando un total de 192 horas, bajo la modalidad de **Proyecto de Investigación**. El tema del proyecto se titula **"DISEÑO DE HORMIGONES"**, con título **"EVALUACIÓN DEL USO DE ÁRIDOS RECICLADOS PROVENIENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) PARA LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES NO ESTRUCTURALES"**. Este proyecto ha sido desarrollado conforme a los lineamientos internos de la mencionada modalidad, y ha cumplido con los requisitos establecidos por el Reglamento de Régimen Académico. Por lo tanto, **certifico** que el proyecto mencionado posee los méritos académicos, científicos y formales necesarios para ser evaluado por el tribunal de titulación designado por la autoridad competente.

La autoría del tema desarrollado corresponde a Daniel Alexander Arboleda Briones, estudiante de la carrera de Ingeniería Civil, período académico 2026 (1), quien se encuentra aptos para la sustentación de su trabajo de titulación.

Certifico lo anterior para los fines pertinentes, a menos que la ley disponga lo contrario.

Manta, 24 de Julio de 2026.

Lo certifico,



Ing. Alexi Oscar Morán Guzmán, Mg.

C.C. 120431824-8

Tutor

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo, Daniel Alexander Arboleda Briones con CC: 171712823-3, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto de investigación con el tema **"DISEÑO DE HORMIGONES"**, con título **"EVALUACIÓN DEL USO DE ÁRIDOS RECICLADOS PROVENIENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) PARA LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES NO ESTRUCTURALES"**, el cual fue dirigido por el tutor, Ing. Alexi Oscar Morán Guzmán, Mg.

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta, a los 24 días del mes de julio de dos mil veinte y seis.



Daniel Alexander Arboleda Briones
C.C. 171712823-3
Autor

CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

En calidad de tribunales de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico:

Haber revisado el trabajo de titulación, bajo la modalidad de Proyecto de Investigación, cuyo tema es **"DISEÑO DE HORMIGONES"** con título **"EVALUACIÓN DEL USO DE ÁRIDOS RECICLADOS PROVENIENTES DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (RCD) PARA LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES NO ESTRUCTURALES"** internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo APRUEBO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para proceder a la defensa correspondiente.

Certifico lo anterior para los fines pertinentes, a salvo disposición de Ley en contrario. En la ciudad de Manta, a los 30 días del mes de enero de dos mil veinte y cinco.



Ing. Yuri Mauricio Rodríguez Andrade, Mg.
C.C. 130430030-5
Tribunal 1



Ing. Dolly Delgado Toala, PhD.
C.C. 130519033-0
Tribunal 2

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de titulación principalmente a Dios, por darme salud, sabiduría y fortaleza para avanzar hasta esta etapa de mi vida académica y lograr unas de mis mayores metas.

A mis padres, Daniel ARBOLEDA y Yirma BRIONES, por ser mi mayor ejemplo de esfuerzo y perseverancia. Este logro es el resultado de una formación llena de amor, respeto y sobre todo responsabilidad. Gracias por creer en mí incluso más fuerte que yo mismo, apoyándome y dándome ánimos en mis momentos más difíciles. Este trabajo es tan mío como suyo. Los amo.

A mis abuelos Gonzalo ARBOLEDA, Mariana AVILÉS, Clímaco BRIONES y Semira CUENCA por todo el amor y consentimiento que me dieron en vida, gracias por ser el refugio de mis travesuras. No pudieron verme triunfar, los extraño, pero sé que siguen cuidándome allá donde estén, de la mano de Dios. Espero que mis sentimientos les llegue.



Daniel Alexander Arboleda Briones

C.C 171712823-3

Autor

AGRADECIMIENTO

De la misma forma, expreso mi mayor agradecimiento a mis padres, por su apoyo incondicional, dándome su respaldo durante toda mi carrera universitaria.

A la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí y a la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura, al brindarme comodidades estudiantiles a lo largo de mi carrera estudiantil. Agradezco a mis docentes de la carrera de Ingeniería Civil por dotarme de conocimiento, aunque no fue fácil, ellos se esforzaban por enseñarnos. A menudo escuchaba “Esta es una carrera de resistencia”, ahora puedo decir que tenían razón, y estoy orgulloso de ser parte de ella.

Agradezco especialmente a mi tutor de tesis, el Ing. Alexi Morán Guzmán por ser mi pilar y guía en este trabajo, en lo que compete a sabiduría y corrección, para mí fue más un compañero de tesis.

A mis compañeros de los cuales las risas no faltaban nunca, a mi compañero y amigo Jesús Zambrano por ofrecerse a ayudarme en campo. Desde la mañana hasta la tarde, cansados, pero unos panes lo compensaban.



Daniel Alexander Arboleda Briones

C.C 171712823-3

Autor

RESUMEN

El presente trabajo realiza un análisis técnico de los áridos reciclados (AR) que vienen de residuos de construcción y demolición (RCD) utilizados en sustitución del árido grueso natural en la producción de hormigones no estructurales en la ciudad de Manta, teniendo en cuenta su comportamiento técnico y ambiental. Debido al crecimiento de los botaderos por el sector de la construcción que genera más escombros y la continua explotación de canteras, se diseñaron mezclas con un porcentaje de sustitución de un 20%, 30%, 40% y 50% de AR, utilizando el método de dosificación propuesto por el ACI 211.1 con una relación agua-cemento de 0,57, para evitar que la mezcla absorba agua en grandes cantidades debido al AR con mortero adherido se utilizó aditivo plastificante, mejorando la trabajabilidad de las mezclas.

Los ensayos realizados a los 28 días reflejaron que las mezclas con 20% y 30% de RCD alcanzaron resistencias a compresión de 21,55 MPa y 20,50 MPa, y módulos de rotura a flexión de 2,90 MPa y 2,85 MPa respectivamente, cumpliendo con los parámetros normados para su uso seguro en aceras. Por su parte, las sustituciones del 40% y 50% registraron caídas a compresión de 19,21 MPa y 18,13 MPa, con módulos de rotura a flexión de 2,68 MPa y 2,55 MPa. Se concluye que, si bien proporciones mayores al 30% no son aptas para pavimentos exteriores por su baja resistencia a tracción, es estructuralmente viable utilizar hasta un 50% de RCD para contrapisos interiores, al superar holgadamente el umbral mínimo exigido de 18 MPa. Además, el uso de RCD resulta altamente viable para fines no estructurales, al reducir el consumo de áridos de origen natural y la generación de escombros, promoviendo así un proceso de economía circular en el país.

Palabras clave: Hormigón no estructural, Áridos reciclados (AR), Residuos de Construcción y Demolición (RCD), Dosificación de mezclas, Resistencia a la compresión, Absorción.

ABSTRACT

This paper presents a technical analysis of recycled aggregates (RA) derived from construction and demolition waste (CDW) used as a substitute for natural coarse aggregate in the production of non-structural concrete in the city of Manta, taking into account their technical and environmental performance. Due to the growth of landfills, and construction sector generating more debris, and the continuous exploitation of quarries, mixes were designed with a substitution percentage of 20%, 30%, 40%, and 50% of RA. The mix design method proposed by ACI 211.1 was used, with a water-cement ratio of 0,57. To prevent the mix from absorbing large amounts of water due to the adhered mortar, a plasticizing admixture was used, improving the workability of the mixes.

Tests conducted at 28 days showed that the mixtures with 20% and 30% CDW reached compressive strengths of 21.55 MPa and 20.50 MPa, and flexural modulus of rupture of 2.90 MPa and 2.85 MPa respectively, complying with the standard parameters for safe use in sidewalks. On the other hand, the 40% and 50% substitutions registered compressive drops to 19.21 MPa and 18.13 MPa, with flexural modulus of rupture of 2.68 MPa and 2.55 MPa. It is concluded that, although proportions greater than 30% are not suitable for exterior pavements due to their low tensile strength, it is structurally viable to use up to 50% CDW exclusively for interior subfloors, as it easily exceeds the minimum required threshold of 18 MPa. Furthermore, the use of CDW is highly viable for non-structural purposes, as it reduces the consumption of natural aggregates and the generation of debris, thus promoting a circular economy process in the country.

Key words: *Non-structural concrete, Recycled aggregates (RA), Construction and Demolition Waste (CDW), Mix design, Compressive strength, Absorption.*

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	VII
ABSTRACT.....	VIII
1. INTRODUCCIÓN.....	16
2. ANTECEDENTES.....	17
3. OBJETIVOS	18
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
4. JUSTIFICACIÓN.....	19
5. CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	19
5.1 Antecedentes Investigativos.....	19
5.2 Hormigón	22
5.2.1 Definición y naturaleza del hormigón	22
5.2.2 Componentes del hormigón	23
5.2.3 Propósito de los agregados	23
5.3 Agregados utilizados para el hormigón	27
5.3.1 Tipos de agregados	27
5.3.2 Los Áridos Reciclados (RCD).....	28
5.3.3 Comportamiento del Árido Reciclado según lineamientos internacionales...	29
5.3.4 Propiedades de los agregados en hormigón	29
5.4 Normativas y estándares	33
5.4.1 Granulometría de Agregados (ASTM C136 - INEN 696)	33
5.4.2 Resistencia a la Degradación “Abrasión” (ASTM C131 - INEN 860).....	34
5.4.3 Masa Unitaria o Peso Volumétrico (ASTM C29 - INEN 858)	34
5.4.4 Densidad y Absorción (ASTM C128 - INEN 857)	36

5.4.5	<i>Contenido de Humedad (ASTM C566 – INEN 862)</i>	37
5.4.6	<i>Resistencia a la Compresión (ASTM C39 - INEN 1573)</i>	39
5.4.7	<i>Resistencia a la Flexión (ASTM C78 – INEN 1574)</i>	39
5.4.8	<i>Asentamiento o Revenimiento (ASTM C143 - INEN 1578)</i>	40
5.5	Normativas europeas relacionadas a los RCD	41
5.5.1	<i>Norma EN 12620:2013 (Especificaciones de Áridos)</i>	41
5.5.2	<i>Código Estructural de España (Real Decreto 470/2021)</i>	41
5.6	Antecedentes e influencia de los áridos reciclados	45
5.6.1	<i>Comportamiento en Estado Fresco</i>	45
5.6.2	<i>Desempeño Mecánico en Estado Endurecido</i>	46
5.6.3	<i>Viabilidad técnica</i>	48
5.7	Elementos de Aplicación para el Hormigón Reciclado	48
5.7.1	<i>Bordillos (Confinamiento Vial)</i>	48
5.7.2	<i>Aceras (Movilidad Peatonal)</i>	49
5.7.3	<i>Contrapisos (Nivelación y Soporte)</i>	49
5.7.4	<i>Muros de Hormigón Ciclópeo</i>	49
5.8	Gestión actual en Manta.....	50
6.	CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO	50
6.1	Modalidad Básica de la Investigación	50
6.1.1	<i>Método de Dosificación</i>	50
6.2	Porcentajes de sustitución	51
6.3	Diseño del Plan Experimental.....	51
6.3.1	<i>Matriz de Especímenes y Ensayos</i>	51
6.3.2	<i>Requerimiento de Materiales</i>	53
7.	CAPÍTULO III: RECURSOS Y PRESUPUESTO	53

7.1	Recursos Humanos.....	53
7.2	Recursos Tecnológicos	53
7.3	Recursos Materiales	54
7.4	Presupuesto	54
8.	CAPÍTULO IV: PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS DE LABORATORIO.....	55
8.1	Caracterización Granulométrica del Árido Fino (Arena para Hormigón)	55
8.2	Caracterización Granulométrica del Árido Fino (Arena Fina Lavada).....	56
8.2.1	<i>Obtención del Módulo de Finura</i>	<i>57</i>
8.3	Caracterización Granulométrica del Árido Grueso (Ripio ½")	58
8.4	Procesamiento y Caracterización Granulométrica del Árido Grueso Reciclado ...	59
8.5	Determinación de Masa Unitaria, Peso Específico y Absorción	61
8.5.1	<i>Cálculo de la Masa Unitaria (Agregado fino)</i>	<i>61</i>
8.5.2	<i>Cálculo de la Masa Unitaria (Ripio ½ ").....</i>	<i>62</i>
8.5.3	<i>Cálculo del Peso Específico Seco (Agregado fino)</i>	<i>62</i>
8.5.4	<i>Cálculo del Peso Específico Seco (Ripio ½ ")</i>	<i>63</i>
8.5.5	<i>Cálculo de la Absorción de Agua (Árido Reciclado (AR)de RCD)</i>	<i>63</i>
8.5.6	<i>Cálculo de la Absorción de Agua (Ripio ½ ").....</i>	<i>63</i>
8.5.7	<i>Cálculo del Contenido de Humedad (Agregado fino)</i>	<i>63</i>
8.5.8	<i>Cálculo del Contenido de Humedad (Agregado grueso)</i>	<i>64</i>
8.6	Resistencia a la Degradación "Abrasión"	64
8.6.1	<i>Cálculo de desgaste para el Ripio Natural de 1/2"</i>	<i>65</i>
8.6.2	<i>Cálculo de desgaste para el Agregado Reciclado (RCD)</i>	<i>65</i>
8.7	Diseño de Mezclas mediante el Método ACI 211.1	66
8.7.1	<i>Dosificación del Hormigón y Ajustes por Humedad</i>	<i>66</i>
8.7.2	<i>Cálculo de Absorción por porcentaje de sustitución de RCD y dosificación. 81</i>	

8.7.3	<i>Escalado de la Dosificación base para las Probetas y Vigas de Hormigón ..</i>	89
8.7.4	<i>Reducción de la Relación agua-cemento mediante el uso de aditivo plastificante</i>	92
8.8	Elaboración del Hormigón y Evaluación en Estado Fresco.....	94
8.9	Moldeo y Proceso de Curado de los Especímenes.....	95
9.	CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y RESULTADOS.....	97
9.1	Evaluación de la Resistencia a la Compresión (ASTM C39)	97
9.2	Evaluación de la Resistencia a la Flexión (ASTM C78)	100
9.3	Evaluación del Impacto Ambiental y Economía Circular	102
10.	CONCLUSIONES.....	104
11.	RECOMENDACIONES.....	106
12.	BIBLIOGRAFÍA.....	107
13.	ANEXOS	111

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Tratamiento ordinario de agregados	20
Tabla 2	Tratamiento especial de los agregados	21
Tabla 3	Tipos de Cemento Portland	24
Tabla 4	Factores que modifican la resistencia del hormigón	25
Tabla 5	Granulometría de agregados.....	30
Tabla 6	Resistencia a la Degradación "Abrasión"	34
Tabla 7	Masa Unitaria de Agregados	35
Tabla 8	Densidad y Absorción	36
Tabla 9	Resistencia a la Compresión	39
Tabla 10	Resistencia a la Flexión	40
Tabla 11	Asentamiento o Revenimiento.....	40
Tabla 12:	Requisitos de composición del árido grueso reciclado.....	43
Tabla 13:	Frecuencia de ensayos de control de producción para áridos reciclados	43

Tabla 14 Factores que pueden producir deterioro en el hormigón	48
Tabla 15: Sustitución de árido grueso natural por reciclado considerando ≥ 18 MPa	51
Tabla 16: Distribución de especímenes por porcentaje de sustitución	52
Tabla 17: Recursos humanos	53
Tabla 18: Recursos tecnológicos	53
Tabla 19: Recursos materiales	54
Tabla 20: Presupuesto	54
Tabla 21 Análisis granulométrico de Arena para Hormigón	55
Tabla 22 Análisis granulométrico de Arena Fina Lavada	56
Tabla 23 Análisis granulométrico de Ripio 1/2"	58
Tabla 24 Análisis granulométrico de RCD.....	60
Tabla 25 Resultados de Desgaste por Abrasión (Máquina de Los Ángeles).....	65
Tabla 26 Datos para Dosificación de Hormigón base	67
Tabla 27 Datos para cálculo de resistencia característica requerida.....	67
Tabla 28 Resistencia característica requerida.....	68
Tabla 29 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos y nominales de agregado.....	68
Tabla 30 Peso del Agua y Porcentaje de Aire	69
Tabla 31 Correspondencia entre la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión del hormigón	69
Tabla 32 Relación agua-cemento (a/c) y peso de cemento.....	70
Tabla 33 Volumen de agregado grueso por Volumen unitario de hormigón	71
Tabla 34 Cantidad de agregado grueso.....	72
Tabla 35 Primera estimación del peso del hormigón fresco	72
Tabla 36 Primera estimación del peso del hormigón.....	73
Tabla 37 Cantidad de agregado fino por el método del peso	73
Tabla 38 Cantidad de agregado fino por método del volumen.....	75
Tabla 39 Humedad superficial.....	76
Tabla 40 Corrección de pesos.....	79
Tabla 41 Dosificación sin Árido Reciclado (RCD).....	80
Tabla 42 Datos para Dosificación de Hormigón con RCD 20%	82

Tabla 43 Dosificación con 20% de RCD.....	83
Tabla 44 Datos para Dosificación de Hormigón con RCD 30%	84
Tabla 45 Dosificación con 30% de RCD.....	85
Tabla 46 Datos para Dosificación de Hormigón con RCD 40%	86
Tabla 47 Dosificación con 40% de RCD.....	87
Tabla 48 Datos para Dosificación de Hormigón con RCD 50%	88
Tabla 49 Dosificación con 50% de RCD.....	89
Tabla 50 Volúmenes de moldes de probetas y vigas	90
Tabla 51 Cantidades para mezcla sin usar RCD.....	91
Tabla 52 Mezclas con Diferentes Porcentajes de Sustitución	91
Tabla 53 Resultados del Ensayo de Asentamiento (Cono de Abrams)	95
Tabla 54 Resultados de Resistencia a la Compresión (Muestra 1).....	98
Tabla 55 Resultados de Resistencia a la Compresión (Muestra 2).....	98
Tabla 56 Promedio de Muestras de Resistencia a la Compresión ($f'c$).....	99
Tabla 57 Resultado de Resistencia a la Flexión	101
Tabla 58 Reducción de consumo de ripio natural por cada 1 m ³ de hormigón producido .	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Clasificación de los Áridos	28
Figura 2 Curva Granulométrica de Arena para Hormigón	56
Figura 3 Curva Granulométrica de Arena Fina Lavada.....	57
Figura 4 Curva Granulométrica de Ripio 1/2"	59
Figura 5 Curva Granulométrica de RCD	61
Figura 6 Ficha técnica de Sika Plastocrete 161 HE	80
Figura 7 Curva de Evolución Final de muestras	99

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Factura de compra de recursos.....	111
Anexo 2 Sacos de Arena fina, Arena para Hormigón y Cemento	111
Anexo 3 Arena fina lavada	112

Anexo 4 Arena para Hormigón.....	112
Anexo 5 Cemento Holcim	113
Anexo 6 Ripio 1/2"	113
Anexo 7 Árido reciclado de RCD con mortero adherido	114
Anexo 8 Aditivo Sika Plastocrete 161 HE	114
Anexo 9 Prensa de ensayo de Flexión	115
Anexo 10 Máquina de "Los Angeles"	115
Anexo 11 Ensayo de contenido de humedad.....	116
Anexo 12 Peso seco al horno de arena	116
Anexo 13 Ensayo de Granulometría de áridos	117
Anexo 14 Materiales en obra	117
Anexo 15 Pesando agua para mezcla.....	118
Anexo 16 Ensayo de revenimiento	118
Anexo 17 Limpieza de concretera	119
Anexo 18 Probetas con 40% de RCD al cabo de ser fundidas.....	119
Anexo 19 Probetas con 20% de RCD en piscina de curado.....	120
Anexo 20 Proceso de secado para ensayar 24 horas después	120
Anexo 21 Peso de probetas.....	121
Anexo 22 Probetas con 50% de sustitución de RCD.....	121
Anexo 23 Moldes de plástico para probetas de 10x20 cm con abertura para desmoldar con compresor de aire	122
Anexo 24 Compresor de aire	122
Anexo 25 Desmoldeo con compresor de aire	123
Anexo 26 Viga después de curado.....	123
Anexo 27 Ensayo destructivo de compresión.....	124
Anexo 28 Fallo por compresión	124
Anexo 29 Recolección de muestra de RCD en zona local	125
Anexo 30 Proceso de selección evitando impurezas	125

1. INTRODUCCIÓN

El hormigón es una roca hecha por el hombre. Es el material que más se utiliza en la construcción en todo el mundo porque es muy resistente y duradero. Se hace mezclando agua y cemento con arena y grava. También se pueden agregar algunos productos químicos para que tenga las propiedades que se necesitan para cada proyecto.

En algunos países, como España, Portugal, Alemania y China, ya se utiliza arena y grava reciclada para hacer hormigón. Han creado reglas para saber si este material es bueno para usar. Por ejemplo, han establecido límites para la cantidad de agua que puede absorber y para la cantidad de sulfatos que puede contener.

Algunos investigadores, como Bai, Zhu, Liu y Liu (2020), han demostrado que el hormigón hecho con arena y grava reciclada es muy útil para construir cosas que no requieren mucha resistencia, como bloques o adoquines. Sin embargo, es importante controlar factores como el tamaño de las partículas, la humedad y la proporción de agua y cemento.

En Ecuador no hay reglas claras para el uso de materiales reciclados en la construcción. Por lo tanto, se desperdician muchos materiales que podrían ser útiles. La ciudad de Manta es un ejemplo de cómo se puede convertir este problema en una solución.

Esta investigación busca responder a la pregunta de si es posible hacer hormigón con arena y grava reciclada de la zona. Se quiere saber si es técnicamente viable y si es bueno para el medio ambiente. El objetivo final es obtener datos confiables que ayuden a promover prácticas de construcción sostenibles y a actualizar las reglas para el uso de materiales reciclados en la construcción en Ecuador.

2. ANTECEDENTES

La industria de la construcción es paradójica en el sentido de que es a la vez una fuente de crecimiento económico y social y, sin embargo, una de las principales causas del consumo excesivo e innecesario de los recursos naturales. La extracción intensiva de agregados de construcción (arena y rocas) está causando daños irreparables a los sistemas fluviales y canteras. Los Residuos de Construcción y Demolición (RCD) se acumulan en los vertederos urbanos más allá de sus límites diseñados y resulta difícil gestionarlos.

Este problema está empeorando en Ecuador, particularmente en la ciudad de Manta. El terremoto de 2016 devastó la ciudad y dejó una gran carga de escombros. Incluso después de todos estos años, la mayoría de los escombros permanecen sin gestionar y ha generado pasivos en forma de contaminación antiestética en forma de escombros y el desperdicio de espacio.

