



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

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

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

AUTORES: JONNATHAN SEBASTIÁN CHUMI PAREDES  
WILLIAM DANIEL GUALLPA LLIVICURA  
TUTOR: ING. FERNANDO RENÉ CÁRDENAS ÁLVAREZ, MSc.

Cuenca - Ecuador

2024

## **CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Jonnathan Sebastián Chumi Paredes con documento de identificación N° 0105509038 y William Daniel Gualpa Llivicura con documento de identificación N° 0106017049; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 24 de enero del 2024

Atentamente,



---

Jonnathan Sebastián Chumi Paredes  
0105509038



---

William Daniel Gualpa Llivicura  
0106017049

## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Jonnathan Sebastián Chumi Paredes con documento de identificación N° 0105509038 y William Daniel Gualpa Llivicura con documento de identificación N° 0106017049, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto de investigación: “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”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 24 de enero del 2024

Atentamente,



---

Jonnathan Sebastián Chumi Paredes  
0105509038



---

William Daniel Gualpa Llivicura  
0106017049

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Fernando René Cárdenas Álvarez con documento de identificación N° 0102086592, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: 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, realizado por Jonnathan Sebastián Chumi Paredes con documento de identificación N° 0105509038 y por William Daniel Gualpa Llivicura con documento de identificación N° 0106017049, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto de investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 24 de enero del 2024

Atentamente,



---

Ing. Fernando René Cárdenas Álvarez, Msc.

0102086592

## **Agradecimientos**

### **Jonnathan Sebastián Chumi Paredes**

Quiero agradecer a mis padres Rolando e Hilda por su apoyo incondicional y paciencia que me han brindado a lo largo de este proceso académico.

También quiero expresar un agradecimiento a nuestro tutor Fernando René Cárdenas Álvarez por su orientación y sugerencias que nos ha contribuido para realizar este trabajo de titulación.

### **William Daniel Gualpa Llivicura**

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de esta tesis. Este proyecto no habría sido posible sin su valioso apoyo y orientación.

En especial a mis padres María y Manuel, expreso mi más sincero agradecimiento a ambos por su inquebrantable apoyo y dedicación a lo largo de mi trayecto en la elaboración de esta tesis. Entiendo plenamente que el trabajo y los sacrificios que han realizado para respaldarme en esta travesía no han pasado desapercibidos.

## Resumen

En el presente trabajo de titulación, se llevó a cabo la elaboración de hormigón reciclado con una resistencia de 24 MPa, sustituyendo parcialmente el árido grueso por lo que denominamos "árido reciclado", obtenido mediante la trituración de materiales provenientes de demoliciones de estructuras de hormigón.

El estudio tiene como objetivo ofrecer una alternativa sustentable para el aprovechamiento de los residuos de hormigón. Con este propósito, se analizaron y compararon las características del árido grueso natural y del árido grueso reciclado. Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas de resistencia a la compresión en cilindros de hormigón a los 28 días, sustituyendo parcialmente el árido grueso con porcentajes de 0%, 10%, 20%, 30%, 40% y 50% de árido reciclado. Los resultados indicaron que un porcentaje óptimo de sustitución oscila entre el 19.30% y el 20% de árido reciclado.

Con este porcentaje óptimo, se realizaron ensayos de resistencia a compresión y flexión, así como ensayos de deformación. En comparación con el hormigón convencional (0% de árido reciclado), se observó que los hormigones diseñados con un 20% de árido reciclado alcanzan valores superiores de resistencia, cumpliendo con los 24 MPa esperados. Además, se constató que la deformación de este hormigón no presenta diferencias significativas en comparación con el convencional, arrojando valores de 24.04 GPa para el módulo de elasticidad y 0.21 para la relación de Poisson.

En relación con lo expuesto, este proyecto demuestra que los escombros de hormigón pueden ser utilizados como sustituto parcial del árido grueso, con un máximo del 20% de árido reciclado. Es importante señalar que los resultados obtenidos podrían ampliarse y mejorarse al considerar el uso de aditivos, así como al implementar la arena reciclada proveniente de la trituración de escombros, material utilizado en esta investigación. Esto ampliaría la aplicación de áridos reciclados en el ámbito de la construcción.

## Abstract

In this titling work, the production of recycled concrete with a strength of 24 MPa was carried out, partially replacing the coarse aggregate with what we call recycled aggregate", obtained by crushing materials from demolitions of concrete structures.

The study aims to offer a sustainable alternative for the use of concrete waste. For this purpose, the characteristics of natural coarse aggregate and recycled coarse aggregate were analyzed and compared. Subsequently, compressive strength tests were carried out on concrete cylinders at 28 days, partially replacing the coarse aggregate with percentages of 0%, 10%, 20%, 30%, 40% and 50% of recycled aggregate. The results indicated that an optimum replacement percentage ranges from 19.30% to 20% recycled aggregate.

With this optimum percentage, compressive and flexural strength tests were carried out, as well as deformation tests. In comparison with conventional concrete (0% recycled aggregate), it was observed that concretes designed with 20% recycled aggregate reach higher strength values, meeting the expected 24 MPa. In addition, it was found that the deformation of this concrete does not show significant differences compared to the conventional one, yielding values of 24.04 GPa for the modulus of elasticity and 0.21 for Poisson's ratio.

In relation to the above, this project demonstrates that concrete rubble can be used as a partial substitute for coarse aggregate, with a maximum of 20% recycled aggregate. It is important to point out that the results obtained could be expanded and improved by considering the use of additives, as well as by implementing recycled sand from rubble crushing, the material used in this research. This would expand the application of recycled aggregates in the construction field.

# Índice

<b>1. 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</b>	<b>1</b>
<b>2. Problema de estudio</b>	<b>2</b>
2.1. Antecedentes . . . . .	2
2.2. Descripción del problema . . . . .	3
2.3. Importancia y alcances . . . . .	4
2.4. Delimitación . . . . .	4
2.4.1. Espacial o geográfica . . . . .	5
2.4.2. Temporal . . . . .	5
2.4.3. Sectorial o institucional . . . . .	5
2.5. Problema General . . . . .	5
2.6. Problemas Específicos . . . . .	5
<b>3. Justificación</b>	<b>6</b>
<b>4. Objetivos</b>	<b>7</b>
4.1. Objetivo General . . . . .	7
4.2. Objetivos Específicos . . . . .	7
<b>5. Marco Teórico</b>	<b>8</b>
5.1. Hormigón . . . . .	8
5.2. Hormigón reciclado . . . . .	8
5.3. Cemento . . . . .	8
5.4. Agua . . . . .	9
5.5. Áridos . . . . .	9
5.5.1. Clasificación de acuerdo a su procedencia . . . . .	10
5.5.2. Clasificación de acuerdo a su tamaño . . . . .	11
5.5.3. Clasificación de acuerdo a su densidad . . . . .	11
5.5.4. Propiedades físicas y mecánicas . . . . .	12
5.5.4.1. Granulometría . . . . .	12
5.5.4.2. Módulo de finura . . . . .	13



5.5.4.3.	Tamaño máximo de los áridos . . . . .	13
5.5.4.4.	Tamaño máximo nominal de los áridos . . . . .	13
5.5.4.5.	Forma y textura . . . . .	13
5.5.4.6.	Densidad . . . . .	14
5.5.4.7.	Absorción y humedad . . . . .	15
5.5.4.8.	Masa unitaria . . . . .	15
5.6.	Diseño de mezcla de hormigón por medio del método ACI . . . . .	16
5.6.1.	Procedimiento para el diseño de mezclas . . . . .	17
5.6.1.1.	Selección del asentamiento . . . . .	17
5.6.1.2.	Selección del tamaño máximo nominal de los áridos . . . . .	18
5.6.1.3.	Estimación del contenido de aire presente en la mezcla . . . . .	18
5.6.1.4.	Estimación de la cantidad de agua . . . . .	19
5.6.1.5.	Selección de la relación agua/cemento . . . . .	20
5.6.1.6.	Calculo para el contenido de cemento. . . . .	21
5.6.1.7.	Estimación de contenido de árido grueso (Granulometría bien gradada) . . . . .	21
5.6.1.8.	Estimación del contenido de árido fino. . . . .	22
5.6.1.9.	Estimación de contenido de árido grueso y árido fino (Granulometría mal gradada) . . . . .	23
5.6.1.10.	Ajuste de la cantidad agua debido a la humedad presente en los áridos . . . . .	26
5.7.	Características y comportamiento del Hormigón . . . . .	26
5.7.1.	Trabajabilidad . . . . .	26
5.7.2.	Durabilidad . . . . .	26
5.7.3.	Resistencia . . . . .	26
<b>6.</b>	<b>Marco metodológico</b>	<b>28</b>
6.1.	Obtención de los áridos . . . . .	28
6.2.	Proceso de trituración . . . . .	29
6.2.1.	Selección de materiales de demoliciones . . . . .	29
6.2.2.	Proceso para la obtención de árido reciclado . . . . .	30
6.2.3.	Cantidades obtenidas del proceso de trituración . . . . .	30
6.3.	Propiedades de los áridos . . . . .	31
6.3.1.	Granulometría . . . . .	31
6.3.2.	Textura y forma . . . . .	38

6.3.3.	Densidad . . . . .	38
6.3.4.	Absorción . . . . .	43
6.3.5.	Masa unitaria . . . . .	47
6.4.	Mezcla de hormigón convencional . . . . .	52
6.4.1.	Asentamiento . . . . .	52
6.4.2.	Tamaño máximo nominal (TMN) . . . . .	53
6.4.3.	Contenido de aire . . . . .	53
6.4.4.	Cantidad de agua . . . . .	54
6.4.5.	Resistencia a la compresión requerida . . . . .	54
6.4.6.	Relación agua/cemento . . . . .	55
6.4.7.	Contenido de cemento . . . . .	57
6.4.8.	Contenido de árido grueso . . . . .	58
6.4.9.	Contenido de árido fino . . . . .	61
6.4.10.	Ajuste por humedad de los áridos . . . . .	62
6.4.11.	Dosificación de mezcla de hormigón convencional . . . . .	62
6.4.12.	Resistencia a la compresión . . . . .	64
6.5.	Diseño de mezcla de hormigón reciclado . . . . .	65
6.5.1.	Mezcla de hormigón reciclado con 10% de árido grueso reciclado . . .	66
6.5.1.1.	Contenido de árido grueso . . . . .	66
6.5.1.2.	Contenido de árido fino . . . . .	66
6.5.1.3.	Ajustes por humedad de los áridos . . . . .	67
6.5.1.4.	Dosificación de mezcla de hormigón reciclado (10% A, R) .	68
6.5.2.	Mezcla de hormigón reciclado con 20% de árido grueso reciclado . . .	70
6.5.2.1.	Contenido de árido grueso . . . . .	70
6.5.2.2.	Contenido de árido fino . . . . .	71
6.5.2.3.	Ajustes por humedad de los áridos . . . . .	71
6.5.2.4.	Dosificación de mezcla de hormigón reciclado (20% A, R) .	72
6.5.3.	Mezcla de hormigón reciclado con 30% de árido grueso reciclado . . .	74
6.5.3.1.	Contenido de árido grueso . . . . .	74
6.5.3.2.	Contenido de árido fino . . . . .	75
6.5.3.3.	Ajustes por humedad de los áridos . . . . .	76
6.5.3.4.	Dosificación de mezcla de hormigón reciclado (30% A, R) .	76
6.5.4.	Mezcla de hormigón reciclado con 40% de árido grueso reciclado . . .	78
6.5.4.1.	Contenido de árido grueso y árido fino . . . . .	78
6.5.4.2.	Ajustes por humedad de los áridos . . . . .	81

6.5.4.3.	Dosificación de mezcla de hormigón reciclado (40% A, R) . . .	82
6.5.5.	Mezcla de hormigón reciclado con 50% de árido grueso reciclado . . .	83
6.5.5.1.	Contenido de árido grueso y árido fino . . . . .	83
6.5.5.2.	Ajustes por humedad de los áridos . . . . .	85
6.5.5.3.	Dosificación de mezcla de hormigón reciclado (50% A, R) . . .	86
6.5.6.	Resistencia a la compresión . . . . .	87
6.6.	Determinación del porcentaje óptimo de árido grueso reciclado . . . . .	90
6.6.1.	Propiedades de porcentaje óptimo de árido grueso reciclado . . . . .	91
6.6.1.1.	Granulometría . . . . .	91
6.6.1.2.	Densidad . . . . .	93
6.6.1.3.	Absorción . . . . .	94
6.6.1.4.	Masa unitaria . . . . .	94
6.6.2.	Mezcla de hormigón con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado	95
6.6.2.1.	Contenido de árido grueso . . . . .	95
6.6.2.2.	Contenido de árido fino . . . . .	95
6.6.2.3.	Ajustes por humedad de los áridos . . . . .	96
6.6.2.4.	Dosificación de mezcla de hormigón reciclado (Porcentaje óptimo) . . . . .	97
6.6.3.	Resistencia a la compresión . . . . .	99
6.6.4.	Módulo de elasticidad . . . . .	103
6.6.5.	Relación de Poisson . . . . .	109
6.7.	Costos para la elaboración de hormigón convencional y hormigón reciclado .	110
<b>7.</b>	<b>Resultados</b>	<b>113</b>
<b>8.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>116</b>
<b>9.</b>	<b>Recomendaciones</b>	<b>117</b>
	<b>Referencias</b>	<b>119</b>
<b>10.</b>	<b>Anexos</b>	<b>120</b>

## Lista de Tablas

1.	Clasificación de los áridos de acuerdo a su procedencia . . . . .	10
2.	Clasificación de acuerdo a su tamaño . . . . .	11
3.	Clasificación de los áridos de acuerdo a su densidad . . . . .	12
4.	Valores de asentamiento recomendados para distintas clases de construcción .	17
5.	Valores recomendados de TMN para distintos tipos de construcción . . . . .	18
6.	Contenido aproximado de aire en el hormigón para distintos grados de exposición	19
7.	Requerimiento aproximado de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del árido . . . . .	20
8.	Relación a/c . . . . .	21
9.	Volumen de árido grueso . . . . .	22
10.	Rango granulométrico recomendado . . . . .	24
11.	Cantidades de árido reciclado obtenido del proceso de trituración . . . . .	30
12.	Resultado del ensayo granulométrico del árido fino . . . . .	31
13.	Análisis granulométrico del árido fino . . . . .	32
14.	Resultados del ensayo granulométrico del árido grueso natural y árido grueso reciclado . . . . .	33
15.	Análisis granulométrico del árido grueso natural . . . . .	33
16.	Análisis granulométrico del árido grueso reciclado . . . . .	34
17.	Resultados del ensayo granulométrico del árido grueso con distintos% de árido grueso reciclado . . . . .	35
18.	Análisis granulométrico del árido grueso con 10% de árido grueso reciclado .	35
19.	Análisis granulométrico del árido grueso con 20% de árido grueso reciclado .	36
20.	Análisis granulométrico del árido grueso con 30% de árido grueso reciclado .	36
21.	Análisis granulométrico del árido grueso con 40% de árido grueso reciclado .	36
22.	Análisis granulométrico del árido grueso con 50% de árido grueso reciclado .	37
23.	Densidad y gravedad específica del árido fino . . . . .	39
24.	Densidad y gravedad específica del árido grueso natural . . . . .	39
25.	Densidad y gravedad específica del árido grueso natural con 10% de árido grueso reciclado incorporado . . . . .	40
26.	Densidad y gravedad específica del árido grueso natural con 20% de árido grueso reciclado incorporado . . . . .	40
27.	Densidad y gravedad específica del árido grueso natural con 30% de árido grueso reciclado incorporado . . . . .	41

28.	Densidad y gravedad específica del árido grueso natural con 40% de árido grueso reciclado incorporado . . . . .	41
29.	Densidad y gravedad específica del árido grueso natural con 50% de árido grueso reciclado incorporado . . . . .	42
30.	Absorción del árido fino . . . . .	44
31.	Absorción del árido grueso natural . . . . .	44
32.	Absorción del árido grueso natural con 10% de árido grueso reciclado incorporado	45
33.	Absorción del árido grueso natural con 20% de árido grueso reciclado incorporado	45
34.	Absorción del árido grueso natural con 30% de árido grueso reciclado incorporado	45
35.	Absorción del árido grueso natural con 40% de árido grueso reciclado incorporado	46
36.	Absorción del árido grueso natural con 50% de árido grueso reciclado incorporado	46
37.	Masa unitaria del árido fino . . . . .	48
38.	Masa unitaria del árido grueso natural . . . . .	48
39.	Masa unitaria del árido grueso con 10% de árido grueso reciclado incorporado	49
40.	Masa unitaria del árido grueso con 20% de árido grueso reciclado incorporado	49
41.	Masa unitaria del árido grueso con 30% de árido grueso reciclado incorporado	50
42.	Masa unitaria del árido grueso con 40% de árido grueso reciclado incorporado	50
43.	Masa unitaria del árido grueso con 50% de árido grueso reciclado incorporado	51
44.	Contenido aproximado de aire en el hormigón para distintos grados de exposición	53
45.	Requerimiento aproximado de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado . . . . .	54
46.	Factor de mayoración $f^c$ . . . . .	55
47.	Relación $a/c$ . . . . .	56
48.	Volumen de árido grueso . . . . .	59
49.	Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de hormigón convencional . . . . .	61
50.	Dosificación corregida por humedad y absorción . . . . .	62
51.	Propiedades en estado fresco del hormigón convencional . . . . .	63
52.	Dosificación definitiva para 1 m <sup>3</sup> de hormigón convencional . . . . .	64
53.	Resistencias a compresión del hormigón convencional . . . . .	65
54.	Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de hormigón con 10% de árido grueso reciclado incorporado	67
55.	Dosificación corregida por humedad y absorción . . . . .	68
56.	Propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (10% A. R) . . . . .	69
57.	Dosificación definitiva para 1 m <sup>3</sup> de hormigón reciclado (10% A. R) . . . . .	70
58.	Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de hormigón con 20% de árido grueso reciclado incorporado	71
59.	Dosificación corregida por humedad y absorción . . . . .	72

60.	Propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (20% A. R) . . . . .	73
61.	Dosificación definitiva para 1 m <sup>3</sup> de hormigón reciclado (20% A. R) . . . . .	74
62.	Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de hormigón con 30% de árido grueso reciclado incorporado	75
63.	Dosificación corregida por humedad y absorción . . . . .	76
64.	Propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (30% A. R) . . . . .	77
65.	Dosificación definitiva para 1 m <sup>3</sup> de hormigón reciclado (30% A. R) . . . . .	78
66.	Rango granulométrico recomendado para realizar la optimización granulométrica	79
67.	Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de hormigón con 40% de árido grueso reciclado incorporado	81
68.	Dosificación corregida por humedad y absorción . . . . .	81
69.	Propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (40% A. R) . . . . .	82
70.	Dosificación definitiva para 1 m <sup>3</sup> de hormigón reciclado (40% A. R) . . . . .	83
71.	Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de hormigón con 50% de árido grueso reciclado incorporado	85
72.	Dosificación corregida por humedad y absorción . . . . .	85
73.	Propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (50% A. R) . . . . .	86
74.	Dosificación definitiva para 1 m <sup>3</sup> de hormigón reciclado (50% A. R) . . . . .	87
75.	Resistencias a compresión del hormigón reciclado (10% A. R) . . . . .	88
76.	Resistencias a compresión del hormigón reciclado (20% A. R) . . . . .	88
77.	Resistencias a compresión del hormigón reciclado (30% A. R) . . . . .	89
78.	Resistencias a compresión del hormigón reciclado (40% A. R) . . . . .	89
79.	Resistencias a compresión del hormigón reciclado (50% A. R) . . . . .	90
80.	Resultados del ensayo granulométrico del árido grueso con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado . . . . .	92
81.	Análisis granulométrico del árido grueso con porcentaje óptimo de árido grueso reciclado . . . . .	92
82.	Densidad y gravedad específica del árido grueso con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado . . . . .	94
83.	Absorción del árido grueso con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado	94
84.	Masa unitaria del árido grueso con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado incorporado . . . . .	95
85.	Dosificación para 1 m <sup>3</sup> de hormigón con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado incorporado . . . . .	96
86.	Dosificación corregida por humedad y absorción . . . . .	97
87.	Propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (Porcentaje óptimo A. R)	98
88.	Dosificación definitiva para 1 m <sup>3</sup> de hormigón reciclado (Porcentaje óptimo A. R)	99
89.	Resistencias a compresión del hormigón reciclado (19.30% A. R) . . . . .	99

90.	Resistencia a flexión del hormigón reciclado (19.30% A. R) . . . . .	100
91.	Módulo de elasticidad del hormigón reciclado (19.30% A. R) . . . . .	104
92.	Resultados de carga - deformación de la muestra No. 1 . . . . .	105
93.	Resultados de carga - deformación de la muestra No. 2 . . . . .	107
94.	Relación de Poisson del hormigón reciclado (19.30% A. R) . . . . .	110
95.	Costo de los materiales para la elaboración de hormigón . . . . .	111
96.	Costo de los materiales para la elaboración de hormigón . . . . .	112
97.	Costo de los materiales para la elaboración de hormigón reciclado (19.30% A. R) . . . . .	112
98.	Costo de los materiales para la elaboración de hormigón reciclado (20% A. R) . . . . .	112

## Lista de Figuras

1.	Optimización de las granulometrías . . . . .	25
2.	Materiales obtenidos de demoliciones de estructuras de hormigón . . . . .	29
3.	Curva granulométrica del árido fino . . . . .	32
4.	Curva granulométrica del ensayo granulométrico del árido grueso . . . . .	34
5.	Curva granulométrica del ensayo granulométrico del árido grueso con distintos porcentajes de árido grueso reciclado . . . . .	37
6.	Variación de las densidades con respecto al porcentaje incorporado de árido grueso reciclado . . . . .	43
7.	Variación de la absorción con respecto al porcentaje incorporado de árido grueso reciclado . . . . .	47
8.	Variación de la masa unitaria con respecto al porcentaje incorporado de árido grueso reciclado . . . . .	51
9.	Interpolación para hallar la relación $a/c$ . . . . .	57
10.	Interpolación para hallar la relación $b/b_0$ . . . . .	60
11.	Optimización granulométrica para el árido grueso con 40% de árido grueso reciclado . . . . .	80
12.	Optimización granulométrica para el árido grueso con 50% de árido grueso reciclado . . . . .	84
13.	Porcentaje óptimo de árido grueso reciclado . . . . .	91
14.	Curva granulométrica del ensayo granulométrico del árido grueso con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado . . . . .	93
15.	Curva fuerza - deformación . . . . .	101
16.	Curva fuerza - deformación . . . . .	102
17.	Curva esfuerzo - deformación . . . . .	106
18.	Curva esfuerzo - deformación . . . . .	108



- 1. 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**

## 2. Problema de estudio

### 2.1. Antecedentes

El uso del hormigón para la construcción ha sido fundamental, por lo que su producción debe ser continua para satisfacer sus requerimientos en la construcción, además de esto se le suma la explotación minera que se requiere para la adquisición de agregados, si juntamos todo esto podemos darnos una idea del daño al medio ambiente que se produce por estas acciones, por este motivo es conveniente dar el mejor uso posible a estos materiales, una forma de darle un mejor uso es mediante la reutilización.

En este aspecto, Hernández y Saravia (2018) en su investigación llevó a cabo el análisis de las propiedades tanto físicas como mecánicas del hormigón, implementando cerámicos reciclados con el objetivo de reutilizar estos materiales en el ámbito de la construcción y del mismo modo disminuir la contaminación del medio ambiente que generan estos. En su investigación obtuvo como resultado un 90% de desempeño de la resistencia diseñada, concluyendo que es conveniente el uso de residuos de cerámica para la elaboración de hormigón. Por lo tanto, se da la posibilidad de analizar de igual manera la aplicación de residuos de cerámica como sustituto del árido grueso para la elaboración de hormigón.

En complemento, Haro (2022) mediante su proyecto investigativo realizó una comparación entre hormigón convencional y hormigón reciclado en la aplicación de bordillos prefabricados mediante la utilización de residuos de elementos estructurales obtenidos de demoliciones. Obteniendo resultados favorables tanto para resistencia a flexión, compresión y resistencia a la abrasión por desgaste para el árido grueso reciclado que evidencian que el árido reciclado es una alternativa del árido natural para la elaboración de hormigón.

Adicional, Hernández y Saravia (2018) propusieron un hormigón con material reciclado específicamente con la implementación de ladrillo triturado como parte del árido grueso natural en proporciones de 0, 5, 15 y 25% con el objetivo de alcanzar una resistencia a la compresión de 180 kg/cm<sup>2</sup> y 210 kg/cm<sup>2</sup>, de tal forma que comprobaron que la resistencia a la compresión se reduce en un 29, 50 y 65%, destacando que la resistencia a la compresión varía en función de la calidad del ladrillo y del diseño de la mezcla. Con lo que podemos destacar que la implementación del agregado reciclado debe ser en proporciones pequeñas para prevenir una disminución de la resistencia a la compresión.