El problema no son los residuos en sí, sino la recolección de los residuos y las oportunidades no aprovechadas que los residuos pueden ofrecer. Internacionalmente, los residuos de agregados de construcción tienen el potencial de ser reciclados y utilizados de manera intencionada. Sin embargo, en Ecuador, el uso de agregados de construcción reciclados contraviene los axiomas del derecho de la construcción y es ilegal.

El agregado reciclado es aún menos consistente en comparación con el agregado natural, ya que tiene mayor porosidad y zonas de cemento adherido, y puede afectar la calidad de la siguiente mezcla si no se dosifica con precisión. Esto genera desconfianza en la industria de la construcción local. En su mayoría, el problema es que no hay comprensión sobre el rendimiento de los agregados reciclados de Manta cuando se utilizan en una matriz de concreto. Esto es preocupante, ya que no queremos colocar elementos no estructurales que no cumplan con los requisitos de resistencia y, en su lugar, no puedan resolver una preocupación de salud pública y proporcionar una solución de ingeniería viable que sea sustentable.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar la viabilidad técnica del uso de áridos reciclados, provenientes de los residuos de construcción y demolición de Manta, mediante la evaluación experimental de sus propiedades físicas y mecánicas, con el propósito de validar su idoneidad en aplicaciones no estructurales y proponer una alternativa sostenible adaptada a los desafíos constructivos del contexto ecuatoriano.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar los áridos reciclados recolectados en Manta mediante la determinación de su densidad, absorción de agua y resistencia a la abrasión (ensayo de Los Ángeles), fundamentando el análisis en las normativas vigentes ASTM, INEN y el Código Estructural.
- Diseñar mezclas de hormigón con distintos porcentajes de sustitución (20%, 30%, 40% y 50%) del árido natural por reciclado, buscando el equilibrio óptimo entre sostenibilidad y desempeño.
- Determinar el desempeño mecánico del hormigón elaborado con áridos reciclados mediante la evaluación de su resistencia a la compresión según la norma ASTM C39/C39M, con el fin de validar si el material alcanza la capacidad de carga necesaria para garantizar su funcionalidad.
- Evaluar la influencia del porcentaje de sustitución de árido reciclado en las propiedades reológicas del hormigón en estado fresco, mediante la determinación y comparación de la trabajabilidad y la densidad.
- Verificar si el hormigón elaborado con áridos reciclados alcanza una resistencia a la compresión mayor o igual a 18 MPa, con el propósito de validar su idoneidad técnica para la fundición de contrapisos y elementos de nivelación.
- Evaluar el impacto ambiental y las mejoras logradas con la implementación de hormigones reciclados, analizando los resultados obtenidos para proponer una alternativa constructiva que garantice eficiencia de recursos y sostenibilidad a largo plazo.

4. JUSTIFICACIÓN

El proceso de seleccionar el agregado en cualquier obra de ingeniería supondrá una fase determinante y que tendrá una especial consideración a la hora de definir la resistencia y durabilidad de las construcciones; por esta razón, el presente trabajo nace a la par de la parte técnica con la parte medioambiental.

El objetivo es averiguar la conveniencia de poder utilizar áridos reciclados generados a partir de escombros de la construcción como materia prima a la hora de elaborar hormigones que no tengan cargas estructurales críticas; en este sentido, el principal interés que guía este trabajo es conocer los datos reales que indican hasta qué punto variar dichas mezclas.

Finalmente, si se demuestra con los datos técnicos que ha funcionado, estaremos dando un buen argumento a la hora de apoyar la economía circular y no solamente evitando que los vertederos se llenen de escombros; aunque el hormigón con Residuos de Construcción y Demolición (RCD) no forme parte del elemento resistente de una edificación, puede llegar a ser un complemento indispensable para la funcionalidad y el urbanismo.

5. CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

5.1 Antecedentes Investigativos

En ingeniería civil y geología, para adquirir áridos tradicionales de piedra, se explotan sistemáticamente los depósitos naturales. En su trabajo, Manual de Áridos, (López Jimeno, 2001) describe una cantera como una operación a cielo abierto de extracción de minerales industriales de rocas y materiales granulares. En contraste con otros tipos de minería, una característica significativa de la extracción en cantera es que se deben remover grandes cantidades de rocas, ya que el valor comercial y estructural del macizo rocoso está determinado por sus propiedades físico-mecánicas.

Por el contrario, desde la perspectiva de la tecnología de materiales, los autores (Mamlouk & Zaniewski, 2016) indican que la explotación de estos depósitos naturales no proporcionará con frecuencia materiales listos para usar. Después de extraer la roca madre,

esta requiere una serie de operaciones mecánicas que consisten en trituración, cribado y lavado para romper la roca y refinarla para cumplir con los límites de granulometría deseados para la producción de concreto según lo establecido por las normativas relevantes.

Tabla 1 Tratamiento ordinario de agregados

Proceso	Descripción
Triturado	Es la reducción de tamaño de las partículas de roca por trituración, constituye la acción básica del procesamiento cuando se requiere producir agregados manufacturados.
Cribado	Es la separación de los agregados en fracciones se efectúa por cribado mecánico, es decir se hace pasar el material natural por cribas con aberturas cuadradas o redondas de diferente medida.
Lavado	El lavado no necesariamente se pretende la completa eliminación de sus contaminantes, sino más bien disminuir su proporción a niveles que han probado no ser decreméntales para la calidad del concreto.

Fuente: *Manual de Tecnología del Concreto*

Tabla 2 Tratamiento especial de los agregados

Tratamiento	Descripción
Remoción de arcilla aglutinada	Es necesario someter los agregados a tratamiento de lavado más enérgico, con acciones de frotación para remover las costras y de impacto para desbaratar los terrones.
División de la arena en fracciones	En cada tolva se acumulan fracciones de partículas de diferente tamaño cuya dosificación regulada por dispositivos automáticos permite recomponer la arena con una granulometría apegada a determinados requerimientos.
Remoción de partículas débiles	Partículas débiles son aquellas cuya escasa resistencia en estado saturado puede resultar perjudicial para la resistencia mecánica, la durabilidad u otras propiedades del concreto.
Remoción de partículas ligeras	Partículas ligeras afectan más a la calidad del concreto al formar parte de la grava que cuando se encuentran en la arena por ello es necesaria su remoción.

Fuente: Manual de Tecnología del Concreto

Se estima que los agregados comprenden entre el 60% y el 75% del peso total del hormigón en la mayoría de las estructuras. Estudios exhaustivos han indicado que la composición del agregado en el hormigón determina la calidad y durabilidad general del producto terminado. Estos estudios han mostrado que el agregado natural es la mejor opción. Los estudios actuales están poniendo mucho énfasis en ideas sostenibles para los agregados naturales, siempre que los sustitutos cumplan con los requisitos técnicos.

La mayor parte de la investigación que se realiza sobre el uso de Hormigón con Agregados Reciclados (RAC) ha demostrado que, aunque hay un aumento en la sustitución de Agregados Reciclados (AR), los resultados todavía son aceptables para componentes no estructurales. Esto, sin embargo, solo es alcanzable si la relación agua-cemento y el contenido de humedad en los agregados se mantienen controlados. (Bai, Zhu, Liu, & Liu, 2020)

En el contexto europeo, la EHE-08 (ahora Real Decreto 470/2021) y sus estudios asociados confirman que, aunque los AR muestran una mayor absorción y menor densidad, pueden ser utilizados en hormigón basándose en la experiencia de países como España.

En el país y en las comunidades locales, lo que pasó después del terremoto de 2016 en Manabí fue algo nuevo para la investigación. En las universidades de Ecuador, muchos estudios han empezado a mirar cómo se manejan los residuos de construcción y demolición. Aunque muchos de estos estudios se enfocaron en ver cuánto daño hubo, sentaron las bases para seguir adelante y ver cómo se pueden aprovechar estos residuos de manera técnica.

En la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, se han hecho algunos estudios que muestran que muchos de estos residuos, que se generan tanto por la reconstrucción después del terremoto como por el crecimiento de las ciudades, como en la Calle 13, se desechan sin ningún tipo de aprovechamiento o tratamiento para darles valor. Esto no solo llena demasiado el lugar donde se tiran los residuos en San Juan, sino que también se desperdicia un material valioso que podría ser útil (Delgado Toala, 2014).

5.2 Hormigón

5.2.1 Definición y naturaleza del hormigón

El hormigón es una especie de piedra artificial. Se forma cuando una mezcla de diferentes materiales se endurece. Esta mezcla está compuesta por un aglomerante, que es una combinación de cemento hidráulico y agua, y materiales de relleno inerte, como arena y grava. A veces, se agregan productos químicos para cambiar sus propiedades (Neville, 2011).

El hormigón es muy resistente a la compresión. Sin embargo, su resistencia a la tracción no es tan buena. Por eso, a menudo se le añade acero de refuerzo. Lo que lo hace destacar es su durabilidad. Si se hace correctamente, el hormigón se convierte en una capa densa y impermeable. Esta capa protege sus partes internas y mantiene su integridad durante mucho tiempo, incluso décadas (Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese, 2004).

El hormigón es muy apreciado por su capacidad para durar. Puede soportar el paso del tiempo y los cambios en el entorno. Si se diseña y construye de manera adecuada, puede durar mucho tiempo sin problemas.

5.2.2 Componentes del hormigón

El hormigón moderno es un material compuesto por varias partes. Se hace mezclando un aglomerante hidráulico, que es una mezcla de cemento y agua, con materiales de relleno inerte, como los agregados. Antes, se pensaba que los agregados solo servían para rellenar y abaratar el costo del hormigón. Sin embargo, ahora se sabe que estos materiales son muy importantes porque ocupan entre el 60% y el 80% del volumen total del hormigón. También ayudan a que el hormigón sea estable y tenga propiedades elásticas (Mehta & Monteiro, 2014).

La pasta de cemento es como un pegamento que une las partículas de los agregados, creando una matriz sólida. Pero es la estructura formada por los agregados la que hace que el hormigón sea resistente al desgaste y no cambie de tamaño con facilidad debido a la contracción o los cambios de temperatura. Esto es importante porque ayuda a que la estructura dure mucho tiempo (Mehta & Monteiro, 2014).

5.2.3 Propósito de los agregados

El material que forma entre el sesenta por ciento y el setenta y cinco por ciento del volumen total del hormigón es muy importante. Este material actúa como el esqueleto que da estabilidad y resistencia al hormigón. La densidad, la porosidad y la forma en que los granos están distribuidos influyen en la cantidad de agua que se necesita para mezclar el hormigón. Esto, a su vez, afecta la resistencia final del material (ASTM International, 2018).

En cuanto a la sostenibilidad, es importante buscar alternativas a los recursos naturales. La extracción de materias primas es un problema porque se están utilizando grandes cantidades. Solo en la Unión Europea, se extraen más de dos mil setecientos millones de toneladas al año. La sustitución de estos recursos naturales por alternativas recicladas se ha convertido en una prioridad (de Andrade Salgado & de Andrade Silva, 2022).

Cemento

El cemento es muy importante en la mezcla del hormigón. Es un material que no es orgánico y es muy fino. Cuando se mezcla con agua, sucede una serie de reacciones químicas que hacen que se endurezca y sea muy resistente. Esto pasa incluso si está bajo el agua (Neville, 2011).

En todo el mundo, el cemento que más se utiliza en la construcción es el cemento Portland. Se hace calentando rocas y arcilla a muy alta temperatura, casi 1450 °C. Después, se muele con yeso para que no se endurezca demasiado rápido (Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese, 2004).

La función principal del cemento es reaccionar con los demás componentes para unir todo. No es para aumentar el volumen, sino para actuar como un adhesivo que hace que todo el sistema sea sólido.

Tabla 3 Tipos de Cemento Portland

Tipo	Descripción	INEN	ASTM
I	Uso Común	152	C150
II	Moderada resistencia a sulfatos Moderado calor de hidratación	152	C150
III	Elevada resistencia inicial	152	C150
IV	Bajo calor de hidratación	152	C150
V	Alta resistencia a la acción de sulfatos	152	C150

Nota: Los tipos IA, IIA y IIIA incluyen incorporador de aire.

Fuente: Holcim (2018) / (Jiménez Ramos, 2020)

Pasta de cemento

La pasta de cemento, que es una mezcla de cemento y agua, es lo que une todas las partículas de agregado. Esto hace que la mezcla suelta se convierta en una matriz sólida y continua, similar a la roca natural.

Cuando la pasta de cemento está fresca, actúa como un lubricante. Esto ayuda a que los agregados se muevan con facilidad y asegura que el material sea lo suficientemente trabajable para su colocación. Con el tiempo, la pasta de cemento se endurece y es la principal responsable de que el material tenga resistencia mecánica y una estructura sólida (Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese, 2004).

Relación Agua/Cemento

La cantidad de agua que se utiliza en una mezcla de cemento afecta su resistencia. Si se usa menos agua, la mezcla es más compacta y resistente. Pero si se reduce demasiado el agua sin agregar productos que ayuden a que la mezcla sea más manejable, se pueden formar grumos que hacen que la mezcla no se compacte bien. Esto puede hacer que la resistencia real de la mezcla sea menor cuando se utiliza en una obra (Jiménez Montoya, García Meseguer, & Morán Cabré, 2010).

Tabla 4 Factores que modifican la resistencia del hormigón

Si aumenta:	Trabajabilidad	Resistencia
Finura de la arena	Aumenta	Disminuye
Relación grava / arena	Disminuye	Aumenta
Agua	Aumenta	Disminuye
Tamaño máximo de árido	Disminuye	Aumenta
Contenido de aire	Aumenta	Disminuye

Cuando hay demasiados finos en la mezcla de hormigón, esto puede afectar negativamente su resistencia. Por eso, se busca encontrar un equilibrio entre arenas costeras y arenas de trituración lavadas. Esto ayudaría a que el hormigón tenga la fluidez necesaria sin perder su capacidad de carga (Jiménez Ramos, 2020).

Propiedades

El estado fresco del hormigón es el momento justo después de mezclar todos los componentes. En este estado, el hormigón es como una masa plástica que se puede transportar, colocar y compactar sin que se separen sus componentes. Esta etapa es muy importante porque determina lo que se llama “trabajabilidad” de la mezcla (Sánchez de Guzmán, 2011).

En el estado fresco, se hace una prueba llamada ensayo de cono de Abrams. Esta prueba mide la consistencia y la trabajabilidad del hormigón. Es una de las pruebas más comunes que se hacen en las obras y en los laboratorios porque es rápida y da una idea clara de lo fluido que es el hormigón antes de que se endurezca (Neville, 2011).

La ASTM C125 (2018) define el estado endurecido como la condición en la que el material ha desarrollado la resistencia mecánica suficiente para soportar cargas y resistir la abrasión. Propiedades como la densidad, el módulo de elasticidad y la impermeabilidad se vuelven los parámetros de control predominantes para garantizar la vida útil de la estructura (ASTM International, 2018).

Resistencia mecánica

La ASTM C125 (2018) dice que un material endurecido es aquel que tiene suficiente resistencia mecánica para aguantar cargas y resistir desgaste. Propiedades como la densidad, elasticidad e impermeabilidad son clave para asegurar que la estructura dure.

La resistencia a la compresión ($f'c$) es vista como el indicador de calidad más importante del hormigón. Esto se debe a que está muy relacionado con la estructura del cemento. Factores como el tipo de agregado, curado y temperatura influyen. Sin embargo, lo que realmente manda es la proporción de agua y cemento. Agregar más agua hace que el hormigón sea más fácil de manejar. Pero también hace que haya más poros en el cemento. Esto reduce mucho la resistencia y durabilidad del material endurecido (Mamlouk & Zaniewski, 2016).

Durabilidad

La protección del hormigón comienza desde el principio, cuando se diseña la mezcla. Es importante tener en cuenta factores como la cantidad de agua y cemento que se

utilizan, y asegurarse de que el hormigón esté bien compactado y curado. Esto es fundamental para evitar que se formen pequeños canales dentro del hormigón que puedan dejar pasar el agua y el aire (ACI Committee 201, 2016).

Permeabilidad y Porosidad

El hormigón puede parecer una roca sólida, pero en realidad tiene una estructura interna compleja con muchos pequeños espacios. Estos espacios se forman cuando el agua que se utiliza para hacer la mezcla, se evapora después de que el cemento se ha endurecido. Es importante controlar la cantidad de estos espacios para asegurarse de que el hormigón sea lo suficientemente denso y resistente a la intemperie (Neville, 2011).

La permeabilidad es una propiedad importante del hormigón que se refiere a la facilidad con la que los líquidos y gases pueden pasar a través de él. Un hormigón con baja permeabilidad es más resistente a los agentes químicos agresivos y a la humedad (Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese, 2004).

En la ciudad de Manta, donde el entorno marino es muy agresivo, es especialmente importante evaluar la permeabilidad del hormigón, especialmente cuando se utilizan materiales reciclados.

5.3 Agregados utilizados para el hormigón

Los agregados son partes importantes que dan estabilidad a la mezcla. Esto ayuda a que no cambie de tamaño tanto cuando se seca y se contrae. La pasta de cemento sola tendría muchos problemas si no tuviera estos agregados. Son una parte económica muy importante de la mezcla y ocupan mucho espacio, entre el 60% y el 75% del total del hormigón (Alexander & Mindess, 2005).

5.3.1 Tipos de agregados

- El Agregado Fino, también conocido como Arena, es un material que se pasa por un tamiz de 9.5 mm y la mayoría pasa por un tamiz N.º 4. Esto ayuda a llenar los espacios entre las piedras grandes y a dar consistencia a la mezcla cuando está fresca (ASTM International, 2018).

- El Agregado Grueso, como la Grava o el Ripio, es un material que se queda en el tamiz N.º 4. Este es el componente principal que soporta las cargas y da resistencia al desgaste (ASTM International, 2018).
- Los materiales pétreos se clasifican en tres categorías según su origen tecnológico: naturales, de trituración y artificiales. Los Áridos Reciclados, que vienen de materiales de construcción y demolición, se consideran artificiales. Estos materiales se seleccionan y trituran para que puedan usarse de nuevo en mezclas cementíceas.

Figura 1 Clasificación de los Áridos

Áridos Naturales	Áridos de Trituración	Áridos Artificiales (Reciclados)	Áridos Marginales
• Extraídos directamente de la naturaleza sin alteraciones químicas. Su procesamiento se limita a la modificación mecánica de su tamaño (granulometría) para el uso en obra.	• Obtenidos mediante la fragmentación mecánica de rocas de cantera. Se admite cualquier roca que garantice la dureza y resistencia necesarias para el hormigón.	• Subproductos recuperados de procesos industriales o actividades humanas. En este grupo destacan los Residuos de Construcción y Demolición (RCD), tratados para su reutilización sustentable.	• Materiales no convencionales que no encajan en las categorías tradicionales, pero que cumplen con normativas específicas que permiten su uso condicionado en la construcción.

5.3.2 Los Áridos Reciclados (RCD)

El árido reciclado es diferente al árido natural porque proviene de restos de construcciones y demoliciones que se trituran. Este árido reciclado tiene dos partes: el árido original y una capa de “mortero viejo” que está pegada a su superficie. Esta capa de mortero hace que el árido reciclado absorba más agua y sea menos denso que el árido natural. Por eso, cuando se hace la mezcla, hay que tener cuidado con la cantidad de agua y cemento que se usa para que el hormigón quede fuerte (Bai, Zhu, Liu, & Liu, 2020).

5.3.3 Comportamiento del Árido Reciclado según lineamientos internacionales

Internacionalmente, los estudios sobre los agregados reciclados se basan en gran medida en las investigaciones del Instituto Americano del Concreto. Un informe del Comité ACI 555R, titulado "Removal and Reuse of Hardened Concrete", proporciona las pautas para reincorporar hormigón triturado en nuevas mezclas (ACI Committee 555, 2001).

El Comité ACI 555 menciona que la principal diferencia entre un árido natural y uno reciclado es la presencia de mortero adherido. Cuando se trituran escombros, las partículas de grava conservan una capa de pasta de cemento alrededor. Esta capa porosa lo que hace es que los agregados reciclados tengan una densidad menor que ronda entre un 5% y 10% menos al de los áridos naturales, y una mayor capacidad de absorción, que puede variar entre el 4% y el 8% (ACI Committee 555, 2001).

A pesar de los cambios físicos, el documento ACI 555R dice que usar áridos reciclados para hacer hormigón estructural y no estructural es técnicamente posible. El comité señala que si se reemplaza el agregado grueso natural por reciclado en una proporción razonable (hasta un 20% o 30%), el efecto negativo en la resistencia a la compresión y en la elasticidad es mínimo. Esto siempre y cuando se ajuste con cuidado la cantidad de agua para hidratar la mezcla sin cambiar la proporción de agua y cemento diseñada (ACI Committee 555, 2001).

5.3.4 Propiedades de los agregados en hormigón

Análisis granulométrico y compacidad

La granulometría es una forma de medir cómo se distribuyen los tamaños de las partículas. Se hace midiendo qué porcentaje de partículas pasa a través de una serie de tamices con agujeros del mismo tamaño (ASTM International, 2019).

Una granulometría perfecta no es algo que suceda por casualidad. En su lugar, sigue un patrón regular en el que las partículas más pequeñas se ajustan en los espacios que dejan las partículas más grandes (Fernández Cánovas, 2013).

Tabla 5 Granulometría de agregados

Dimensión de la partícula elemental (mm)	Atterberg (Sistema Internacional)
< 0,001	Arcilla
< 0,002	Arcilla
0,005	Limo
0,01	Limo
0,02	Limo
0,05	Arena Fina
0,1	Arena Fina
0,25	Arena Fina
0,2	Arena Fina
0,5	Arena Gruesa
1,0	Arena Gruesa
2,0	Arena Gruesa
3,0	Grava Fina
5,0	Grava Fina
10,0	Grava
20,0	Grava gruesa y Piedras
> 20,0	Grava gruesa y Piedras

Fuente: Escala Granulométrica de Udden-Wentworth (2016)

Rugosidad

Los áridos reciclados son diferentes de los áridos naturales que vienen de ríos y canteras. Estos áridos naturales suelen tener superficies lisas. Por otro lado, los áridos

reciclados tienen mucha rugosidad. Esto se debe a que todavía tienen restos de mortero antiguo adherido a la piedra original. Esta textura áspera es muy buena ya que hace que los áridos se peguen mejor a la mezcla nueva.

Sin embargo, esta superficie con muchos poros y rugosa también hace que las partículas se froten entre sí más. Esto reduce la capacidad de la mezcla para fluir suavemente. Por lo tanto, se necesita agregar más agua o productos especiales (aditivos) para que la mezcla sea más fácil de trabajar (de Andrade Salgado & de Andrade Silva, 2022).

Densidad

La densidad de los agregados es uno de los indirectos de porosidad y calidad de la roca madre. De acuerdo con la ASTM C127, la propiedad se define como la relación que tiene la masa del agregado y la masa de un volumen igual de agua destilada. Su determinación es muy importante, ya que el volumen absoluto que los áridos ocupen en la mezcla es necesario para el diseño de la dosificación (ASTM International, 2015).

En el caso particular del RCD, se tiene claro que existe una relación inversa entre el contenido de mortero adherido y la densidad. El árido reciclado siempre tiene una densidad inferior a la del árido natural. Esto se debe a que el mortero viejo adherido, es mucho más poroso y ligero que la piedra natural. Como resultado, el uso de estos materiales para realizar mezcla de hormigón tiende a tener un peso unitario ligeramente menor, lo cual no representa un factor tan significativo en la resistencia estructural, pero sí debe tomarse en consideración el peso propio de los elementos constructivos (Bai, Zhu, Liu, & Liu, 2020).

Estados de Humedad y Absorción

Establecer la diferencia termodinámica entre la absorción y el contenido de humedad de un agregado, es fundamental en la tecnología del concreto; (Neville, 2011) dice que la **absorción** es una propiedad intrínseca del material y que se puede definir como la cantidad máxima de agua que pueden contener un agregado dentro de sus poros internos. Por el contrario, el **contenido de humedad**, es una condición variable y circunstancial, y se define como la cantidad total de agua (interna y superficial) que contiene el agregado en un momento dado, antes de que se mezclen.

Para el diseño volumétrico de mezclas, (Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese, 2004) establecieron que los agregados pétreos se pueden encontrar en cuatro estados de humedad:

- **Seco al horno (SH):** El material ha sido secado artificialmente a 110 °C, de tal manera que no hay agua en los poros del material.
- **Seco al aire (SA):** La superficie del agregado es seca, pero no lo son los poros internos del agregado. En esta condición, el agregado absorberá parte del agua de la mezcla.
- **Saturado Superficialmente Seco (SSS):** Es el estado de equilibrio teórico ideal. Todos los poros internos se llenan completamente de agua, quedando seca la superficie exterior. En este punto, el agregado no aporta ni extrae agua de la pasta de cemento.
- **Húmedo:** Los poros internos están saturados, y alrededor de la partícula existe una película de agua libre ("agua superficial") la cual aumentará la relación agua-cemento de la mezcla si no se descuenta del diseño.

Valerse de entender y medir el contenido de humedad real de los áridos en obra es el único mecanismo que permite al proyectista determinar la cantidad de "agua de compensación" (o agua a descontar). Este hecho es un factor de riesgo crítico en el uso de áridos reciclados dado que su alta porosidad los hace extremadamente susceptibles a la variabilidad climática con la exigencia de un riguroso control del contenido de humedad antes de ser introducidos en la hormigonera (Kosmatka, Kerkhoff, & Panarese, 2004).

Absorción de agua y resistencia en RCD

Los áridos reciclados pueden presentar valores de absorción entre el 5% y el 12%, en función de la calidad del origen, mientras que un árido natural típico tiene valores inferiores al 2%. Esos dos defectos microestructurales propios del proceso de reciclaje no son casuales: La porosidad del mortero adherido y las fisuras inducidas que se generan en la estructura del árido durante los procesos de trituración y molienda de los escombros, que actúan como redes capilares adicionales (Wang, Yu, & Li, 2020).

Esta condición obliga a implementar correcciones durante la dosificación. Si el árido se añade seco en la hormigonera, absorba agua de diseño que se utilizará para la hidratación del cemento nuevo, disminuyendo la trabajabilidad y la resistencia final. Por este motivo, se recomienda trabajar los áridos en estado Saturado Superficialmente Seco (SSS) (Wang, Yu, & Li, 2020).

Se encontró que la hidrofilia del árido tiene una evaluación directa con la limpieza que se imparte al árido, tanto a través de tratamientos químicos como mecánicos, los cuales debilitan y quitan la capa de mortero adherido y por tanto la capacidad de absorción de agua del árido, reduciendo entre 9% y 19%. Esto reafirma que la absorción es un defecto del proceso de reciclaje y que por lo tanto no es una característica del petróleo agregado, sino una contracción por secado aumentada y resistencia final del hormigón disminuida (Wang, Qian, Chen, & Xu, 2017).

5.4 Normativas y estándares

5.4.1 Granulometría de Agregados (ASTM C136 - INEN 696)

En el caso de una muestra seca y de masa conocida, se separa las partículas por tamaño, usando una serie de tamices en el orden de aberturas decreciente. Se determina la distribución de masa de partículas retenidas (curva granulométrica) en cada tamiz, expresada en porcentaje de la masa total y el módulo de finura (INEN, 2011).

El módulo de finura se calcula dividiendo la sumatoria de los porcentajes acumulados retenidos en la serie de tamices por 100, para ver si el material es apto o no. Se representa con la siguiente expresión:

$$MF = \frac{\Sigma\% \text{ Acumulados retenidos}}{100} \quad (5.1)$$

Donde:

MF = Módulo de Finura.

$\Sigma\%$ = Sumatoria de Porcentajes (%).

5.4.2 Resistencia a la Degradación “Abrasión” (ASTM C131 - INEN 860)

El ensayo mide la resistencia al desgaste del árido, mediante la máquina de “Los Ángeles”. Se coloca el árido dentro del tambor con una carga abrasiva (esferas de acero) dentro del mismo, el cual gira, y una pestaña interna eleva las esferas y se derriban en el árido, causándole impacto y trituración. Tras un número específico de revoluciones, se tamiza el material para cuantificar el porcentaje de pérdida de masa por degradación (INEN, 2011).

Tabla 6 Resistencia a la Degradación "Abrasión"

Gradación del Material	Tamaño Máximo Nominal	No. de Esferas de Acero	Peso de la carga Abrasiva (g)	Revoluciones Totales
A	37.5 mm (1 1/2")	12	5000 ± 25	500
B	19.0 mm (3/4")	11	4584 ± 25	500
C	9.5 mm (3/8")	8	3330 ± 20	500
D	4.75 mm (N.º 4)	6	2500 ± 15	500

Fuente: Norma ASTM C131 / (INEN, 2011)

El porcentaje de pérdida de masa por degradación se determina mediante la fórmula:

$$D = \frac{B-C}{B} \times 100 \quad (5.2)$$

Donde:

D = Degradación en porcentaje (%).

B = Masa inicial de la muestra sometida al ensayo (g).

C = Masa final de la muestra que queda retenida en el tamiz N.º 12 (1.70 mm) una vez terminado el ensayo y lavado el material (g).

5.4.3 Masa Unitaria o Peso Volumétrico (ASTM C29 - INEN 858)

Este método calculará el peso volumétrico del árido. Se introduce el material en un volumen conocido, que se compacte (varillado o sacudido) o no (dependiendo del

procedimiento), de tal forma que se tiene un volumen conocido. Se determina la masa unitaria y el porcentaje de porosidades entre las partículas, a partir de la masa neta del recipiente y el volumen del recipiente (INEN, 2010).

Tabla 7 Masa Unitaria de Agregados

Tipo de Agregado Pétreo	Estado de Compactación	Rango Típico de Masa Unitaria (kg/m³)
Árido Natural (Grueso)	Suelto	1350 - 1550
Árido Natural (Grueso)	Compactado	1450 - 1650
Árido Fino (Arena)	Suelto	1400 - 1600
Árido Fino (Arena)	Compactado	1500 - 1700
Árido Reciclado (RCD)	Compactado	1200 - 1450

Fuente: Parámetros de ensayo basados en ASTM C29 / (INEN, 2010)

El cálculo de la masa unitaria, ya sea en estado suelto o compactado, se obtiene relacionando el peso neto del material con el volumen del recipiente que lo contiene:

$$M = \frac{G-T}{V} \quad (5.3)$$

Donde:

M = Masa Unitaria (kg/m³).

G = Masa del agregado + masa del molde (kg).

T = Masa del molde vacío (kg).

V = Volumen del molde (m³).

Adicionalmente, el porcentaje de espacios vacíos entre las partículas se calcula mediante la siguiente relación:

$$\%V = \frac{(S \times W) - M}{S \times W} \times 100 \quad (5.4)$$

Donde:

%V = Porcentaje de vacíos (%).

S = Densidad relativa (gravedad específica) del agregado en estado seco (valor adimensional obtenido del ensayo de densidad y absorción).

W = Densidad del agua (kg/m^3).

M = Masa unitaria (suelta o compactada) del agregado (kg/m^3).

5.4.4 Densidad y Absorción (ASTM C128 - INEN 857)

Se mete un árido seco en agua por 24 ± 4 horas, se extrae y se transporta a una condición de "Saturado Superficialmente Seco". Se pesa en este estado y luego se calcula su volumen. Finalmente, se deshidrata la muestra en el horno. La diferencia de masa se utiliza para determinar la densidad relativa (gravedad específica) y el porcentaje de absorción de agua. (INEN, 2010)

Tabla 8 Densidad y Absorción

Tipo de Agregado	Densidad Relativa (Aparente) (g/cm^3)	Porcentaje de Absorción Típico (%)
Grava Natural (Trituración)	2.55 - 2.75	0.5% - 2.0%
Arena Natural (Lavada/Mina)	2.50 - 2.65	1.0% - 3.0%
Árido Reciclado de Hormigón	2.10 - 2.40	4.0% - 8.0%
Árido Reciclado Mixto (Cerámico)	1.80 - 2.20	9.0% - 15.0%

Fuente: Parámetros de ensayo basados en ASTM C127 y C128 / NTE INEN 857 y 856. Rangos típicos de comportamiento para RCD adaptados del Comité ACI 555R.

Para la determinación del Peso Específico del agregado grueso, se emplean las siguientes relaciones en función de su estado de humedad:

Peso específico seco al horno:

$$PE_{(SH)} = \frac{A}{B-C} \quad (5.5)$$

Peso específico saturado superficialmente seco:

$$PE_{(SSS)} = \frac{B}{B-C} \quad (5.6)$$

Peso específico aparente:

$$PE_{(AP)} = \frac{A}{A-C} \quad (5.7)$$

Donde:

A = Masa de la muestra seca al horno (g).

B = Masa de la muestra en estado Saturado Superficialmente Seco (SSS) (g).

C = Masa de la muestra sumergida en agua (g).

Absorción:

Por su parte, la capacidad de absorción, que representa el porcentaje de agua necesaria para llenar los vacíos internos del agregado, se calcula como:

$$\%Abs = \frac{S-A}{A} \times 100 \quad (5.8)$$

Donde:

%Abs = Capacidad de absorción (%).

S = Masa de la muestra en estado SSS (g).

A = Masa de la muestra seca al horno (g).

5.4.5 Contenido de Humedad (ASTM C566 – INEN 862)

La absorción intrínseca de un material y la humedad a la que se encuentra en el momento del mezclado es de vital importancia en la tecnología del hormigón. El contenido de humedad puede calcularse en base a la cantidad total de agua (interna y externa) que el agregado pétreo tiene justo antes de ser introducido en la hormigonera (Chango Pilla, 2021).

El control de este parámetro toma una importancia crítica en el diseño en el caso específico de los reciclables (RCD). Dada la alta porosidad y grietas que se encuentran en el mortero viejo adherido a la roca original, estos materiales tienen una alta capacidad para absorber o liberar agua con el mortero nuevo. Si no se cuantifica exactamente esta humedad inicial, el escombros se comportará como una "esponja", absorbiendo el agua libre que se va a emplear para la hidratación de la pasta de cemento. Esto influirá adversamente en la proporción agua/cemento, que es la que se efectúa en la práctica, dañando considerablemente la trabajabilidad en estado fresco y afectando a la resistencia mecánica de la masa endurecida (de Andrade Salgado & de Andrade Silva, 2022).

Normalmente, la humedad del agregado se registra pesando una muestra representativa en su estado natural (húmedo) y luego secándola en un horno a 110°C por 24 horas hasta que se alcance la masa constante, cuando se pesa el agregado seco (Chango Pilla, 2021).

A partir de esta diferencia de masas, el porcentaje de humedad se calcula de la siguiente manera:

$$\%w = \frac{W_h - W_d}{W_d} \times 100 \quad (5.9)$$

Donde:

%w = Contenido de humedad

W_h = Peso natural (kg).

W_d = Peso seco (kg).

Con esta información numérica, el diseñador puede entonces usar con seguridad el agua de compensación requerida en la dosificación, asegurando que el hormigón no desflore, mientras todavía cumple con los fluidez proyectada y calidad final (Bai, Zhu, Liu, & Liu, 2020).

5.4.6 Resistencia a la Compresión (ASTM C39 - INEN 1573)

Consiste en aplicar una carga axial de compresión a probetas de hormigón a una carga y velocidad constante hasta que ocurra la falla del mismo. El valor de la resistividad a la compresión de una probeta de hormigón se determina dividiendo la carga máxima registrada en el ensayo por el área de la sección transversal de la probeta (INEN, 2010).

Tabla 9 Resistencia a la Compresión

Resistencia a la Compresión (f'c)	Resistencia (PSI)	Relación a/c Máxima (Sin inclusor de aire)	Relación a/c Máxima (Con inclusor de aire)
150 kg/cm²	2150	0.80	0.71
175 kg/cm²	2500	0.65	0.56
210 kg/cm²	3000	0.58	0.50
245 kg/cm²	3500	0.52	0.46
280 kg/cm²	4000	0.47	0.42
315 kg/cm²	4500	0.43	0.38
350 kg/cm²	5000	0.40	0.35

Fuente: Comité ACI 211.1

5.4.7 Resistencia a la Flexión (ASTM C78 – INEN 1574)

Consiste en aplicar una carga axial de compresión a una probeta de hormigón (viga) de forma continua y velocidad constante en los tercios de su luz libre hasta su rotura. La resistencia a la flexión del hormigón, o "módulo de rotura", es el resultado de dividir la carga máxima obtenida en el ensayo por la distancia entre los apoyos y las dimensiones del hormigón en el ensayo en el punto de falla, entre el ancho y el alto de la viga (INEN, 2012).

Tabla 10 Resistencia a la Flexión

Resistencia a Compresión (f'_c)	Módulo de Rotura Estimado (f_r) en kg/cm^2	Módulo de Rotura Estimado (f_r) en MPa
180 kg/cm^2 (18 MPa)	26.8 - 29.5	2.6 - 2.9
210 kg/cm^2 (21 MPa)	29.0 - 32.0	2.8 - 3.1
250 kg/cm^2 (25 MPa)	31.6 - 35.0	3.1 - 3.4
280 kg/cm^2 (28 MPa)	33.5 - 37.0	3.3 - 3.6

Fuente: Fórmulas empíricas del Reglamento ACI 318 para hormigón estructural

5.4.8 Asentamiento o Revenimiento (ASTM C143 - INEN 1578)

Ensayo para determinar la consistencia del hormigón fresco. La muestra se coloca en tres capas con 25 golpes de varilla en cada capa dentro del Cono de Abrams. Cuando se retira el molde, el hormigón fluye hacia abajo debido a la gravedad. La diferencia entre la altura del molde y la altura del hormigón asentado es el valor del revenimiento (INEN, 2010).

Tabla 11 Asentamiento o Revenimiento

Tipo de Consistencia	Asentamiento (cm)	Tolerancia (cm)	Intervalo Resultante (cm)	Aplicación Típica
Seca (S)	0 - 2	0	0 - 2	Pavimentos vibrados con rodillo
Plástica (P)	3 - 5	± 1	2 - 6	Zapatas, aceras y pavimentos manuales
Blanda (B)	6 - 9	± 1	5 - 10	Vigas, muros y losas reforzadas
Fluida (F)	10 - 15	± 2	8 - 17	Secciones estrechas o bombeo
Líquida (L)	16 - 20	± 2	14 - 22	Hormigón autocompactante

Fuente: Comité ACI 211.1

5.5 Normativas europeas relacionadas a los RCD

5.5.1 Norma EN 12620:2013 (*Especificaciones de Áridos*)

Esta es la norma madre que integra bajo un mismo estándar de calidad, a los áridos naturales y reciclados. Su filosofía no es "prohibir", sino clasificar meticulosamente para asegurar la seguridad a largo plazo. La norma se enfoca en la heterogeneidad de los RCD con tres pilares.

La **EN 12620** se complementa con la **EN 206**, que establece los requisitos de la fabricación del hormigón. Juntas forman un sistema de filtro de calidad. La norma establece un grado de pureza del material, que debería ser alto, normalmente un mínimo del 90% de hormigón y piedra y un máximo del 10% de impurezas cerámicas, para que el material sea técnicamente clasificado como Árido Reciclado de Hormigón (Comité Europeo de Normalización, 2016).

5.5.2 Código Estructural de España (*Real Decreto 470/2021*)

El Código Estructural, que fue aprobado con el Real Decreto 470/2021, es el marco normativo rector en España que establece los criterios para integrar la sostenibilidad en los edificios civiles. La normativa sobre materiales pétreos se concentra en el Artículo 30 ("Áridos") que fundamenta la normativa legal y técnica que asegura que los agregados poseen las propiedades que permitan obtener la resistencia y durabilidad requerida del hormigón.

De acuerdo con las generalidades de la norma (Art.30.1) se tienen los fundamentos de la calidad:

1. **Armonización Europea:** Todos los áridos, naturales o reciclados, deben contar con el marcado CE (Conformidad Europea) y satisfacer rigurosamente las propiedades establecidas en la normativa UNE-EN 12620.
2. **Integridad Física y Química:** La ley prohíbe usar áridos que se puedan descomponer por influencia de agentes externos, es decir, rocas blandas, friables o porosas, y rocas con nódulos de yeso y sulfuros oxidables que afecten la matriz cementicia.

Condicionantes Técnicos para Áridos Reciclados (Artículo 30.8 y Anejo 15)

El Código Estructural solo incluye en la definición de "árido reciclado" a los residuos de hormigón que provienen del machaqueo. El Artículo 30.8 y el Anejo 15 establecen un riguroso control para asegurar la fiabilidad estructural que prohíbe expresamente la utilización de la fracción fina reciclada, áridos de naturaleza asfáltica o cerámica, y los provenientes de las estructuras en las que existan patologías previas.

- **Restricciones de Uso y Resistencia:** Queda expresamente prohibido el empleo de áridos reciclados en elementos de hormigón pretensado. Para el uso de agregado reciclado deberá ser excluido para elementos de hormigón pretensado. Su aplicación está reservada para hormigón en masa y/o armado con una característica de resistencia ($f'c$) no superior a 40 N/mm².
- **Umbral Práctico del 20%:** La norma restringe la sustitución a un 20% del peso total del árido grueso, en aplicaciones estructurales. Para superar este porcentaje, es necesario realizar investigaciones experimentales específicas, y realizar modificaciones rigurosas de dosificación para compensar la reducción de propiedades mecánicas.
- **Exigencias Físico-Mecánicas Rigurosas:** El Código actual es diferente de los códigos anteriores en que establece límites numéricos exactos de calidad del material. El árido grueso reciclado no debe tener una absorción mayor del 7% y el árido natural con que se mezclen no debe superar el 4,5%. Además, la resistencia del árido reciclado (Coeficiente de Los Ángeles) se limita al 40%.

Control de Pureza y Requisitos de Composición

El saneamiento del escombros es una prioridad normativa, debido a la heterogeneidad de los Residuos de Construcción y Demolición (RCD). El Artículo 30.8.4 establece que la pureza de los componentes del árido grueso reciclado es altísima, con un límite muy restrictivo en la cantidad de contaminantes ligeros, arcillas, metales o plásticos que puedan provocar reacciones dañinas (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021).

Tabla 12: Requisitos de composición del árido grueso reciclado

Elemento	Categoría	Límite
Hormigón, mortero, material pétreo	$R_{cu} 95$	$\geq 95\%$
Partículas ligeras	FL_{2-}	$\leq 2\%$
Materiales bituminosos	Ra_{1-}	$\leq 1\%$
Otros materiales (arcilla, vidrio, plásticos, metales, etc.)	$XRg_{0.5-}$	$\leq 0,5\%$

Fuente: Boletín Oficial del Estado, Gobierno de España

Rigurosidad en la Frecuencia de Ensayos (Anejo 15)

Finalmente, el Anejo 15 establece un riguroso protocolo de control de producción, para certificar que estas propiedades requeridas en el Artículo 30 se mantienen constantes en el tiempo. Las plantas productoras y los laboratorios de control tienen que realizar un plan de pruebas que se tiene que repetir obligatoriamente, destacando las vulnerabilidades propias del material reciclado (Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 2021).

Tabla 13: Frecuencia de ensayos de control de producción para áridos reciclados

Propiedad	Norma	Frecuencia (tiempo)	Frecuencia (toneladas)
Granulometría. Desclasificados inferiores	UNE-EN 933-1	1/semana	Cada 2000
Coeficiente de forma	UNE-EN 933 -4	1/mes	Cada 10000
Contenido de finos	UNE-EN 933-2	1/semana	Cada 2000

Propiedad	Norma	Frecuencia (tiempo)	Frecuencia (toneladas)
Coeficiente de los Ángeles	UNE-EN 1097-2	1/mes	Cada 2000
Absorción	UNE-EN 1097-6	1/semana	Cada 2000
Estabilidad frente a soluciones de MgSO4(*)	UNE-EN 1367-2	1 / 6 meses	Cada 10000
Terrones de arcilla	UNE 7133	1/semana	Cada 2000
Partículas ligeras	UNE 7244	1/ mes	Cada 10000
Determinación de compuestos de azufre (SO3)	UNE-EN 1744-1	1 / 3 mes	Cada 10000
Determinación de sulfatos solubles en ácido	UNE-EN 1744-1	1 / 3 mes	Cada 10000
Determinación de cloruros totales	UNE-EN 1744-1	1 / 3 mes	Cada 10000
Impurezas	UNE-EN 933-11	1/semana	Cada 2000

Fuente: Anejo 15 Recomendaciones para la utilización de hormigones reciclados

Significado y Alcance de las Normas UNE-EN:

- **EN (Norma Europea):** Se refiere a la Norma que ha sido elaborada, consensuada y aprobada por el Comité Europeo de Normalización (CEN), que unifica un nivel de calidad a escala de la Unión Europea.
- **UNE (Una Norma Española):** Significa que dicho estándar europeo ha sido adoptado, traducido y ratificado oficialmente por la Asociación Española de

Normalización, convirtiéndose en el documento técnico oficial dentro del territorio español.