Además, Vásquez (2019) elaboró un hormigón sostenible con el uso parcial de agregados reciclados como reemplazo del árido grueso natural, obtenido de la recolección de desechos de porcelana, cerámica y vidrio, al cual expuso a pruebas tanto destructivas como no destructivas, comprobando un mejor desempeño en la implementación de la porcelana a diferencia de la cerámica y vidrio que obtuvieron una reducción de la resistencia a la compresión entre un 15 a 40%.

Así mismo, Vivar (2021) realizó una comparación entre hormigón reciclado y hormigón convencional con respecto a la relación agua/cemento y proporción de áridos reciclados incorporados a la mezcla de hormigón, logrando verificar que el porcentaje de absorción del árido reciclado es superior al árido natural lo que implica implementar un mayor porcentaje de agua en la mezcla de hormigón específicamente en un 2.30% a diferencia del árido natural que solo requiere de 1.60%, en cuanto a las características del árido grueso, los áridos reciclados satisfacen lo establecido en la normativa.

## **2.2. Descripción del problema**

Actualmente, el hormigón es uno de los materiales más utilizados en el sector de la construcción debido a sus propiedades y accesibilidad, sin embargo, su proceso de obtención lo convierte en uno de los principales contaminantes ambientales. El problema ambiental no surge únicamente de la producción de sus distintos componentes, sino también por los restos que se generan en la construcción y si a esto le añadimos la demolición de infraestructuras que ya han cumplido su vida útil, obtenemos una gran porción de residuos que se amontonan anualmente en los botaderos de la ciudad.

El problema ambiental también surge ante la necesidad de adquirir los recursos para la elaboración de hormigón, obtenidos principalmente por minería, la cual afecta el ecosistema y medio ambiente, considerando que estos recursos son limitados, surge la necesidad de reutilizar estos recursos como alternativa para contrarrestar estos daños al medio ambiente.

Ante esta problemática, algunos países han implementado plantas para la recuperación y reutilización de desechos de construcción, en la mayoría de los casos este material recuperado ha servido en aplicaciones de menor calidad, como rellenos en construcción de carreteras y terraplenes de edificios. Países como Irlanda, Hungría y Países Bajos han expresado obtener unas tasas de recuperación entre el 99, 100% en 2017 y 2018. (Peters, 2022)

En el Ecuador no se ha tomado en cuenta este tema, ni se ha implementado este tipo de propuestas, ya sea para el control o reciclaje de residuos y demoliciones de construcción, a diferencia de otros materiales como el papel, vidrio y plástico que sí se han considerado reciclables y se han propuesto un tratamiento para ser reutilizados; lo cual ha generado que en mejor de los casos estos desechos de construcción sean almacenados en botaderos de las ciudades para así evitar que sean arrojados en las orillas de ríos y quebradas.

Ante estos hechos, la investigación propone la utilización de áridos obtenidos de demoliciones de estructuras de hormigón para la elaboración de hormigón reciclado con la finalidad de dar un mejor uso a estos desechos, reducir la cantidad de volumen que estos ocupan en los botaderos y contribuir con el medio ambiente.

### **2.3. Importancia y alcances**

A medida que pasan los años la población ha requerido de nuevas infraestructuras para su vida diaria, esto ha llevado que la adquisición de recursos para construcción no cese, lo cual también ha convertido al hormigón como uno de los materiales más usados para la construcción, pero su implementación en obra no es del todo práctico, siempre se generan desperdicios, residuos que simplemente son desechados al botadero. El objetivo de esta investigación es analizar la factibilidad de reutilizar estos residuos de hormigón como sustituto del árido grueso para la elaboración de hormigón reciclado.

El alcance del estudio se limita a la elaboración de hormigón reciclado mediante la implementación de materiales obtenidos de demoliciones de estructuras de hormigón como parte del árido grueso en porcentajes de 0, 10, 20, 30, 40 y 50%, encontrar el porcentaje óptimo de árido reciclado que se puede incorporar a la mezcla y comparar su resistencia a la compresión entre el hormigón reciclado y el hormigón convencional.

### **2.4. Delimitación**

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

### **2.4.1. Espacial o geográfica**

El trabajo de titulación se realiza en la Universidad Politécnica Salesiana de la Ciudad de Cuenca, campus El Vecino.

### **2.4.2. Temporal**

El desarrollo del trabajo de titulación “Elaboración de hormigón reciclado utilizando materiales obtenidos de desperdicios y demoliciones de construcciones, como árido grueso, para una resistencia a la compresión de 24 MPa” se lo desarrolla a partir del mes de octubre del 2023 hasta el mes de enero del 2024 de acuerdo al cronograma planteado en el diseño de titulación propuesto.

### **2.4.3. Sectorial o institucional**

El trabajo de titulación “Elaboración de hormigón reciclado utilizando materiales obtenidos de desperdicios y demoliciones de construcciones, como árido grueso, para una resistencia a la compresión de 24 MPa”, se sitúa en el ámbito de la construcción y la ingeniería civil, explorando una opción sostenible y rentable en comparación con el hormigón tradicional, además de contribuir con el medio ambiente.

## **2.5. Problema General**

¿Es posible elaborar 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?

## **2.6. Problemas Específicos**

- ¿Cómo puede beneficiar la 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?
- ¿Cómo se puede elaborar 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?

- ¿Cuáles son sus propiedades físicas y mecánicas del 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?
- ¿Cuál es el porcentaje óptimo de árido reciclado que se puede incorporar para elaborar 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?

### **3. Justificación**

En el Ecuador no existen instituciones dedicadas específicamente al control y tratamiento de desechos generados por residuos y demoliciones de estructuras de hormigón, por lo tanto, desarrollar una alternativa para aprovechar estos residuos en la producción de hormigón reciclado, presenta una solución considerable a fin de evitar problemas a futuro como la acumulación de desechos en botaderos, la abundante necesidad de recursos naturales para la elaboración de hormigón y daños en el medio ambiente.

En la actualidad el uso del hormigón en la construcción es primordial, ya sea para la construcción de inmuebles, obras viales, puentes, todas se basan en hormigón y a medida que pasa el tiempo estas construcciones cada vez aumentan en función del crecimiento poblacional de la ciudad; o a la vez las construcciones que se aproximan al final de su vida útil o sufren de deterioro que los lleva a ser demolidas, lo cual implica que haya una constante necesidad por adquirir recursos naturales para la producción de hormigón y también una gran cantidad de desechos producto de residuos de estas nuevas construcciones y desechos de demoliciones de construcciones viejas.

El presente estudio se lleva a cabo con el objetivo de proponer una alternativa a los restos de hormigón de construcción que son desechados en los botaderos como árido grueso para la elaboración de hormigón reciclado, con la intención de identificar y comparar las propiedades tanto físicas como mecánicas entre un hormigón reciclado y un hormigón normal mediante ensayos de laboratorio.

La investigación busca proporcionar una evaluación de la reutilización de restos de hormigón como sustituto de parte del árido grueso para la elaboración de hormigón reciclado.

Debido a que no se cuenta en el país con normativas sobre la implementación de árido grueso obtenido de residuos de construcción o demoliciones, es conveniente evaluarlo para un mejor desarrollo y conocimiento del tema en el país, e incluso llevar a cabo la creación de normativas para la elaboración de hormigón reciclado.

## **4. Objetivos**

### **4.1. Objetivo General**

Elaborar 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.

### **4.2. Objetivos Específicos**

- Analizar las características del árido reciclado como sustituto del árido grueso natural para la elaboración de hormigón reciclado.
- Comparar las características entre el árido reciclado y el árido grueso natural.
- Encontrar el porcentaje óptimo de árido reciclado que se puede incorporar a la mezcla de hormigón.
- Verificar la resistencia a la compresión de 24 MPa en hormigones reciclados.
- Comparar los costos para la elaboración de hormigón reciclado con respecto al hormigón convencional.

## **5. Marco Teórico**

### **5.1. Hormigón**

Por la facilidad de manipulación, aplicación, durabilidad, resistencia y bajo costo, el hormigón destaca como uno de los materiales más utilizados en la construcción en los últimos años debido a su facilidad para ser diseñado y producido según las especificaciones y necesidades de cada proyecto (Carrasco, Ordoñez, y Peña, 2021).

Se denomina hormigón a la mezcla de tres materiales principales: el cemento, áridos y agua, añadidos a la mezcla en dosificaciones según el diseño previo. Adicionalmente, se le pueden agregar aditivos siempre y cuando sea necesario. Estos componentes brindarán determinadas propiedades al hormigón en función de sus propias características y proporciones de los componentes. Por ende, para poder dominar su uso, se deben conocer tanto las características del producto final, como también de los componentes que lo conforman.

Debido a sus características es utilizado para diversos tipos de estructuras, puentes, túneles, represas, edificaciones, pistas de aterrizaje, carreteras y prácticamente en todo lo referente a construcciones (Quiroz y Salamanca, 2006).

### **5.2. Hormigón reciclado**

Mientras que el hormigón reciclado se obtiene a partir de una mezcla en donde se pretende sustituir, total o parcialmente el agregado natural, por un material que es producto de la trituración de desechos de escombros de edificios, carreteras o toda obra civil que se ha demolido.

Hoy en día, pocos países han desarrollado normativas para la implementación de árido reciclado en la mezcla de hormigón. Estas normativas señalan el porcentaje máximo de árido reciclado que se puede añadir a la mezcla y sus exigencias en cuanto a la calidad del árido que debe tener para su implementación (Navarro, 2014).

### **5.3. Cemento**

El cemento es un material producto de la trituración de clinker, que al combinarse con el agua, produce una reacción química conocida como hidratación. Esta reacción forma una



masa denominada pasta. Esta pasta cuenta con propiedades de adherencia y cohesión que posibilitan la unión con los áridos, formando así el hormigón. Una vez que la pasta se endurece, forma una masa sólida capaz de resistir cargas y tensiones.

Principalmente, el cemento es un clinker que ha sido finamente molido, producto de la cocción de mezclas que contienen cal, alúmina, fierro y sílice en proporciones determinadas.

## 5.4. Agua

El agua es considerada como uno de los elementos primordiales en la elaboración de la mezcla de hormigón, tiene la función, junto con el cemento, de producir los procesos de hidratación y proporcionar manejabilidad al hormigón durante su preparación y colocación.

El agua está dentro de dos campos principales, las cuales son:

- El agua de amasado cumple dos funciones principales: por un lado, se encarga de hidratar el cemento y, además, permite que el hormigón alcance la trabajabilidad necesaria. (Quiroz y Salamanca, 2006)
- El agua de curado es un paso determinante en la etapa de endurecimiento del hormigón. A medida que el hormigón se va secando, pierde agua. El proceso de curado del elemento hormigonado permite mantener la relación agua/cemento, evitando así que se pierda la resistencia esperada.

## 5.5. Áridos

Los áridos son materiales naturales (árido fino y árido grueso) que se utilizan en la elaboración de concreto. Su composición, tamaño, forma y densidad pueden variar según su origen. Por ende, es importante analizar sus características y propiedades antes de diseñar la mezcla para garantizar la durabilidad y resistencia del hormigón. Los áridos pueden clasificarse según su procedencia, tamaño y densidad.

Es necesario contar con áridos que posean una resistencia óptima y durabilidad, cuya superficie se encuentre en su mayoría libre de impurezas como barro, limo y materia orgánica, ya que estas pueden afectar la unión con la pasta de cemento.

### 5.5.1. Clasificación de acuerdo a su procedencia

Los áridos naturales consisten en una mezcla de rocas y minerales que poseen una física y composición química interna. Según su origen se clasifican en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Los áridos naturales se obtienen mediante la explotación de minas, la recolección de depósitos fluviales o la trituración de roca de cantera. Por lo tanto, la variación en la calidad, granulometría, contenido de humedad y absorción dependerá de estos procesos de obtención.

Por otra parte, tenemos a los áridos reciclados (A. R), los cuales pueden tener orígenes variados, desde aquellos resultantes de la demolición parcial o total de estructuras de hormigón armado y pavimentos.

Los áridos reciclados, obtenidos de la trituración de dichos hormigones, presentan características similares en cuanto a tamaños en comparación con los áridos naturales. Sin embargo, los áridos reciclados también tienen otras características propias.

**Tabla 1**

*Clasificación de los áridos de acuerdo a su procedencia*

<b>Naturales o convencionales</b>	<b>Artificiales o no convencionales</b>
Materiales de arrastre de río	Materiales aligerantes de poliestireno o arcilla expandida
Materiales de cantera	Materiales de demolición
Escoria de alto horno	Otros materiales reciclados

**Fuente:** Cordero, Cárdenas, y Rojas (2018).

Tanto para los áridos naturales como para los áridos reciclados, las plantas de producción presentan características muy semejantes. La única excepción es que, en el caso de los áridos reciclados, se requiere incorporar equipos para la eliminación de contaminantes que suelen estar presentes.

### 5.5.2. Clasificación de acuerdo a su tamaño

Los áridos pueden variar en tamaño, y esta distribución de tamaños se denomina granulometría, la cual se determina mediante tamices. En caso de que haya variabilidad en la granulometría, esto puede afectar la homogeneidad del hormigón.

Para una mezcla de hormigón, el contenido de arcilla y limo debe ser lo más mínimo posible, ya que tienden a consumir una gran cantidad de agua y provocan una reducción de la adherencia entre la pasta de cemento y el árido grueso. Por otro lado, las arenas y gravas gruesas pueden producir concretos con poca trabajabilidad.

**Tabla 2**

*Clasificación de acuerdo a su tamaño*

Denominación para concreto	Denominación según tamaño	Tamaño (mm)
Árido grueso	Rajón, piedra bola	>152.4
	Piedra	50.8 - 152.4
	Grava	19.1 - 50.8
	Gravilla	4.76 - 19.1
Árido fino	Arena	0.075 - 4.76
Fracción muy fina	Limo	0.002 - 0.074
	Arcilla	<0.002

**Fuente:** Hernández y Saravia (2018).

### 5.5.3. Clasificación de acuerdo a su densidad

Con respecto a la gravedad específica, se pueden obtener concretos de diversas densidades. Para áridos con una gravedad específica menor de 2.5, se les denomina ligeros, y se pueden obtener concretos livianos. Para áridos con una gravedad específica menor a 2.5 se consideran concretos livianos, de 2.5 a 2.75 normales y por último, para áridos con una gravedad específica mayor de 2.75, se consideran pesados. (Cordero y cols., 2018)

**Tabla 3***Clasificación de los áridos de acuerdo a su densidad*

Clasificación del árido	Masa unitaria aproximada (kg/m <sup>3</sup> )		Variedades más comunes de áridos	Ejemplos de uso
	Del árido	Del concreto		
Liviano	480 - 1300	13 - 100 500 - 1350	Pizarras expandidas, esquistos, escoria, arcilla	Concretos livianos estructurales
Normal	1300 - 2000	2000 - 2500	Arena, grava, piedra triturada, clinker, escoria de fundición	Obras en concreto en general, arena, grava, piedra
Pesado	2000 - 5600	>2500	Barrita, limonita, magnetita, limadura de acero, hematita	Concreto para macizos de anclaje, para protección contra radiaciones, etc.

**Fuente:** Hernández y Saravia (2018).

#### 5.5.4. Propiedades físicas y mecánicas

##### 5.5.4.1. Granulometría

La granulometría se refiere a la distribución de los tamaños de las partículas en los áridos. Se determina mediante tamices, y con la ayuda de cálculos se estiman las partículas de masa que pasan a través de cada tamiz. En Ecuador, este ensayo se lleva a cabo de acuerdo a la norma NTE INEN 696.

Por medio de este ensayo se obtiene una curva que debe estar acorde a los límites establecidos por la norma INEN NTE 872. Esta norma especifica los límites para el árido grueso como también para el árido fino, tanto inferior como superior. Una correcta distribución de partículas garantiza una buena trabajabilidad en el concreto y disminuye la cantidad de vacíos.

La granulometría influye en la cantidad necesaria de áridos (árido fino y árido grueso), en la trabajabilidad, economía, contracción y durabilidad del concreto.

#### **5.5.4.2. Módulo de finura**

El módulo de finura es un valor característico granulométrico del árido fino, en base al cual permite determinar la cantidad de áridos necesarios para el diseño de hormigón.

Según Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, y Tanesi (2004) el módulo de finura debe ser mayor a 2.3 y no debe superar 3.1, en caso donde este valor supere 3.1 es necesario realizar ajustes en la proporción de árido fino y árido grueso.

#### **5.5.4.3. Tamaño máximo de los áridos**

El tamaño máximo del árido se refiere a la abertura más pequeña del tamiz por el cual pasan todas las partículas del árido grueso. Este tamaño máximo influye en la cantidad de agua y cemento necesaria para la mezcla de hormigón, debido a la variación en la cantidad de área superficial.

#### **5.5.4.4. Tamaño máximo nominal de los áridos**

El tamaño máximo nominal se refiere al tamiz más pequeño a través del cual pasa la mayor parte del árido grueso, reteniéndose entre un 5% y un 15% de la masa, según Armas y Torres (2020). A medida que se reduce el tamaño máximo del árido grueso, se incrementa la superficie de contacto entre el árido y la pasta de cemento, mejorando de esta manera la resistencia del hormigón.

#### **5.5.4.5. Forma y textura**

La forma y textura del árido influyen en las propiedades del hormigón en estado fresco. En el caso de áridos con textura angular, se requiere una mayor cantidad de agua para obtener una mezcla trabajable, lo que también implica incrementar la cantidad de cemento para no alterar la relación agua/cemento.

Según Armas y Torres (2020), el uso de áridos de textura redondeada proporciona altas densidades con una menor energía de compactación debido a un mejor acomodo de las partículas. A diferencia de los áridos con textura angular, que requieren una mayor energía

de compactación, sin embargo, estos áridos proporcionan una gran estabilidad y soporte.

La adherencia entre la pasta de cemento y el árido se ve afectada por el tipo de textura del árido. Existe una mejor adherencia con el uso de áridos de textura angular.

#### 5.5.4.6. Densidad

La densidad de un árido se define como la relación entre su masa y su volumen. Los métodos para determinar la densidad están estipulados por la norma NTE INEN 856 para áridos finos y la norma NTE INEN 857 para áridos gruesos.

**Densidad (SH)(Árido fino)** Relación entre la densidad de los áridos, la cual se obtiene al secarlos mediante calentamiento en un horno a  $110\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , y la densidad del agua destilada a una temperatura específica.

$$Densidad (SH), kg/m^3 = \frac{997.5 A}{(B + S - C)} \quad (1)$$

Donde:

A: masa de la muestra seca al horno, g

B: masa del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración, g

C: masa del picnómetro lleno con muestra y agua hasta la marca de calibración, g

S: masa de la muestra saturada superficialmente seca, g.

**Densidad (SH)(Árido grueso)** Masa de las partículas del árido, secas al horno, por unidad de volumen, considerando el volumen que ocupan los permeables e impermeables, sin tener en cuenta los espacios vacíos existentes entre las partículas.

$$Densidad (SH), kg/m^3 = \frac{997.5 A}{(B - C)} \quad (2)$$

Donde:

A: masa en aire de la muestra seca al horno, g

B: masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca, g, y

C: masa aparente en agua de la muestra saturada, g.

#### 5.5.4.7. Absorción y humedad

La absorción está relacionada con la porosidad del árido. A medida que el árido es más poroso, tendrá una menor resistencia mecánica. Por lo tanto, a menor absorción, el árido será más compacto y de mejor calidad. Con lo cual, el árido puede presentar las siguientes posibilidades:

- **Absolutamente seco:** todos los poros vacíos tanto internos como los superficiales.
- **Seco al aire:** parte de los poros internos se encuentran llenos.
- **Saturado y superficialmente seco:** La superficie del arido se encuentra en estado seco, sin embargo los poros internos y superficiales se encuentran llenos de agua en su totalidad.
- **Húmedo:** los poros internos y superficiales se encuentran llenos, pero con la acumulación de humedad en la superficie.

Es necesario considerar la cantidad de agua añadida según las condiciones de humedad de los áridos. Si la cantidad de agua no se ajusta por la humedad, la relación agua/cemento en la mezcla se verá afectada, lo que podría perjudicar la resistencia a compresión y la trabajabilidad del concreto.

#### 5.5.4.8. Masa unitaria

La masa unitaria de un árido se define como la cantidad de masa necesaria para llenar un recipiente de volumen específico, teniendo en cuenta los vacíos entre las partículas. La masa volumétrica del árido frecuentemente utilizado en el hormigon oscila entre 1200 y 1750 kg/m<sup>3</sup>. La presencia de vacíos afecta en la demanda de mortero en el diseño de la mezcla, variando entre el 30% y el 45% para el árido grueso, y entre el 40% y el 50% para el árido fino.

La angularidad del árido aumenta la cantidad de espacios vacíos, por el contrario los tamaños mayores y una buena gradación del árido disminuyen los espacios vacíos. Para determinar la masa volumétrica y el contenido de espacios vacíos, se sigue el procedimiento establecido por la norma NTE INEN 858.

**Masa unitaria suelta.** La masa unitaria suelta se refiere a la colocación del árido dentro de un recipiente mediante el simple efecto de la gravedad a una cierta altura. Este valor es menor en comparación con la masa unitaria compacta y proporciona una idea del volumen de espacios vacíos que se generan con el acomodo de los áridos, al mismo tiempo que refleja la influencia de la forma y textura del árido.

**Masa unitaria compacta.** La masa unitaria compacta se determina colocando el árido en tres capas distintas y compactándolo con 25 golpes en cada capa.

## **5.6. Diseño de mezcla de hormigón por medio del método ACI**

El método ACI, por sus siglas en inglés (American Concrete Institute), se utiliza para el diseño de mezclas de hormigón, principalmente en Estados Unidos. Debido a lo práctico que resulta utilizar este método, ha sido adaptado por muchas otras partes del mundo.

Para este método, se deben considerar varias propiedades que presentará el hormigón en estado fresco o endurecido, así como la durabilidad, resistencia, trabajabilidad y economía. El objetivo es optimizar al máximo las propiedades de los materiales sin dejar de lado los requisitos de diseño específicos para una aplicación particular.

Previamente, el método ACI 211.1 especifica que se deben conocer las propiedades de los materiales a utilizar. Estas propiedades se obtendrán mediante ensayos de laboratorio, los cuales estarán regulados por las normas del INEN (Servicio Ecuatoriano de Normalización).

Los valores que se deben determinar son:

- Granulometría de los áridos.
- Módulo de finura del árido fino.
- Tamaño máximo del árido grueso.
- Densidad seca al horno y absorción de los áridos.
- Peso unitario del árido grueso.
- Densidad y tipo del cemento a utilizar.
- Humedad de los agregados, previo a realizar la mezcla.



### 5.6.1. Procedimiento para el diseño de mezclas

#### 5.6.1.1. Selección del asentamiento

La selección del asentamiento depende de los requerimientos que el hormigón va a necesitar en términos de trabajabilidad. Para ello, se utiliza la siguiente tabla:

**Tabla 4**

*Valores de asentamiento recomendados para distintas clases de construcción*

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de concreto)	Grado de trabajabilidad trabajabilidad	Tipo de estructura y condiciones de colocación
0 - 2.0	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibraciones de formaleta.
2.0 - 3.5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados con máquina mecánica.
3.5 - 5.0	Semi - seca	Pequeño	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales.
5.0 - 10.0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas y pavimentos, compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración.
10.0 - 15.0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactarlo con demasiada vibración.

**Fuente:** Niño (2010)

### 5.6.1.2. Selección del tamaño máximo nominal de los áridos

La cantidad de mortero necesaria para la adherencia de los áridos se estimará acorde al tamaño máximo nominal que estos presenten. Se pueden obtener resultados más favorables al reducir los tamaños máximos nominales. Además, el tamaño máximo de los áridos será utilizado para determinar la cantidad de aire y agua en la mezcla.

**Tabla 5**

*Valores recomendados de TMN para distintos tipos de construcción*

Dimensión mínima del elemento (cm)	Tamaño máximo nominal en mm (pulgadas)			
	Muros reforzados, vigas y columnas	Muros sin refuerzos	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6 - 15	12 (1/2") - 19 (3/4")	19 (3/4")	19 (3/4") - 25 (1")	19 (3/4") - 38 (1 1/2")
19 - 29	19 (3/4") - 38 (1 1/2")	38 (1 1/2")	38 (1 1/2") - 76 (3")	
30 - 74	38 (1 1/2") - 76 (3")	76 (3")	38 (1 1/2") - 76 (3")	76 (3")
75 o más	38 (1 1/2") - 76 (3")	152(6")	38 (1 1/2") - 76 (3")	76 (3") - 152 (6")

**Fuente:** Niño (2010)

### 5.6.1.3. Estimación del contenido de aire presente en la mezcla

Estimar el contenido de aire sirve para evaluar y controlar la resistencia, así como la durabilidad que presentará el hormigón ante condiciones naturales, tales como la corrosión de los aceros, congelación o deshielo y la reacción álcali-agregado. Sin embargo, en ciertas circunstancias, la presencia o incorporación de aire en la mezcla resulta beneficiosa y puede mejorar el comportamiento ante las condiciones naturales previamente mencionadas.