Por tanto, si en el Código Estructural se requiere que se cumpla una norma UNE-EN (por ejemplo: UNE-EN 12620: Áridos), se asegura la armonización técnica. Con ello la confiabilidad y seguridad estructural y los ensayos, los límites de impureza y los criterios de aceptación del material son exactamente los mismos en España que en toda Europa (Asociación Española de Normalización, 2024).

5.6 Antecedentes e influencia de los áridos reciclados

5.6.1 Comportamiento en Estado Fresco

El árido reciclado no es una roca monolítica, sino que es un sistema compuesto, que los investigadores plantearon como una “esponja” en el interior, ya que el árido reciclado se adhiere a la roca original por los huecos de la porosidad del mortero antiguo. Si no se compensa con la pre saturación del árido o con aditivos plastificantes, la consistencia de la mezcla de diseño se desvanece rápidamente (Gómez-Soberón, 2002).

Los autores informan de disminuciones alrededor del 12% en el peso unitario del hormigón fresco para sustituciones totales. Esta es directamente causada por la menor gravedad específica del AR a la natural (Ceballos-Medina, González-Rincón, & Sánchez, 2021).

Trabajabilidad

La trabajabilidad es el trabajo energético necesario para transportar, colocar, compactar y terminar la mezcla en su estado fresco. Esta propiedad se asocia con la cohesión y con el roce entre las partículas que se encuentran en suspensión en el agua del amasado. En mezclas preparadas con áridos reciclados, si no se toma de precaución, tendrán tendencia a disminuir en su trabajabilidad. Esto se da, ya que la rugosidad y porosidad de la superficie del RCD incrementa la fricción interna y roba el agua libre de la pasta, haciendo que nuevamente vuelvan a ser más rugosas y porosas en la matriz, y se

requiere una contra compensación rigurosa de agua o aditivo para mantener la fluidez en el diseño.

Homogeneidad

Es la propiedad que garantiza que los componentes del hormigón se mantengan distribuidos de manera uniforme. Una mezcla es homogénea cuando presenta ausencia de segregación (que no exista separación entre la grava y la pasta cementícea) conservando su cohesión durante las etapas de transporte, colocación y compactación (Jiménez Ramos, 2020); Dicho esto, al incorporar RCD, es fundamental asegurar que exista un esqueleto de finos adecuado (homogeneización de arena de mar / arena lavada) que permita lubricar y suspender las partículas de escombros.

Proceso de Fraguado

El fraguado es un conjunto de reacciones químicas y físicas que promueven la transición del cemento del estado líquido a sólido, por medio de la cual el cemento pasa de ser plástico a ser sólido (Jiménez Ramos, 2020).

En el hormigón convencional, este "tiempo abierto" está gobernado por la relación agua/cemento y el clima. Sin embargo, en el hormigón con AR, el contenido de humedad del RCD es un factor clave. Si el árido reciclado se añade seco a la mezcladora, el agua de hidratación se absorberá demasiado pronto, provocando el desarrollo temprano de rigidez o una rápida pérdida de plasticidad, lo que reducirá significativamente la cantidad de tiempo permitido para las operaciones de fundición y acabado.

5.6.2 Desempeño Mecánico en Estado Endurecido

Este fenómeno está asociado con la creación de una Zona de Transición Interfacial (ITZ) menos resistente. La adherencia del "mortero viejo" hace que actúe en el sistema como el "eslabón más débil" que permite la propagación de micro fisuras bajo carga (Etxeberria, Vázquez, Marí, & Barra, 2007).

Estudios recientes han resaltado que este desempeño es un factor que depende de la relación agua/cemento; con un diseño de mezcla cuidadoso, las pérdidas de resistencia se pueden reducir a niveles aceptables (Balla Pillajo & Yupa Apaja, 2023).

Compacidad y Densidad

La compacidad es la relación matemática entre el volumen real de los sólidos y el volumen total del sistema de hormigón; es el recíproco directo de la porosidad total del sistema. (Neville, 2011) dice que las propiedades mecánicas y la durabilidad del concreto endurecido dependen del nivel de compacidad que alcanza durante las fases de consolidación y curado. Una matriz con gran compacidad, minimiza, en gran medida, el espacio de vacíos y los poros capilares que no pueden transmitir esfuerzos de compresión en forma uniforme. La incorporación de áridos reciclados de RCD puede provocar una disminución de la compacidad del sistema, ya que el mortero viejo tiene una característica porosa. Este reto estructural requiere un control estricto en el alojamiento de las fracciones granulares y una compactación mecánica óptima, en el laboratorio, que reduzca la pérdida de densidad.

Dureza y Resistencia al Desgaste Superficial

La resistencia a degradación física, rayado, abrasión mecánica localizada en la superficie del hormigón endurecido, es la característica principal de la dureza en la ciencia de los materiales cementíceos. Como dicen (Mehta & Monteiro, 2014), la dureza superficial de la mezcla no se trata de una propiedad homogénea, sino de la interacción mecánica que se produce entre la dureza intrínseca de la roca madre del agregado y la resistencia de la pasta de cemento que confina el esqueleto granular. En el caso de los elementos no estructurales proyectados en el presente estudio (aceras y bordillos en la ciudad de Manta), la dureza es un parámetro de servicio crítico, ya que se exponen directamente al rozamiento peatonal y a la acción del medio ambiente en la costa. Considerando que las partículas de RCD tienen zonas frágiles por el mortero residual, es imperativo consolidar la pasta nueva, con un alto grado de densidad, evitando así el desgaste prematuro de la superficie.

Tabla 14 Factores que pueden producir deterioro en el hormigón

Clasificación	Patologías que presenta
Físicas	Diferencias térmicas, fuego, humedad, ambientes secos, desgaste
Químicas	Contaminación atmosférica, Filtración de agua, carbonatación.
Mecánicas	Golpes, vibraciones, cargas.
Biológicas	Proliferación de Vegetación, hongos, moho.

Fuente: Adaptado de (Jiménez Ramos, 2020)

5.6.3 Viabilidad técnica

La normativa internacional y el Código Estructural establecido en el Real Decreto 470/2021 permiten el uso de áridos reciclados de manera técnica. Esto significa que se pueden reemplazar hasta el 100% de la fracción gruesa en hormigones que no son estructurales o que se utilizan para limpieza. La idea es que un hormigón reciclado de 20 MPa es tan útil como uno convencional para estos fines.

El hormigón reciclado ofrece una calidad de servicio adecuada. Aunque no es tan resistente como un hormigón de alta calidad, es más que suficiente para obras de urbanismo. Esto tiene ventajas importantes en cuanto a costos y también ayuda a reducir el impacto ambiental (Chumi Paredes & Gualpa Llivicura, 2024).

5.7 Elementos de Aplicación para el Hormigón Reciclado

5.7.1 Bordillos (Confinamiento Vial)

El bordillo es un elemento de contención lateral. Se define según las Normas de Diseño Geométrico para Carreteras del MTOP como "una estructura lineal que divide a la calzada de la acera, cumple una función dual de ingeniería: la de contener al paquete estructural del pavimento, ya que el bordillo previene el movimiento lateral de la carpeta asfáltica, y la de drenaje de la superficie de rodamiento. En el primer caso sirve como retenedor de la capa de superficie asfáltica; en el segundo caso, como una cuneta para las aguas pluviales a los sistemas de drenaje" (Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP), 2003).

5.7.2 Aceras (*Movilidad Peatonal*)

La acera se considera parte del sistema básico en el proceso de movilidad urbana. Se define como la estructura de la vía pública destinada exclusivamente al uso peatonal según la norma NTE INEN 2306. La acera no requiere gran resistencia, pero sí una alta resistencia al desgaste y una superficie antideslizante (INEN, 2009). En el desarrollo de proyectos modernos, se recomienda el uso de otros materiales en estos lugares debido a la menor carga de servicio, lo que representa amplios márgenes de seguridad, en relación con la resistencia portante de los materiales para el uso de hormigón con agregado reciclado (American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), 2018).

5.7.3 Contrapisos (*Nivelación y Soporte*)

En la construcción, el contrapiso es la capa intermedia entre el terreno natural y el acabado final. El comité ACI 302 lo define como una losa de hormigón simple (generalmente de 5 a 10 cm de espesor) sin carácter estructural, cuya función es aislar y crear una base nivelada para la aplicación de cualquier acabado (baldosas cerámicas, pisos de madera, entre otros). Esto protege el piso terminado de la humedad y la humedad por capilaridad (ACI Committee 302, 2015).

5.7.4 Muros de Hormigón Ciclópeo

El hormigón ciclópeo es un tipo de hormigón en masa. En este tipo de hormigón, se incorporan grandes bloques de piedra natural, llamados mampuestos, que pesan como mínimo 50 kg cada uno. Estos bloques se agregan a la mezcla cementícea mientras se deposita. El hormigón ciclópeo no tiene armadura metálica. Su resistencia y estabilidad dependen solo de su peso. La gran cantidad de roca que se utiliza, que ocupa entre el 30% y el 40% del elemento, reduce la cantidad de pasta de cemento necesaria.

Por lo tanto, el hormigón ciclópeo es ideal para obras grandes que soportan mucho peso, como muros de contención, cimientos corridos y bases de nivelación. En estas obras, el hormigón ciclópeo es muy útil porque trabaja bien con compresión (Sánchez de Guzmán, 2011).

5.8 Gestión actual en Manta

Después del terremoto de Pedernales de 2016, los residuos de construcción y demolición (RCD) son visibles en algunos puntos estratégicos de la ciudad, especialmente en el vertedero de San Juan. Han pasado los años y el manejo de estos residuos sigue siendo tan sencillo como siempre: demoler y desechar. Este proceso ya existía incluso antes del terremoto (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Manta (GAD Manta), 2022).

6. CAPÍTULO II: MARCO METODOLÓGICO

6.1 Modalidad Básica de la Investigación

En este contexto, se intenta abordar el problema mediante la generación de datos cuantitativos y específicos, resultado del uso riguroso de normas y métodos desarrollados en laboratorio. Así, el carácter experimental se evidencia en la manipulación deliberada y planificada de la composición de las mezclas: sustitución del árido natural por material reciclado (en proporciones o porcentajes). Finalmente, el carácter comparativo es crucial para evaluar la viabilidad de la solución propuesta: además de analizar las mezclas con agregados reciclados en sí mismas, analizar si se comparan con las obtenidas a partir de un hormigón tradicional.

6.1.1 Método de Dosificación

Para este “hormigón estándar” y sus subsiguientes diseños de mezcla, se proponen varios métodos de cálculo por volumen, que en su mayoría se pueden dividir en “métodos racionales y empíricos” (Jiménez Ramos, 2020). Para llevar a cabo el desarrollo de este estudio, se descartó la utilización de métodos racionales o densidad óptima (UCE), optando por seguir el método empírico del comité ACI 211.1, razón por la cual dicho comité permite mayores posibilidades matemáticas para determinar el agua de compensación necesaria en casos particulares con materiales absorbentes, como es el caso de los áridos reciclados (RCD).

6.2 Porcentajes de sustitución

Tabla 15: Sustitución de árido grueso natural por reciclado considerando ≥ 18 MPa

% Árido reciclado	Resultados esperados
20%	Referencia conservadora
30%	Óptimo técnico esperado
40%	Límite superior seguro
50%	Caída de resistencia (riesgo)

6.3 Diseño del Plan Experimental

Para corroborar experimentalmente los resultados previstos en la **Tabla 15**, que abarcan desde un valor conservador del 20% hasta un umbral de riesgo del 50%, se diseñó una campaña de ensayos para verificar el comportamiento mecánico de la mezcla de concreto durante su curado. En total, se producirán cuarenta y cuatro probetas para esta investigación.

6.3.1 Matriz de Especímenes y Ensayos

Las probetas se clasificaron según el tipo de carga a la que serán ensayadas para obtener su resistencia a la compresión y su módulo de rotura:

- **Probetas para Ensayo a Compresión:**

Se fabricarán **40 probetas de hormigón estándar de 10x20 cm**. Para cada uno de los cuatro porcentajes de sustitución de árido reciclado (RCD) (20%, 30%, 40% y 50%), se asignarán 10 cilindros. Esta distribución permite ensayar 2 probetas por cada edad de rotura programada (3, 7, 14, 21 y 28 días). Ensayar dos cilindros garantiza la obtención de un valor promedio confiable que brindará la curva de evolución de la resistencia ($f'c$) durante el primer mes de curado del hormigón.

- **Vigas para Ensayo a Flexión:**

Para evaluar el módulo de rotura, se fabricarán **4 vigas** con dimensiones del cajón estándar de **15x15x50 cm**. Se elaborará una viga por cada porcentaje de sustitución,

las cuales serán ensayadas a los 28 días para determinar cómo actúa la adición del árido reciclado (RCD) frente a la resistencia a la tracción.

Relación típica de rotura:

$$f_r \approx 0.62 \sqrt{f'_c} \quad (6.1)$$

Donde:

f_r = Módulo de Rotura (Mpa).

f'_c = Resistencia a la Compresión del Hormigón (Mpa).

Para el caso de 21MPa:

$$f_r \approx 0.62 \sqrt{21} \approx 2.84 \text{ MPa}$$

Para el caso de 18MPa:

$$f_r \approx 0.62 \sqrt{18} \approx 2.63 \text{ MPa}$$

El módulo de rotura **mínimo** para aceras según el ACI va entre **2.8 a 3.2 MPa**, lo que significa que en caso de usar un determinado porcentaje de sustitución y alcanza un valor superior a 2.8 MPa, será apto para aceras peatonales.

Tabla 16: Distribución de especímenes por porcentaje de sustitución

% de Árido Reciclado	Cilindros a Compresión (10x20 cm)	Vigas a Flexión (15x15x50 cm)	Edades de ensayo (días)
20%	10 probetas (2 por edad)	1 viga	3, 7, 14, 21 y 28
30%	10 probetas (2 por edad)	1 viga	3, 7, 14, 21 y 28
40%	10 probetas (2 por edad)	1 viga	3, 7, 14, 21 y 28
50%	10 probetas (2 por edad)	1 viga	3, 7, 14, 21 y 28
Total	40 probetas	4 vigas	-

6.3.2 Requerimiento de Materiales

Para cubrir el volumen de mezcla necesario para la elaboración de las 44 probetas (tomando en cuenta los desperdicios de la mezcla y moldeado), el diseño de esta investigación requiere de las siguientes materias primas:

- **Cemento:** 1 saco de cemento hidráulico (50 kg).
- **Áridos Finos:** 1 saco de arena fina lavada (40 kg) y 2 sacos de arena para hormigón (50 kg).
- **Áridos Gruesos Naturales:** 2 sacos de ripio natural, que servirán como esqueleto granular base (50 kg).
- **Áridos Gruesos Reciclados:** 1 saco de árido reciclado (RCD), previamente clasificado y limpio, destinado a las sustituciones progresivas del agregado grueso (50 kg aproximadamente).

7. CAPÍTULO III: RECURSOS Y PRESUPUESTO

7.1 Recursos Humanos

Tabla 17: Recursos humanos

Nombres	Cargo	Aporte al proyecto
Arboleda Briones Daniel Alexander	Estudiante	Elaboración del proyecto de titulación
Ing. Alexi Oscar Morán Guzmán, Mg	Tutor	Académico

7.2 Recursos Tecnológicos

Tabla 18: Recursos tecnológicos

Software	Área	Facultad
Microsoft Excel	Herramienta Office	Ingeniería, Industria y Arquitectura
Microsoft Word	Herramienta Office	Ingeniería, Industria y Arquitectura
Microsoft PowerPoint	Herramienta Office	Ingeniería, Industria y Arquitectura

7.3 Recursos Materiales

Tabla 19: Recursos materiales

Descripción	Función/Uso
Computador	Recopilar y analizar datos
Libros y artículos	Recopilar información
Prensa de compresión	Ensayos destructivos de laboratorio
Máquina “Los Ángeles”	Ensayos destructivos de laboratorio
Tamices	Ensayos no destructivos de laboratorios
Cono de Abrams	Ensayos no destructivos de laboratorios

7.4 Presupuesto

Tabla 20: Presupuesto

Descripción	Unidad	Precio Unitario	Cantidad	Costo Final
Cemento Holcim	kg	8.34	1	8.34
Arena fina lavada	kg	1.29	1	1.29
Arena para hormigón	kg	1.62	2	3.24
Ripio ½”	kg	1.29	2	2.58

8. CAPÍTULO IV: PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS DE LABORATORIO

8.1 Caracterización Granulométrica del Árido Fino (Arena para Hormigón)

Para constituir el armazón granular fino del diseño de mezcla, se utilizó al principio un material comercial denominado "Arena para Hormigón", originario de la cantera Megarok. Este agregado se define como una combinación de arena triturada y arena natural limpia. En la **Tabla 21** se especifican los valores del análisis granulométrico de esta arena:

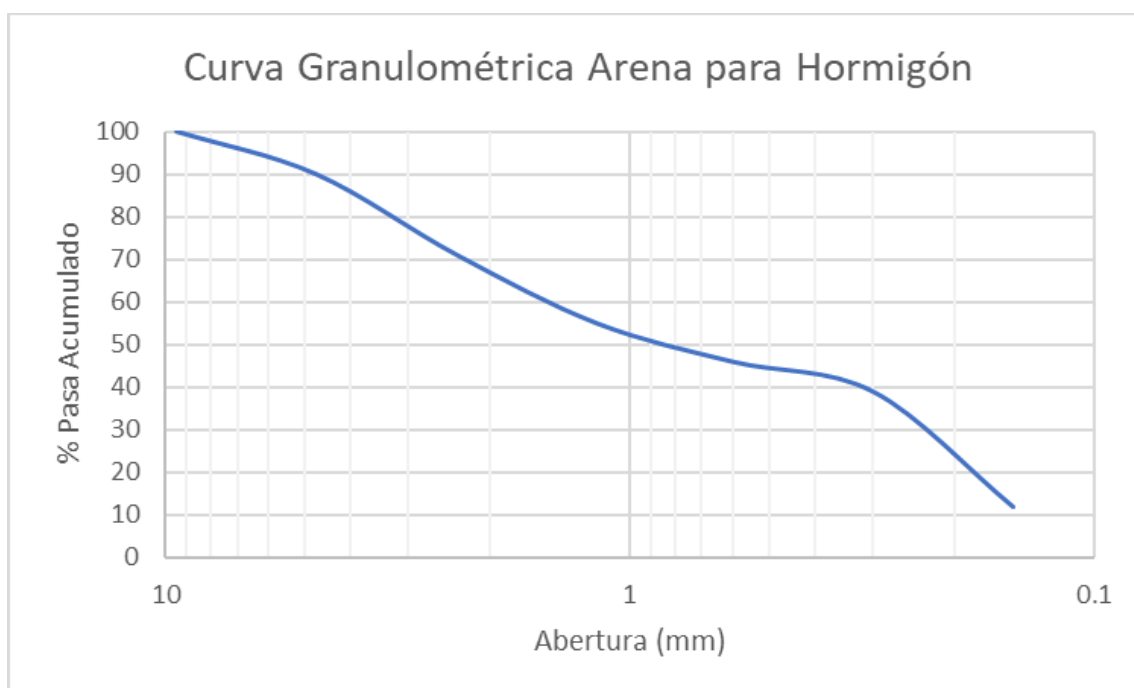
Tabla 21 Análisis granulométrico de Arena para Hormigón

Tamiz INEN	Tamiz ASTM	Retenido Parcial (g)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasa Acumulado (%)
9.50 mm	3/8 in.	0.0	0	0	100
4.75 mm	No. 4	96.8	10	10	90
2.36 mm	No. 8	193.4	19	29	71
1.18 mm	No. 16	159.6	16	45	55
600 µm	No. 30	92.6	9	54	46
300 µm	No. 50	77.8	8	61	39
150 µm	No. 100	272.0	27	88	12
Bandeja		117.3	12	100	0

Una vez obtenidos los datos granulométricos, se procedió a calcular el Módulo de Finura del material:

$$MF = \frac{10 + 29 + 45 + 54 + 61 + 88}{100} = 2.87$$

Figura 2 Curva Granulométrica de Arena para Hormigón



8.2 Caracterización Granulométrica del Árido Fino (Arena Fina Lavada)

Al ver la textura rugosa y gruesa de la arena de trituración, se notó que se necesitaba añadir un árido fino para que la mezcla quede bien y tenga un buen acabado. También se quiso disminuir la fricción interna que causaba la textura de los áridos reciclados. Para esto, se eligió una arena lavada de grano fino que es de origen natural, arena de mar lavada.