**Tabla 6**

*Contenido aproximado de aire en el hormigón para distintos grados de exposición*

Contenido de aire					
Árido grueso		Porcentaje promedio aproximado de aire atrapado	Porcentaje promedio total de aire recomendado para los siguientes grados de exposición		
Pulgadas	mm		Suave	Mediano	Severo
3/8	9.51	3.00	4.50	6.00	7.50
1/2	12.5	2.50	4.00	5.50	7.00
3/4	19.1	2.00	3.50	5.00	6.00
1	25.4	1.50	3.00	4.50	6.00
1 1/2	38.1	1.00	2.50	4.50	5.50
2	50.8	0.50	2.00	4.00	5.00
3	76.1	0.30	1.50	3.50	4.50
6	152.4	0.20	1.00	3.00	4.00

**Fuente:** Niño (2010)

#### **5.6.1.4. Estimación de la cantidad de agua**

Como se mencionó en los apartados anteriores, el agua influye en la determinación de varias cualidades que presentará el hormigón en estado fresco o endurecido. Además, la estimación del agua estará relacionada con la forma de los áridos, sus tamaños, el aire atrapado en la mezcla y, en caso de aditivos, su adición. Debido a esto, se han diseñado y estudiado métodos que ayudan a estimar la cantidad de agua de mezclado para una primera mezcla. El ACI presenta una tabla para estimar este valor. "Los valores proporcionados están influenciados por el asentamiento, el tamaño máximo nominal de los áridos y el contenido de aire en la mezcla." (Niño, 2010).

**Tabla 7**

*Requerimiento aproximado de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del árido*

CANTIDAD DE AGUA									
Condición del contenido de aire	Asentamiento cm	Agua en kg/m <sup>3</sup> de concreto para los TMN del agregado indicado							
		9.50	12.50	19.10	25.40	38.10	50.00	76.10	152.40
		–	–	–	–	–	**	**	**
Concreto sin aire incluido	3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
	8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
	15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	-
	Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin aire incluido, por ciento	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido	3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
	8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
	15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	-
	Promedio recomendable de contenido total de aire por ciento	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3
* Estas cantidades de agua de mezclado deben utilizarse en los cálculos de los factores de cemento para mezclas de prueba. Son las máximas para agregados gruesos angulares razonablemente bien formados graduados dentro de los límites de las especificaciones aceptadas.									
** Los valores de asentamiento para un concreto que contenga un agregado mayor de 40 mm están basados en pruebas de asentamiento efectuado después de remover las partículas mayores de 40 mm por medio de cribado húmedo.									

**Fuente:** Niño (2010)

### 5.6.1.5. Selección de la relación agua/cemento

Dado que es un valor importante en el diseño de mezclas, el ACI establece recomendaciones y límites para la relación agua/cemento, los cuales se basan en los requisitos de resistencia y durabilidad.

Para la estimación de la relación a/c se utiliza la siguiente tabla:

**Tabla 8***Relación a/c*

Relación agua/cemento		
Resistencia a la compresión a los 28 días en kg/cm <sup>2</sup> (psi)	Concreto sin incluir de aire Relación absoluta por peso	Concreto con incluir de aire Relación absoluta por peso
175 (2500)	0.65	0.56
210 (3000)	0.58	0.50
245 (3500)	0.52	0.46
280 (4000)	0.47	0.42
315 (4500)	0.43	0.38
350 (5000)	0.40	0.35

**Nota:** La tabla muestra la relación entre la resistencia a la compresión y algunos valores de la relación a/c. Niño (2010).

#### 5.6.1.6. Cálculo para el contenido de cemento.

Dado que se tiene el contenido de agua y la relación agua/cemento para obtener la cantidad de cemento necesaria, procedemos a calcular dicha cantidad con la siguiente relación:

$$\frac{a}{c} = \frac{\text{Cant. Agua (kg)}}{\text{Cant. Cemento}} \quad (3)$$

#### 5.6.1.7. Estimación de contenido de árido grueso (Granulometría bien gradada)

Según el método ACI, para determinar el contenido de árido grueso, se parte de obtener el volumen de árido grueso por metro cúbico de hormigón (B). Este método se apoya en una tabla que depende de los volúmenes de los áridos secos al horno, el módulo de finura y el tamaño máximo nominal de los áridos.

**Tabla 9***Volumen de árido grueso*

Contenido de grava							
Máximo tamaño nominal de áridos		Volumen del árido grueso varillado (compactado) en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de árido fino					
		MÓDULO DE FINURA					
Pulgadas	mm	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2
3/8	9.51	0.52	0.5	0.48	0.46	0.44	0.42
1/2	12.5	0.61	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51
3/4	19.1	0.68	0.66	0.64	0.62	0.6	0.58
1	25.4	0.73	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63
1 1/2	38.1	0.77	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67
2	50.8	0.8	0.78	0.76	0.74	0.72	0.7
3	76.1	0.84	0.82	0.8	0.78	0.76	0.74
6	152.4	0.89	0.87	0.85	0.83	0.81	0.79

\* Los volúmenes están basados sobre agregados en condiciones de secado de horno descritos en ASTM C 29.  
 \* Estos volúmenes son seleccionados de relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado para construcción usual reforzada.

**Nota:** La tabla representa el volumen de grava por unidad de volumen de concreto (b/bo). Niño (2010),

El valor de árido grueso por metro cúbico se determina multiplicando el valor de b/bo por el valor de bo'. A su vez, el valor de bo' se calcula a partir de la masa unitaria compacta (MUC) y la densidad del árido grueso (dg).

$$b_{o'} = \frac{MUC}{dg} \quad (4)$$

De tal manera que:

$$B = (b/b_o) \times b_{o'} \quad (5)$$

#### 5.6.1.8. Estimación del contenido de árido fino.

Una vez estimado el contenido de árido grueso y en base a los volúmenes previamente

obtenidos (aire, agua, cemento, árido grueso), podemos estimar la cantidad de árido fino mediante la siguiente fórmula:

$$V_{\text{Árido fino}} = 1 - V_{\text{Aire}} - V_{\text{Agua}} - V_{\text{Cemento}} - V_{\text{Árido grueso}} \quad (6)$$

#### 5.6.1.9. Estimación de contenido de árido grueso y árido fino (Granulometría mal gradada)

En situaciones en las que el árido fino o el árido grueso no cumplen con los límites granulométricos, es necesario llevar a cabo una optimización de la granulometría. El objetivo es determinar la mejor combinación de árido fino y árido grueso para lograr una mezcla de hormigón con óptima manejabilidad y resistencia, considerando un contenido de cemento específico. Para llevar a cabo esta optimización, se utiliza el método Road Note Laboratory (RNL).

Para obtener un rango granulométrico que satisfaga necesidades de las mezclas de hormigón tales como manejabilidad, resistencia y trabajabilidad, se ha desarrollado la Tabla 10, la cual se ajusta según el tamaño máximo.

Para ello se utiliza el método gráfico que especifica lo siguiente:

1. Se dibuja un cuadro de 10 divisiones en las ordenadas y 10 en la abscisa.
2. Los ejes de las ordenadas se enumeran de abajo hacia arriba, desde 0 hasta 100. En cuanto a los ejes de las abscisas, se ordenan en la parte inferior de 100 a 0 y en la parte superior de 0 a 100, comenzando desde la izquierda. Este diseño permite que cualquier valor superior sumado al valor correspondiente inferior de 100.
3. Se denomina al eje superior porcentaje de árido fino y al eje inferior porcentaje de árido grueso.
4. Sobre el eje de las abscisas de la izquierda se coloca la granulometría del árido fino y sobre el eje opuesto se coloca la granulometría del árido grueso.
5. Una vez realizado el procedimiento anterior, se procede a unir con líneas rectas los puntos correspondientes a cada tamiz en las dos granulometrías.

6. Se observará que las líneas rectas son inclinadas, ahí se colocan los puntos que corresponden a la especificación elegida de la tabla.

**Tabla 10**

*Rango granulométrico recomendado*

Tamiz		Límite de los porcentajes que pasan los siguientes tamaños máximos								
pulg	mm	90.6 mm (3 1/2")	76.1 mm (3")	64.0 mm (2 1/2")	50.8 mm (2")	38.1 mm (1 1/2")	25.4 mm (1")	19.0 mm (3/4")	12.7 mm (1/2")	9.51 mm (3/8")
3 1/2	90.6	100								
3	76.1	94 91	100							
2 1/2	64	89 83	94 91	100						
2	50.8	82 73	87 80	92 88	100					
1 1/2	38.1	74 62	78 68	83 75	90 85	100				
1	25.4	64 50	68 55	72 60	78 68	87 80	100			
3/4	19	58 42	62 47	65 51	71 58	78 68	90 85	100		
1/2	12.7	50 34	53 37	57 41	62 47	68 55	78 68	87 80	100	
3/8	9.51	45 29	48 32	51 35	56 40	62 47	71 58	78 68	90 85	100
No. 4	4.76	36 20	38 22	40 24	44 27	48 32	56 40	62 47	71 58	78 68
No. 8	2.36	28 13	30 15	32 16	34 18	38 22	44 27	48 32	55 40	61 46
No. 16	1.18	22 9	23 10	25 11	27 13	30 15	34 18	38 22	44 27	48 32
No. 30	600	17 6	18 7	20 8	21 9	23 10	27 13	30 15	34 19	38 22
No. 50	300	14 4	14 4	15 5	17 8	18 7	21 9	23 10	27 13	30 15
No. 100	150	11 3	11 3	12 4	13 4	14 5	17 6	18 7	21 9	23 10

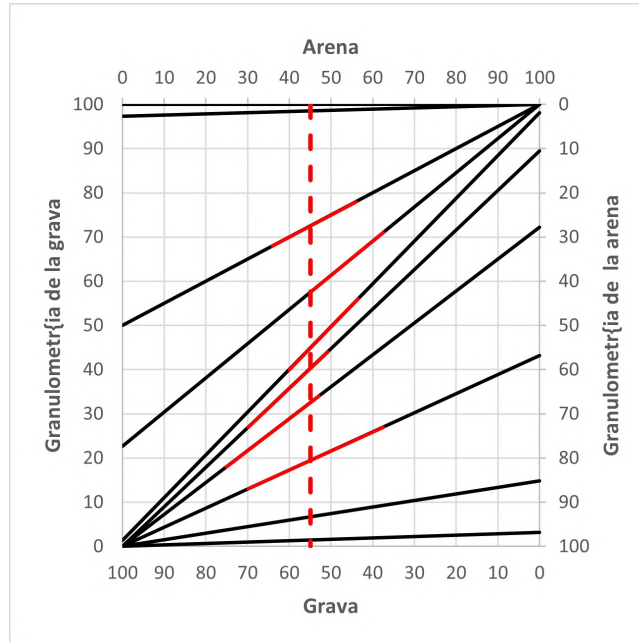
**Fuente:** Niño (2010)

7. Se traza un eje o una línea vertical que separe los puntos encontrados anteriormente en igual cantidad tanto a izquierda como hacia la derecha.
8. El resultado representa el porcentaje de árido fino y árido grueso que se requiere para realizar una mezcla óptima de hormigón.



**Figura 1**

*Optimización de las granulometrías*



**Nota:** El presente gráfico representa la optimización de la granulometría mediante el método Rod Note Laboratory (RNL)

Con la optimización de la granulometría, el contenido de árido fino y árido grueso se obtiene de manera similar al método ACI, al sumar los volúmenes de cemento, agua y aire, y luego restar esa suma a  $1 \text{ m}^3$ . El resultado de este cálculo es el volumen de árido fino y árido grueso.

Una vez que se ha determinado el volumen de los áridos y calculado su densidad promedio, es posible determinar la masa tanto del árido fino como del árido grueso. La densidad promedio de los áridos es un valor promediado según los porcentajes obtenidos a través de la optimización granulométrica.

$$d_{prom} = (\%f) \times (df) + (\%g) \times (dg) \quad (7)$$

Donde:

dg = Densidad del árido grueso

df = Densidad del árido fino

d prom = Densidad promedio

%f = Porcentaje del árido fino, en forma decimal

%g = Porcentaje del árido grueso, en forma decimal

#### **5.6.1.10. Ajuste de la cantidad agua debido a la humedad presente en los áridos**

Dado que la humedad en los áridos puede variar según las condiciones climáticas y de almacenamiento, y el diseño considera áridos secos, es necesario corregir la cantidad de agua a agregar a la mezcla.

### **5.7. Características y comportamiento del Hormigón**

#### **5.7.1. Trabajabilidad**

La trabajabilidad de una mezcla de hormigón se define como la facilidad con la que puede ser trasladada, compactada y colocada en el lugar requerido. Está representado mediante el grado de compacidad, plasticidad, y consistencia o movilidad (Niño, 2010).

Como la trabajabilidad depende de la consistencia, esta puede variar de acuerdo con las necesidades en la obra. No es lo mismo trabajar con un hormigón seco, que normalmente se utiliza en pavimentos o áreas grandes, que trabajar con ese mismo hormigón en una cimentación en la cual se presenta una cantidad considerable de refuerzo de acero.

#### **5.7.2. Durabilidad**

La durabilidad del cemento hidráulico se define como su capacidad para resistir la acción del medio ambiente, ataques químicos, abrasión y otras condiciones de servicio, asegurando que sus características y propiedades se mantengan a lo largo de su vida útil (Quiroz y Salamanca, 2006).

#### **5.7.3. Resistencia**

La resistencia es una característica importante que presenta el hormigón para resistir esfuerzos, tanto a tracción, tensión, corte y compresión, siendo esta última la más significativa de todas. Por ende, conocer la resistencia que va a presentar el hormigón a diferentes eventos

de esfuerzos resulta indispensable para los proyectistas al momento de diseñar estructuras.

Para determinar la resistencia del hormigón, "Se emplean cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, o cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura. Estos cilindros se colocan en una máquina universal, a la cual se les aplican cargas axiales" (Valle y Torres, 2022). La carga se aplica a una velocidad de  $0.25 \pm 0.05$  MPa/s y se mantiene constante durante el ensayo. Es posible aumentar la velocidad una vez que el espécimen ha alcanzado su resistencia máxima y ha fallado.

Los factores que afectan la resistencia incluyen:

- Relación agua/cemento.
- Contenido y tipo de cemento.
- Características de los agregados o áridos.
- Curado del concreto.
- Edad del concreto.

## **6. Marco metodológico**

Para el desarrollo de esta investigación fue necesaria la aplicación de múltiples ensayos y métodos necesarios para determinar las características de los materiales que fueron utilizados para el diseño de mezclas, estos ensayos están planteados por la normativa NTE INEN.

Los estudios fueron necesarios para verificar la factibilidad de la aplicación de los áridos reciclados en el diseño de mezclas para un hormigón de 24 MPa.

### **6.1. Obtención de los áridos**

El crecimiento experimentado por la ciudad en el ámbito de la construcción ha generado la necesidad de que el sector urbano se adapte a las nuevas demandas de servicios básicos como nuevas conexiones tanto para las redes de agua potable como para el alcantarillado, lo que ha llevado a la ruptura de vías, compuestas principalmente por capas de rodadura de hormigón armado, el mismo que tendrá que ser desalojado y depositado en las escombreras de la ciudad.

Para hacer frente a esta problemática, hemos obtenido los materiales provenientes de demoliciones de estructuras de hormigón de vías realizadas por el Municipio de Cuenca en la Av. Yana Urco y la Calle Río Upano.

## Figura 2

*Materiales obtenidos de demoliciones de estructuras de hormigón*



**Nota:** Material obtenido en la Av. Yana Urco y Calle Río Upano

## 6.2. Proceso de trituración

Para la obtención de los tamaños requeridos de árido reciclado se empleó un proceso de trituración, transportando el material que se obtuvo de la demolición de una vía hacia una cantera ubicada en el sector de Bullcay – Gualaceo, a continuación, se describirá el proceso que se llevó a cabo para la obtención de dicho material.

### 6.2.1. Selección de materiales de demoliciones

Durante la recolección de los materiales, es necesario realizar una selección de los escombros, evitando que estos estén contaminados con alguna otra sustancia que pueda ocasionar inconvenientes al momento de realizar la trituración o la mezcla como tal, evitando que lleve materia orgánica o metales propios de la estructura.

### 6.2.2. Proceso para la obtención de árido reciclado

La cantera utilizada consta de un sistema de trituración primaria y secundaria.

En el proceso de trituración primaria, una trituradora de mandíbulas reduce el tamaño de los escombros, depositándolos luego en una banda transportadora que los lleva hacia una criba.

El sistema de cribado es vibratorio y consta de tres mallas o tamices encargados de clasificar granulométricamente el material que llega de la banda, la clasificación da como resultado; arena, grava de 3/4 de pulgada y gravilla, además como método de limpieza se emplea un sistema de lavado en la banda que transporta la arena para eliminar el polvo que quede en ella como resultado de la trituración.

Una vez realizado este proceso, otra banda se encarga de llevar el material que no ha sido clasificado hacia la trituración secundaria que consta de una trituradora de mandíbula que se encargara de reducir aún más el material restante para de nuevo ser transportado hacia la criba donde se repetirá el proceso anterior dando así como concluido el proceso de trituración.

### 6.2.3. Cantidades obtenidas del proceso de trituración

Para el proceso de trituración se necesitó una muestra de escombros de hormigón de 1000 kg para que la cantera pueda funcionar correctamente, mediante la trituración se obtuvo arena, grava y gravilla, una vez acabado con el proceso se pesó el material respectivamente obteniendo los siguientes resultados.

**Tabla 11**

*Cantidades de árido reciclado obtenido del proceso de trituración*

<b>Cantidades resultantes de trituración</b>	
<b>Material</b>	<b>Peso (kg)</b>
Árido grueso (3/4")	690.00
Gravilla	80.00
Árido fino	164.00
Perdidas en polvo	66.00
<b>Total</b>	<b>1000.00</b>

### 6.3. Propiedades de los áridos

A continuación se presenta las características tanto físicas como mecánicas de los áridos a utilizar, adicionalmente se muestra cómo se diferencian los áridos reciclados en comparación a los áridos naturales, en base a rangos característicos que se tienen para cada uno de los áridos, como también de las normativas empleadas para su determinación.

#### 6.3.1. Granulometría

Con la finalidad de asegurar una adecuada distribución granulométrica de los áridos, ya sean finos, gruesos o reciclados, se lleva a cabo la determinación de la granulometría. Los límites de esta distribución deben estar en concordancia con los establecidos por la normativa NTE INEN 872.

Para llevar a cabo el análisis granulométrico del árido fino, la norma establece que el tamaño de la muestra debe ser de al menos 300 g. En este ensayo, se utilizó una muestra de 578.40 g y se llevaron a cabo el tamizado y lavado, utilizando los tamices No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100 y No. 200.

**Tabla 12**

*Resultado del ensayo granulométrico del árido fino*

<b>Ensayo granulométrico NTE INEN 696 - NTE INEN 872</b>		
<b>Muestra</b>	Peso inicial de la muestra (g)	578.40
<b>Resultados</b>	Módulo de finura (-)	2.67
	Contenido de fino (%)	2.56
	Granulometría	Bien gradada

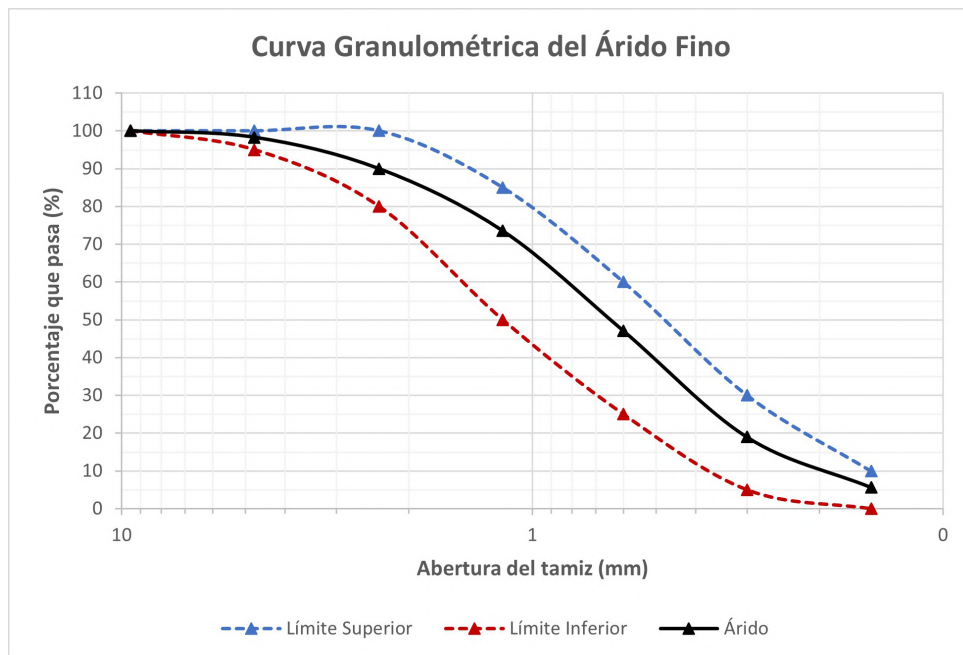
**Tabla 13**

*Análisis granulométrico del árido fino*

Análisis granulométrico del árido grueso								
Tamiz		Masa retenida	Retenido	Retenido	Pasante	Límite Inferior	Límite Superior	Cumplimiento norma
pulg	mm	(g)	parcial (%)	acumulado (%)	acumulado (%)			NTE INEN 872
3/8	9.50	0.00	0	0	100	100	100	Cumple
No 4	4.75	9.90	2	2	98	95	100	Cumple
No 8	2.36	48.10	8	10	90	80	100	Cumple
No 16	1.18	95.10	16	26	74	50	85	Cumple
No 30	0.60	153.10	26	53	47	25	60	Cumple
No 50	0.30	162.60	28	81	19	5	30	Cumple
No 100	0.15	76.70	13	94	6	0	10	Cumple
No 200	0.075	18.10	3	97	3	-	-	Cumple
<b>Fondo</b>		14.80	2.56	100	0	-	-	
<b>Total</b>		578.40						

**Figura 3**

*Curva granulométrica del árido fino*



En la Figura 3, se observa que la curva granulométrica del árido fino se encuentra dentro de los límites establecidos por la Norma NTE INEN 872. Además, la Tabla 12 detalla el



módulo de finura del árido fino, con un valor específico de 2.67. Es relevante destacar que este módulo de finura cumple con las recomendaciones del ACI, que establecen que dicho valor debe ser mayor a 2.30 y menor que 3.10.

Para el árido grueso, tanto el árido grueso natural como el árido grueso reciclado, el tamaño de la muestra está vinculado al tamaño máximo nominal del árido, de acuerdo con lo establecido por la norma NTE INEN 696. Según esta norma, el tamaño de la muestra debe ser de al menos 5 kg para un árido grueso con un tamaño máximo nominal de 19 mm (3/4"). Este análisis se realiza mediante el tamizado de la serie No. 6 de la norma NTE INEN 872, a través de los siguientes tamices: 1", 3/4", 1/2", 3/8", No. 4.

**Tabla 14**

*Resultados del ensayo granulométrico del árido grueso natural y árido grueso reciclado*

<b>Ensayo granulométrico NTE INEN 696 - NTE INEN 872</b>			
		<b>A. G. Natural</b>	<b>A. Reciclado</b>
<b>Muestra</b>	Peso inicial de la muestra (g)	5114.00	5048.00
	Tamaño máximo nominal (mm)	19.00	19.00
	Tamaño máximo (mm)	25.00	25.00
<b>Resultado</b>	Granulometría	Bien gradada	Bien gradada

**Tabla 15**

*Análisis granulométrico del árido grueso natural*

<b>Análisis granulométrico del árido grueso</b>								
<b>Tamiz</b>	<b>Masa retenida</b>	<b>Retenido</b>	<b>Retenido</b>	<b>Pasante</b>	<b>Límite Inferior</b>	<b>Límite Superior</b>	<b>Cumplimiento norma</b>	
<b>pulg mm</b>	<b>(g)</b>	<b>parcial (%)</b>	<b>acumulado (%)</b>	<b>acumulado (%)</b>			<b>NTE INEN 872</b>	
1"	25	0.00	0	0	100	100	100	Cumple
3/4"	19	189.90	4	4	96	90	100	Cumple
1/2"	12.5	3472.10	68	72	28	20	55	Cumple
3/8"	9.5	1056.20	21	92	8	0	15	Cumple
No 4	4.75	379.40	7	100	0	0	5	Cumple
<b>Fondo</b>		16.40	0	100	0	-	-	
<b>Total</b>		5114.00						

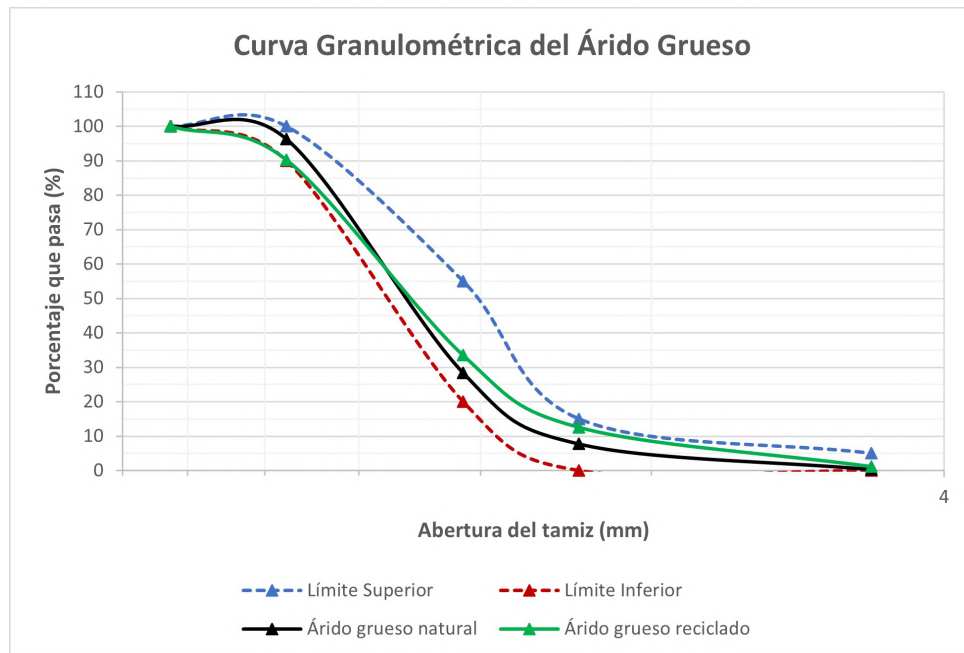
**Tabla 16**

*Análisis granulométrico del árido grueso reciclado*

Análisis granulométrico del árido grueso reciclado								
Tamiz	Masa retenida	Retenido	Retenido	Pasante	Límite Inferior	Límite Superior	Cumplimiento norma	
pulg	mm	(g)	parcial (%)	acumulado (%)	acumulado (%)			NTE INEN 872
1"	25	0.00	0	0	100	100	100	Cumple
3/4"	19	491.30	10	10	90	90	100	Cumple
1/2"	12.5	2865.60	57	66	34	20	55	Cumple
3/8"	9.5	1056.70	21	87	13	0	15	Cumple
No 4	4.75	575.50	11	99	1	0	5	Cumple
<b>Fondo</b>		58.90	1	100	0	-	-	
<b>Total</b>		5048.00						

**Figura 4**

*Curva granulométrica del ensayo granulométrico del árido grueso*



En la Tabla 4, se muestra la granulometría del árido grueso, que incluye el árido grueso natural como también el árido grueso reciclado, junto con sus límites granulométricos. La granulometría del árido grueso natural muestra una gradación adecuada, siendo óptima para el diseño de mezcla. Es importante destacar que la granulometría del árido grueso natural

será empleada en el diseño de hormigón convencional.

Además, se puede observar que la granulometría del árido reciclado depende en gran medida del sistema de trituración utilizado en su proceso de producción, logrando una granulometría adecuada mediante la trituración de mandíbula.

Por otra parte, dado que el árido grueso a utilizar en la mezcla de hormigón consiste en la combinación de árido grueso natural y un porcentaje de árido grueso reciclado, resulta apropiado llevar a cabo el ensayo granulométrico teniendo en cuenta esta combinación. Esto con la finalidad de verificar si, al combinar ambas granulometrías, se cumplen los límites establecidos y realizar las correcciones necesarias en el diseño de la mezcla de hormigón en caso de ser requerido.

**Tabla 17**

*Resultados del ensayo granulométrico del árido grueso con distintos % de árido grueso reciclado*

Ensayo granulométrico NTE INEN 696 - NTE INEN 872						
		10% A. R.	20% A. R.	30% A. R.	40% A. R.	50% A. R.
<b>Muestra</b>	Peso inicial de la muestra (g)	5074.00	5096.00	5025.00	5113.00	5138.00
	Tamaño máximo nominal (mm)	19.00	19.00	19.00	19.00	19.00
	Tamaño máximo (mm)	25.00	25.00	25.00	25.00	25.00
<b>Resultado</b>	Granulometría	Bien gradada	Bien gradada	Bien gradada	Mal gradada	Mal gradada

**Tabla 18**

*Análisis granulométrico del árido grueso con 10% de árido grueso reciclado*

Análisis granulométrico del árido grueso con 10% de árido grueso reciclado								
Tamiz	Masa retenida	Retenido	Retenido	Pasante	Límite Inferior	Límite Superior	Cumplimiento norma	
pulg mm	(g)	parcial (%)	acumulado (%)	acumulado (%)			NTE INEN 872	
1*	25	0	0	100	100	100	Cumple	
3/4*	19	138	3	97	90	100	Cumple	
1/2*	12.5	3386	67	69	31	20	Cumple	
3/8*	9.5	1044	21	90	10	0	Cumple	
No 4	4.75	460	9	99	1	0	Cumple	
<b>Fondo</b>		46	1	100	0	-		
<b>Total</b>		5074						

**Tabla 19***Análisis granulométrico del árido grueso con 20% de árido grueso reciclado*

Análisis granulométrico del árido grueso con 20% de árido grueso reciclado								
Tamiz	Masa retenida	Retenido	Retenido	Pasante	Límite Inferior	Límite Superior	Cumplimiento norma	
pulg mm	(g)	parcial (%)	acumulado (%)	acumulado (%)			NTE INEN 872	
1"	25	0	0	100	100	100	Cumple	
3/4"	19	152	3	97	90	100	Cumple	
1/2"	12.5	3384	66	69	31	20	Cumple	
3/8"	9.5	1133	22	92	8	0	Cumple	
No 4	4.75	409	8	100	0	5	Cumple	
<b>Fondo</b>	18		0	100	0	-		
<b>Total</b>	5096							

**Tabla 20***Análisis granulométrico del árido grueso con 30% de árido grueso reciclado*

Análisis granulométrico del árido grueso con 30% de árido grueso reciclado								
Tamiz	Masa retenida	Retenido	Retenido	Pasante	Límite Inferior	Límite Superior	Cumplimiento norma	
pulg mm	(g)	parcial (%)	acumulado (%)	acumulado (%)			NTE INEN 872	
1"	25	0	0	100	100	100	Cumple	
3/4"	19	138	3	97	90	100	Cumple	
1/2"	12.5	3258	65	68	32	20	Cumple	
3/8"	9.5	1172	23	91	9	15	Cumple	
No 4	4.75	440	9	100	0	5	Cumple	
<b>Fondo</b>	17		0	100	0	-		
<b>Total</b>	5025							

**Tabla 21***Análisis granulométrico del árido grueso con 40% de árido grueso reciclado*

Análisis granulométrico del árido grueso con 40% de árido grueso reciclado								
Tamiz	Masa retenida	Retenido	Retenido	Pasante	Límite Inferior	Límite Superior	Cumplimiento norma	
pulg mm	(g)	parcial (%)	acumulado (%)	acumulado (%)			NTE INEN 872	
1"	25	0	0	100	100	100	Cumple	
3/4"	19	181	4	96	90	100	Cumple	
1/2"	12.5	2774	54	58	42	20	Cumple	
3/8"	9.5	1315	26	84	16	15	No cumple	
No 4	4.75	832	16	100	0	5	Cumple	
<b>Fondo</b>	11		0	100	0	-		
<b>Total</b>	5113							

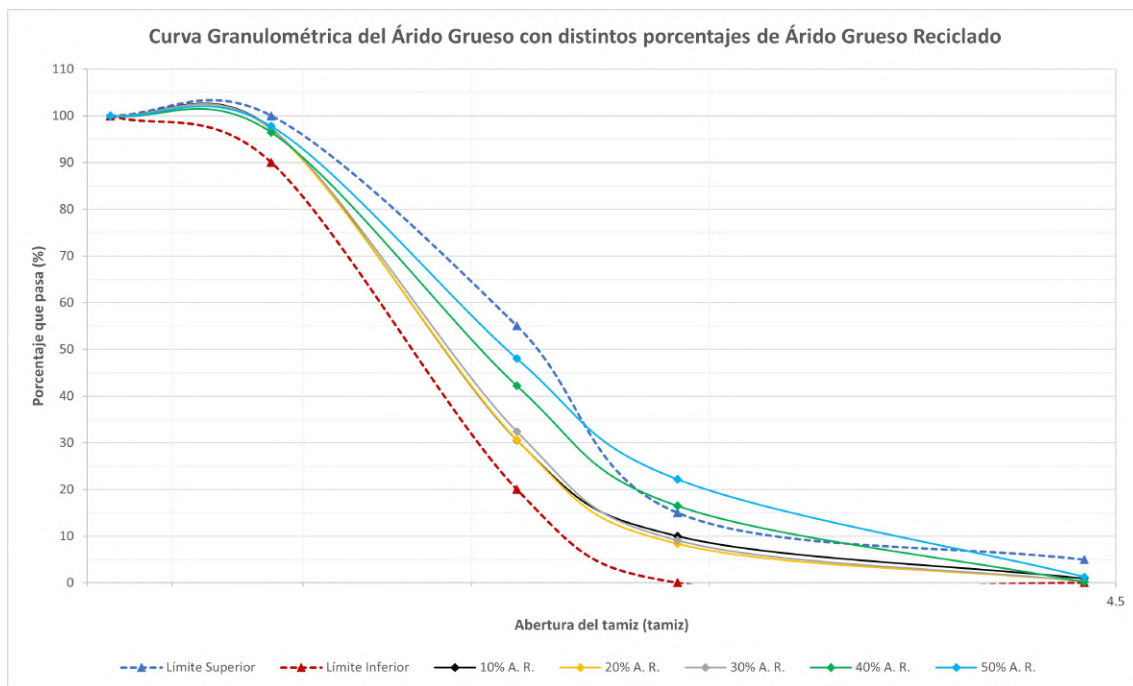
**Tabla 22**

*Análisis granulométrico del árido grueso con 50% de árido grueso reciclado*

Análisis granulométrico del árido grueso con 50% de árido grueso reciclado										
Tamiz	Masa retenida	Retenido	Retenido	Pasante	Límite Inferior	Límite Superior	Cumplimiento norma			
pulg	mm	(g)	parcial (%)	acumulado (%)	acumulado (%)			NTE INEN 872		
1'	25	0	0	0	100	100	100	Cumple		
3/4'	19	114	2	2	98	90	100	Cumple		
1/2'	12.5	2556	50	52	48	20	55	Cumple		
3/8'	9.5	1329	26	78	22	0	15	No cumple		
No 4	4.75	1071	21	99	1	0	5	Cumple		
<b>Fondo</b>		68	1	100	0	-	-			
<b>Total</b>		5138								

**Figura 5**

*Curva granulométrica del ensayo granulométrico del árido grueso con distintos porcentajes de árido grueso reciclado*



Del análisis de la curva granulométrica del árido grueso en combinación con el árido grueso reciclado, se concluye que la granulometría se vuelve mal gradada cuando el porcentaje de

árido grueso es sustituido en más del 30% por el árido grueso reciclado. Se observa una acumulación significativa del árido en el tamiz de 9.5 mm (3/8"), lo que provoca que el porcentaje acumulado que pasa por este tamiz supere los límites establecidos por la normativa. Por lo tanto, para poder utilizar estos porcentajes de árido grueso natural y árido grueso reciclado en la mezcla de hormigón, sea necesario realizar el diseño de la mezcla utilizando el método gráfico.

### **6.3.2. Textura y forma**

En cuanto a la textura, no hay diferencias significativas entre el árido grueso natural y el árido reciclado; ambos presentan una textura angular. Sin embargo, se observa que el árido reciclado es más rugoso al tacto en comparación con el árido natural.

En lo que respecta a la forma, el árido grueso reciclado presenta áridos de forma más redondeada debido a la presencia de restos de mortero en las caras planas del árido reciclado. Cabe destacar que la forma del árido grueso reciclado dependerá del tipo de trituración empleado para su obtención.

### **6.3.3. Densidad**

Con el objetivo de determinar la densidad del árido fino, la norma INEN NTE 856 establece un procedimiento gravimétrico. Esta normativa considera que los áridos poseen un porcentaje de poros, lo que permite, mediante dicho procedimiento, tener en cuenta la entrada de agua en estos poros y calcular la masa de agua que ingresa en el árido. Como resultado, se obtiene una gravedad específica promedio de 2.43 y una densidad seca al horno promedio de 2419.51 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 23***Densidad y gravedad específica del árido fino*

<b>Determinación de la Densidad NTE INEN 856</b>			
		<b>1.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>2.<sup>a</sup> Muestra</b>
<b>Muestra</b>	Masa de la muestra saturada superficialmente seca (S)(g)	500.00	500.00
	Masa del picnómetro lleno con muestra y agua hasta la marca de calibración (C)(g)	1004.60	1006.30
	Masa del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración (B)(g)	704.20	704.10
	Masa de la muestra seca al horno (A)(g)	481.80	482.10
<b>Resultado</b>	Gravedad específica (SH)(-)	2.41	2.44
	Densidad (SH)(kg/m <sup>3</sup> )	2407.79	2431.22
	Gravedad específica promedio (SH)(-)		2.43
	Densidad promedio (SH)(kg/m <sup>3</sup> )		2419.51

Con el objetivo de calcular la densidad del árido grueso, la normativa, específicamente la norma INEN NTE 857, establece las masas mínimas necesarias para llevar a cabo el ensayo. El indicador para la masa mínima de la muestra es el tamaño máximo nominal del árido. En este caso, dado que el tamaño máximo nominal del árido es de 19 mm (3/4"), la masa requerida debe ser de al menos 3 kg. Esto conduce a obtener una gravedad específica para el árido grueso natural de 2.60, con una densidad seca al horno promedio correspondiente a 2596.22 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 24***Densidad y gravedad específica del árido grueso natural*

<b>Determinación de la Densidad NTE INEN 857</b>				
		<b>1.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>2.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>3.<sup>a</sup> Muestra</b>
<b>Muestra</b>	Masa aparente en agua de la muestra saturada (C)(g)	1905.90	1928.70	1923.70
	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3061.20	3099.60	3087.10
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	3009.30	3041.50	3031.70
<b>Resultado</b>	Gravedad Específica (SH)(-)	2.60	2.60	2.61
	Densidad (SH)(-)	2598.24	2591.05	2599.36
	Gravedad específica promedio (SH)(-)		2.60	
	Densidad promedio (SH)(kg/m <sup>3</sup> )		2596.22	

Para el árido grueso reciclado, dado que no existe una normativa específica en el país, se llevó a cabo el procedimiento establecido por la normativa INEN NTE 857, realizando los ensayos para evaluar los distintos porcentajes de árido grueso reciclado que se incorporan al árido grueso total.

**Tabla 25**

*Densidad y gravedad específica del árido grueso natural con 10% de árido grueso reciclado incorporado*

<b>Determinación de la Densidad NTE INEN 857</b>				
		<b>10% A. R</b>		
		<b>1.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>2.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>3.<sup>a</sup> Muestra</b>
<b>Muestra</b>	Masa aparente en agua de la muestra saturada (C)(g)	1931.10	1919.80	1903.20
	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3104.20	3089.30	3062.00
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	3052.60	3041.20	3006.80
<b>Resultado</b>	Gravedad Específica (SH)(-)	2.60	2.60	2.59
	Densidad (SH)(-)	2595.68	2593.92	2588.33
	Gravedad específica promedio (SH)(-)		2.60	
	Densidad promedio (SH)(kg/m <sup>3</sup> )		2592.65	

**Tabla 26**

*Densidad y gravedad específica del árido grueso natural con 20% de árido grueso reciclado incorporado*

<b>Determinación de la Densidad NTE INEN 857</b>				
		<b>20% A. R</b>		
		<b>1.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>2.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>3.<sup>a</sup> Muestra</b>
<b>Muestra</b>	Masa aparente en agua de la muestra saturada (C)(g)	1901.20	1911.30	1909.40
	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3073.10	3103.50	3092.10
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	3000.40	3028.50	3023.70
<b>Resultado</b>	Gravedad Específica (SH)(-)	2.56	2.55	2.57
	Densidad (SH)(-)	2553.91	2547.63	2564.16
	Gravedad específica promedio (SH)(-)		2.56	
	Densidad promedio (SH)(kg/m <sup>3</sup> )		2555.24	



**Tabla 27**

*Densidad y gravedad específica del árido grueso natural con 30% de árido grueso reciclado incorporado*

<b>Determinación de la Densidad NTE INEN 857</b>				
		<b>30% A. R</b>		
		<b>1.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>2.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>3.<sup>a</sup> Muestra</b>
<b>Muestra</b>	Masa aparente en agua de la muestra saturada (C)(g)	1871.30	1856.70	1889.00
	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3021.00	3014.80	3059.10
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	2957.90	2941.90	2991.40
<b>Resultado</b>	Gravedad Específica (SH)(-)	2.57	2.54	2.56
	Densidad (SH)(-)	2566.31	2534.00	2550.12
	Gravedad específica promedio (SH)(-)		2.56	
	Densidad promedio (SH)(kg/m <sup>3</sup> )		2550.14	

**Tabla 28**

*Densidad y gravedad específica del árido grueso natural con 40% de árido grueso reciclado incorporado*

<b>Determinación de la Densidad NTE INEN 857</b>				
		<b>40% A. R</b>		
		<b>1.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>2.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>3.<sup>a</sup> Muestra</b>
<b>Muestra</b>	Masa aparente en agua de la muestra saturada (C)(g)	1962.60	1875.10	1861.60
	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3193.00	3057.20	3028.40
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	3114.10	2975.60	2951.50
<b>Resultado</b>	Gravedad Específica (SH)(-)	2.53	2.52	2.53
	Densidad (SH)(-)	2524.73	2510.86	2523.13
	Gravedad específica promedio (SH)(-)		2.53	
	Densidad promedio (SH)(kg/m <sup>3</sup> )		2519.57	

**Tabla 29**

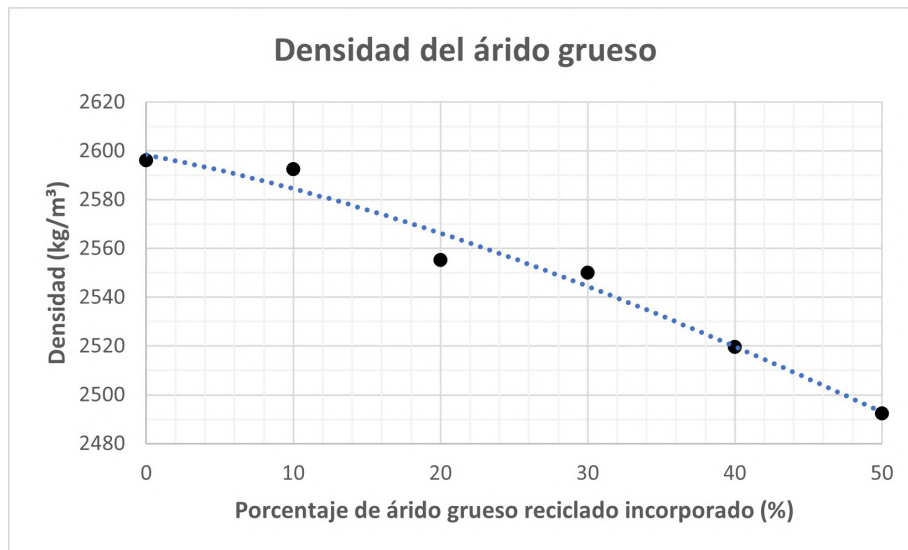
*Densidad y gravedad específica del árido grueso natural con 50% de árido grueso reciclado incorporado*

<b>Determinación de la Densidad NTE INEN 857</b>				
		<b>50% A. R</b>		
		<b>1.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>2.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>3.<sup>a</sup> Muestra</b>
	Masa aparente en agua de la muestra saturada (C)(g)	1888.60	1907.80	1878.30
<b>Muestra</b>	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3082.00	3126.30	3078.50
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	2998.60	3035.60	2991.00
	Gravedad Específica (SH)(-)	2.51	2.49	2.49
	Densidad (SH)(-)	2506.46	2485.01	2485.82
<b>Resultado</b>	Gravedad específica promedio (SH)(-)		2.50	
	Densidad promedio (SH)(kg/m <sup>3</sup> )		2492.43	

Según Pavón de la Fé (2012), el proceso de trituración influye en la densidad de los áridos reciclados. Esto se debe a que, dependiendo del tipo de trituración empleado, se obtienen resultados con una mayor o menor cantidad de mortero adherido al árido. Se observa que la trituración de impacto tiende a reducir una mayor cantidad de mortero adherido, lo que resulta en densidades relativamente superiores en comparación con los procesos de trituración de mandíbula o de cono.

## Figura 6

*Variación de las densidades con respecto al porcentaje incorporado de árido grueso reciclado*



Con respecto a las densidades promedio del árido grueso, se observa que a medida que se incorpora árido grueso reciclado, la densidad tiende a disminuir. Aproximadamente, la densidad del árido grueso disminuye en  $21.1565 \text{ kg/m}^3$  por cada 10% de árido grueso reciclado añadido al total del árido grueso. Esta disminución en la densidad puede atribuirse a la textura superficial del árido grueso reciclado, que presenta una superficie más porosa debido a las partículas de mortero adheridas al árido.

Es importante considerar que la mayoría de los áridos naturales presentan gravedades específicas en el rango de 2.4 a 2.9, con densidades comprendidas entre  $2400$  y  $2900 \text{ kg/m}^3$ . Podemos corroborar que tanto el árido natural como el árido incorporado con árido grueso reciclado se encuentran dentro de este rango de densidades. De esta manera, podemos deducir que pueden ser utilizados en la elaboración de hormigón.

### 6.3.4. Absorción

La absorción del agregado fino está determinada por la norma NTE INEN 856, y de acuerdo con esta normativa, se obtuvo una absorción promedio del 3.75%.

**Tabla 30***Absorción del árido fino*

Determinación de la Absorción NTE INEN 856			
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa de la muestra saturada superficialmente seca (S)(g)	500.00	500.00
	Masa de la muestra seca al horno (A)(g)	481.80	482.10
<b>Resultado</b>	Absorción (%)	3.78	3.71
	Absorción promedio (%)	3.75	

En cuanto a la absorción del árido grueso natural, se llevó a cabo el ensayo siguiendo la norma NTE INEN 857, la cual evalúa la porosidad general presente en el árido. Según esta normativa, se obtuvo una absorción promedio del 1.82%.