Tabla 22 Análisis granulométrico de Arena Fina Lavada

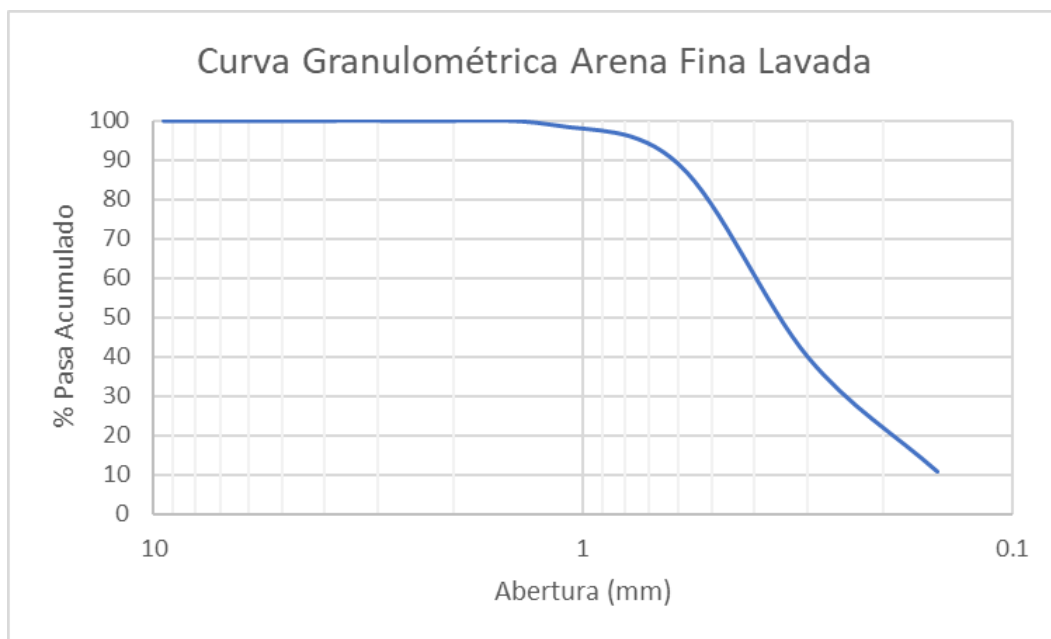
Tamiz INEN	Tamiz ASTM	Retenido Parcial (g)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasa Acumulado (%)
9.50 mm	3/8 in.	0.0	0	0	100
4.75 mm	No. 4	0.0	0	0	100
2.36 mm	No. 8	0.0	0	0	100
1.18 mm	No. 16	10.0	1	1	99
600 µm	No. 30	100.0	10	11	89
300 µm	No. 50	490.0	49	60	40
150 µm	No. 100	290.0	29	89	11
Bandeja		110.0	11	100	0

Una vez obtenidos los datos granulométricos, se procedió a calcular el Módulo de Finura del material:

$$MF = \frac{0 + 0 + 1 + 11 + 60 + 89}{100} = 1.61$$

La adición de este árido trajo el porcentaje de finos que faltaban en las mallas número 30, número 50 y número 100. Esto permitió crear un esqueleto granular continuo cuando se mezcló con la arena de trituración.

Figura 3 Curva Granulométrica de Arena Fina Lavada



8.2.1 Obtención del Módulo de Finura

Para comprobar si la mezcla era óptima, calculamos el Módulo de Finura combinado (MF_{comb}). Este parámetro se encuentra con la media ponderada de los módulos de finura individuales de los agregados, en función de su porcentaje de participación, 80% de arena para hormigón y 20% de arena fina lavada, utilizando la siguiente ecuación:

$$MF_{comb} = (MF_{AH} \times P_{AH}) + (MF_{AF} \times P_{AF}) \quad (8.1)$$

Donde:

MF_{comb} = Módulo de finura combinado

MF_{AH} = Módulo de finura de la arena de trituración para hormigón.

P_{AH} = Proporción de la arena de trituración en la mezcla.

MF_{AF} = Módulo de finura de la arena fina lavada.

P_{AF} = Proporción de la arena fina lavada en la mezcla.

$$MF_{combinado} = (2.86 \times 0.80) + (1.61 \times 0.20) = \mathbf{2.61}$$

8.3 Caracterización Granulométrica del Árido Grueso (Ripio ½")

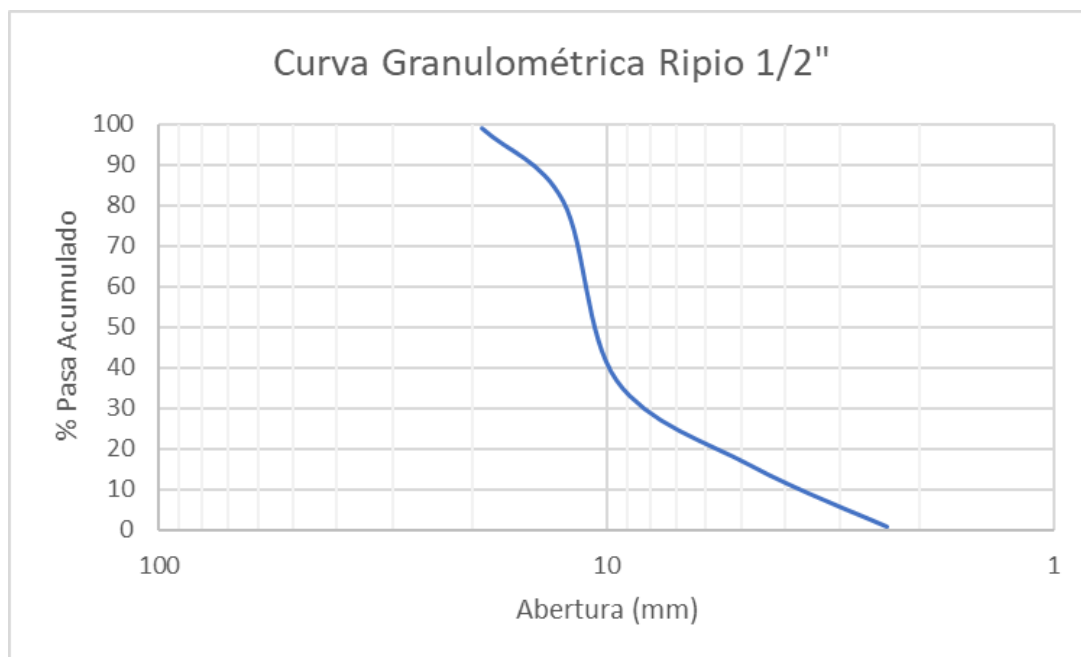
Para conformar la fracción gruesa del esqueleto granular en las mezclas de hormigón, se utilizó ripio de ½", comercialmente catalogado como Piedra #6. De acuerdo con la información técnica suministrada por la cantera Megarok, este agregado es producto de la trituración y cribado mecánico de roca basáltica.

Tabla 23 Análisis granulométrico de Ripio 1/2 "

Tamiz INEN	Tamiz ASTM	Retenido Parcial (g)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasa Acumulado (%)
19.0 mm	3/4 in.	82.7	1	1	99
12.5 mm	1/2 in.	1749.5	18	19	81
9.50 mm	3/8 in.	4233.8	44	63	37
4.75 mm	No. 4	2000.0	21	84	16
2.36 mm	No. 8	1440.6	15	99	1
Bandeja		149.8	1.6	100	0

Una vez obtenidos los datos de la granulometría, se grafica la curva granulométrica:

Figura 4 Curva Granulométrica de Ripio 1/2"



8.4 Procesamiento y Caracterización Granulométrica del Árido Grueso Reciclado

En la ciudad de Manta se obtuvo árido grueso reciclado a partir de residuos de construcción de hormigón. Los escombros de hormigón se procesaron mediante limpieza mecánica y trituración para simular un proceso industrial y alcanzar el comportamiento y la granulometría de un material natural. Durante el proceso de trituración mecánica, los fragmentos de cemento antiguo presentes en el árido sufrieron fricción e impacto, eliminando así sus zonas débiles.

Posteriormente, se obtuvo un material con una superficie de textura irregular.

Después, se procesó una muestra de 5000 gramos mediante tamizado para determinar su tamaño según las normas ASTM C136 e INEN 696, ya que debía coincidir con el de una grava normal de tamaño máximo nominal de 1/2 pulgada. Los datos recopilados se muestran en la **Tabla 24**.

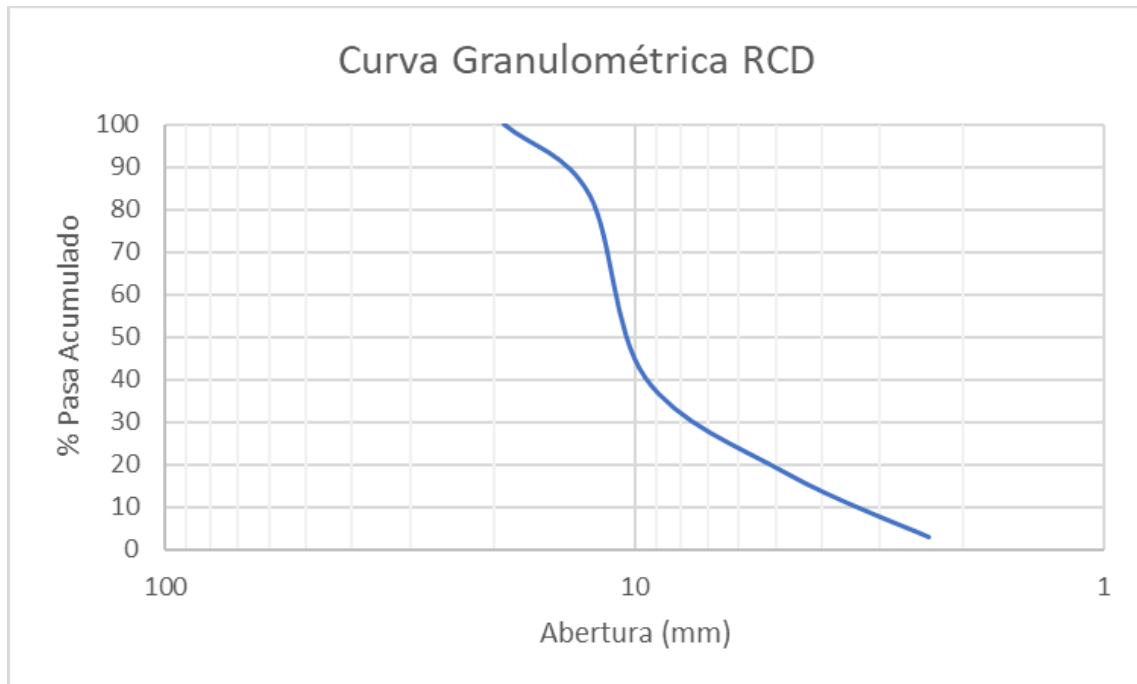
Tabla 24 Análisis granulométrico de RCD

Tamiz INEN	Tamiz ASTM	Retenido Parcial (g)	Retenido Parcial (%)	Retenido Acumulado (%)	Pasa Acumulado (%)
19.0 mm	3/4 in.	0.0	0.0	0.0	100.0
12.5 mm	1/2 in.	825.0	16.5	16.5	83.5
9.50 mm	3/8 in.	2150.0	43.0	59.5	40.5
4.75 mm	No. 4	1125.0	22.5	82.0	18.0
2.36 mm	No. 8	750.0	15.0	97.0	3.0
Bandeja		150.0	3.0	100.0	0.0

Los resultados mostraron que el tamaño de las partículas del material era muy parecido al del material natural. Esto confirma que la forma en que se trituro el material fue correcta. Sin embargo, como se esperaba, el material reciclado presentó algunas diferencias pequeñas. Tenía un poco más de partículas que pasaban por la malla número 8, es decir, un 3% en comparación con el 1% del material natural. También había un poco más de material acumulado en la bandeja. Esta pequeña diferencia se debe a que el mortero que estaba pegado al material es muy quebradizo y se pulveriza fácilmente cuando se tamiza de manera mecánica. Esto confirma que el material reciclado es heterogéneo, es decir, no es uniforme.

Una vez obtenidos los datos de la granulometría, se grafica la curva granulométrica:

Figura 5 Curva Granulométrica de RCD



8.5 Determinación de Masa Unitaria, Peso Específico y Absorción

8.5.1 Cálculo de la Masa Unitaria (Agregado fino)

Para la determinación del peso volumétrico, se utilizó un recipiente cilíndrico metálico estandarizado con un volumen de 0.010 m^3 (10 litros).

Masa del recipiente vacío (T): 5.25 kg

Masa del recipiente + agregado suelto (G): 20.55 kg

$$M = \frac{20.55 \text{ kg} - 5.25 \text{ kg}}{0.010 \text{ m}^3} = \frac{15.30 \text{ kg}}{0.010 \text{ m}^3} = 1530 \text{ kg/m}^3$$

Para su parte compactada, normalmente se acostumbra a usar un 10% más de la masa unitaria suelta:

$$M_c = M \times 0.1$$

Donde:

M_c= Masa Unitaria Compactada (kg/m^3).

M = Masa Unitaria Suelta (kg/m^3).

$$M_c = (1530 \times 0.1) + 1530 = 1683 \text{ kg/m}^3$$

8.5.2 Cálculo de la Masa Unitaria (Ripio ½”)

Masa del recipiente vacío (T): 5.25 kg

Masa del recipiente + agregado suelto (G): 20.55 kg

$$M = \frac{18.95 \text{ kg} - 5.25 \text{ kg}}{0.010 \text{ m}^3} = \frac{13.70 \text{ kg}}{0.010 \text{ m}^3} = 1370 \text{ kg/m}^3$$

$$M_c = (1370 \times 0.1) + 1370 = 1507 \text{ kg/m}^3$$

8.5.3 Cálculo del Peso Específico Seco (Agregado fino)

Se determinó la gravedad específica evaluando el empuje hidrostático del material. La muestra fue ensayada tras 24 horas de inmersión y secado posterior al horno.

Masa de la muestra seca al horno (A): 500 g

Masa de la muestra en estado SSS (B): 507.7 g

Masa de la muestra sumergida en agua (C): 316.9 g

$$PE_{SH} = \frac{500}{507.7 - 316.9} = \frac{500}{190.8} = 2.62 \text{ g/cm}^3 = 2620 \text{ kg/m}^3$$

8.5.4 Cálculo del Peso Específico Seco (Ripio ½")

Masa de la muestra seca al horno (A): 3000 g

Masa de la muestra en estado SSS (B): 3033 g

Masa de la muestra sumergida en agua (C): 1900.9 g

$$P_{E_{SH}} = \frac{3000}{3033 - 1900.9} = \frac{3000}{1132.1} = 2.65 \text{ g/cm}^3 = 2650 \text{ kg/m}^3$$

8.5.5 Cálculo de la Absorción de Agua (Árido Reciclado (AR) de RCD)

Este parámetro es crítico para cuantificar la demanda hídrica del mortero adherido al RCD. Se calculó relacionando la masa del agua retenida en los poros internos frente a la masa seca del escombros.

Masa de la muestra en estado SSS (S): 2662.5 g

Masa de la muestra seca al horno (A): 2500 g

$$\%Abs = \left(\frac{2662.5 - 2500}{2500} \right) \times 100 = \left(\frac{162.5}{2500} \right) \times 100 = 6.50\%$$

8.5.6 Cálculo de la Absorción de Agua (Ripio ½")

Masa de la muestra en estado SSS (S): 3033 g

Masa de la muestra seca al horno (A): 3000 g

$$\%Abs = \left(\frac{3033 - 3000}{3000} \right) \times 100 = \left(\frac{33}{3000} \right) \times 100 = 1.10\%$$

8.5.7 Cálculo del Contenido de Humedad (Agregado fino)

Se determinó el porcentaje de humedad total de la muestra en las condiciones ambientales del laboratorio previo al mezclado.

Peso natural de la muestra húmeda: 1518 g

Peso de la muestra secada al horno: 1500 g

$$\%w = \left(\frac{1518 - 1500}{1500} \right) \times 100 = \left(\frac{18}{1500} \right) \times 100 = 1.20\%$$

8.5.8 Cálculo del Contenido de Humedad (Agregado grueso)

Peso natural de la muestra húmeda: 2010 g

Peso de la muestra secada al horno: 2000 g

$$\%w = \left(\frac{2010 - 2000}{2000} \right) \times 100 = \left(\frac{10}{2000} \right) \times 100 = 0.50\%$$

8.6 Resistencia a la Degradación "Abrasión"

La dureza y la resistencia al desgaste de los agregados gruesos se evaluaron con la Máquina de Los Ángeles. Esto es muy importante para esta investigación porque el hormigón diseñado se usará para hacer aceras y bordillos, que están expuestos a fricción y desgaste constantes.

Dado que el tamaño máximo de los agregados es de 1/2 pulgada, se aplicó la **Gradación B** de la norma. Esto significa que se tomaron 5000 gramos de muestra y se sometieron a 500 revoluciones en un tambor rotatorio con 11 esferas de acero. Después de esto, el material se tamizó con una malla para ver cuánto se había degradado.

Los resultados se presentan en la **Tabla 25**. Como se esperaba, el árido reciclado perdió más masa que el ripio natural. Esto se debe a que el árido reciclado tiene una capa de cemento viejo que se tritura y se desprende fácilmente cuando se golpea con las esferas de acero. Sin embargo, el resultado (36.20%) es muy bueno, ya que no supera el límite máximo del 40% establecido por el Código Estructural para usar áridos reciclados.

Tabla 25 Resultados de Desgaste por Abrasión (Máquina de Los Ángeles)

Tipo de Agregado Grueso	Masa Inicial (g)	Masa Final (g)	Desgaste (%)
Ripio Natural 1/2"	5000	4075	18.50
Árido Grueso Reciclado (RCD)	5000	3190	36.20

8.6.1 Cálculo de desgaste para el Ripio Natural de 1/2"

Para obtener los valores porcentuales de desgaste (D) presentados en la tabla, se aplicó la ecuación normalizada que relaciona la masa inicial de la muestra (B) con la masa final que logró ser retenida en el tamiz No. 12 tras el ensayo (C).

Masa inicial de la muestra ensayada (B): 5000 g

Masa final retenida en el tamiz No. 12 (C): 4075 g

$$D = \left(\frac{5000 - 4075}{5000} \right) \times 100 = \left(\frac{925}{5000} \right) \times 100 = 18.50\%$$

8.6.2 Cálculo de desgaste para el Agregado Reciclado (RCD)

Masa inicial de la muestra ensayada (B): 5000 g

Masa final retenida en el tamiz No. 12 (C): 3190 g

$$D = \left(\frac{5000 - 3190}{5000} \right) \times 100 = \left(\frac{1810}{5000} \right) \times 100 = 36.20\%$$

8.7 Diseño de Mezclas mediante el Método ACI 211.1

Con la caracterización física y mecánica de los agregados hecha, se pasó a calcular las dosificaciones de los materiales utilizando el método del Comité 211.1 del Instituto Americano del Concreto. Este método es útil porque nos ayuda a predecir cuánta agua se necesita en mezclas con áridos que absorben mucha agua, lo que nos permite hacer un ajuste muy preciso.

El objetivo era hacer un hormigón que soportara una presión de 21 MPa a los 28 días. Este hormigón sería para elementos que no soportan mucho peso, como aceras, bordillos y contrapisos. Para que el hormigón sea fácil de trabajar y colocar, ya sea a mano o con una vibradora ligera, se definió una consistencia plástica con un asentamiento objetivo de 8,5 cm.

8.7.1 *Dosificación del Hormigón y Ajustes por Humedad*

El primer paso consistió en establecer un hormigón de referencia elaborado únicamente con áridos naturales (nuestra mezcla de arena y ripio basáltico de ½"). Se realizaron cálculos que arrojaron una proporción teórica en seco supuesta de **1:2,09:2,20** (cemento:arena:grava).

Dosificación de Hormigón base

Con los datos que ya se obtuvieron de ensayos previos, se obtuvo los datos para poder dosificar un hormigón 210 por el método ACI 211.1 **usando 1.1 de absorción únicamente del ripio ½"**:

Tabla 26 Datos para Dosificación de Hormigón base

Descripción	Agregado Fino	Agregado Grueso
Peso Unitario Suelto (kg/m³)	1530	1370
Peso Unitario Compactado (kg/m³)	1683	1507
Peso Específico (kg/m³)	2620	2650
Módulo de Finura	2.61	6.93
Tamaño Máximo Nominal	-	1/2"
Tamaño Máximo	-	3/4"
% Absorción	1.55	1.1
% Humedad	1.2	0.5
Peso Específico del Cemento (kg/m³)	3100	
HORMIGÓN		
Condiciones	Normales	
Contenido de aire	Sin aire incluido	
Resistencia (kg/cm²)	210	
Consistencia (cm)	8.5	

Tabla 27 Datos para cálculo de resistencia característica requerida

$f'c$ (kg/cm ²)	$fc'r$ (kg/cm ²)
$f'c < 210$	$f'c + 70$
$210 \leq f'c \leq 350$	$f'c + 85$
$f'c > 350$	$f'c + 100$

Fuente: ACI

Como se está calculando para un hormigón de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, se realiza lo siguiente para obtener la **resistencia característica requerida**:

$$fc'r = 210 + 85 = 295 \text{ kg/cm}^2$$

Tabla 28 Resistencia característica requerida

PASO 1: RESISTENCIA CARACTERÍSTICA				
Resistencia			Resistencia característica requerida	
$f'c$	210	(kg/cm^2)	Condición	$f'c'r$
			< 210	NO CUMPLE (kg/cm^2)
			210 - 350	295 (kg/cm^2)
			> 350	NO CUMPLE (kg/cm^2)

Ahora para calcular la cantidad de agua y porcentaje de aire se utiliza lo siguiente:

Tabla 29 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos y nominales de agregado

Revenimiento (cm)	Agua (kg/m^3) para el hormigón de agregado de tamaño nominal máximo (pulg) indicado							
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"	6"
Hormigón sin aire incluido								
2.5 a 5.0	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10.0	228	216	205	193	181	169	145	124
15.0 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Cantidad aproximada de aire en hormigón sin aire incluido (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Hormigón con aire incluido								
2.5 a 5.0	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 a 10.0	202	193	184	175	165	157	133	119
15.0 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	-
Promedio recomendado de contenido de aire según el nivel de exposición (%)								
Exposición ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición moderada	6	5.5	5.5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

Fuente: ACI

Con los datos que se tienen, tratándose de un hormigón sin aire incluido, se usará la tabla **sin aire incluido**, con los valores de revenimiento o **asentamiento** de **7.5 a 10 cm** y un **TMN** de **1/2"**, se obtiene los siguientes valores:

Tabla 30 Peso del Agua y Porcentaje de Aire

PASO 2: CANTIDAD DE AGUA Y PORCENTAJE DE AIRE			
TMN	1/2"		
Contenido de aire	No		
Consistencia (cm)	8.5		
Revenimiento (cm)	7.5 - 10		
		Peso Agua	216 (kg/m ³ H°)
		% Aire	2.5 0.025

Para el siguiente paso, se tiene el peso del cemento y la relación agua-cemento, para ello, se usa la siguiente tabla:

Tabla 31 Correspondencia entre la relación agua-cemento y la resistencia a la compresión del hormigón

Resistencia requerida a la compresión a los 28 días (kg/cm ²)	Relación a/c: Hormigón sin aire incluido	Relación a/c: Hormigón con aire incluido
420	0.41	-
350	0.48	0.4
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Fuente: ACI

Como se tiene un hormigón de **295 kg/cm²**, es de suma importancia realizar una **interpolación**:

$$X = 0.48 + \frac{(295 - 350) \times (0.57 - 0.48)}{280 - 350} = \mathbf{0.551}$$

Y se obtiene el peso del cemento realizando una división de la cantidad de agua sobre la relación agua-cemento:

$$W_c = \frac{w_a}{X} \quad (8.2)$$

Donde:

W_c = Peso del cemento (kg).

W_w = Peso del agua (kg).

X = Interpolación resultante de la relación a/c.

$$W_c = \frac{216}{0.551} = 392.015 \text{ kg/m}^3 H^\circ$$

Tabla 32 Relación agua-cemento (a/c) y peso de cemento

PASO 3: RELACIÓN A/C Y PESO DE CEMENTO				
$fc'r$	295	(kg/cm^2)	Contenido de aire	No
INTERPOLACIÓN	$fc'r$		Relación a/c	
	350		0.48	
	295		X	
	280		0.57	
Peso del cemento W_c		392.015	$(kg/m^3 H^\circ)$	

En el siguiente paso, se procede a calcular la cantidad de agregado grueso usando como datos el tamaño máximo nominal (TMN) y el módulo de finura, usando la siguiente tabla:

Tabla 33 Volumen de agregado grueso por Volumen unitario de hormigón

Tamaño máximo nominal del agregado (pulg)	Volumen de agregado grueso varillado en seco por volumen unitario de hormigón para distintos módulos de finura de arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	0.50	0.48	0.46	0.44
1/2"	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	0.66	0.64	0.62	0.60
1"	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	0.75	0.73	0.71	0.69
2"	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	0.82	0.80	0.78	0.76
6"	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: ACI

Como los valores que se están usando son TMN de 1/2" y un módulo de finura de 2.61, se tiene que **interpolarse el Volumen de Agregado Grueso**:

$$X = 0.48 + \frac{(2.610 - 2.6) \times (0.55 - 0.57)}{2.8 - 2.6} = 0.569 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$$

Y se calcula el peso del agregado grueso a partir de su dato de peso unitario compactado dividido para el volumen de agregado grueso que se acaba de obtener:

$$W_{AG} = \frac{M_c}{X} \quad (8.3)$$

Donde:

W_{AG} = Peso de Agregado Grueso (kg).

M_c = Masa Unitaria Compactada (kg/m³).

X = Interpolación resultante de Volumen de Agregado Grueso (m^3).

$$W_{AG} = \frac{1507 \text{ kg}/m^3}{0.569 \text{ m}^3/m^3} = \mathbf{857.483 \text{ kg}/m^3 H^\circ}$$

Tabla 34 Cantidad de agregado grueso

PASO 4: CANTIDAD DE AGREGADO GRUESO				
TMN	1/2"	MF	2.610	
INTERPOLACIÓN	MF	V AG (m^3)		
	2.6	0.57		
	2.610	X	0.569	($m^3/m^3 H^\circ$)
	2.8	0.55		
W_{AG}	857.483		($kg/m^3 H^\circ$)	

Siguiendo el proceso, se hace una **primera estimación** del peso del hormigón usando el TMN relacionándolo con su valor de hormigón sin aire incluido:

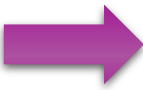
Tabla 35 Primera estimación del peso del hormigón fresco

Tamaño máximo nominal del agregado (pulg)	Primera estimación del peso del hormigón fresco (kg/m^3)	
	Hormigón sin aire incluido	Hormigón con aire incluido
3/8"	2280	2200
1/2"	2310	2230
3/4"	2345	2275
1"	2380	2290
1 1/2"	2410	2350
2"	2445	2345
3"	2490	2405
6"	2530	2435

Fuente: ACI

Como se usa TMN de 1/2", su valor correspondiente de hormigón sin aire incluido es de 2310 kg/m^3 .

Tabla 36 Primera estimación del peso del hormigón

PASO 5: PRIMERA ESTIMACIÓN DEL PESO DEL HORMIGÓN			
TMN	1/2"		$H^\circ \quad 2310 \quad (\text{kg/m}^3 H^\circ)$
Contenido de aire	No		

El siguiente paso es calcular la cantidad de agregado fino:

$$W_{AF_p} = P_H - W_C - W_w - W_{AG} \quad (8.4)$$

Donde:

W_{AF_p} = Peso de Agregado Fino por método de peso (kg).

P_H = Primera estimación de peso de hormigón (kg).

W_C = Peso de cemento (kg).

W_w = Peso del agua (kg).

W_{AG} = Peso de Agregado Grueso (kg).

$$W_{AF_p} = 2310 - 392.015 - 216 - 857.483 = 844.52 \text{ kg/m}^3 H^\circ$$

Tabla 37 Cantidad de agregado fino por el método del peso

PASO 6: CANTIDAD DE AGREGADO FINO POR EL MÉTODO DEL PESO			
Peso agregado fino	W_{AF_p}	844.502	$(\text{kg/m}^3 H^\circ)$

Ahora se procede a calcular la cantidad de agregado fino por el método del volumen:

Volumen de cemento:

$$V_C = \frac{C}{\gamma_C} \quad (8.5)$$

$$V_C = \frac{392.015}{3100} = 0.126 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$$

Volumen de agregado grueso:

$$V_{AG} = \frac{W_{AG}}{\gamma_{AG}} \quad (8.6)$$

$$V_{AG} = \frac{857.483}{2650} = 0.324 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$$

Volumen de agua:

$$V_w = \frac{W_w}{\gamma_w} \quad (8.7)$$

$$V_w = \frac{216}{1000} = 0.216 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$$

Volumen de aire:

$$V_{air} = 2.5 \% = 0.025 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$$

Donde:

V_C = Volumen de cemento (m^3).

γ_C = Peso específico del cemento (kg/m^3).

V_{AG} = Volumen de Agregado Grueso (m^3).

γ_{AG} = Peso específico de Agregado Grueso (kg/m^3).

V_w = Volumen de Agua (m^3).

γ_w = Peso específico del Agua (kg/m^3).

V_{air} = Volumen de aire (m^3).

Sumatoria de volúmenes:

$$\Sigma V = C1 + AG1 + W1_w + \text{Aire}$$

$$\Sigma V = 0.126 + 0.324 + 0.216 + 0.025 = 0.691 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$$

Volumen de agregado fino:

$$V_{AF} = 1 \text{ m}^3 \text{ H}^\circ - \Sigma V \quad (8.8)$$

Donde:

V_{AF} = Volumen de agregado fino (m^3).

$1 \text{ m}^3 \text{ H}^\circ = 1 \text{ metro cúbico de hormigón.}$

$$V_{AF} = 1 - 0.691 = \mathbf{0.309 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ}$$

Y finalmente se obtiene el peso del agregado fino:

$$AF_v = V_{AF} \times \gamma_{AF} \quad (8.9)$$

Donde:

W_{AF_v} = Peso de Agregado Fino por método de volumen (kg).

V_{AF} = Volumen de agregado fino (m^3).

γ_{AF} = Peso específico de agregado fino (kg/m^3).

$$W_{AF_v} = 0.309 \times 2620 = \mathbf{809.58 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ H}^\circ}$$

Tabla 38 Cantidad de agregado fino por método del volumen

PASO 7: CANTIDAD DE AGREGADO FINO POR EL MÉTODO DEL VOLUMEN			
Cemento	V_C	0.126	$(\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ)$
Agregado grueso	V_{AG}	0.324	$(\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ)$
Agua	V_w	0.216	$(\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ)$
Vacíos	V_{air}	0.025	$(\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ)$
Sumatoria de volúmenes	ΣV	0.691	$(\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ)$
Agregado fino	V_{AF}	0.309	$(\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ)$
Peso de agregado fino	W_{AF_v}	809.58	$(\text{kg}/\text{m}^3 \text{ H}^\circ)$

En el siguiente paso se obtiene la humedad superficial realizando una resta entre la humedad y la absorción, tanto para el agregado fino como para el agregado grueso:

Humedad Superficial de Agregado Fino:

$$HSAF = \%W_{AF} - \%Ab_{SAF} \quad (8.10)$$

Donde:

$\%w_{AF}$ = Contenido de humedad de agregado fino (%).

$\%Abs_{AF}$ = Capacidad de absorción de agregado fino (%).

$$HSAF = 1.2 - 1.55 = -0.35 \%$$

Humedad Superficial de Agregado Grueso:

$$HSAG = \%w_{AG} - \%Abs_{AG} \quad (8.11)$$

Donde:

$\%w_{AG}$ = Contenido de humedad de agregado grueso (%).

$\%Abs_{AG}$ = Capacidad de absorción de agregado grueso (%).

$$HSAG = 0.5 - 1.1 = -0.6 \%$$

Tabla 39 Humedad superficial

PASO 8: HUMEDAD SUPERFICIAL			
Humedad superficial del agregado fino	HSAF	-0.35	%
Humedad superficial del agregado grueso	HSAG	-0.6	%

Con esto, ya se puede corregir los pesos para así poder obtener la dosificación:

Peso corregido de cemento (kg):

$$W_{C_corr} = W_C = 392.015 \text{ kg/m}^3 H^\circ$$

Volumen corregido de cemento:

$$V_{C_corr} = \frac{W_C}{\gamma_C} \quad (8.12)$$

Donde:

V_{C_corr} = Volumen corregido de cemento (m^3).

W_C = Peso del cemento (kg).

γ_C = Peso específico del cemento (kg/m^3)

$$V_{C_corr} = \frac{392.015}{3100} = \mathbf{0.127 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ}$$

Peso corregido de agregado fino:

$$W_{AF_corr} = (1\text{m}^3 \text{H}^\circ + (\%w_{AF})) \times W_{AF_v} \quad (8.13)$$

Donde:

W_{AF_corr} = Peso corregido de agregado fino (kg).

$\%w_{AF}$ = Contenido de humedad de agregado fino

W_{AF_v} = Peso de Agregado Fino por método de volumen (kg).

$$W_{AF_corr} = (1 + (1.2\%)) \times 809.58$$

$$W_{AF_corr} = (1 + 0.012) \times 809.58 = \mathbf{819.29 \text{ kg}/\text{m}^3 \text{ H}^\circ}$$

Volumen corregido de agregado fino:

$$V_{AF_corr} = \frac{W_{AF_corr}}{\gamma_{AF}} \quad (8.14)$$

Donde:

V_{AF_corr} = Volumen corregido del agregado fino (m^3)

W_{AF_corr} = Peso corregido del agregado fino (kg)

γ_{AF} = Peso específico de agregado fino (kg/m^3).

$$V_{AF_corr} = \frac{819.29}{2620} = \mathbf{0.313 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ}$$

Peso corregido de agregado grueso:

$$W_{AG_corr} = (1\text{m}^3 \text{H}^\circ + (\%w_{AG})) \times W_{AG} \quad (8.15)$$

Donde:

W_{AG_corr} = Peso corregido del agregado grueso (kg).

$\%w_{AG}$ = Contenido de humedad de agregado grueso (%).

W_{AG} = Peso de Agregado Grueso (kg).

$$W_{AG_corr} = (1 + (0.5\%)) \times 857.483$$

$$W_{AG_corr} = (1 + 0.005) \times 857.483 = \mathbf{861.77 \, kg/m^3 \, H^\circ}$$

Volumen corregido de agregado grueso:

$$V_{AG_corr} = \frac{W_{AG_corr}}{\gamma_{AG}} \quad (8.16)$$

Donde:

V_{AG_corr} = Volumen corregido del agregado grueso (m^3).

W_{AG_corr} = Peso corregido del agregado grueso (kg).

γ_{AG} = Peso específico de Agregado Grueso (kg/m^3).

$$V_{AG_corr} = \frac{861.77}{2650} = \mathbf{0.325 \, m^3/m^3 \, H^\circ}$$

Peso corregido del agua:

$$W_{w_corr} = W_w - (W_{AF_v} \times HSAF) - (W_{AG} \times HSAG) \quad (8.17)$$

Donde:

W_{w_corr} = Peso corregido del agua (kg).

W_w = Peso del agua (kg).

W_{AF_v} = Peso de Agregado Fino por método de volumen (kg).

$HSAF$ = Humedad Superficial de Agregado Fino (%).

W_{AG} = Peso de Agregado Grueso (kg).

$HSAG$ = Humedad Superficial de Agregado Grueso (%).

$$W_{w_corr} = 216 - (809.58 \times (-0.35\%)) - (857.483 \times (-0.6\%))$$

$$W_{w_corr} = 216 - (809.58 \times (-0.0035)) - (857.483 \times (-0.006))$$

$$W_{w_corr} = \mathbf{223.98 \, kg/m^3 \, H^\circ}$$

Volumen corregido del agua:

$$V_{w_corr} = \frac{W_{w_corr}}{\gamma_w} \quad (8.18)$$

Donde:

V_{w_corr} = Volumen del agua corregido (m^3).

W_{w_corr} = Peso corregido del agua (kg).

γ_w = Peso específico del agua (kg/m^3)

$$V_{w_corr} = \frac{223.98}{1000} = 0.224 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$$

Tabla 40 Corrección de pesos

PASO 9: CORRECCIÓN DE PESOS			
En Peso ($kg/m^3 \text{ H}^\circ$)		En Volumen ($m^3/m^3 \text{ H}^\circ$)	
Peso AF corregido	819.29	Volumen AF corregido	0.313
Peso AG corregido	861.77	Volumen AG corregido	0.325
Peso Agua corregido	223.98	Volumen Agua corregido	0.224
Peso Cemento	392.02	Volumen Cemento	0.127

El verdadero desafío surgió durante el diseño de la mezcla. Con tasas de sustitución del 20, 30, 40 y 50 por ciento (del agregado grueso convencional en cada mezcla), las tasas de absorción de agua efectiva del agregado grueso aumentaron de manera considerable. Para evitar que el agregado absorbiera el agua de la pasta necesaria para la hidratación, fue preciso realizar ajustes en cada mezcla antes del vertido, a fin de mantener una relación agua-cemento constante de 0,57 ya que el plastificante a usar es **Sika Plastocrete 161 HE**, el cual tiene un rango normal/medio (posibilidad aproximada de reducción de agua entre un 5% a 10%), funciona como reductor de agua.

Dicho esto, para adquirir la dosificación es de suma importancia dividir el mismo cemento, el agregado fino y el agregado grueso para el peso del cemento:

$$C = \frac{392.02}{392.02} = 1$$

$$AF = \frac{819.29}{392.02} = 2.09$$

$$AG = \frac{861.77}{392.02} = 2.20$$

Se divide también para el peso del cemento, el peso del agua para obtener la relación **agua-cemento**:

$$a/c = \frac{223.98}{392.02} = \mathbf{0.5714}$$

Tabla 41 Dosificación sin Árido Reciclado (RCD)

PASO 10: RESUMEN DE CANTIDADES Y PROPORCIONES			
Descripción	Símbolo	En Peso ($kg/m^3 H^\circ$)	En Volumen ($m^3/m^3 H^\circ$)
Peso del Cemento	C	392.02	0.127
Peso de Agregado Fino	AF	819.29	0.313
Peso Agregado Grueso	AG	861.77	0.325
Peso de Agua	A	223.98	0.224
C	AF	AG	
1	2.09	2.20	

La ficha técnica de Sika Plastocrete 161 HE dice que su rango de dosificación va desde el 0.2% hasta el 2.5% del peso del cemento.

Figura 6 Ficha técnica de Sika Plastocrete 161 HE

INFORMACION DEL PRODUCTO

Empaques	Plástico: 2 kg Plástico: 4 kg Plástico: 10 kg Plástico: 20 kg Tambor: 220 kg
Apariencia / Color	Líquido color ambar oscuro
Vida en el recipiente	24 meses desde su producción.
Condiciones de Almacenamiento	Debe conservarse en lugar fresco y bajo techo, en su envase original bien cerrado.
Densidad	1,10 kg/l aprox.

INFORMACION DE APLICACIÓN

Dosificación Recomendada	La dosificación varía del 0,2% al 2,5% del peso del cemento.
---------------------------------	--

Fuente: Hoja técnica de producto - Sika Ecuador

8.7.2 Cálculo de Absorción por porcentaje de sustitución de RCD y dosificación

Dicho esto, se tiene que calcular la absorción para cada distinto porcentaje de sustitución de árido reciclado modificando el porcentaje de absorción en medida del porcentaje de sustitución que se va a emplear. Con anterioridad ya se calculó que el porcentaje de absorción del ripio ½” es de 1.1% que es lo que se utilizó para la dosificación base, ahora también se sabe que el porcentaje de absorción del árido reciclado (RCD) es de 6.5%. Entonces se procederá a calcular la absorción del ripio mezclado de la siguiente manera:

$$Abs_{comb} = (Abs_R \times R) + (Abs_{RCD} \times RCD) \quad (8.19)$$

Donde:

Abs_{comb} = Absorción del ripio natural combinado con AR de RCD al n% (%).

Abs_R = Absorción de ripio natural (%).

R = Cantidad de ripio natural en la mezcla (kg).

Abs_{RCD} = Absorción de RCD (%).

RCD = Cantidad de RCD en la mezcla (kg).

Absorción de RCD al 20%:

$$Abs_{comb} = (1.1 \times 0.8) + (6.5 \times 0.2)$$

$$Abs_{comb} = 2.18\%$$

Dosificación de Hormigón con RCD al 20%:

Con esto, lo que se hace es sustituir el valor de 1.1% que se usó en la dosificación base para saber cuánto de agua se modificará agregando el RCD:

Tabla 42 Datos para Dosificación de Hormigón con RCD 20%

Descripción	Agregado Fino	Agregado Grueso
Peso Unitario Suelto (kg/m³)	1530	1370
Peso Unitario Compactado (kg/m³)	1683	1507
Peso Específico (kg/m³)	2620	2650
Módulo de Finura	2.61	6.93
Tamaño Máximo Nominal	-	1/2"
Tamaño Máximo	-	3/4"
% Absorción	1.55	2.18
% Humedad	1.2	0.5
Peso Específico del Cemento (kg/m³)	3100	
HORMIGÓN		
Condiciones	Normales	
Contenido de aire	Sin aire incluido	
Resistencia (kg/cm²)	210	
Consistencia (cm)	8.5	

Como se modificó la absorción, únicamente cambiará la humedad superficial del agregado grueso y por consiguiente la cantidad de agua aumentará:

Humedad Superficial de Agregado Grueso:

$$HSAG = 0.5 - 2.18 = -1.68 \%$$

Peso corregido del agua:

$$W_{w_corr} = 216 - (809.58 \times (-0.35\%)) - (857.483 \times (-1.68\%))$$

$$W_{w_corr} = 216 - (809.58 \times (-0.0035)) - (857.483 \times (-0.0168))$$

$$W_{w_corr} = \mathbf{233.24 \text{ kg/m}^3 \text{ H}^\circ}$$

Volumen corregido del agua:

$$V_{w_corr} = \frac{233.24}{1000} = \mathbf{0.233 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ}$$

Y se tiene la dosificación para un porcentaje de sustitución de 20%:

Tabla 43 Dosificación con 20% de RCD

PASO 10: RESUMEN DE CANTIDADES Y PROPORCIONES			
Descripción	Símbolo	En Peso ($\text{kg/m}^3 \text{ H}^\circ$)	En Volumen ($\text{m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$)
Peso del Cemento	C	392.02	0.127
Peso de Agregado Fino	AF	819.29	0.313
Peso Agregado Grueso	AG	861.77	0.325
Peso de Agua	A	233.24	0.233
C	AF	AG	
1	2.09	2.20	

Como la cantidad de agua aumentó, la relación agua-cemento también lo hará:

$$a/c = \frac{233.24}{392.02} = \mathbf{0.5950}$$

Ahora se procede a calcular para los demás porcentajes de sustitución siguiendo el ejemplo con RCD al 20%.