**Tabla 31***Absorción del árido grueso natural*

Determinación de la Absorción NTE INEN 857				
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3061.20	3099.60	3087.10
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	3009.30	3041.50	3031.70
<b>Resultado</b>	Absorción (%)	1.73	1.91	1.83
	Absorción promedio (%)	1.82		

Con el objetivo de obtener los valores de absorción que se presentarán en cada diseño de mezcla para cada porcentaje de árido grueso reciclado incorporado, se llevaron a cabo los ensayos utilizando diferentes proporciones de árido grueso reciclado y árido grueso normal. Los valores resultantes se muestran en las siguientes tablas:

**Tabla 32***Absorción del árido grueso natural con 10% de árido grueso reciclado incorporado*

Determinación de la Absorción NTE INEN 857				
		10% A. R		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3104.20	3089.30	3062.00
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	3052.60	3041.20	3006.80
<b>Resultado</b>	Absorción (%)	1.69	1.58	1.84
	Absorción promedio (%)		1.70	

**Tabla 33***Absorción del árido grueso natural con 20% de árido grueso reciclado incorporado*

Determinación de la Absorción NTE INEN 857				
		20% A. R		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3073.10	3103.50	3092.10
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	3000.40	3028.50	3023.70
<b>Resultado</b>	Absorción (%)	2.42	2.42	2.27
	Absorción promedio (%)		2.37	

**Tabla 34***Absorción del árido grueso natural con 30% de árido grueso reciclado incorporado*

Determinación de la Absorción NTE INEN 857				
		30% A. R		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3021.00	3014.80	3059.10
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	2957.90	2941.90	2991.40
<b>Resultado</b>	Absorción (%)	2.13	2.48	2.26
	Absorción promedio (%)		2.29	

**Tabla 35***Absorción del árido grueso natural con 40% de árido grueso reciclado incorporado*

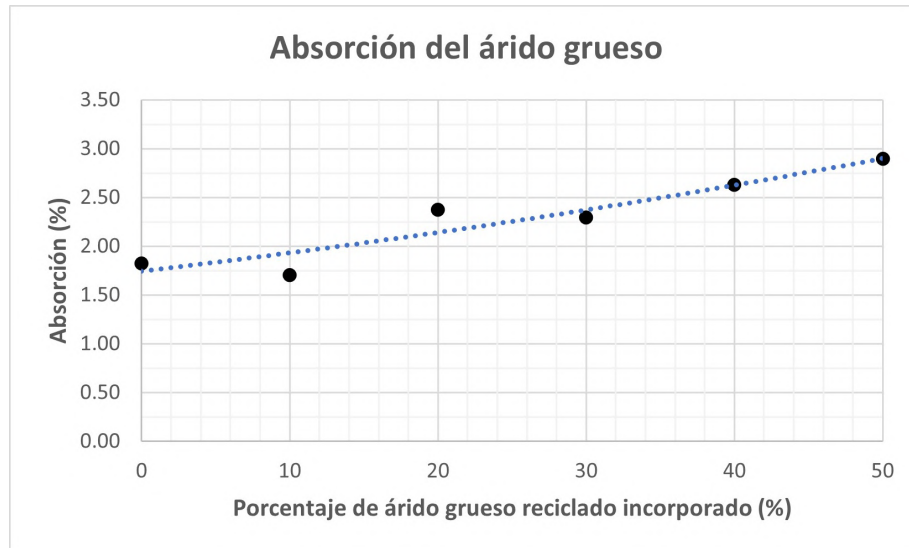
Determinación de la Absorción NTE INEN 857				
		40% A. R		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3193.00	3057.20	3028.40
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	3114.10	2975.60	2951.50
<b>Resultado</b>	Absorción (%)	2.53	2.74	2.61
	Absorción promedio (%)		2.63	

**Tabla 36***Absorción del árido grueso natural con 50% de árido grueso reciclado incorporado*

Determinación de la Absorción NTE INEN 857				
		50% A. R		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3082.00	3126.30	3078.50
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	2998.60	3035.60	2991.00
<b>Resultado</b>	Absorción (%)	2.78	2.99	2.93
	Absorción promedio (%)		2.90	

## Figura 7

*Variación de la absorción con respecto al porcentaje incorporado de árido grueso reciclado*



Al analizar cómo varía la absorción al incorporar cantidades crecientes de árido reciclado, observamos que la absorción del árido aumenta aproximadamente en un 0.226% por cada 10% de árido grueso reciclado incorporado al total del árido grueso. De acuerdo con (Pavón de la Fé, 2012), existe una relación entre el porcentaje de absorción del árido grueso reciclado y su densidad, observándose que la densidad es menor cuando el porcentaje de absorción es más elevado.

### 6.3.5. Masa unitaria

Para lograr una proporción adecuada de árido en la dosificación del hormigón, es necesario determinar la densidad para una unidad de volumen de árido en estado seco, un procedimiento que se rige por la norma NTE INEN 858.

**Tabla 37***Masa unitaria del árido fino*

Determinación de la Masa Unitaria NTE INEN 858							
		Suelta			Compacta		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra	1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa del árido más el molde (G)(kg)	5.453	5.535	5.671	5.809	5.917	5.969
	Masa del molde (T)(kg)	1.544	1.544	1.544	1.544	1.544	1.544
	Volumen del molde (V)(m <sup>3</sup> )	0.00282	0.00282	0.00282	0.00282	0.00282	0.00282
<b>Resultado</b>	Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	1386.17	1415.25	1463.48	1512.41	1550.71	1569.15
	Masa Unitaria promedio (kg/m <sup>3</sup> )		1421.63			1544.09	

Se obtuvo que, para el árido fino, la masa unitaria suelta promedio es de 1421.63 kg/m<sup>3</sup>, mientras que la masa unitaria compacta presenta un promedio de 1544.09 kg/m<sup>3</sup>.

**Tabla 38***Masa unitaria del árido grueso natural*

Determinación de la Masa Unitaria NTE INEN 858							
		Suelta			Compacta		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra	1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa del árido más el molde (G)(kg)	24.819	24.164	24.781	26.104	26.001	26.192
	Masa del molde (T)(kg)	12.175	12.175	12.175	12.175	12.175	12.175
	Volumen del molde (V)(m <sup>3</sup> )	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961
<b>Resultado</b>	Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	1315.71	1247.55	1311.76	1449.43	1438.71	1458.58
	Masa Unitaria promedio (kg/m <sup>3</sup> )		1291.58			1448.91	

En el caso del árido grueso natural, se observa que la masa unitaria suelta promedio es de 1291.68 kg/m<sup>3</sup>, y la masa unitaria compacta presenta un promedio de 1448.91 kg/m<sup>3</sup>.



**Tabla 39***Masa unitaria del árido grueso con 10% de árido grueso reciclado incorporado*

Determinación de la Masa Unitaria NTE INEN 858							
10% A. R.							
		Suelta			Compacta		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra	1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa del árido más el molde (G)(kg)	24.06	24.19	24.198	25.959	26.027	25.946
	Masa del molde (T)(kg)	12.175	12.175	12.175	12.175	12.175	12.175
	Volumen del molde (V)(m <sup>3</sup> )	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961
<b>Resultado</b>	Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	1236.73	1250.26	1251.09	1434.34	1441.42	1432.99
	Masa Unitaria promedio (kg/m <sup>3</sup> )		1246.03			1436.25	

**Tabla 40***Masa unitaria del árido grueso con 20% de árido grueso reciclado incorporado*

Determinación de la Masa Unitaria NTE INEN 858							
20% A. R.							
		Suelta			Compacta		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra	1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa del árido más el molde (G)(kg)	23.995	24.03	24.182	25.725	25.688	25.857
	Masa del molde (T)(kg)	12.175	12.175	12.175	12.175	12.175	12.175
	Volumen del molde (V)(m <sup>3</sup> )	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961
<b>Resultado</b>	Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	1230.18	1233.82	1249.64	1410.20	1406.35	1423.93
	Masa Unitaria promedio (kg/m <sup>3</sup> )		1237.88			1413.49	

**Tabla 41***Masa unitaria del árido grueso con 30% de árido grueso reciclado incorporado*

Determinación de la Masa Unitaria NTE INEN 858							
30% A. R.							
		Suelta			Compacta		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra	1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa del árido más el molde (G)(kg)	23.835	23.978	24.137	25.665	25.595	25.781
	Masa del molde (T)(kg)	12.175	12.175	12.175	12.175	12.175	12.175
	Volumen del molde (V)(m <sup>3</sup> )	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961
<b>Resultado</b>	Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	1213.32	1228.20	1244.75	1403.75	1396.46	1415.82
	Masa Unitaria promedio (kg/m <sup>3</sup> )		1228.75			1405.34	

**Tabla 42***Masa unitaria del árido grueso con 40% de árido grueso reciclado incorporado*

Determinación de la Masa Unitaria NTE INEN 858							
40% A. R.							
		Suelta			Compacta		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra	1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa del árido más el molde (G)(kg)	23.807	23.939	23.93	25.665	25.653	25.728
	Masa del molde (T)(kg)	12.173	12.173	12.173	12.175	12.173	12.173
	Volumen del molde (V)(m <sup>3</sup> )	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961
<b>Resultado</b>	Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	1210.61	1224.35	1223.41	1403.75	1402.71	1410.51
	Masa Unitaria promedio (kg/m <sup>3</sup> )		1219.46			1405.65	

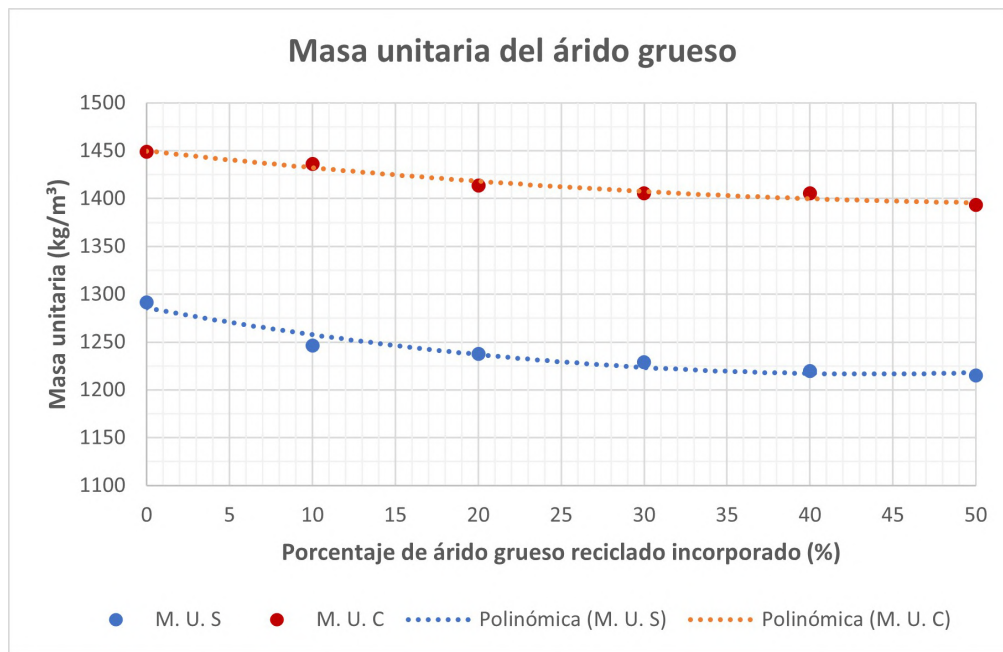
**Tabla 43**

*Masa unitaria del árido grueso con 50% de árido grueso reciclado incorporado*

Determinación de la Masa Unitaria NTE INEN 858							
50% A. R.							
		Suelta			Compacta		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra	1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa del árido más el molde (G)(kg)	23.732	23.871	23.944	25.493	25.61	25.585
	Masa del molde (T)(kg)	12.173	12.173	12.173	12.173	12.173	12.173
	Volumen del molde (V)(m <sup>3</sup> )	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961
<b>Resultado</b>	Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	1202.81	1217.27	1224.87	1386.06	1398.23	1395.63
	Masa Unitaria promedio (kg/m <sup>3</sup> )	1214.98			1393.31		

**Figura 8**

*Variación de la masa unitaria con respecto al porcentaje incorporado de árido grueso reciclado*



Por lo tanto, se puede observar que los áridos naturales finos como gruesos, su masa unitaria se sitúa en un rango intermedio entre 1200 y 1750 kg/m<sup>3</sup>, considerándolos de peso normal. Sin embargo, al combinar el árido grueso con el árido reciclado en distintos porcentajes, su masa unitaria disminuye en comparación con el árido grueso natural, llegando incluso a

clasificarse como un árido de peso liviano.

Además, se estima que la masa unitaria suelta del árido disminuye aproximadamente en  $13.516 \text{ kg/m}^3$ , y en cuanto a la masa unitaria compacta, disminuye en  $10.82 \text{ kg/m}^3$  por cada 10% de árido grueso reciclado incorporado al total del árido grueso.

## **6.4. Mezcla de hormigón convencional**

Una vez analizadas y evaluadas las características de los áridos, se inicia la elaboración de la mezcla de hormigón de prueba. Con el objetivo de establecer una mezcla base que sirva como punto de partida para la elaboración de las mezclas de hormigón reciclado. Durante este proceso, nos guiamos por el método ACI 211, tanto para el árido grueso natural como para el árido grueso con porcentajes de material reciclado que cumplen con una granulometría bien gradada.

Para lograrlo, es necesario definir las características y especificaciones necesarias del hormigón, con el objetivo de determinar las cantidades precisas de los componentes. Esto nos permitirá obtener las propiedades deseadas en la mezcla

Esta mezcla de prueba será de hormigón convencional, con la elaboración de seis cilindros de prueba para ensayos de compresión a los 7 y 28 días. Con el objetivo de alcanzar una resistencia de 24 MPa a los 28 días. A continuación, se detallan los criterios para estimar las cantidades de los materiales necesarios para el diseño de la mezcla de prueba:

### **6.4.1. Asentamiento**

El asentamiento a tener en cuenta en el diseño de la mezcla de concreto debe ser apropiado para el tipo de construcción que se llevará a cabo y las propiedades necesarias del hormigón. Por lo tanto, es esencial utilizar valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción.

En nuestra investigación, se ha contemplado un asentamiento de 10 cm, que correspondería a un hormigón con una trabajabilidad intermedia. Este está específicamente adaptado para estructuras tales como losas, vigas, columnas, fundaciones y muros, y se emplea la vibración como método de colocación.

### 6.4.2. Tamaño máximo nominal (TMN)

En los ensayos granulométricos realizados al árido grueso natural, se determinó que el tamaño máximo nominal del árido es de  $\frac{3}{4}$ " (19.1 mm). Este valor se sitúa dentro de los valores recomendados para el tamaño máximo nominal (TMN) en el tipo de construcción que se planea llevar a cabo.

### 6.4.3. Contenido de aire

El contenido de aire atrapado en el hormigón está directamente relacionado con el tamaño máximo nominal del árido. Según la Tabla 44, para el tamaño máximo nominal del árido grueso de  $\frac{3}{4}$ ", se espera un valor del 2% por cada metro cúbico, equivalente a 0.02 m<sup>3</sup>. Mediante el ensayo establecido por la norma NTE INEN 3122, se obtuvo un contenido de aire de 1.9%.

**Tabla 44**

*Contenido aproximado de aire en el hormigón para distintos grados de exposición*

Contenido de aire					
Árido grueso		Porcentaje promedio aproximado de aire atrapado	Porcentaje promedio total de aire recomendado para los siguientes grados de exposición		
Pulgadas	mm		Suave	Mediano	Severo
3/8	9.51	3.00	4.50	6.00	7.50
1/2	12.50	2.50	4.00	5.50	7.00
3/4	19.10	<b>2.00</b>	3.50	5.00	6.50
1	25.40	1.50	3.00	4.50	6.00
1 1/2	38.10	1.00	2.50	4.50	5.50
2	50.80	0.50	2.00	4.00	5.00
3	76.10	0.30	1.50	3.50	4.50
6	152.40	0.20	1.00	3.00	4.00

**Fuente:** Niño (2010)

#### 6.4.4. Cantidad de agua

La cantidad de agua por cada metro cúbico está condicionada por variables como el asentamiento, el tamaño máximo nominal y el contenido de aire. De acuerdo con la Tabla 45, la cantidad de agua es de 200 kg/m<sup>3</sup>. No obstante, es importante tener en cuenta que esta cantidad de agua no se incluye en la absorción que se encuentra en los poros saturables del árido.

**Tabla 45**

*Requerimiento aproximado de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado*

CANTIDAD DE AGUA									
Condición del contenido de aire	Asentamiento cm	Agua en kg/m <sup>3</sup> de concreto para los TMN del agregado indicado							
		9.50	12.50	19.10	25.40	38.10	50.00	76.10	152.40
		–	–	–	–	–	**	**	**
Concreto sin aire incluido	3 a 5	205	200	185	180	160	155	145	125
	8 a 10	225	215	200	195	175	170	160	140
	15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	-
	Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin aire incluido, por ciento	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Concreto con aire incluido	3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
	8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
	15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	-
	Promedio recomendable de contenido total de aire por ciento	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3
* Estas cantidades de agua de mezclado deben utilizarse en los cálculos de los factores de cemento para mezclas de prueba. Son las máximas para agregados gruesos angulares razonablemente bien formados graduados dentro de los límites de las especificaciones aceptadas.									
** Los valores de asentamiento para un concreto que contenga un agregado mayor de 40 mm están basados en pruebas de asentamiento efectuado después de remover las partículas mayores de 40 mm por medio de cribado húmedo.									

**Fuente:** Niño (2010)

#### 6.4.5. Resistencia a la compresión requerida

En nuestra investigación, hemos establecido una resistencia a la compresión de 24 MPa con el objetivo de cumplir con la normativa que exige una resistencia a la compresión mínima de 21 MPa.

Con la resistencia a la compresión de 24 MPa y aplicando el factor de mayoración de

acuerdo con la Tabla 46, obtenemos una resistencia a la compresión requerida de 32.5 MPa.

**Tabla 46**

*Factor de mayoración  $f'_c$*

Resistencia a compresión especificada, $f'_c$ , MPa	Resistencia a compresión media requerida, MPa
$<21$	$f'_c + 7.0$
$21 \leq f'_c \leq 35$	$f'_c + 8.5$
$>35$	$1.10 f'_c + 5.0$

**Nota:** La tabla representa el factor de mayoración para distintas resistencias a la compresión

#### 6.4.6. Relación agua/cemento

Debido a que la resistencia a la compresión está sujeta a la relación agua/cemento ( $a/c$ ), procederemos a determinar la relación  $a/c$  necesaria para alcanzar la resistencia a compresión requerida. Esto se realizará considerando la información de la Tabla 8, la cual presenta valores de resistencia a la compresión con el uso de cemento Portland tipo 1 en función de la relación  $a/c$ , teniendo en cuenta si el hormigón contiene o no aire incluido.

Dado que la Tabla 8 no ofrece valores de relación  $a/c$  para la resistencia a compresión requerida, es necesario calcular esta relación mediante interpolación, basándonos en los valores proporcionados en la tabla 47. En nuestra investigación, se interpolaron los valores comprendidos entre 0.43 y 0.40, correspondientes a una resistencia a la compresión de 315 y 350 Kg/cm<sup>2</sup>, obteniendo un valor de 0.421 para una resistencia de 32.5 MPa.

**Tabla 47***Relación a/c*

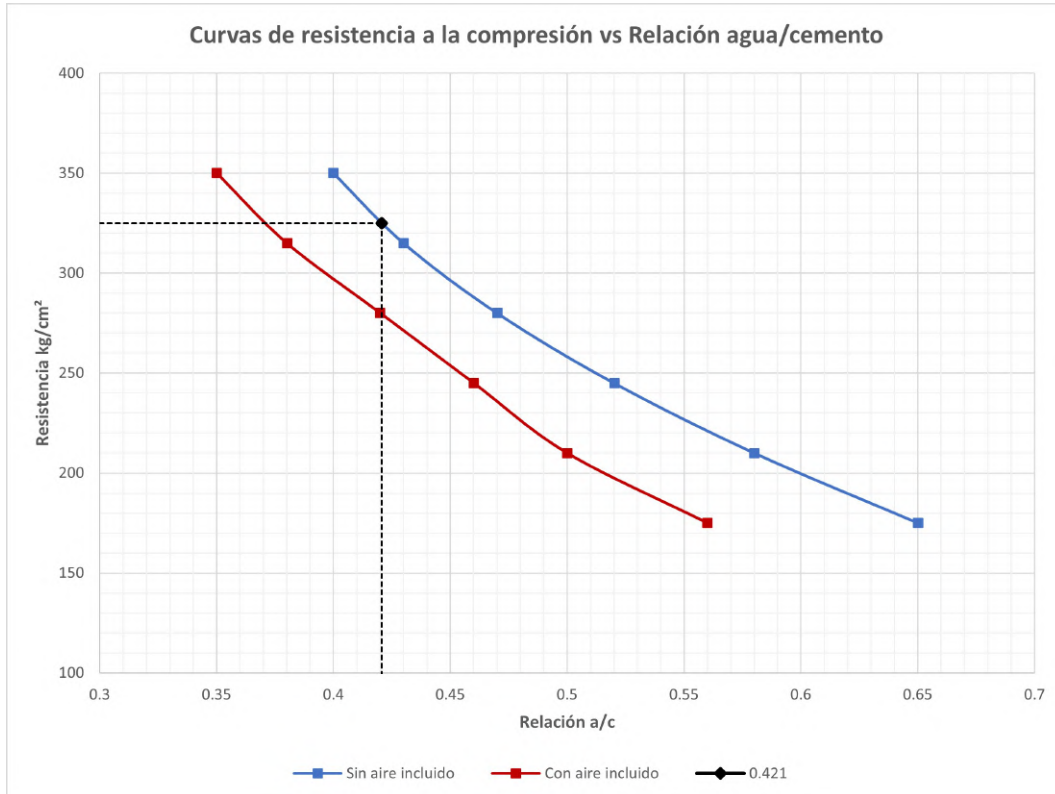
Relación agua/cemento		
Resistencia a la compresión a los 28 días en kg/cm <sup>2</sup> (psi)	Concreto sin inductor de aire	Concreto con inductor de aire
	Relación absoluta por peso	Relación absoluta por peso
175 (2500)	0.65	0.56
210 (3000)	0.58	0.50
245 (3500)	0.52	0.46
280 (4000)	0.47	0.42
315 (4500)	0.43	0.38
350 (5000)	0.40	0.35

**Nota:** La tabla representa la relación entre la resistencia a la compresión y algunos valores de la relación a/c



**Figura 9**

*Interpolación para hallar la relación a/c*



#### 6.4.7. Contenido de cemento

La cantidad de cemento necesaria para un metro cúbico de hormigón depende principalmente de las cantidades de agua de mezcla y la relación a/c respectivamente. Obteniendo la cantidad de cemento mediante la siguiente relación:

$$\text{Contenido de agua} \quad 200 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Relación a/c} \quad 0.421$$

$$c = 200/0.421$$

$$c \approx 475.41 \text{ kg}$$

#### **6.4.8. Contenido de árido grueso**

Según el método ACI 211, es necesario tener en cuenta los datos obtenidos de las pruebas de granulometría, considerando tanto el módulo de finura del árido fino como el tamaño máximo nominal del árido grueso. De esta manera, se obtiene el término  $b/b_o$ , que representa la proporción del árido grueso seco y compactado por volumen unitario de hormigón. Mientras que  $b_o'$  se refiere a la relación entre la masa seca compacta y la densidad seca al horno del árido grueso. Es importante destacar que este procedimiento es aplicable únicamente a áridos que cumplen con los límites granulométricos tanto del árido grueso como del árido fino.

Con los valores del tamaño máximo nominal (TMN) del árido grueso y el módulo de finura (MF) del árido fino, y utilizando la tabla 9, se encuentra el valor para la relación  $b/b_o$  por medio de interpolación, obteniendo un valor de 0.633.

**Tabla 48***Volumen de árido grueso*

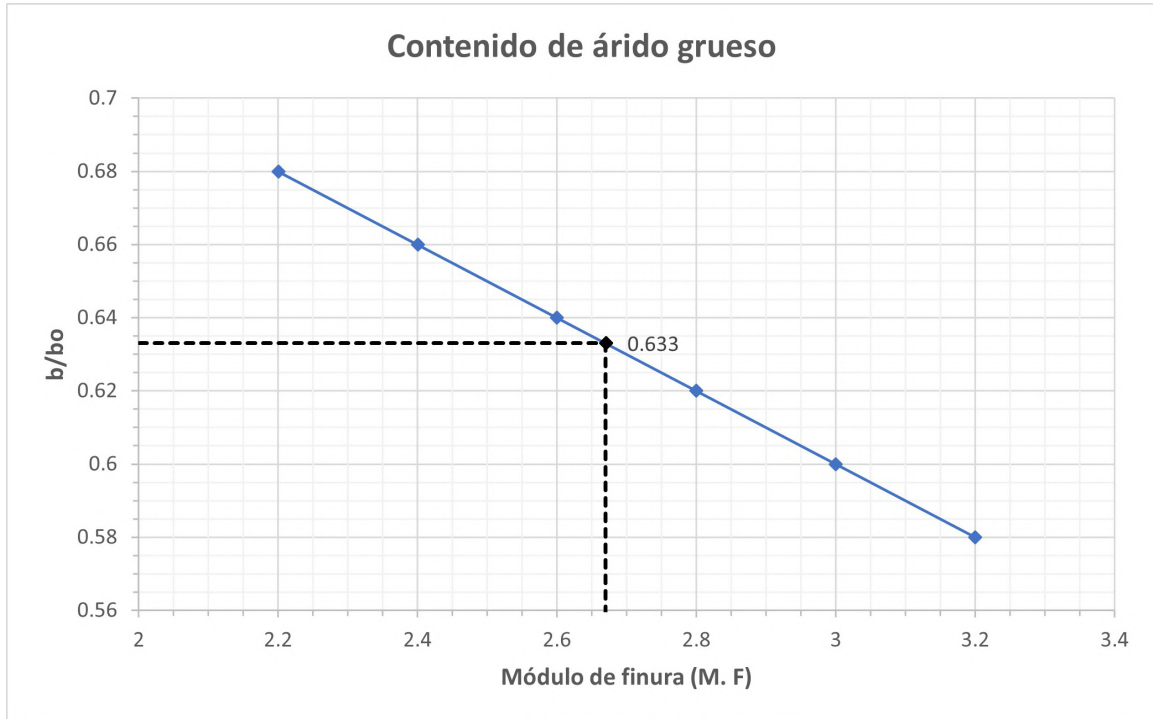
Contenido de grava							
Máximo tamaño nominal de áridos		Volumen del árido grueso varillado (compactado) en seco por volumen unitario de concreto para diferentes módulos de finura de árido fino					
		MÓDULO DE FINURA					
Pulgadas	mm	2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	3.2
3/8	9.51	0.52	0.5	0.48	0.46	0.44	0.42
1/2	12.5	0.61	0.59	0.57	0.55	0.53	0.51
3/4	19.1	0.68	0.66	0.64	0.62	0.6	0.58
1	25.4	0.73	0.71	0.69	0.67	0.65	0.63
1 1/2	38.1	0.77	0.75	0.73	0.71	0.69	0.67
2	50.8	0.8	0.78	0.76	0.74	0.72	0.7
3	76.1	0.84	0.82	0.8	0.78	0.76	0.74
6	152.4	0.89	0.87	0.85	0.83	0.81	0.79

\* Los volúmenes están basados sobre agregados en condiciones de secado de horno descritos en ASTM C 29.  
 \* Estos volúmenes son seleccionados de relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado para construcción usual reforzada.

**Nota:** La tabla representa el volumen de arido grueso por unidad de volumen de concreto (b/bo)

**Figura 10**

*Interpolación para hallar la relación b/bo*



Donde:

$$\text{Masa Unitaria Compacta (MUC)} \quad 1448.907 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Densidad (SH)} \quad 2596.217 \text{ kg/m}^3$$

$$b_o' = \frac{1448.907}{2596.217}$$

$$b_o' = 0.558$$

$$B = 0.633 \times 0.558$$

$$B = 0.353 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$\text{Cantidad de Árido grueso} \quad 917.16 \text{ kg}$$

#### 6.4.9. Contenido de árido fino

Con las cantidades obtenidas en peso de los componentes para el hormigón (árido grueso, agua, cemento, aire) y las densidades respectivas de cada uno, se determinan los volúmenes equivalentes. Esto se hace con la finalidad de obtener el volumen total de arena necesario para la mezcla de hormigón.

$$\text{Vol. Cemento} \quad 0.164 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Agua} \quad 0.200 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Aire} \quad 0.020 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Árido grueso} \quad 0.353 \text{ m}^3$$

En este contexto, el volumen del árido fino se calcula como la diferencia entre el volumen de  $1 \text{ m}^3$  y los volúmenes de los componentes ya obtenidos (árido grueso, agua, cemento, aire).

$$\text{Vol. Árido fino} = 1 - (0.164 + 0.200 + 0.02 + 0.353)$$

$$\text{Vol. Árido fino} \quad 0.263 \text{ m}^3$$

#### Tabla 49

*Dosificación para  $1 \text{ m}^3$  de hormigón convencional*

Cantidades de los materiales por $\text{m}^3$ de hormigón			
Material	kg	kg/ $\text{m}^3$	$\text{m}^3/\text{m}^3$
Contenido de aire	0.00	0.00	0.020
Cantidad de agua	200.00	1000.00	0.2
Contenido de cemento	475.41	2900.00	0.164
Contenido de árido grueso	917.16	2596.22	0.353
Contenido de árido fino	635.85	2419.51	0.263
<b>Total</b>	<b>2228.41</b>		<b>1.000</b>

**Nota:** La tabla representa la dosificación para la mezcla de hormigón convencional

#### 6.4.10. Ajuste por humedad de los áridos

Debido a la porosidad de los áridos, estos estarán expuestos a un cierto porcentaje de humedad que no está incluido en el volumen de agua para la mezcla. Esta cantidad de agua debe ser añadida o restada hasta lograr una condición saturada superficialmente seca en los áridos. Por esta razón, es necesario realizar este ajuste a los áridos con el objetivo de determinar la cantidad necesaria de agua que se debe agregar al cemento y a los áridos para lograr el asentamiento requerido.

**Tabla 50**

*Dosificación corregida por humedad y absorción*

Material	Dosificación Base	Humedad		Absorción		Contenido de agua a añadir/quitar	Dosificación Corregido
	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
Contenido de aire	0.00						0.00
Cantidad de agua	200.00						177.55
Contenido de cemento	475.41						475.41
Contenido de árido grueso	917.16	1.12	927.43	1.82	933.85	6.42	927.43
Contenido de árido fino	635.85	8.29	688.56	3.75	659.69	-28.87	688.56
<b>Total</b>	2228.41	---	---	---	---	-22.45	2268.95

**Nota:** La tabla representa la dosificación corregida por humedad y absorción de los áridos

#### 6.4.11. Dosificación de mezcla de hormigón convencional

Una vez establecida la dosificación del hormigón con su respectiva corrección por humedad, se llevó a cabo una mezcla de 15 litros para evaluar el asentamiento y rendimiento. Siguiendo el procedimiento establecido por la norma NTE INEN 1578-1, se registró un asentamiento de 7 cm, no alcanzando el valor esperado de 10 cm. Esto indica la necesidad de realizar una corrección por asentamiento.

Además, la mezcla de hormigón presentó una densidad de 2301.99 kg/m<sup>3</sup> y un peso total de 34.03 kg, resultando en un rendimiento de 14.78286 litros. Este rendimiento tampoco cumplió con el rendimiento esperado de 15 litros, que era el volumen de mezcla de prueba diseñada, lo que también implica en la necesidad de corregir la mezcla por rendimiento.

Para calcular el contenido de agua corregido, primero se realizó la corrección por rendimiento y luego se ajustó la cantidad de agua a añadir o quitar en función de la corrección por asentamiento.

$$Agua_{Rendimiento} = \frac{200 \times 15}{14.78286}$$

$$Agua_{Rendimiento} = 202.94$$

**Tabla 51**

*Propiedades en estado fresco del hormigón convencional*

<b>Propiedades físicas del hormigón</b>		
Asentamiento	7.00	cm
Densidad	2301.99	kg/m <sup>3</sup>
Rendimiento	0.01478	m <sup>3</sup>
<b>Contenido de agua neta por m<sup>3</sup></b>		
Corrección por rendimiento	202.94	kg
Corrección por asentamiento	208.94	kg

**Nota:** La tabla representa las propiedades obtenidas de la mezcla de hormigón convencional

Con base en las correcciones efectuadas tanto por asentamiento como por rendimiento, la dosificación de la mezcla de hormigón en estado seco (SH) para el hormigón convencional queda de la siguiente manera:

**Tabla 52***Dosificación definitiva para 1 m<sup>3</sup> de hormigón convencional*

<b>Cantidades de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Material</b>	<b>kg</b>
Contenido de aire	0.00
Cantidad de agua	208.94
Contenido de cemento	496.65
Contenido de árido grueso	930.63
Contenido de árido fino	625.38
<b>Total</b>	<b>2261.60</b>

**Nota:** La tabla representa la dosificación definitiva para la mezcla de hormigón convencional

#### **6.4.12. Resistencia a la compresión**

Para los ensayos de compresión, se fabricaron 6 cilindros. Los primeros 3 cilindros fueron sometidos a ensayos a los 7 días después de la fundición de la mezcla de hormigón convencional. Esto se hizo con el propósito de evaluar su resistencia y verificar si la mezcla logra una resistencia a compresión mínima del 70% de su resistencia de diseño, establecida en 24 MPa.

En cuanto a los 3 cilindros restantes, fueron sometidos a ensayos de compresión a los 28 días después de la fundición de la mezcla de hormigón convencional. Este proceso tenía como objetivo confirmar que la mezcla alcanzara el 100% de la resistencia a compresión diseñada.



**Tabla 53***Resistencias a compresión del hormigón convencional*

Hormigón convencional							
Días	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kN)	Peso (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)
7	10.23	20.23	157.65	3831.80	2304.44	19.18	19.51
	10.20	20.27	157.25	3828.20	2311.27	19.24	
	10.20	20.27	164.21	3834.50	2315.07	20.10	
28	10.15	20.20	225.92	3871.50	2368.68	27.92	26.57
	10.20	20.23	258.09	3904.00	2361.69	31.59	
	10.20	20.27	206.02	3855.60	2327.81	25.21	

**Nota:** La tabla muestra la resistencias a compresión a los 7 y 28 días del hormigón convencional

Dado que la norma NTE INEN 1573 establece una precisión dentro del ensayo, el rango aceptable de variación de resistencia para un número de tres cilindros de dimensiones 100 mm por 200 mm es del 10.6%. Por lo tanto, se han resaltado en color rojo las resistencias que no fueron consideradas en el cálculo del valor promedio.

## 6.5. Diseño de mezcla de hormigón reciclado

En la elaboración de la mezcla de hormigón reciclado, se utilizó como referencia la mezcla de hormigón convencional, manteniendo la misma cantidad de agua para alcanzar un asentamiento de 10 cm. Además, se mantuvieron constantes las cantidades de cemento, aire y el volumen de grava por unidad de volumen de hormigón (b/bo), ya que el tamaño máximo nominal es igual a  $\frac{3}{4}$ " (19.1 mm) tanto para el árido grueso natural como para el árido grueso reciclado.

Para las mezclas de hormigón reciclado, se estableció un porcentaje mínimo del 10% y un máximo del 50% de árido grueso reciclado, con el objetivo de analizar la variabilidad en la resistencia del hormigón al aumentar este porcentaje y, además, determinar el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado que se puede incorporar en la mezcla sin afectar las propiedades del hormigón.

Es importante tener en cuenta que, para los porcentajes del 40% y 50% de árido grueso

reciclado incorporado, la granulometría no cumplía con los límites establecidos por la norma. Esto implica que el método ACI 211 no puede ser implementado para la elaboración de hormigón en estos casos, y se requiere una optimización de la granulometría mediante el método Road Note Laboratory para llevar a cabo el diseño de la mezcla de hormigón.

### 6.5.1. Mezcla de hormigón reciclado con 10% de árido grueso reciclado

#### 6.5.1.1. Contenido de árido grueso

Donde:

$$\text{Masa Unitaria Compacta (MUC)} \quad 1436.25 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Densidad (SH)} \quad 2592.65 \text{ kg/m}^3$$

$$b_{o'} = \frac{1436.25}{2592.65}$$

$$b_{o'} = 0.554$$

$$B = 0.633 \times 0.554$$

$$B = 0.351 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$\text{Cantidad de Árido grueso} \quad 818.23 \text{ kg}$$

$$\text{Cantidad de Árido reciclado} \quad 90.91 \text{ kg}$$

#### 6.5.1.2. Contenido de árido fino

$$\text{Vol. Cemento} \quad 0.164 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Agua} \quad 0.200 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Aire} \quad 0.020 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Árido grueso} \quad 0.316 \text{ m}^3$$

$$\text{Vol. Árido reciclado} \quad 0.035 \text{ m}^3$$

Donde:

$$\text{Vol. \u00c1rido fino} = 1 - (0.164 + 0.200 + 0.02 + 0.316 + 0.035)$$

$$\text{Vol. \u00c1rido fino} = 0.265 \text{ m}^3$$

**Tabla 54**

*Dosificaci\u00f3n para 1 m\u00b3 de hormig\u00f3n con 10% de \u00e1rido grueso reciclado incorporado*

<b>Cantidades de los materiales por m\u00b3 de hormig\u00f3n</b>			
<b>Material</b>	<b>kg</b>	<b>kg/m\u00b3</b>	<b>m\u00b3/m\u00b3</b>
Contenido de aire	0.00	0.00	0.020
Cantidad de agua	200.00	1000.00	0.2
Contenido de cemento	475.41	2900.00	0.164
Contenido de \u00e1rido grueso	818.23	2592.65	0.316
Contenido de \u00e1rido reciclado	90.91	2592.65	0.035
Contenido de \u00e1rido fino	642.15	2419.51	0.265
<b>Total</b>	2226.70	- - -	1.000

**Nota:** La tabla representa la dosificaci\u00f3n para la mezcla de hormig\u00f3n reciclado (10% A. R)

### 6.5.1.3. Ajustes por humedad de los \u00e1ridos

**Tabla 55***Dosificación corregida por humedad y absorción*

Material	Dosificación Base	Humedad		Absorción		Contenido de agua a añadir/quitar	Dosificación Corregido
	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
Contenido de aire	0.00						0.00
Cantidad de agua	200.00						182.92
Contenido de cemento	475.41						475.41
Contenido de árido grueso	818.23	1.29	828.79	1.7	832.14	3.35	828.79
Contenido de árido reciclado	90.91	1.29	92.09	1.7	92.46	0.37	92.09
Contenido de árido fino	642.15	6.99	687.03	3.75	666.23	-20.81	687.03
<b>Total</b>	2226.70	---	---	---	---	-17.08	2266.24

**Nota:** La tabla representa la dosificación corregida por humedad y absorción de los áridos

#### 6.5.1.4. Dosificación de mezcla de hormigón reciclado (10% A, R)

Mediante la dosificación obtenida para el hormigón con un 10% de árido grueso reciclado, se llevó a cabo una mezcla de 15 litros para determinar su asentamiento y rendimiento. El asentamiento registrado fue de 5 cm, alcanzando apenas la mitad del asentamiento deseado de 10 cm, lo que indica la necesidad de realizar una corrección por asentamiento.

Además, la mezcla de hormigón presentó una densidad de 2300.99 kg/m<sup>3</sup> y un peso total de 33.99 kg, resultando en un rendimiento de 14.7719 litros. Este rendimiento se sitúa por debajo del esperado de 14 litros, por lo que también es necesario llevar a cabo una corrección por rendimiento.

$$Agua_{Rendimiento} = \frac{200 \times 15}{14.7719}$$

$$Agua_{Rendimiento} = 203.07$$

**Tabla 56**

*Propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (10% A. R)*

<b>Propiedades físicas del hormigón</b>		
Asentamiento	5.00	cm
Densidad	2300.99	kg/m <sup>3</sup>
Rendimiento	0.01477	m <sup>3</sup>
<b>Contenido de agua neta por m<sup>3</sup></b>		
Corrección por rendimiento	203.07	kg
Corrección por asentamiento	213.07	kg

**Nota:** La tabla representa las propiedades obtenidas de la mezcla de hormigón reciclado (10% A. R)

Con las correcciones realizadas por asentamiento y rendimiento, la dosificación de la mezcla de hormigón en estado seco (SH) para el hormigón reciclado (10% A. R) queda de la siguiente manera:

**Tabla 57***Dosificación definitiva para 1 m<sup>3</sup> de hormigón reciclado (10% A. R)*

<b>Cantidades de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Material</b>	<b>kg</b>
Contenido de aire	0.00
Cantidad de agua	213.07
Contenido de cemento	506.47
Contenido de árido grueso	830.78
Contenido de árido reciclado	92.31
Contenido de árido fino	619.44
<b>Total</b>	<b>2262.07</b>

**Nota:** La tabla representa la dosificación definitiva para la mezcla de hormigón reciclado (10% A. R)

### 6.5.2. Mezcla de hormigón reciclado con 20% de árido grueso reciclado

#### 6.5.2.1. Contenido de árido grueso

Donde:

$$Masa Unitaria Compacta (MUC) \quad 1413.49 \text{ kg/m}^3$$

$$Densidad (SH) \quad 2555.24 \text{ kg/m}^3$$

$$b_{o'} = \frac{1413.49}{2555.24}$$

$$b_{o'} = 0.553$$

$$B = 0.633 \times 0.553$$

$$B = 0.350 \text{ m}^3/\text{m}^3$$

$$Cantidad \text{ de } \acute{A}rido \text{ grueso} \quad 715.79 \text{ kg}$$

$$Cantidad \text{ de } \acute{A}rido \text{ reciclado} \quad 178.95 \text{ kg}$$

### 6.5.2.2. Contenido de árido fino

<i>Vol. Cemento</i>	$0.164 \text{ m}^3$
<i>Vol. Agua</i>	$0.200 \text{ m}^3$
<i>Vol. Aire</i>	$0.020 \text{ m}^3$
<i>Vol. Árido grueso</i>	$0.280 \text{ m}^3$
<i>Vol. Árido reciclado</i>	$0.070 \text{ m}^3$

Donde:

$$\text{Vol. Árido fino} = 1 - (0.164 + 0.200 + 0.0200 + 0.280 + 0.070)$$

$$\text{Vol. Árido fino} = 0.266 \text{ m}^3$$

**Tabla 58**

*Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de hormigón con 20% de árido grueso reciclado incorporado*

<b>Cantidades de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón</b>			
<b>Material</b>	<b>kg</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup></b>
Contenido de aire	0.00	0.00	0.020
Cantidad de agua	200.00	1000.00	0.2
Contenido de cemento	475.41	2900.00	0.164
Contenido de árido grueso	715.79	2555.24	0.280
Contenido de árido reciclado	178.95	2555.24	0.070
Contenido de árido fino	643.37	2419.51	0.266
<b>Total</b>	2213.51	- - -	1.000

**Nota:** La tabla representa la dosificación para la mezcla de hormigón reciclado (20% A. R)

### 6.5.2.3. Ajustes por humedad de los áridos

**Tabla 59***Dosificación corregida por humedad y absorción*

Material	Dosificación Base	Humedad		Absorción		Contenido de agua a añadir/quitar	Dosificación Corregido
	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
Contenido de aire	0.00						0.00
Cantidad de agua	200.00						158.31
Contenido de cemento	475.41						475.41
Contenido de árido grueso	715.79	1.37	725.60	2.37	732.76	7.16	725.60
Contenido de árido reciclado	178.95	1.37	181.40	2.37	183.19	1.79	181.40
Contenido de árido fino	643.37	11.62	718.13	3.75	667.49	-50.63	718.13
<b>Total</b>	2213.51	---	---	---	---	-41.69	2258.84

**Nota:** La tabla representa la dosificación corregida por humedad y absorción de los áridos

#### 6.5.2.4. Dosificación de mezcla de hormigón reciclado (20% A, R)

Para el hormigón con un 20% de árido grueso reciclado, se obtuvo un asentamiento de 4 cm, por lo que fue necesario realizar una corrección por asentamiento para lograr alcanzar el asentamiento deseado de 10 cm.

Además, la mezcla de hormigón presentó una densidad de 2300.71 kg/m<sup>3</sup> y un peso total de 33.88 kg, resultando en un rendimiento de 14.72589 litros. Este rendimiento se encuentra por debajo del valor esperado de 15 litros, por lo que también es necesario llevar a cabo una corrección por rendimiento.

$$Agua_{Rendimiento} = \frac{200 \times 15}{14.72589}$$

$$Agua_{Rendimiento} = 203.71$$



**Tabla 60**

*Propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (20% A. R)*

<b>Propiedades físicas del hormigón</b>		
Asentamiento	7.00	cm
Densidad	2300.71	kg/m <sup>3</sup>
Rendimiento	0.01472	m <sup>3</sup>
<b>Contenido de agua neta por m<sup>3</sup></b>		
Corrección por rendimiento	203.71	kg
Corrección por asentamiento	209.71	kg

**Nota:** La tabla representa las propiedades obtenidas de la mezcla de hormigón reciclado (20% A. R)

Con las correcciones realizadas por asentamiento y rendimiento, la dosificación de la mezcla de hormigón en estado seco (SH) para el hormigón reciclado (20% A. R) queda de la siguiente manera:

**Tabla 61***Dosificación definitiva para 1 m<sup>3</sup> de hormigón reciclado (20% A. R)*

<b>Cantidades de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Material</b>	<b>kg</b>
Contenido de aire	0.00
Cantidad de agua	209.71
Contenido de cemento	498.48
Contenido de árido grueso	729.06
Contenido de árido reciclado	182.26
Contenido de árido fino	635.76
<b>Total</b>	<b>2255.27</b>

**Nota:** La tabla representa la dosificación definitiva para la mezcla de hormigón reciclado (20% A. R)

### 6.5.3. Mezcla de hormigón reciclado con 30% de árido grueso reciclado

#### 6.5.3.1. Contenido de árido grueso

Donde:

$$Masa\ Unitaria\ Compacta\ (MUC) \quad 1405.34\ kg/m^3$$

$$Densidad\ (SH) \quad 2550.14\ kg/m^3$$

$$b_{o'} = \frac{1405.34}{2550.14}$$

$$b_{o'} = 0.551$$

$$B = 0.633 \times 0.551$$

$$B = 0.349\ m^3/m^3$$

$$Cantidad\ de\ \acute{A}rido\ grueso \quad 622.71\ kg$$

*Cantidad de Árido reciclado*      266.87 kg

### 6.5.3.2. Contenido de árido fino

*Vol. Cemento*      0.164 m<sup>3</sup>

*Vol. Agua*      0.200 m<sup>3</sup>

*Vol. Aire*      0.020 m<sup>3</sup>

*Vol. Árido grueso*      0.244 m<sup>3</sup>

*Vol. Árido reciclado*      0.105 m<sup>3</sup>

Donde:

$$Vol. \text{ Árido fino} = 1 - (0.164 + 0.200 + 0.020 + 0.244 + 0.105)$$

$$Vol. \text{ Árido fino} = 0.267 m^3$$

### Tabla 62

*Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de hormigón con 30% de árido grueso reciclado incorporado*

<b>Cantidades de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón</b>			
<b>Material</b>	<b>kg</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup></b>
Contenido de aire	0.00	0.00	0.020
Cantidad de agua	200.00	1000.00	0.2
Contenido de cemento	475.41	2900.00	0.164
Contenido de árido grueso	622.71	2550.14	0.244
Contenido de árido árido reciclado	266.87	2550.14	0.105
Contenido de árido fino	646.57	2419.51	0.267
<b>Total</b>	2211.55	- - -	1.000

**Nota:** La tabla representa la dosificación para la mezcla de hormigón reciclado (30% A. R)

### 6.5.3.3. Ajustes por humedad de los áridos

**Tabla 63**

*Dosificación corregida por humedad y absorción*

Material	Dosificación Base	Humedad		Absorción		Contenido de agua a añadir/quitar	Dosificación Corregido
	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
Contenido de aire	0.00						0.00
Cantidad de agua	200.00						195.79
Contenido de cemento	475.41						475.41
Contenido de árido grueso	622.71	1.39	631.36	2.29	636.97	5.60	631.36
Contenido de árido reciclado	266.87	1.39	270.58	2.29	272.99	2.40	270.58
Contenido de árido fino	646.57	5.64	683.03	3.75	670.81	-12.22	683.03
<b>Total</b>	2211.55	---	---	---	---	-4.21	2256.17

**Nota:** La tabla representa la dosificación corregida por humedad y absorción de los áridos

### 6.5.3.4. Dosificación de mezcla de hormigón reciclado (30% A, R)

Para el hormigón con un 30% de árido grueso reciclado, se obtuvo un asentamiento de 4.5 cm, por lo que fue necesario realizar una corrección por asentamiento para alcanzar el asentamiento deseado de 10 cm.

Además, la mezcla de hormigón presentó una densidad de 2273.44 kg/m<sup>3</sup> y un peso total de 33.84 kg, resultando en un rendimiento de 14.88493 litros. Este rendimiento se sitúa por debajo del valor esperado de 15 litros, por lo que también es necesario llevar a cabo una corrección por rendimiento.

$$Agua_{Rendimiento} = \frac{200 \times 15}{14.88493}$$

$$Agua_{Rendimiento} = 201.53$$

**Tabla 64**

*Propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (30% A. R)*

<b>Propiedades físicas del hormigón</b>		
Asentamiento	4.50	cm
Densidad	2273.44	kg/m <sup>3</sup>
Rendimiento	0.01489	m <sup>3</sup>
<b>Contenido de agua neta por m<sup>3</sup></b>		
Corrección por rendimiento	201.53	kg
Corrección por asentamiento	212.53	kg

**Nota:** La tabla representa las propiedades obtenidas de la mezcla de hormigón reciclado (30% A. R)

Con las correcciones realizadas por asentamiento y rendimiento, la dosificación de la mezcla de hormigón en estado seco (SH) para el hormigón reciclado (30% A. R) queda de la siguiente manera:

**Tabla 65***Dosificación definitiva para 1 m<sup>3</sup> de hormigón reciclado (30% A. R)*

<b>Cantidades de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Material</b>	<b>kg</b>
Contenido de aire	0.00
Cantidad de agua	212.53
Contenido de cemento	505.19
Contenido de árido grueso	627.47
Contenido de árido reciclado	268.92
Contenido de árido fino	615.71
<b>Total</b>	<b>2229.82</b>

**Nota:** La tabla representa la dosificación definitiva para la mezcla de hormigón reciclado (30% A. R)

#### **6.5.4. Mezcla de hormigón reciclado con 40% de árido grueso reciclado**

##### **6.5.4.1. Contenido de árido grueso y árido fino**

Debido a que la granulometría con un 40% de árido grueso reciclado incorporado no cumple con los límites granulométricos, el diseño de la mezcla de hormigón debe llevarse a cabo mediante otro método. En este caso, se utilizará el método Road Note Laboratory, el cual realiza una optimización granulométrica y determina cuál es la mejor mezcla de árido fino y árido grueso para lograr un hormigón con propiedades de manejabilidad y resistencia.