Absorción de RCD al 30%:

$$Abs_{comb} = (1.1 \times 0.7) + (6.5 \times 0.3)$$

$$Abs_{comb} = \mathbf{2.72\%}$$

Dosificación de Hormigón con RCD al 30%:*Tabla 44 Datos para Dosificación de Hormigón con RCD 30%*

Descripción	Agregado Fino	Agregado Grueso
Peso Unitario Suelto (kg/m³)	1530	1370
Peso Unitario Compactado (kg/m³)	1683	1507
Peso Específico (kg/m³)	2620	2650
Módulo de Finura	2.61	6.93
Tamaño Máximo Nominal	-	1/2"
Tamaño Máximo	-	3/4"
% Absorción	1.55	2.72
% Humedad	1.2	0.5
Peso Específico del Cemento (kg/m³)	3100	
HORMIGÓN		
Condiciones	Normales	
Contenido de aire	Sin aire incluido	
Resistencia (kg/cm²)	210	
Consistencia (cm)	8.5	

Humedad Superficial de Agregado Grueso:

$$HSAG = 0.5 - 2.72 = -2.22 \%$$

Peso corregido del agua:

$$W_{w_corr} = 216 - (809.58 \times (-0.35\%)) - (857.483 \times (-2.22\%))$$

$$W_{w_corr} = 216 - (809.58 \times (-0.0035)) - (857.483 \times (-0.0222))$$

$$W_{w_corr} = 237.87 \text{ kg/m}^3 H^\circ$$

Volumen corregido del agua:

$$V_{w_corr} = \frac{237.87}{1000} = 0.238 \text{ m}^3/\text{m}^3 H^\circ$$

Tabla 45 Dosificación con 30% de RCD

PASO 10: RESUMEN DE CANTIDADES Y PROPORCIONES			
Descripción	Símbolo	En Peso ($\text{kg/m}^3 H^\circ$)	En Volumen ($\text{m}^3/\text{m}^3 H^\circ$)
Peso del Cemento	C	392.02	0.127
Peso de Agregado Fino	AF	819.29	0.313
Peso Agregado Grueso	AG	861.77	0.325
Peso de Agua	A	237.87	0.238
C		AF	AG
1		2.09	2.20

$$a/c = \frac{237.87}{392.02} = 0.6068$$

Absorción de RCD al 40%:

$$Abs_{comb} = (1.1 \times 0.6) + (6.5 \times 0.4)$$

$$Abs_{comb} = 3.26\%$$

Dosificación de Hormigón con RCD al 40%:*Tabla 46 Datos para Dosificación de Hormigón con RCD 40%*

Descripción	Agregado Fino	Agregado Grueso
Peso Unitario Suelto (kg/m³)	1530	1370
Peso Unitario Compactado (kg/m³)	1683	1507
Peso Específico (kg/m³)	2620	2650
Módulo de Finura	2.61	6.93
Tamaño Máximo Nominal	-	1/2"
Tamaño Máximo	-	3/4"
% Absorción	1.55	3.26
% Humedad	1.2	0.5
Peso Específico del Cemento (kg/m³)	3100	
HORMIGÓN		
Condiciones	Normales	
Contenido de aire	Sin aire incluido	
Resistencia (kg/cm²)	210	
Consistencia (cm)	8.5	

Humedad Superficial de Agregado Grueso:

$$HSAG = 0.5 - 3.26 = -2.76 \%$$

Peso corregido del agua:

$$W_{w_corr} = 216 - (809.58 \times (-0.35\%)) - (857.483 \times (-2.76\%))$$

$$W_{w_corr} = 216 - (809.58 \times (-0.0035)) - (857.483 \times (-0.0276))$$

$$W_{w_corr} = 242.50 \text{ kg/m}^3 \text{ H}^\circ$$

Volumen corregido del agua:

$$V_{w_corr} = \frac{242.50}{1000} = \mathbf{0.243 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ}$$

Tabla 47 Dosificación con 40% de RCD

PASO 10: RESUMEN DE CANTIDADES Y PROPORCIONES			
Descripción	Símbolo	En Peso ($kg/m^3 \text{ H}^\circ$)	En Volumen ($m^3/m^3 \text{ H}^\circ$)
Peso del Cemento	C	392.02	0.127
Peso de Agregado Fino	AF	819.29	0.313
Peso Agregado Grueso	AG	861.77	0.325
Peso de Agua	A	242.50	0.243
C		AF	AG
1		2.09	2.20

$$a/c = \frac{242.50}{392.02} = \mathbf{0.6186}$$

Absorción de RCD al 50%:

$$Abs_{comb} = (1.1 \times 0.5) + (6.5 \times 0.5)$$

$$Abs_{comb} = \mathbf{3.8\%}$$

Dosificación de Hormigón con RCD al 50%:*Tabla 48 Datos para Dosificación de Hormigón con RCD 50%*

Descripción	Agregado Fino	Agregado Grueso
Peso Unitario Suelto (kg/m³)	1530	1370
Peso Unitario Compactado (kg/m³)	1683	1507
Peso Específico (kg/m³)	2620	2650
Módulo de Finura	2.61	6.93
Tamaño Máximo Nominal	-	1/2"
Tamaño Máximo	-	3/4"
% Absorción	1.55	3.8
% Humedad	1.2	0.5
Peso Específico del Cemento (kg/m³)	3100	
HORMIGÓN		
Condiciones	Normales	
Contenido de aire	Sin aire incluido	
Resistencia (kg/cm²)	210	
Consistencia (cm)	8.5	

Humedad Superficial de Agregado Grueso:

$$HSAG = 0.5 - 3.8 = -3.3 \%$$

Peso corregido del agua:

$$A = 216 - (809.58 \times (-0.35\%)) - (857.483 \times (-3.3\%))$$

$$A = 216 - (809.58 \times (-0.0035)) - (857.483 \times (-0.0330))$$

$$A = 247.13 \text{ kg/m}^3 \text{ H}^\circ$$

Volumen corregido del agua:

$$A = \frac{247.13}{1000} = 0.247 \text{ m}^3/\text{m}^3 \text{ H}^\circ$$

Tabla 49 Dosificación con 50% de RCD

PASO 10: RESUMEN DE CANTIDADES Y PROPORCIONES			
Descripción	Símbolo	En Peso ($kg/m^3 \text{ H}^\circ$)	En Volumen ($m^3/m^3 \text{ H}^\circ$)
Peso del Cemento	C	392.02	0.127
Peso de Agregado Fino	AF	819.29	0.313
Peso Agregado Grueso	AG	861.77	0.325
Peso de Agua	A	247.13	0.247
C		AF	AG
1		2.09	2.20

$$a/c = \frac{247.13}{392.02} = 0.6304$$

8.7.3 Escalado de la Dosificación base para las Probetas y Vigas de Hormigón

Dado que los resultados del método ACI se calculan partiendo del supuesto de que se prepara un metro cúbico de hormigón fresco, fue necesario ajustar las cantidades proporcionalmente para obtener el volumen requerido según la proporción de material de sustitución empleada en la elaboración de 10 probetas cilíndricas (de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura) y una viga (de 15 cm x 15 cm x 50 cm). Para compensar las pérdidas derivadas de la adherencia del hormigón a las herramientas y a las paletas de la hormigonera, se añadió un 20 % adicional por desperdicio. De este modo, el volumen preparado para cada mezcla resultó ser de 0,0377 m³.

Tabla 50 Volúmenes de moldes de probetas y vigas

Descripción	Valor	Unidad
Volumen de probeta 10x20 cm	0.00157	m ³
Volumen de viga 15x15x50	0.01571	m ³
Volumen para 10 probetas	0.0157	m ³
Volumen para 1 viga	0.01571	m ³
Volumen total	0.03141	m³

Una vez obtenidos los volúmenes, se procede a calcular un porcentaje de desperdicio, se utilizará un umbral de 20%:

$$desp = V_T \times 1.2\% \quad (8.20)$$

Donde:

desp = Desperdicios (m³).

V_T = Volumen total (m³).

$$desp = 0.03141 \times 0.012 = \mathbf{0.038 \, m^3}$$

Ahora con ese valor de desperdicio, es de vital importancia que se multiplique por las cantidades en peso de la dosificación, y se obtiene:

$$\mathbf{Cemento} = 0.038 \times 392.02 = 14.78 \, \text{kg}$$

$$\mathbf{Agregado \, fino} = 0.038 \times 819.29 = 30.88 \, \text{kg}$$

$$\mathbf{Agregado \, grueso} = 0.038 \times 861.77 = 32.48 \, \text{kg}$$

$$\mathbf{Agua} = 0.038 \times 247.13 = 8.44 \, \text{lt}$$

Tabla 51 Cantidades para mezcla sin usar RCD

Descripción	Valor	Unidad
20% desperdicio	0.038	m ³
Cemento	14.78	kg
Agregado fino	30.88	kg
Agregado grueso	32.48	kg
Agua	8.44	lt

Como el agua fue lo único que se modificó, entonces a continuación se muestra como su cantidad es directamente proporcional al aumento de porcentaje de sustitución por RCD.

Tabla 52 Mezclas con Diferentes Porcentajes de Sustitución

Mezclas con diferentes porcentajes de sustitución					
	20%	30%	40%	50%	Total
Cemento (kg)	14.78	14.78	14.78	14.78	59.12
Arena para Hormigón 80% (kg)	24.70	24.70	24.70	24.70	98.80
Arena fina 20% (kg)	6.18	6.18	6.18	6.18	24.72
RCD (kg)	6.50	9.74	12.99	16.24	45.47
Ripio ½" (kg)	25.99	22.74	19.49	16.24	84.45
Agua (lt)	8.79	8.97	9.14	9.31	36.21
a/c	0.59	0.61	0.62	0.63	-

8.7.4 Reducción de la Relación agua-cemento mediante el uso de aditivo plastificante

Se requiere bajar la cantidad de la relación agua-cemento de las 4 mezclas a 0.57, ya que fue el resultado que arrojó el cálculo base, podría bajar a más, pero debido a que el plastificante **Sika Plastocrete 161 HE** tiene un rango normal/medio que permite reducir un máximo de 10% de agua en la mezcla, para el porcentaje de sustitución de 50% estará actuando al límite, lo cual se demostrará a continuación. Para mantener constancia, a **las 4 mezclas se las reducirá a una relación a/c = 0.57**.

Primero se calcula el agua que necesita la mezcla para alcanzar la relación agua-cemento base que necesita la mezcla. Sería la cantidad de cemento de cada mezcla (constante) multiplicado por la relación a/c original sin RCD:

$$A_{rc} = W_c \times r_{a/c} \quad (1.8.4)$$

Donde:

A_{rc} = Agua requerida en concreteira (lt).

W_c = Peso del cemento de la mezcla (kg).

$r_{a/c}$ = Relación agua-cemento requerida.

$$A_{rc} = 14.78 \text{ kg} \times 0.57 = \mathbf{8.42 \text{ lt}}$$

Una vez obtenido este resultado, habrá que realizar una resta de la cantidad de agua de cada mezcla sustrayendo el resultado anterior:

$$A_e = A_d - A_{rc} \quad (1.8.5)$$

Donde:

A_e = Agua a extraer (lt).

A_d = Agua dosificada de diseño (lt).

A_{rc} = Agua requerida en concreteira (lt).

Agua a extraer para 20% de RCD:

$$A_e = 8.79 \text{ lt} - 8.42 \text{ lt} = 0.37 \text{ lt}$$

Al restar 0.37 lt (370 ml) de agua a esta mezcla, se utilizará solamente los 8.42 lt. Ahora lo importante es observar el umbral de porcentaje extraído de agua respecto a la cantidad original de agua:

$$\%ex = \frac{100 \times A_e}{A_d} \quad (1.8.6)$$

Donde:

%ex = Porcentaje de extracción de agua (%).

$$\%ex = \frac{100 \times 0.37}{8.79} = 4.21\%$$

Como se puede observar, 4.21% no llega a sobrepasar un 10% de extracción.

Agua a extraer para 30% de RCD:

$$A_e = 8.97 \text{ lt} - 8.42 \text{ lt} = 0.55 \text{ lt}$$

$$\%ex = \frac{100 \times 0.55}{8.97} = 6.13\%$$

Agua a extraer para 40% de RCD:

$$A_e = 9.14 \text{ lt} - 8.42 \text{ lt} = 0.72 \text{ lt}$$

$$\%ex = \frac{100 \times 0.72}{9.14} = 7.88\%$$

Agua a extraer para 50% de RCD:

$$A_e = 9.31 \text{ lt} - 8.42 \text{ lt} = 0.89 \text{ lt}$$

$$\%ex = \frac{100 \times 0.89}{9.31} = 9.56\%$$

Como se puede observar, el porcentaje de extracción de agua está por debajo del límite por un 0.42% así que el plastificante todavía funciona dentro de su norma.

Cálculo de aditivo plastificante para las cuatro mezclas:

Al retirar la cantidad de agua de cada mezcla, se volverá más difícil de trabajar, lo que se traduce como “baja trabajabilidad”, sin embargo, para darle a la mezcla la fluidez

que se necesita, se calcula la dosis de aditivo, en la **Tabla 41** se mostró que se usa del 0.2% al 2.5% del peso del cemento. Para este caso, se utilizará una tasa conservadora de 1% (0.01) del peso del cemento. Como el peso del cemento es constante para las cuatro mezclas, la cantidad de aditivo a usar será la misma para las cuatro:

$$Adt = W_c \times d_{rec} \quad (1.8.7)$$

Donde:

Adt = Cantidad de aditivo (kg).

W_c = Peso del cemento de la mezcla (kg).

d_{rec} = Dosificación de aditivo recomendada respecto a la cantidad de cemento (%).

$$Adt = 14.78 \text{ kg} \times 0.01 = 0.1478 \text{ kg} = \mathbf{147.8 \text{ g}}$$

De esta manera, se agrega 147.8 g de aditivo a cada mezcla, mezclando el 80% del agua final de cada mezcla con el aditivo y se separa el 20 % restante para agregarla poco a poco en la concretera al momento que esté girando únicamente con la fracción gruesa, ya que absorberá un poco de agua.

8.8 Elaboración del Hormigón y Evaluación en Estado Fresco

Para poder preparar el material, se utilizó una concretera mecánica, la cual debe encenderse y agregar agua para limpiarla y después vaciarla. El proceso empieza introduciendo la fracción gruesa (el ripio natural y el RCD) junto con el 20% de agua de diseño. Esto se lo hizo de manera que el mortero adherido del árido reciclado se pre sature primero por unos 15 segundos. Posteriormente, se incorpora las arenas (80% arena para hormigón y 20% arena fina lavada) con el cemento, y se va vaciando de a poca cantidad el 80% de agua mezclada con el aditivo plastificante en su interior, dejando trabajar a la concretera sin interrupciones durante unos tres minutos, hasta que la mezcla se vea trabajable.

Cuando se vierte el hormigón fresco en la carretilla, se realiza la prueba del Cono de Abrams (NTE INEN 1578) para poder medir su consistencia. Se pudo observar en la práctica y se comprobó la incidencia que tienen los áridos reciclados. Mientras más árido

reciclado se aportaba, más espesa o dura se mostraba la mezcla y la fluidez disminuía, como se puede ver en la **Tabla 53**.

Tabla 53 Resultados del Ensayo de Asentamiento (Cono de Abrams)

Dosificación	Asentamiento Real (cm)	Tipo de Consistencia
Sustitución al 20% RCD	8.1	Plástica
Sustitución al 30% RCD	7.3	Plástica - Blanda
Sustitución al 40% RCD	6.5	Blanda
Sustitución al 50% RCD	6.2	Blanda - Dura

La fuerte bajada observada en la trabajabilidad a partir del 30% de sustitución de árido reciclado (RCD) no se debió a que no existiese suficiente cantidad de agua de hidratación para la mezcla, sino por el aumento exponencial de la fricción interna que provocaba la textura rugosa tan densa del RCD. La cantidad de plastificante previa que se había calculado era imprescindible para que no se formaran poros, obteniendo así el material adecuado para que se adaptara al molde.

8.9 Moldeo y Proceso de Curado de los Especímenes

Una vez se comprueba que la consistencia era la indicada, se procedió al moldeo de cilindros según la norma ASTM C31:

Moldeo

Se llenaron los cilindros de plástico en dos capas de volumen igual; cada capa fue sometida a 25 golpes con la varilla lisa para forzar la salida del aire atrapado, terminando con golpes suaves del martillo de goma por el exterior del cilindro para mejorar el acabado superficial y cerrar los poros; de igual manera el mismo procedimiento para la viga en el molde de madera. Cabe recalcar que los 10 moldes de cilindros y el molde de la viga tenían que estar aceitados para un proceso de desmolde mucho más sencillo.

Desencofrado y curado

Permitiendo el reposo de los moldes durante 24 horas dentro del laboratorio, cubiertos con plásticos para evitar que el calor de la mezcla evaporara el agua antes de tiempo; al día siguiente se desencofra los moldes. Los moldes de los cilindros poseen un agujero en su base que fue tapado con un poco de plastilina, esta se retira y se utiliza un compresor de aire para colocarlo en ese punto, haciendo que el molde salga por presión de aire. Para la viga, esta presenta unos tornillos con los que se armó el molde, únicamente hay que desatornillar el molde.

El siguiente paso fue marcarlos con un código (tipo de mezcla) para una fácil identificación y su fecha para someterlos a ensayo de compresión y flexión respectivamente. Después se los sumergió en la piscina de curado. La piscina de curado contenía agua saturada de cal y mantenida a temperatura controlada, donde permanecieron de forma ininterrumpida hasta las edades de ensayo.

9. CAPÍTULO V: DISCUSIÓN Y RESULTADOS

Una vez terminado el tiempo de curado en la piscina de curado, se pasa a ensayar las probetas de forma destructiva. Esta fase es la más importante de la investigación, porque permite comprobar en la práctica si un hormigón que contiene un porcentaje de árido reciclado (AR) es capaz de soportar las exigencias mecánicas de un entorno urbanizable, Llevándolo a cabo mediante la superación de dos especificaciones normativas: 21 MPa para elementos exteriores (aceras) y 18 MPa para elementos interiores (contrapisos).

9.1 Evaluación de la Resistencia a la Compresión (ASTM C39)

La ruptura de los cilindros mediante el uso de la prensa hidráulica fue el punto decisivo para realizar la verificación mecánica definitiva. Se partió de un 20 % de sustitución de ripio natural por árido reciclado (RCD), y la dosificación empleada sirvió como línea base física para evaluar el efecto progresivo de la incorporación de este material.

Para garantizar la fiabilidad estadística y el rigor experimental, se ensayaron dos especímenes (Muestra 1 y Muestra 2) de la misma mezcla para cada una de las distintas edades de curado (**3, 7, 14, 21 y 28 días**) y para cada uno de los porcentajes de sustitución de RCD (**20, 30, 40 y 50 %**). La información de la carga máxima soportada por cada una de las probetas de hormigón antes de su falla estructural en la prensa de laboratorio se recoge en las **Tablas 54 y 55**.

Tabla 54 Resultados de Resistencia a la Compresión (Muestra 1)

Edad de Rotura	20% RCD (kg/cm²)	30% RCD (kg/cm²)	40% RCD (kg/cm²)	50% RCD (kg/cm²)
3 días	119.9	111.4	106.3	97.9
7 días	163.0	151.3	146.3	135.3
14 días	189.9	179.6	170.9	161.2
21 días	201.6	196.0	182.2	173.3
28 días	216.4	203.6	193.7	179.6

Tabla 55 Resultados de Resistencia a la Compresión (Muestra 2)

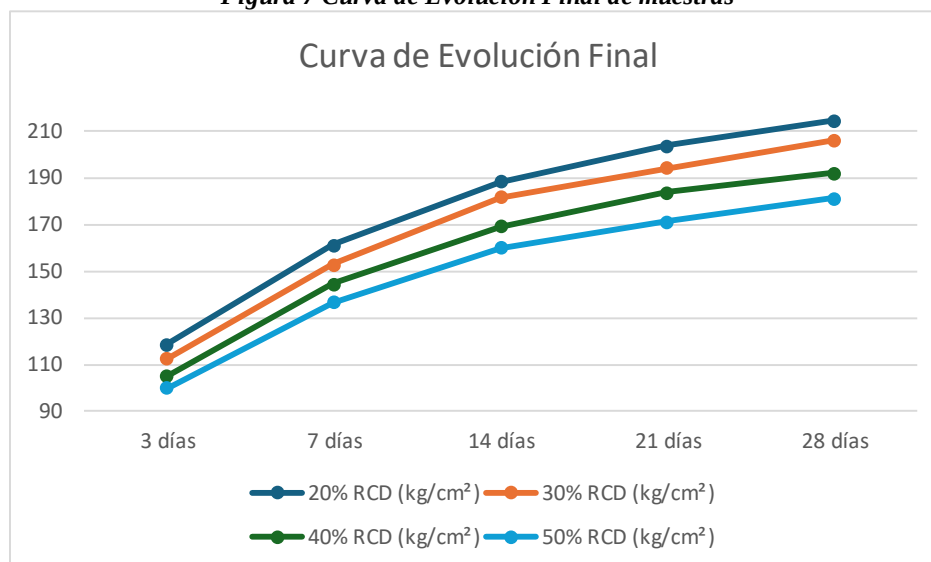
Edad de Rotura	20% RCD (kg/cm²)	30% RCD (kg/cm²)	40% RCD (kg/cm²)	50% RCD (kg/cm²)
3 días	117.5	113.2	103.5	101.3
7 días	159.4	154.3	142.5	137.9
14 días	186.7	183.8	167.5	158.4
21 días	206.0	192.4	185.2	169.3
28 días	212.6	208.4	190.5	183.0

La variación correspondiente entre los pares de cilindros resultó ser mínima (variaciones entre 1 y 3 kg/cm², pocas varían entre 4 y 5 kg/cm² como máximo), lo que prueba el elevado grado de homogenización del sistema durante el mezclado mecánico y un minucioso control de calidad durante las etapas de varillado y curado de las probetas. Con los datos, y de forma matemática, se calculó el promedio de cada uno de los pares de cilindros, generando así la curva de evolución final que se muestra en la **Figura 6**.

Tabla 56 Promedio de Muestras de Resistencia a la Compresión ($f'c$)

Edad de Rotura	20% RCD (kg/cm ²)	30% RCD (kg/cm ²)	40% RCD (kg/cm ²)	50% RCD (kg/cm ²)
3 días	118.7	112.3	104.9	99.6
7 días	161.2	152.8	144.4	136.6
14 días	188.3	181.7	169.2	159.8
21 días	203.8	194.2	183.7	171.3
28 días	214.5	206.0	192.1	181.3

Figura 7 Curva de Evolución Final de muestras



Tras analizar los promedios finales después del control de 28 días, se dedujo que el comportamiento del hormigón es el siguiente: a mayor cantidad de residuos de demolición y construcción utilizados, menor es la resistencia. No obstante, los resultados en cuanto a la viabilidad técnica son totalmente favorables respecto a los objetivos de la investigación:

- **Viable para bordillos y aceras (21 MPa o 210 kg/cm²):**

En construcciones viales expuestas a el cambio de clima y tráfico peatonal continuo, resulta evidente que un 20 % de residuos de demolición y construcción constituye la única alternativa directamente aplicable.

Esto alcanza una resistencia media de $215,5 \text{ kg/cm}^2$ ($21,55 \text{ MPa}$), que supera con creces la especificación deseada, demostrando que el uso de residuos de demolición y construcción en proporciones conservadoras no solo permite beneficiarse de sus componentes ecológicos, sino que tampoco se produce un debilitamiento interno significativo. Con una sustitución del 30%, la mezcla resultante cae por debajo de 21 MPa , por lo que no puede considerarse totalmente válida para un uso seguro.

- **Viabilidad para Contrapisos (18 MPa o 180 kg/cm^2):**

La verdadera hazaña ingenieril y de sostenibilidad de esta investigación se pone de manifiesto en este segundo caso. Para el caso de las losas vertidas de nivelación, los casos de las bases o contrapisos interiores residenciales, ciertamente todas las dosificaciones ensayadas fueron viables. La sustitución del 30% (205.0 kg/cm^2) y 40% (192.1 kg/cm^2) ofrecen un excelente margen de seguridad, superando holgadamente el umbral para esta cuestión.

La mezcla límite para el 50% de RCD, a pesar de mostrar un evidente debilitamiento de resistencia (caída por la porosidad medianamente del mortero adherido), logró aguantar soportando a los 28 días 181.3 kg/cm^2 (18.13 MPa). Este dato demuestra empíricamente que es posible sustituir hasta la mitad del ripio natural por escombros urbanos procesados en Manta, y aun circunstancialmente y sobradamente cumplir con los estándares estructurales mínimos exigidos para la conformación de contrapisos de una edificación.

9.2 Evaluación de la Resistencia a la Flexión (ASTM C78)

Se procedió a la evaluación del comportamiento a tracción de las mezclas a partir de la rotura a flexión de las vigas prismáticas a los veintiocho días de curado. Este ensayo (al que comúnmente se le llama módulo de rotura) hay que considerarlo de primordial importancia para las aplicaciones urbanas a las que se hace referencia en este trabajo de investigación, porque las aceras vehiculares y peatonales suelen fallar mediante esfuerzos flexionales debidos a asentamientos del terreno soporte. Para los elementos que se encuentran sometidos al desgaste de la vía pública, como es el caso de las aceras, la práctica ingenieril establece un módulo de rotura mínimo de 2.8 MPa . La **Tabla 56** presenta un resumen de los valores reales obtenidos a partir del ensayo al que se sometieron

las cuatro vigas (correspondiente cada viga a uno de los porcentajes de sustitución) bajo cargas aplicadas en los tercios de su luz libre, tal y como establece la norma para este ensayo.