Para realizar la optimización granulométrica, es necesario tener en cuenta el tamaño máximo del árido. Según los ensayos granulométricos, hemos definido que el tamaño máximo del árido es de 1" (25.4 mm). Con base en este tamaño máximo y utilizando la información de la Tabla 10, seleccionamos el rango granulométrico recomendado.

**Tabla 66**

*Rango granulométrico recomendado para realizar la optimización granulométrica*

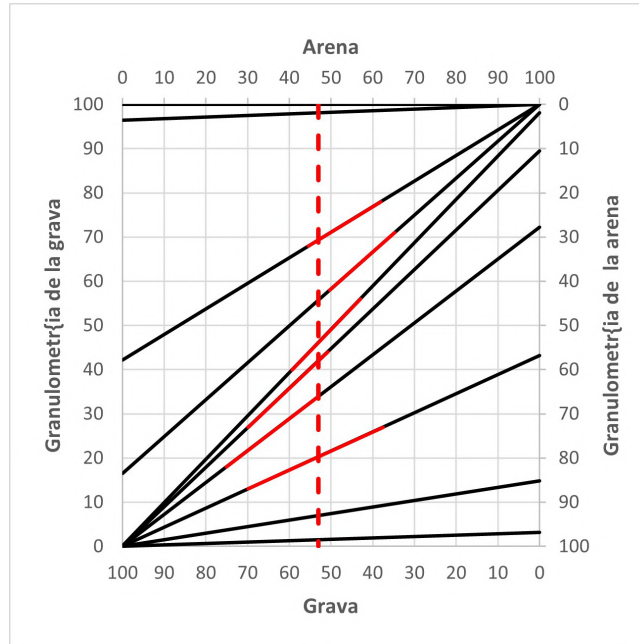
Tamiz		Límite de los porcentajes que pasan los siguientes tamaños máximos								
pulg	mm	90.6 mm (3 1/2")	76.1 mm (3")	64.0 mm (2 1/2")	50.8 mm (2")	38.1 mm (1 1/2")	25.4 mm (1")	19.0 mm (3/4")	12.7 mm (1/2")	9.51 mm (3/8")
3 1/2	90.6	100								
3	76.1	94 91	100							
2 1/2	64	89 83	94 91	100						
2	50.8	82 73	87 80	92 88	100					
1 1/2	38.1	74 62	78 68	83 75	90 85	100				
1	25.4	64 50	68 55	72 60	78 68	87 80	100			
3/4	19	58 42	62 47	65 51	71 58	78 68	90 85	100		
1/2	12.7	50 34	53 37	57 41	62 47	68 55	78 68	87 80	100	
3/8	9.51	45 29	48 32	51 35	56 40	62 47	71 58	78 68	90 85	100
No. 4	4.76	36 20	38 22	40 24	44 27	48 32	56 40	62 47	71 58	78 68
No. 8	2.36	28 13	30 15	32 16	34 18	38 22	44 27	48 32	55 40	61 46
No. 16	1.18	22 9	23 10	25 11	27 13	30 15	34 18	38 22	44 27	48 32
No. 30	600	17 6	18 7	20 8	21 9	23 10	27 13	30 15	34 19	38 22
No. 50	300	14 4	14 4	15 5	17 8	18 7	21 9	23 10	27 13	30 15
No. 100	150	11 3	11 3	12 4	13 4	14 5	17 6	18 7	21 9	23 10

**Fuente:** Niño (2010)

Con el rango granulométrico recomendado, obtenemos la siguiente solución gráfica que representa la combinación óptima para la mezcla de árido fino y árido grueso.

**Figura 11**

*Optimización granulométrica para el árido grueso con 40% de árido grueso reciclado*



**Nota:** El presente gráfico representa la optimización de la granulometría mediante el método Rod Note Laboratory (RNL) para la granulometría con 40% de árido grueso reciclado

Donde se obtuvieron la siguiente proporción de árido grueso y árido fino, además de su densidad promedio:

*Promedio de árido grueso*      53.07%

*Promedio de árido fino*      46.93%

*Densidad promedio*      2472.61 kg/m<sup>3</sup>

Obteniendo la siguiente dosificación para el hormigón con un 40% de árido grueso reciclado incorporado.



**Tabla 67***Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de hormigón con 40% de árido grueso reciclado incorporado*

<b>Cantidades de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón</b>			
<b>Material</b>	<b>kg</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup></b>
Contenido de aire	0.00	0.00	0.020
Cantidad de agua	200.00	1000.00	0.200
Contenido de cemento	475.41	2900.00	0.164
Contenido de árido grueso	485.02	2519.57	0.196
Contenido de árido árido reciclado	323.34	2519.57	0.131
Contenido de árido fino	714.93	2419.51	0.289
<b>Total</b>	2198.70	- - -	1.000

**Nota:** La tabla representa la dosificación para la mezcla de hormigón reciclado (40% A. R)**6.5.4.2. Ajustes por humedad de los áridos****Tabla 68***Dosificación corregida por humedad y absorción*

<b>Material</b>	<b>Dosificación Base</b>	<b>Humedad</b>		<b>Absorción</b>		<b>Contenido de agua a añadir/quitar</b>	<b>Dosificación Corregido</b>
	<b>kg</b>	<b>%</b>	<b>kg</b>	<b>%</b>	<b>kg</b>	<b>kg</b>	<b>kg</b>
Contenido de aire	0.00						0.00
Cantidad de agua	200.00						192.83
Contenido de cemento	475.41						475.41
Contenido de árido grueso	485.02	1.05	490.11	2.63	497.77	7.66	490.11
Contenido de árido reciclado	323.34	1.05	326.74	2.63	331.85	5.11	326.74
Contenido de árido fino	714.93	6.54	761.69	3.75	741.74	-19.95	761.69
<b>Total</b>	2198.70	- - -	- - -	- - -	- - -	-7.17	2246.77

**Nota:** La tabla representa la dosificación corregida por humedad y absorción de los áridos

### 6.5.4.3. Dosificación de mezcla de hormigón reciclado (40% A, R)

Para el hormigón con un 40% de árido grueso reciclado, se obtuvo un asentamiento de 3 cm, por lo que fue necesario realizar una corrección por asentamiento para alcanzar el asentamiento deseado de 10 cm.

Además, la mezcla de hormigón presentó una densidad de 2276.99 kg/m<sup>3</sup> y un peso total de 33.70 kg, resultando en un rendimiento de 14.80024 litros. Este rendimiento se sitúa por debajo del valor esperado de 15 litros, por lo que también es necesario llevar a cabo una corrección por rendimiento.

$$Agua_{Rendimiento} = \frac{200 \times 15}{14.80024}$$

$$Agua_{Rendimiento} = 202.69$$

**Tabla 69**

*Propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (40% A. R)*

<b>Propiedades físicas del hormigón</b>		
Asentamiento	3.00	cm
Densidad	2276.99	kg/m <sup>3</sup>
Rendimiento	0.01480	m <sup>3</sup>
<b>Contenido de agua neta por m<sup>3</sup></b>		
Corrección por rendimiento	202.69	kg
Corrección por asentamiento	216.69	kg

**Nota:** La tabla representa las propiedades obtenidas de la mezcla de hormigón reciclado (40% A. R)

Con las correcciones realizadas por asentamiento y rendimiento, la dosificación de la

mezcla de hormigón en estado seco (SH) para el hormigón reciclado (40% A. R) queda de la siguiente manera:

**Tabla 70**

*Dosificación definitiva para 1 m<sup>3</sup> de hormigón reciclado (40% A. R)*

<b>Cantidades de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Material</b>	<b>kg</b>
Contenido de aire	0.00
Cantidad de agua	216.69
Contenido de cemento	515.08
Contenido de árido grueso	491.54
Contenido de árido reciclado	327.69
Contenido de árido fino	678.98
<b>Total</b>	<b>2229.98</b>

**Nota:** La tabla representa la dosificación definitiva para la mezcla de hormigón reciclado (40% A. R)

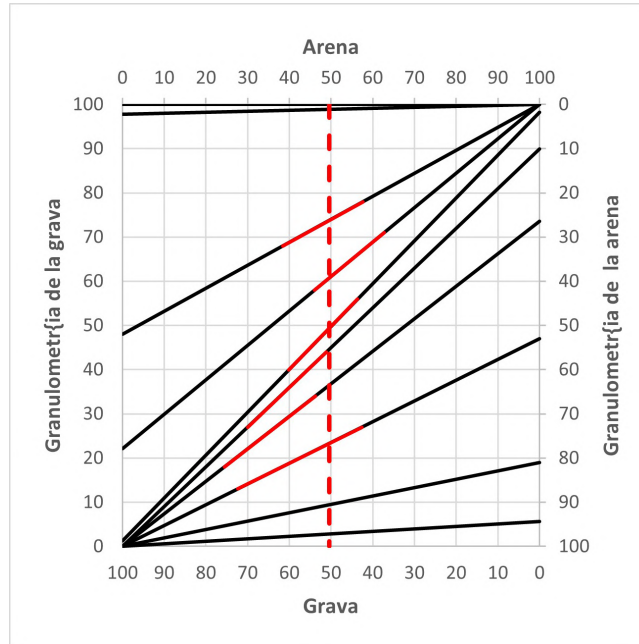
**6.5.5. Mezcla de hormigón reciclado con 50% de árido grueso reciclado**

**6.5.5.1. Contenido de árido grueso y árido fino**

Mediante el método Road Note Laboratory, obtenemos la siguiente solución gráfica que representa la combinación óptima para la mezcla de árido fino y árido grueso con el 50% de árido grueso reciclado.

**Figura 12**

*Optimización granulométrica para el árido grueso con 50% de árido grueso reciclado*



**Nota:** El presente gráfico representa la optimización de la granulometría mediante el método Rod Note Laboratory (RNL) para la granulometría con 50% de árido grueso reciclado

Donde se obtuvieron la siguiente proporción de árido grueso y árido fino, además de su densidad promedio:

*Promedio de árido grueso*      50.42%

*Promedio de árido fino*      49.58%

*Densidad promedio*      2456.28 kg/m<sup>3</sup>

Obteniendo la siguiente dosificación para el hormigón con un 50% de árido grueso reciclado incorporado.

**Tabla 71***Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de hormigón con 50% de árido grueso reciclado incorporado*

<b>Cantidades de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón</b>			
<b>Material</b>	<b>kg</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup></b>
Contenido de aire	0.00	0.00	0.020
Cantidad de agua	200.00	1000.00	0.200
Contenido de cemento	475.41	2900.00	0.164
Contenido de árido grueso	381.50	2492.43	0.155
Contenido de árido reciclado	381.50	2492.43	0.155
Contenido de árido fino	750.22	2419.51	0.305
<b>Total</b>	2188.64	- - -	1.000

**Nota:** La tabla representa la dosificación para la mezcla de hormigón reciclado (50% A. R)**6.5.5.2. Ajustes por humedad de los áridos****Tabla 72***Dosificación corregida por humedad y absorción*

<b>Material</b>	<b>Dosificación Base</b>	<b>Humedad</b>		<b>Absorción</b>		<b>Contenido de agua a añadir/quitar</b>	<b>Dosificación Corregido</b>
	<b>kg</b>	<b>%</b>	<b>kg</b>	<b>%</b>	<b>kg</b>	<b>kg</b>	<b>kg</b>
Contenido de aire	0.00						0.00
Cantidad de agua	200.00						201.39
Contenido de cemento	475.41						475.41
Contenido de árido grueso	381.50	0.86	384.78	2.9	392.57	7.78	384.78
Contenido de árido reciclado	381.50	0.86	384.78	2.9	392.57	7.78	384.78
Contenido de árido fino	750.22	5.64	792.54	3.75	778.36	-14.18	792.54
<b>Total</b>	2188.64	- - -	- - -	- - -	- - -	1.39	2238.90

**Nota:** La tabla representa la dosificación corregida por humedad y absorción de los áridos

### 6.5.5.3. Dosificación de mezcla de hormigón reciclado (50% A, R)

Para el hormigón con un 50% de árido grueso reciclado, se obtuvo un asentamiento de 3 cm, por lo que fue necesario realizar una corrección por asentamiento para alcanzar el asentamiento deseado de 10 cm.

Además, la mezcla de hormigón presentó una densidad de 2263.49 kg/m<sup>3</sup> y un peso total de 33.58 kg, resultando en un rendimiento de 14.83549 litros. Este rendimiento se sitúa por debajo del valor esperado de 15 litros, por lo que también es necesario llevar a cabo una corrección por rendimiento.

$$Agua_{Rendimiento} = \frac{200 \times 15}{14.83549}$$

$$Agua_{Rendimiento} = 202.20$$

**Tabla 73**

*Propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (50% A. R)*

<b>Propiedades físicas del hormigón</b>		
Asentamiento	3.00	cm
Densidad	2263.49	kg/m <sup>3</sup>
Rendimiento	0.01484	m <sup>3</sup>
<b>Contenido de agua neta por m<sup>3</sup></b>		
Corrección por rendimiento	202.20	kg
Corrección por asentamiento	216.20	kg

**Nota:** La tabla representa las propiedades obtenidas de la mezcla de hormigón reciclado (50% A. R)

Con las correcciones realizadas por asentamiento y rendimiento, la dosificación de la mezcla de hormigón en estado seco (SH) para el hormigón reciclado (50% A. R) queda de la

siguiente manera:

**Tabla 74**

*Dosificación definitiva para 1 m<sup>3</sup> de hormigón reciclado (50% A. R)*

<b>Cantidades de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Material</b>	<b>kg</b>
Contenido de aire	0.00
Cantidad de agua	216.20
Contenido de cemento	513.91
Contenido de árido grueso	385.69
Contenido de árido reciclado	385.69
Contenido de árido fino	712.90
<b>Total</b>	<b>2214.39</b>

**Nota:** La tabla representa la dosificación definitiva para la mezcla de hormigón reciclado (50% A. R)

#### **6.5.6. Resistencia a la compresión**

Para los ensayos de compresión, se diseñaron 6 cilindros con el objetivo de analizar la resistencia. Se evaluó la resistencia de los primeros 3 cilindros a los 7 días y de los 3 últimos cilindros a los 28 días. Además, de analizar cómo varía su resistencia en comparación con el hormigón convencional a medida que se incorpora una mayor cantidad de árido grueso reciclado.

**Tabla 75***Resistencias a compresión del hormigón reciclado (10% A. R)*

Hormigón reciclado (10% A. R)							
Días	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kN)	Peso (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)
7	10.20	20.23	175.91	3828.50	2316.02	21.53	21.73
	10.16	20.20	174.27	3831.20	2339.41	21.50	
	10.13	20.23	178.64	3826.90	2347.16	22.17	
28	10.13	20.33	260.74	3879.20	2367.53	32.35	31.11
	10.15	20.25	248.99	3870.50	2362.22	30.77	
	10.13	20.25	243.47	3870.30	2371.43	30.21	

**Nota:** La tabla muestra la resistencias a compresión a los 7 y 28 días del hormigón reciclado (10% A. R)

**Tabla 76***Resistencias a compresión del hormigón reciclado (20% A. R)*

Hormigón reciclado (20% A. R)							
Días	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kN)	Peso (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)
7	10.20	20.26	190.07	3821.70	2308.48	23.26	22.85
	10.13	20.25	181.60	3805.20	2331.54	22.53	
	10.16	20.20	184.47	3809.40	2326.10	22.75	
28	10.18	20.28	278.13	3861.30	2339.27	34.17	34.06
	10.20	20.30	277.33	3858.30	2326.00	33.94	
	10.15	20.20	227.25	3845.90	2353.01	28.09	

**Nota:** La tabla muestra la resistencias a compresión a los 7 y 28 días del hormigón reciclado (20% A. R)



**Tabla 77***Resistencias a compresión del hormigón reciclado (30% A. R)*

Hormigón reciclado (30% A. R)							
Días	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kN)	Peso (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)
7	10.20	20.30	209.87	3816.90	2301.04	25.68	24.33
	10.18	20.28	193.37	3805.40	2305.40	23.76	
	10.25	20.30	194.38	3841.60	2293.39	23.56	
28	10.25	20.30	247.80	3861.00	2304.97	30.03	30.03
	10.20	20.25	215.91	3836.50	2318.57	26.42	
	10.20	20.33	289.74	3851.40	2318.41	35.46	

**Nota:** La tabla muestra la resistencias a compresión a los 7 y 28 días del hormigón reciclado (30% A. R)

**Tabla 78***Resistencias a compresión del hormigón reciclado (40% A. R)*

Hormigón reciclado (40% A. R)							
Días	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kN)	Peso (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)
7	10.13	20.27	169.20	3808.60	2331.33	20.99	20.88
	10.20	20.27	132.36	3808.80	2299.56	16.20	
	10.20	20.30	169.76	3809.00	2296.28	20.78	
28	10.18	20.23	208.91	3830.80	2326.53	25.67	27.06
	10.23	20.28	260.11	3833.50	2299.78	31.65	
	10.20	20.35	232.51	3845.50	2312.59	28.45	

**Nota:** La tabla muestra la resistencias a compresión a los 7 y 28 días del hormigón reciclado (40% A. R)

**Tabla 79***Resistencias a compresión del hormigón reciclado (50% A. R)*

Hormigón reciclado (50% A. R)							
Días	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Carga (kN)	Peso (g)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)
7	10.20	20.33	184.72	3765.30	2266.58	22.61	23.23
	10.23	20.23	192.71	3793.00	2281.11	23.45	
	10.35	20.28	198.77	3899.10	2285.21	23.63	
28	10.23	20.33	242.50	3782.60	2263.66	29.50	26.48
	10.20	20.25	216.37	3814.00	2304.97	26.48	
	10.20	20.33	184.23	3792.10	2282.72	22.55	

**Nota:** La tabla muestra la resistencias a compresión a los 7 y 28 días del hormigón reciclado (50% A. R)

## 6.6. Determinación del porcentaje óptimo de árido grueso reciclado

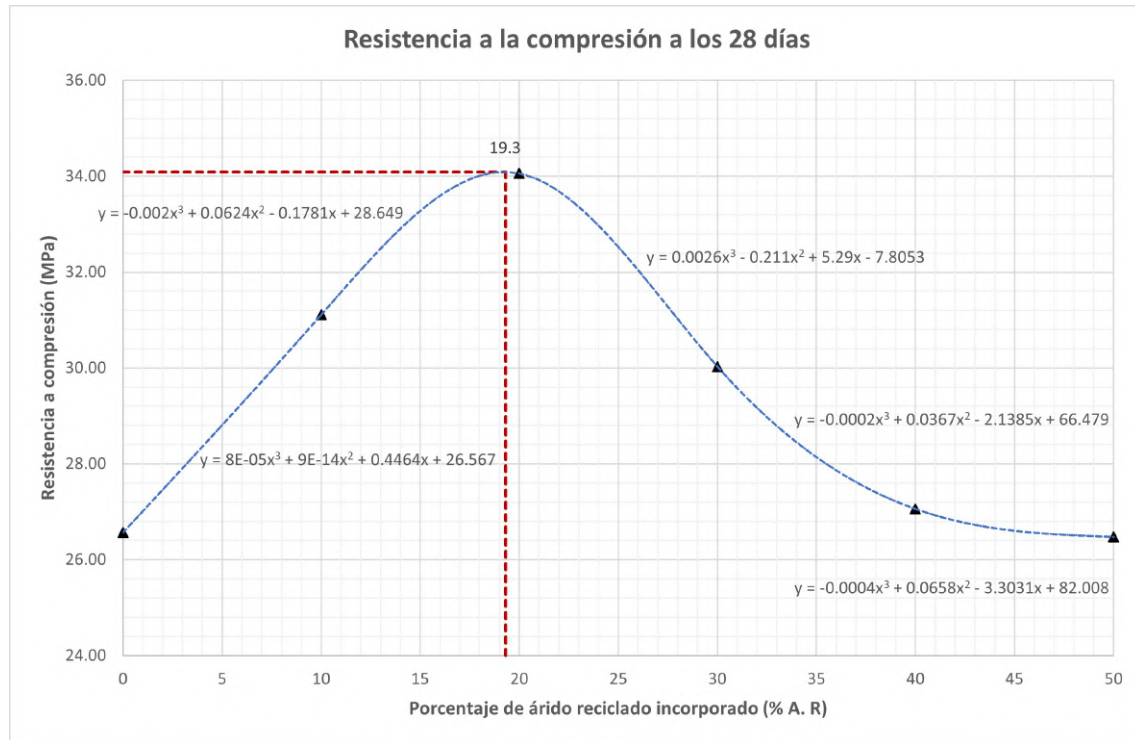
De acuerdo a los resultados obtenidos a lo largo de la investigación, podemos optimizar el porcentaje de árido grueso reciclado que puede sustituir al árido grueso natural. Este porcentaje representa el valor con el cual podemos obtener un hormigón con las mejores características.

Para calcular el porcentaje óptimo de árido reciclado, aplicamos el método de interpolación spline cúbico. Elegimos este método debido a que ajusta de manera más precisa los puntos tabulados y proporciona ecuaciones de tercer grado que describen el segmento entre los dos puntos.

Donde elegimos la segunda ecuación,  $y = -0.002x^3 + 0.0624x^2 - 0.1781x + 28.649$ , ya que se observa que el punto máximo se encuentra dentro del intervalo del 10 al 20% de árido reciclado. Al derivar la ecuación e igualar a cero, podemos encontrar el punto máximo, siendo este un valor aproximado de 19.30% de árido reciclado.

**Figura 13**

*Porcentaje óptimo de árido grueso reciclado*



**Nota:** El presente gráfico representa el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado que puede sustituir al árido grueso natural

La curva de la Figura 13 muestra la variación de las resistencias para las mezclas con diferentes porcentajes de árido grueso reciclado incorporado. Podemos determinar que el porcentaje óptimo es del 19.30% de árido grueso reciclado. A partir de este valor, se evidencia que la resistencia del hormigón disminuye a medida que se incorpora una mayor cantidad de árido grueso reciclado.