Tabla 57 Resultado de Resistencia a la Flexión

Probeta	Porcentaje de RCD	Módulo de Rotura (MPa)
Viga 1	20%	2.90
Viga 2	30%	2.85
Viga 3	40%	2.68
Viga 4	50%	2.55

Los resultados de ensayo de las vigas coinciden directamente con la disminución de resistencia observada en los cilindros, con lo que se reafirma la viabilidad técnica:

Las vigas con proporciones del **20% y 30% de RCD** alcanzaron módulos de **2.90 MPa** y **2.85 MPa** respectivamente, cifra que supera el **módulo mínimo de seguridad (2.8 MPa)**, evidenciando que estas mezclas poseen cohesión interna y resistencia a tracción para aguantar el tránsito superficial, propio de aceras y bordillos.

Por el contrario, excesivas cantidades de mortero adherido en las vigas del 40% y 50% producen una debilidad de la zona de tracción del elemento (la parte baja de la viga en el ensayo). Al romperse a los **2.68 MPa** y **2.55 MPa** son mezclas todavía **susceptibles** a la fisuración **por flexión**, de modo que no son aptas para pavimentos exteriores.

Una vez más vale decir que esta disminución del Módulo de Rotura no vuelve inválidas las mezclas del 40% y 50% para contrapisos residenciales, ya que estos elementos (que requieren mínimo 18 MPa a compresión) trabajan apoyados directamente sobre un estrato compactado y confinado, de modo que las cargas de flexión son prácticamente nulas.

9.3 Evaluación del Impacto Ambiental y Economía Circular

La viabilidad técnica del uso de materiales reciclados de construcción y demolición (RCD) en aplicaciones no estructurales no estaría completa sin especificar los beneficios ambientales derivados de su aplicación. El quinto objetivo de esta investigación es identificar cómo la sustitución de agregados tendría un impacto ambiental positivo en el entorno de la ciudad de Manta, facilitando la transición de un modelo de consumo lineal a una economía circular.

Partiendo de los resultados obtenidos de los ensayos de laboratorio en la presente investigación, la viabilidad ambiental se fundamenta en 3 puntos de mitigación:

Conservación de los recursos pétreos naturales

La fabricación convencional de hormigón implica un alto costo debido a la extracción sistemática de recursos no renovables. Partiendo del presente estudio tomando como ejemplo la grava o agregado grueso, para producir 1 m³ de hormigón, se necesitarían 860,77 kg de grava virgen triturada para la mezcla base (ACI 211.1). Dicho esto, dado que la sustitución estructural de hasta el 50 % de estos agregados sería técnicamente posible para la producción de un contrapiso, se ahorrarían 430,88 kg de roca basáltica virgen por metro cúbico de hormigón producido. Si consideramos una ciudad como Manta, y suponiendo que todos los proyectos inmobiliarios utilizaran ese porcentaje para un piso nivelado con el concreto de este estudio, entonces la cantidad de piedra local extraída disminuiría tan drásticamente que evitaría: deforestación, erosión del suelo, cambios en las cuencas hidrográficas.

Mitigación de Residuos Ambientales Locales y Alivio de Botaderos

La ciudad de Manta ha heredado la carga de residuos acumulada por el terremoto de 2016, a la que se le añade la generación de Residuos de Construcción y Demolición (RCD) en la producción del crecimiento inmobiliario y del proceso de renovación urbana, como las obras que hubo en la Calle 13. En la actualidad, la gestión de este residuo se limita a la operación de la disposición final en el botadero de San Juan, en el peor de los casos, a la disposición final en vertederos clandestinos que producen contaminación visual y proliferación de hierba mala, bacterias, entre otros. La incorporación de mezclas de

residuos con un 20 % a un 30 % para aceras y bordillos da la oportunidad de transformar este pasivo ambiental en materia prima activa de reutilizaciones prácticas. En lugar de ocupar botadero de San Juan, el escombros se reintegra al metabolismo urbano, permitiendo alargar la vida útil del vertedero municipal y reducir la carga pública que genera la gestión de residuos sólidos.

Reducción de la Huella de Carbono (CO₂) debido a Transporte

El transporte de materiales de pétreos es uno de los factores que contribuye de manera más importante a las emisiones de gases de efecto invernadero en la construcción. Los agregados naturales gruesos tienen que ser transportados desde canteras situadas en los alrededores o cantones adyacentes mediante volquetas de alto tonelaje propulsadas normalmente por diésel.

Por otro lado, los escombros se producen dentro de la misma matriz urbana de Manta. Fomentar que existan plantas trituradoras de RCD en el mismo perímetro de la ciudad o reutilizar los escombros correspondientes a una demolición en la misma obra, para hacer sus propios contrapisos, permite acortar de manera muy importante las distancias de transporte. Esta buena compatibilización ahorra combustible, mejora el tránsito de carga pesada en las vías de la ciudad y, aunque sea mínimamente, reduce las emisiones de CO₂ en la atmósfera.

Tabla 58 Reducción de consumo de ripio natural por cada 1 m³ de hormigón producido

Diseño de Mezcla	Ripio Natural Extraído de Cantera	Ripio Reutilizado
0% RCD (Hormigón Base)	861.77 kg	0.00 kg
20% RCD	689.42 kg	172.35 kg
30% RCD	603.24 kg	258.53 kg
40% RCD	517.06 kg	344.71 kg
50% RCD	430.88 kg	430.89 kg

En definitiva, el resultado de la investigación demuestra que el sistema propuesto es muy eficiente, así como muy sostenible en términos de prolongación en el tiempo. De hecho, al limitarse el nivel de sustitución a un 20% para aceras y permitir hasta el 50% en contrapisos, se consigue un equilibrio perfecto: la ciudad obtiene elementos constructivos seguros y duraderos, resolviendo el problema de la acumulación de escombros y protegiendo sus recursos naturales.

10. CONCLUSIONES

El estudio caracterizó las propiedades físicas y mecánicas de los agregados reciclados, provenientes de materiales de construcción y demolición (RCD) en la ciudad de Manta, y se demostró que estos agregados tienen una capacidad de absorción de agua considerablemente mayor (6,5 %) que el árido natural (1,1 %), además de experimentar una mayor pérdida de masa por abrasión en la máquina de “Los Ángeles” (36,2 %). Como resultado de estas diferencias en las propiedades del material, debidas a la naturaleza del mortero antiguo adherido, los agregados cumplieron con las disposiciones normativas internacionales (límite de desgaste < 40 %).

De acuerdo a el análisis del diseño de la mezcla, se encontró que el uso de residuos de construcción y demolición (RCD) influyó directamente en la trabajabilidad del hormigón fresco debido a la fricción interna originada por la mayor rugosidad de los áridos reciclados. Por ello, se añadió un plastificante de agua Sika Plastocrete 161 HE para asegurar una consistencia plástica y mantener la relación agua/cemento constante en 0,57, evitando así una pérdida de resistencia.

Las pruebas de resistencia a la compresión a los 28 días ($f'c$) han demostrado que existe una relación inversamente proporcional entre el porcentaje de RCD y su capacidad de carga, pero con una sustitución del 20%, el promedio de 21,55 MPa superó el requisito de 21 MPa para materiales estructurales y garantiza un uso seguro y fiable en construcciones de aceras y bordillos en proyectos urbanísticos.

En este proyecto se alcanzó la máxima tasa de sustitución, con una resistencia a compresión promedio de 18,13 MPa a los 28 días, utilizando un 50 % de residuos de construcción y demolición. Dado que el resultado supera lo mínimo estándar para elementos de nivelación, se concluye que es posible sustituir hasta la mitad del árido grueso natural por árido reciclado en aplicaciones como contrapisos, descartando su uso para pavimentos que están sujetos a flexión.

Se realizaron ensayos mecánicos mediante pruebas de flexión, demostrando el comportamiento mecánico de las mezclas durante su estado endurecido, obteniéndose los siguientes valores: En porcentajes del 20% y 30% se registraron valores superiores a 2,8 MPa de módulo de rotura lo cual es lo mínimo de aceptación, 2,90 y 2,85 MPa respectivamente. Sin embargo, las pruebas muestran una ruptura de flexión de las mezclas al 40 y 50% de sustitución por RCD, lo que excluye su capacidad para ser utilizadas en pavimentos exteriores donde se requiere flexión, aunque aún funcionan como contrapisos. Las pruebas en estado endurecido alcanzaron un proceso de curado de 28 días, pero la resistencia de estas mezclas crecerá a medida que pasen el tiempo, de modo que el uso de RCD en porcentajes altos de sustitución aún sigue siendo completamente factible en mezclas de hormigón.

Desde la perspectiva de la economía circular, la utilización de hormigones no estructurales con un 50% de RCD representa un ahorro considerable de 430.88 kg de roca virgen por metro cúbico producido en cantera. Llevar esto a nivel urbano en Manta disminuirá satisfactoriamente la saturación del botadero de San Juan y otros sitios de descarga, reducirá la contaminación visual generada por ellos y la huella de carbono asociada al transporte pesado (diésel) de materiales pétreos, y disminuirá la sobreexplotación de las canteras locales.

11. RECOMENDACIONES

Se debe ejercer un control estricto sobre el contenido de humedad del agregado reciclado antes de mezclarlo en obra. Dado que los residuos de construcción y demolición (RCD) pueden tener una capacidad de absorción de agua muy alta, es posible que sea necesario incorporar el agregado reciclado a la mezcla preparada en condiciones de saturación superficial seca, o, si no es posible, se debe realizar una hidratación con compensaciones matemáticas en la fase de formulación para que no se absorba agua por el mortero adherido y así mantener la consistencia de la mezcla dentro del rango requerido.

Se recomienda que el gobierno autónomo descentralizado (GAD) del cantón de Manta elabore ordenanzas municipales y normas de licitación en materia de contratación pública, que promuevan o exijan el uso de un porcentaje mínimo de sustitución de RCD (como el 20% que este estudio demostró viable) para la construcción de obras públicas de pequeña escala, como aceras, bordillos y cunetas.

Dado que los aditivos plastificantes convencionales de rango medio funcionan a límite de capacidad (reducción de aproximadamente el 10 %) para compensar la pérdida de trabajabilidad en mezclas con una alta sustitución de residuos de construcción y demolición (40-50 %), este estudio sugiere la aplicación de aditivos superplastificantes (reductores de agua de alto rango). La tecnología química permitirá una reducción significativa del contenido de agua y producirá mezclas de alta consistencia sin perder resistencia a la compresión ($f'c$).

Con el propósito de ampliar futuras investigaciones sobre la implementación del uso de la fracción fina de RCD, su estudio reológico y el efecto sobre las mezclas de hormigón, para alcanzar niveles de sustitución integral que aseguren el máximo consumo de residuos.

12. BIBLIOGRAFÍA

- ACI Committee 201. (2016). *Guide to Durable Concrete (ACI 201.2R-16)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- ACI Committee 302. (2015). *Guide to Concrete Floor and Slab Construction (ACI 302.1R-15)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute.
- ACI Committee 555. (2001). *Removal and Reuse of Hardened Concrete (ACI 555R-01)*. American Concrete Institute.
- Alexander, M., & Mindess, S. (2005). *Aggregates in Concrete*. Londres: Taylor & Francis.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (2018). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (The Green Book)*. Washington, D.C.
- Asociación Española de Normalización. (2024). *UNE*. Obtenido de <https://www.une.org/normalizacion>
- ASTM International. (2015). *ASTM C127-15: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. West Conshohocken, PA.
- ASTM International. (2018). *ASTM C125-18: Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM International. (2019). *ASTM C136/C136M-19: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken, PA.
- Bai, G., Zhu, C., Liu, C., & Liu, B. (2020). An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. *Construction and Building Materials*, 240, 117978.
- Balla Pillajo, E. D., & Yupa Apaja, J. J. (2023). *Comportamiento mecánico y durabilidad de un hormigón reciclado con fines estructurales en el Ecuador: Un estudio de revisión*. Riobamba: Universidad Nacional de Chimborazo.

- Ceballos-Medina, S., González-Rincón, D. C., & Sánchez, J. D. (2021). Reciclaje de Residuos de Construcción y Demolición (RC&D) Generados en la Universidad del Valle Sede Meléndez para la Fabricación de Adoquines. *Revista ION*, 34, 27-35.
- Chango Pilla, I. V. (2021). Diseño de un hormigón de 210 kg/cm² utilizando los agregados finos de la Parroquia El Rosario, Cantón Pelileo. Quito, Ecuador: Universidad Internacional SEK.
- Chumi Paredes, J. S., & Gualpa Llivicura, W. D. (2024). *Elaboración de hormigón reciclado con una resistencia a la compresión de 24 MPa, utilizando como parte del árido grueso materiales obtenidos de demoliciones de estructuras de hormigón*. Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana.
- Comité Europeo de Normalización. (2013). *N 12620:2013+A1:2008 - Áridos para hormigón*. Bruselas.
- Comité Europeo de Normalización. (2016). *N 206:2013+A1:2016 - Hormigón: Especificaciones, prestaciones, producción y conformidad*. Bruselas.
- de Andrade Salgado, F., & de Andrade Silva, F. (2022). Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 52, 104452.
doi:10.1016/j.jobbe.2022.104452
- Delgado Toala, D. M. (2014). *La gestión de los residuos de construcción y demolición para contrarrestar los impactos ambientales generados por el progresivo desarrollo de la Calle 13 de la ciudad de Manta [Tesis de Maestría]*. Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735-742.
- Fernández Cánovas, M. (2013). *Hormigón* (10a ed.). Garceta Grupo Editorial.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Manta (GAD Manta). (2022). *Emisión de permiso para descargar desechos sólidos generadores de escombros en*

el vertedero municipal. Manta. Obtenido de GOB.EC (Plataforma Única de Trámites Ciudadanos)

Gómez-Soberón, J. M. (2002). Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. *Cement and Concrete Research*, 32, 1301-1311.

INEN. (2009). *NTE INEN 2306: Accesibilidad de las personas al medio físico. Vías de circulación peatonal*. Quito: INEN.

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

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

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

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

INEN. (2011). *NTE INEN 696:2011. Áridos. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*. Quito: INEN. Obtenido de <https://www.normalizacion.gob.ec/>.

INEN. (2011). *NTE INEN 860:2011. Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de Los Ángeles*. Quito: INEN.

INEN. (2012). *NTE INEN 1574:2012. Hormigón de cemento hidráulico. Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón (Método de la viga simple con carga en los tercios del claro)*. Quito: INEN.

Jiménez Montoya, P., García Meseguer, Á., & Morán Cabré, F. (2010). *Hormigón Armado* (15a ed.). Barcelona: Gustavo Gili.

Jiménez Ramos, D. A. (2020). *Diseño de mezclas de dosificación para hormigón de $f'c=210 \text{ kg. / cm.}^2$ a partir del estudio de las propiedades de los materiales pétreos*

- de las canteras Ancesa 3, Las Juntas, Los Nietos y Alvarado*. Ambato: Universidad Tecnológica Indoamérica.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., & Panarese, W. C. (2004). *Design and Control of Concrete Mixtures*. Skokie, Illinois: Portland Cement Association.
- López Jimeno, C. (2001). *Manual de áridos: prospección, explotación y aplicaciones*. Madrid: Entorno Gráfico.
- Mamlouk, M. S., & Zaniewski, J. P. (2016). *Materials for Civil and Construction Engineers* (4a ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. New York: McGraw-Hill Education.
- Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTOP). (2003). *Normas de Diseño Geométrico de Carreteras*. Quito.
- Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. (2021). *Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural*. Madrid: Boletín Oficial del Estado.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (Quinta ed.). Londres: Pearson Education.
- Sánchez de Guzmán, D. (2011). *Tecnología del concreto y del mortero* (6a ed.). Bogotá: Bhandar Editores.
- Wang, J., Qian, X., Chen, P., & Xu, Y. (2017). An environmentally friendly method to improve the quality of recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, 144, 432-441. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.191
- Wang, R., Yu, N., & Li, Y. (2020). Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. *Construction and Building Materials*, 242, 118164. doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118164



Anexo 3 Arena fina lavada



Anexo 4 Arena para Hormigón



Anexo 5 Cemento Holcim



Anexo 6 Ripio 1/2"



Anexo 7 Árido reciclado de RCD con mortero adherido



Anexo 8 Aditivo Sika Plastocrete 161 HE



Anexo 9 Prensa de ensayo de Flexión



Anexo 10 Máquina de "Los Angeles"



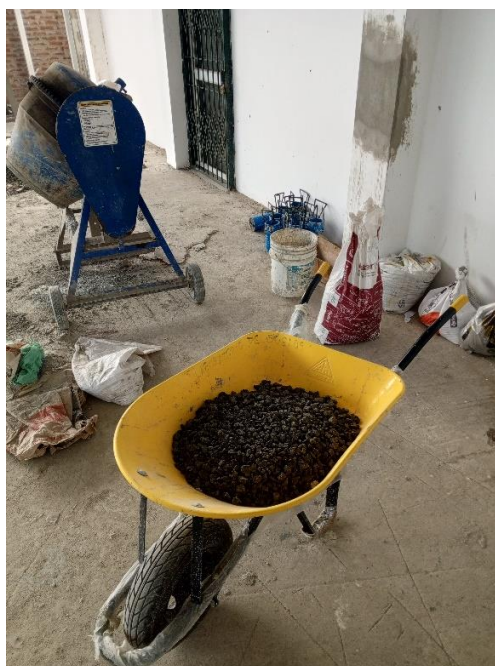
Anexo 11 Ensayo de contenido de humedad



Anexo 12 Peso seco al horno de arena



Anexo 13 Ensayo de Granulometría de áridos



Anexo 14 Materiales en obra



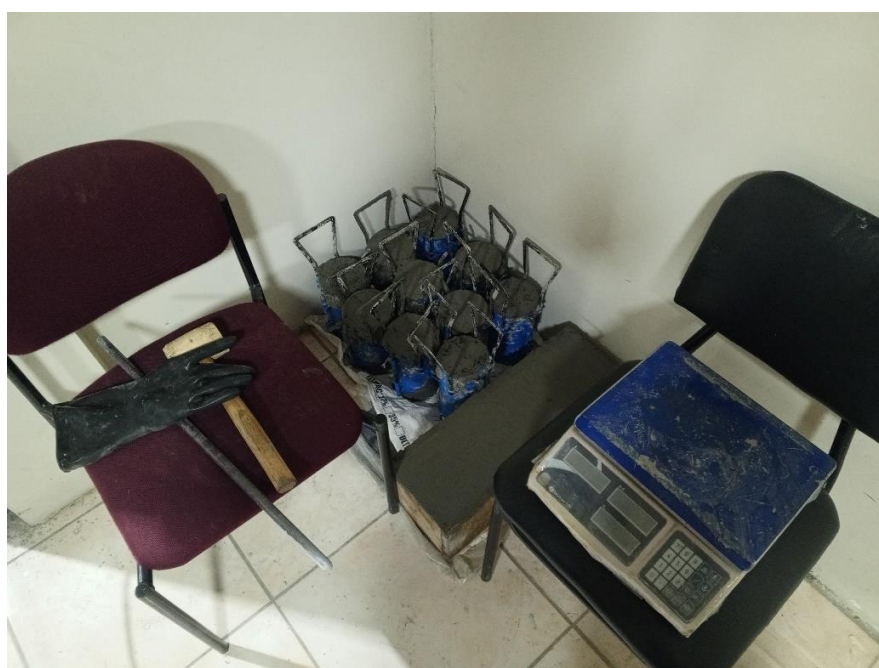
Anexo 15 Pesando agua para mezcla



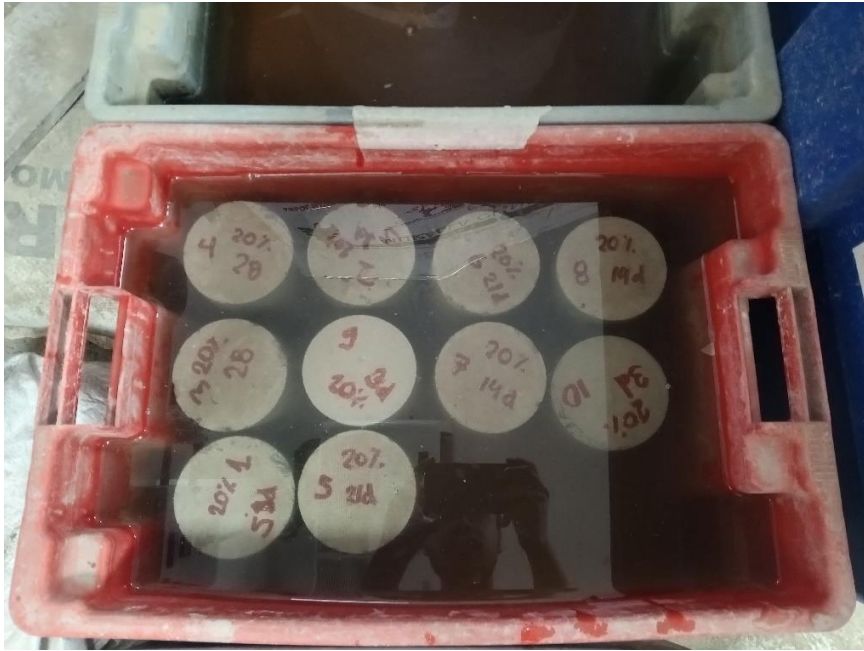
Anexo 16 Ensayo de revenimiento



Anexo 17 Limpieza de concretera



Anexo 18 Probetas con 40% de RCD al cabo de ser fundidas



Anexo 19 Probetas con 20% de RCD en piscina de curado



Anexo 20 Proceso de secado para ensayar 24 horas después



Anexo 21 Peso de probetas



Anexo 22 Probetas con 50% de sustitución de RCD



Anexo 23 Moldes de plástico para probetas de 10x20 cm con abertura para desmoldar con compresor de aire



Anexo 24 Compresor de aire



Anexo 25 Desmoldeo con compresor de aire



Anexo 26 Viga después de curado



Anexo 27 Ensayo destructivo de compresión



Anexo 28 Fallo por compresión



Anexo 29 Recolección de muestra de RCD en zona local



Anexo 30 Proceso de selección evitando impurezas