### 6.6.1. Propiedades de porcentaje óptimo de árido grueso reciclado

#### 6.6.1.1. Granulometría

**Tabla 80**

*Resultados del ensayo granulométrico del árido grueso con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado*

<b>Ensayo granulométrico NTE INEN 696 - NTE INEN 872</b>		
	Peso inicial de la muestra (g)	5087.00
<b>Muestra</b>	Tamaño máximo nominal (mm)	19.00
	Tamaño máximo (mm)	25.00
<b>Resultado</b>	Granulometría	Bien gradada

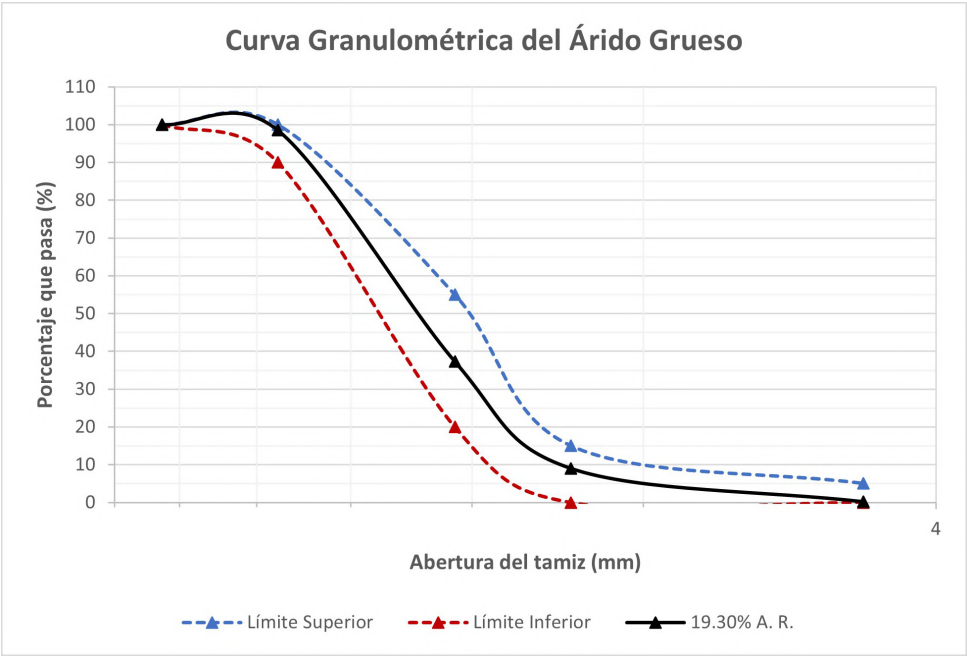
**Tabla 81**

*Análisis granulométrico del árido grueso con porcentaje óptimo de árido grueso reciclado*

<b>Análisis granulométrico del árido grueso con 19.30% de árido grueso reciclado</b>								
<b>Tamiz</b>	<b>Masa retenida</b>	<b>Retenido</b>	<b>Retenido</b>	<b>Pasante</b>	<b>Límite Inferior</b>	<b>Límite Superior</b>	<b>Cumplimiento norma</b>	
<b>pulg mm</b>	<b>(g)</b>	<b>parcial (%)</b>	<b>acumulado (%)</b>	<b>acumulado (%)</b>			<b>NTE INEN 872</b>	
1"	25	0	0	100	100	100	Cumple	
3/4"	19	75	1	99	90	100	Cumple	
1/2"	12.5	3113	61	63	20	55	Cumple	
3/8"	9.5	1440	28	91	0	15	Cumple	
No 4	4.75	450	9	100	0	5	Cumple	
<b>Fondo</b>		9	0	100	0	-	-	
<b>Total</b>		5087						

**Figura 14**

*Curva granulométrica del ensayo granulométrico del árido grueso con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado*



**6.6.1.2. Densidad**

**Tabla 82**

*Densidad y gravedad específica del árido grueso con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado*

Determinación de la Densidad NTE INEN 857				
		19.30% A. R		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa aparente en agua de la muestra saturada (C)(g)	1979.30	1969.90	1932.90
	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	3201.40	3188.20	3133.70
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	3131.40	3112.30	3064.90
<b>Resultado</b>	Gravedad Específica (SH)(-)	2.56	2.55	2.55
	Densidad (SH)(-)	2555.94	2548.22	2545.90
	Gravedad específica promedio (SH)(-)		2.56	
	Densidad promedio (SH)(kg/m <sup>3</sup> )		2550.02	

### 6.6.1.3. Absorción

**Tabla 83**

*Absorción del árido grueso con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado*

Determinación de la Absorción NTE INEN 857				
		19.30% A. R		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca (B)(g)	1979.30	1969.90	1932.90
	Masa en aire de la muestra seca al horno (A)(g)	3131.40	3112.30	3064.90
<b>Resultado</b>	Absorción (%)	2.24	2.44	2.25
	Absorción promedio (%)		2.31	

### 6.6.1.4. Masa unitaria

**Tabla 84**

*Masa unitaria del árido grueso con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado incorporado*

Determinación de la Masa Unitaria NTE INEN 858							
19.30% A. R.							
		Suelta			Compacta		
		1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra	1. <sup>a</sup> Muestra	2. <sup>a</sup> Muestra	3. <sup>a</sup> Muestra
<b>Muestra</b>	Masa del árido más el molde (G)(kg)	24.561	24.383	24.504	25.675	25.896	25.914
	Masa del molde (T)(kg)	12.175	12.175	12.175	12.175	12.175	12.175
	Volumen del molde (V)(m <sup>3</sup> )	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961	0.00961
<b>Resultado</b>	Masa Unitaria (kg/m <sup>3</sup> )	1288.87	1270.34	1282.93	1404.79	1427.78	1429.66
	Masa Unitaria promedio (kg/m <sup>3</sup> )		1280.71			1420.74	

## 6.6.2. Mezcla de hormigón con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado

### 6.6.2.1. Contenido de árido grueso

Donde:

$$Masa\ Unitaria\ Compacta\ (MUC) \quad 1420.74\ kg/m^3$$

$$Densidad\ (SH) \quad 2550.02\ kg/m^3$$

$$b_{o'} = \frac{1420.74}{2550.02}$$

$$b_{o'} = 0.557$$

$$B = 0.633 \times 0.557$$

$$B = 0.353\ m^3/m^3$$

$$Cantidad\ de\ \acute{A}rido\ grueso \quad 725.76\ kg$$

$$Cantidad\ de\ \acute{A}rido\ reciclado \quad 173.57\ kg$$

### 6.6.2.2. Contenido de árido fino

$$Vol.\ Cemento \quad 0.164\ m^3$$

$$Vol.\ Agua \quad 0.200\ m^3$$

$$\begin{aligned} \text{Vol. Aire} & 0.020 \text{ m}^3 \\ \text{Vol. Árido grueso} & 0.284 \text{ m}^3 \\ \text{Vol. Árido reciclado} & 0.068 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Donde:

$$\text{Vol. Árido fino} = 1 - (0.164 + 0.200 + 0.020 + 0.284 + 0.068)$$

$$\text{Vol. Árido fino} \quad 0.263 \text{ m}^3$$

**Tabla 85**

*Dosificación para 1 m<sup>3</sup> de hormigón con el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado incorporado*

<b>Cantidades de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón</b>			
<b>Material</b>	<b>kg</b>	<b>kg/m<sup>3</sup></b>	<b>m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup></b>
Contenido de aire	0.00	0.00	0.020
Cantidad de agua	200.00	1000.00	0.200
Contenido de cemento	475.41	2900.00	0.164
Contenido de árido grueso	725.76	2550.02	0.284
Contenido de árido reciclado	173.57	2550.02	0.068
Contenido de árido fino	637.28	2419.51	0.263
<b>Total</b>	2212.01	- - -	1.000

**Nota:** La tabla representa la dosificación para la mezcla de hormigón reciclado (Porcentaje óptimo A. R)

### 6.6.2.3. Ajustes por humedad de los áridos



**Tabla 86***Dosificación corregida por humedad y absorción*

Material	Dosificación Base	Humedad		Absorción		Contenido de agua a añadir/quitar	Dosificación Corregido
	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
Contenido de aire	0.00						0.00
Cantidad de agua	200.00						201.93
Contenido de cemento	475.41						475.41
Contenido de árido grueso	725.76	1.55	737.01	2.31	742.52	5.52	737.01
Contenido de árido reciclado	173.57	1.55	176.26	2.31	177.58	1.32	176.26
Contenido de árido fino	637.28	4.52	666.08	3.75	661.18	-4.91	666.08
<b>Total</b>	2212.01	---	---	---	---	1.93	2256.69

**Nota:** La tabla representa la dosificación corregida por humedad y absorción de los áridos

#### 6.6.2.4. Dosificación de mezcla de hormigón reciclado (Porcentaje óptimo)

Mediante la dosificación obtenida para el hormigón con un el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado, se llevó a cabo una mezcla de 15 litros para determinar su asentamiento y rendimiento. El asentamiento registrado fue de 6 cm, lo que indica la necesidad de realizar una corrección por asentamiento.

Además, la mezcla de hormigón presentó una densidad de 2297.87 kg/m<sup>3</sup> y un peso total de 33.85 kg, resultando en un rendimiento de 14.73103 litros. Este rendimiento se sitúa por debajo del esperado de 15 litros, por lo que también es necesario llevar a cabo una corrección por rendimiento.

$$Agua_{Rendimiento} = \frac{200 \times 15}{14.73103}$$

$$Agua_{Rendimiento} = 203.65$$

**Tabla 87**

*Propiedades en estado fresco del hormigón reciclado (Porcentaje óptimo A. R)*

<b>Propiedades físicas del hormigón</b>		
Asentamiento	6.00	cm
Densidad	2297.87	kg/m <sup>3</sup>
Rendimiento	0.01473	m <sup>3</sup>
<b>Contenido de agua neta por m<sup>3</sup></b>		
Corrección por rendimiento	203.65	kg
Corrección por asentamiento	211.65	kg

**Nota:** La tabla representa las propiedades obtenidas de la mezcla de hormigón reciclado (Porcentaje óptimo A. R)

Con las correcciones realizadas por asentamiento y rendimiento, la dosificación de la mezcla de hormigón en estado seco (SH) para el hormigón reciclado (Porcentaje óptimo A. R) queda de la siguiente manera:

**Tabla 88***Dosificación definitiva para 1 m<sup>3</sup> de hormigón reciclado (Porcentaje óptimo A. R)*

<b>Cantidades de los materiales por m<sup>3</sup> de hormigón</b>	
<b>Material</b>	<b>kg</b>
Contenido de aire	0.00
Cantidad de agua	211.65
Contenido de cemento	503.10
Contenido de árido grueso	739.01
Contenido de árido reciclado	176.74
Contenido de árido fino	622.85
<b>Total</b>	<b>2253.36</b>

**Nota:** La tabla representa la dosificación definitiva para la mezcla de hormigón reciclado (Porcentaje óptimo A. R)

### 6.6.3. Resistencia a la compresión

**Tabla 89***Resistencias a compresión del hormigón reciclado (19.30% A. R)*

<b>Hormigón reciclado (19.30% A. R)</b>							
<b>Días</b>	<b>Diámetro (cm)</b>	<b>Altura (cm)</b>	<b>Carga (kN)</b>	<b>Peso (g)</b>	<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Promedio (MPa)</b>
7	10.18	20.25	166.83	3833.60	2325.93	20.50	21.25
	10.20	20.33	179.86	3843.30	2313.54	22.01	
28	10.21	20.26	287.06	3851.40	2321.87	35.06	35.36
	10.33	20.28	288.80	3955.00	2326.96	34.46	
	10.23	20.30	300.55	3817.00	2287.63	36.57	

**Nota:** La tabla muestra la resistencias a compresión a los 7 y 28 días del hormigón reciclado (19.30% A. R)

Además, con el objetivo de profundizar en la implementación del árido reciclado en el hormigón, se analizó la resistencia a la flexión, ya que esta suele ser baja en comparación con la resistencia a la compresión y se convierte en un valor determinante para el diseño de pavimentos. La evaluación de la resistencia a la flexión del hormigón reciclado se ha llevado a cabo siguiendo el procedimiento establecido por la norma NTE INEN 2554, que utiliza una viga simplemente apoyada con carga en los dos tercios de la luz.

Con base en el ensayo realizado, se observó la fractura en el tercio medio de la viga. De acuerdo con la norma, se especifica que si la fractura ocurre dentro del tercio medio de la luz libre, el módulo de rotura debe calcularse mediante la siguiente expresión:

$$R = \frac{PL}{b d^2}$$

**Tabla 90**

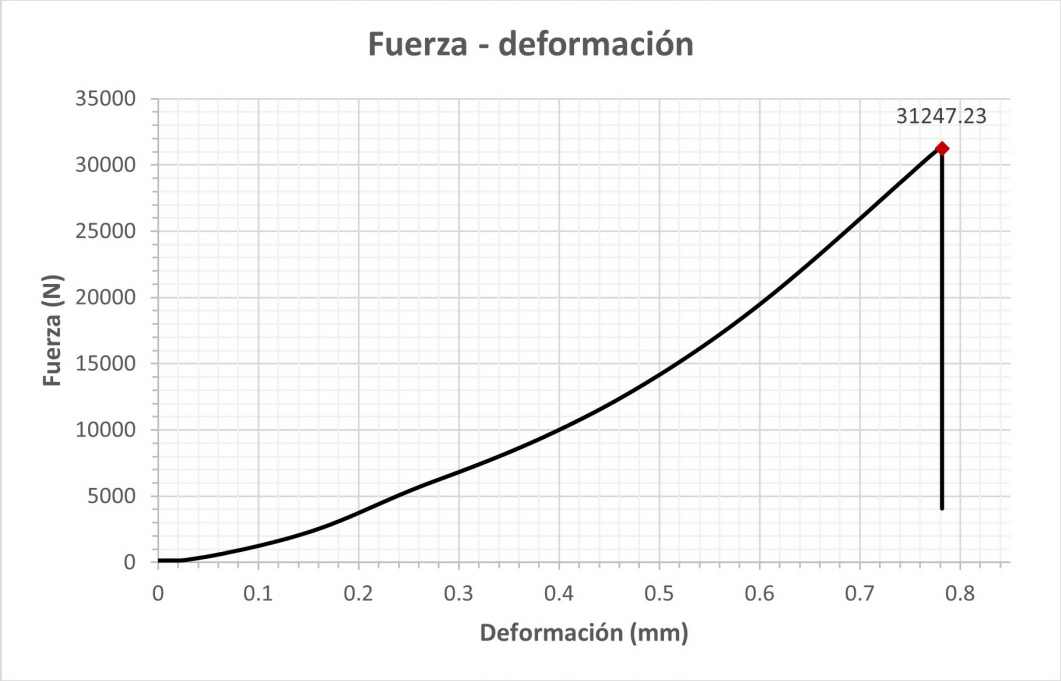
*Resistencia a flexión del hormigón reciclado (19.30% A. R)*

<b>Determinación del Módulo de Rotura NTE INEN 2554</b>			
		<b>1.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>2.<sup>a</sup> Muestra</b>
<b>Resultados</b>	Carga máxima aplicada (P)(N)	31247.23	30275.68
	Luz libre (L)(mm)	470.00	492.10
	Ancho promedio del espécimen en la fractura (b)(mm)	151.00	151.00
	Altura promedio del espécimen en la fractura (d)(mm)	150.70	149.30
	Módulo de rotura (R)(MPa)	4.28	4.43
	Módulo de rotura promedio (R)(MPa)		4.35

**Nota:** La tabla muestra el módulo de rotura del hormigón reciclado (19.30% A. R)

**Figura 15**

*Curva fuerza - deformación*



**Figura 16**

*Curva fuerza - deformación*



El módulo de rotura se estima que presenta valores del 10 al 20% de la resistencia a compresión, presentándose la siguiente relación recomendada por el Comité Europeo del Concreto que se puede usar cuando no se cuente con ensayos a flexión.

$$MR = K \sqrt{f'c}$$

Donde el valor de K varía de 2.0 a 2.7, según las recomendaciones del Comité Europeo, que sugiere 2.5, mientras que el ACI recomienda 2.0.

$$MR = 2.5 \sqrt{240}$$

$$MR = 38.73 \text{ kg/m}^2 \approx 3.80 \text{ MPa}$$

$$MR = 2.0 \sqrt{240}$$

$$MR = 30.98 \text{ kg/m}^2 \approx 3.04 \text{ MPa}$$

#### **6.6.4. Módulo de elasticidad**

De manera similar, se analizó el módulo de elasticidad del hormigón. Aunque este aspecto generalmente no se considera de gran importancia práctica, sí constituye una medida de la resistencia a la deformación o, dicho de otra forma, de su rigidez.

El módulo de elasticidad del hormigón está influenciado por la dosificación de la mezcla, su resistencia a la compresión y de la edad de la muestra. En cuanto a la dosificación de la mezcla, el tipo de árido es la principal causa de variación, ya que este presenta un módulo de elasticidad mayor que el de la pasta de cemento.

Para determinar el módulo de elasticidad del hormigón con un 19.30% de árido reciclado incorporado, se realizó el procedimiento que dicta la norma ASTM C 469, dado que no existe una norma ecuatoriana para llevar a cabo este ensayo.

**Tabla 91***Módulo de elasticidad del hormigón reciclado (19.30% A. R)*

<b>Determinación del Módulo de Elasticidad ASTM C 469</b>			
		<b>1.<sup>a</sup> Muestra</b>	<b>2.<sup>a</sup> Muestra</b>
<b>Muestra</b>	Diámetro (D)(mm)	152.00	152.50
	Altura (H)(mm)	300.50	300.00
	Área (mm <sup>2</sup> )	18145.84	18265.42
	Altura inicial (H <sub>0</sub> )(mm)	200.00	200.00
	Diámetro inicial (D <sub>0</sub> )(mm)	152.00	152.50
	f <sub>c</sub> (MPa)	30.23	33.73
	0.4 f <sub>c</sub> (MPa)	12.09	13.49
	<b>Resultados</b>	S <sub>1</sub> (MPa)	1.124
S <sub>2</sub> (MPa)		12.092	13.492
ε <sub>1</sub> (-)		0.00005	0.00005
ε <sub>2</sub> (-)		0.000505903	0.000565828
E (GPa)		24.06	24.74
E Promedio (GPa)		24.40	

**Nota:** La tabla muestra el módulo de elasticidad del hormigón reciclado (19.30% A. R)



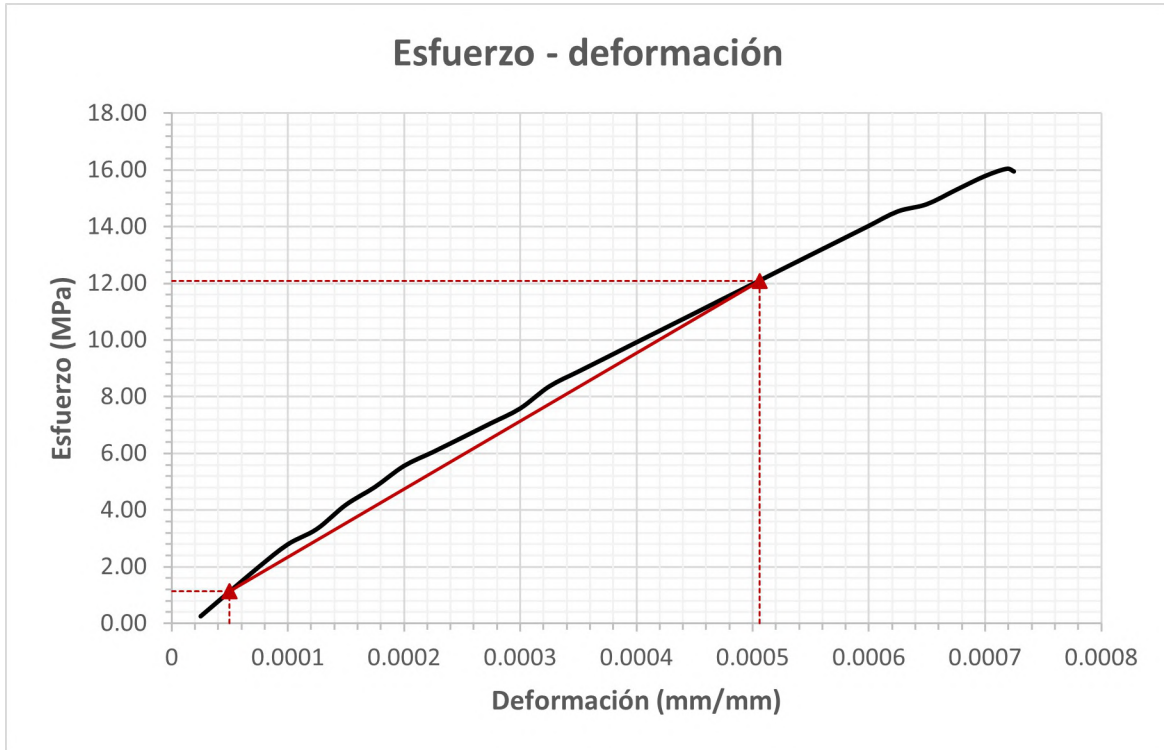
**Tabla 92***Resultados de carga - deformación de la muestra No. 1*

Carga (kN)	$\sigma$ (MPa)	Lectura del ensayo ASTM C 469					
		$g_t$	d	$g_t$	d'	$\varepsilon_t$	$\varepsilon_t$
4.5	0.25	0.01	0.005	0	0	0.000025	0
20.4	1.12	0.02	0.01	0	0	0.00005	0
36.1	1.99	0.03	0.015	0	0	0.000075	0
50.6	2.79	0.04	0.02	0.01	0.00444444	0.0001	2.924E-05
60.4	3.33	0.05	0.025	0.01	0.00444444	0.000125	2.924E-05
75.9	4.18	0.06	0.03	0.01	0.00444444	0.00015	2.924E-05
87.3	4.81	0.07	0.035	0.01	0.00444444	0.000175	2.924E-05
100.8	5.55	0.08	0.04	0.01	0.00444444	0.0002	2.924E-05
109.7	6.05	0.09	0.045	0.01	0.00444444	0.000225	2.924E-05
118.9	6.55	0.1	0.05	0.02	0.00888889	0.00025	5.848E-05
128.2	7.06	0.11	0.055	0.02	0.00888889	0.000275	5.848E-05
137.6	7.58	0.12	0.06	0.02	0.00888889	0.0003	5.848E-05
151.7	8.36	0.13	0.065	0.02	0.00888889	0.000325	5.848E-05
161.2	8.88	0.14	0.07	0.02	0.00888889	0.00035	5.848E-05
170.5	9.40	0.15	0.075	0.02	0.00888889	0.000375	5.848E-05
179.9	9.91	0.16	0.08	0.03	0.01333333	0.0004	8.7719E-05
189.2	10.43	0.17	0.085	0.03	0.01333333	0.000425	8.7719E-05
198.5	10.94	0.18	0.09	0.03	0.01333333	0.00045	8.7719E-05
207.9	11.46	0.19	0.095	0.03	0.01333333	0.000475	8.7719E-05
217.2	11.97	0.2	0.1	0.03	0.01333333	0.0005	8.7719E-05
	12.092					0.0005059	8.7719E-05
226.6	12.49	0.21	0.105	0.03	0.01333333	0.000525	8.7719E-05
235.9	13.00	0.22	0.11	0.04	0.01777778	0.00055	0.00011696
245.2	13.51	0.23	0.115	0.04	0.01777778	0.000575	0.00011696
254.5	14.03	0.24	0.12	0.04	0.01777778	0.0006	0.00011696
263.8	14.54	0.25	0.125	0.04	0.01777778	0.000625	0.00011696
268.4	14.79	0.26	0.13	0.04	0.01777778	0.00065	0.00011696
277.5	15.29	0.27	0.135	0.04	0.01777778	0.000675	0.00011696
286.4	15.78	0.28	0.14	0.04	0.01777778	0.0007	0.00011696
291.1	16.04	0.29	0.14375	0.05	0.02222222	0.00071875	0.0001462
289.4	15.95	0.29	0.145	0.05	0.02222222	0.000725	0.0001462

**Nota:** La tabla muestra la lectura del deformómetro longitudinal y transversal

**Figura 17**

*Curva esfuerzo - deformación*



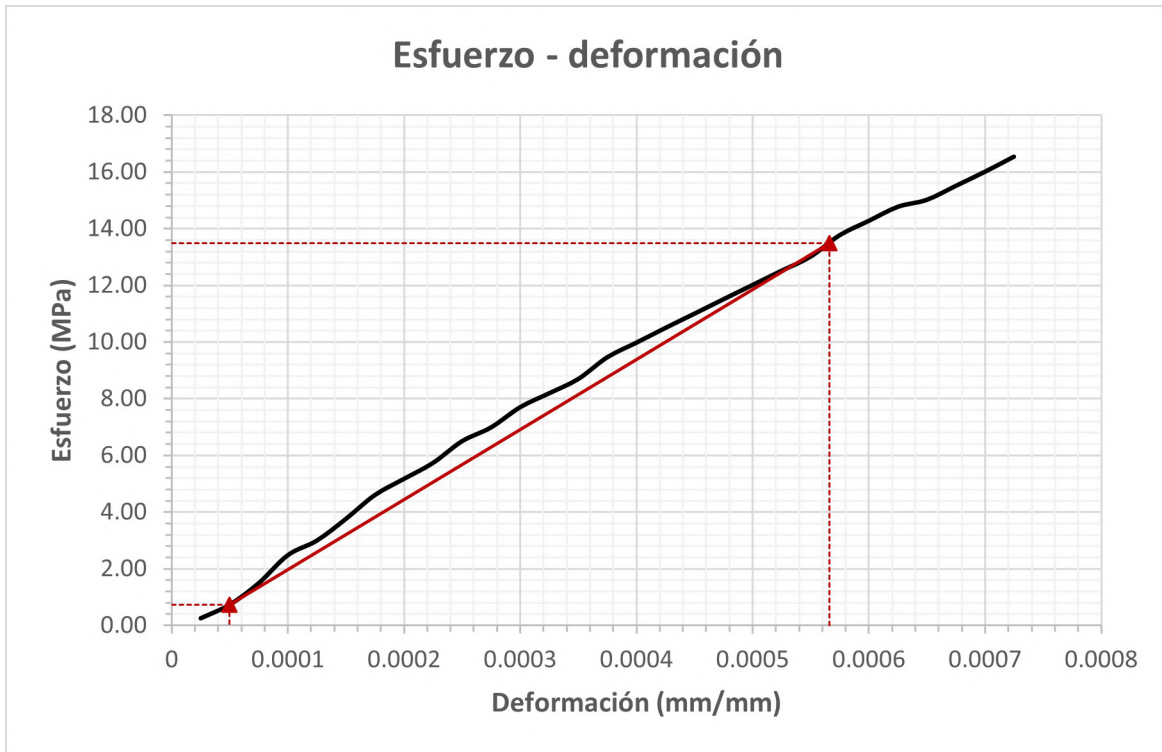
**Tabla 93***Resultados de carga - deformación de la muestra No. 2*

Lectura del ensayo ASTM C 469							
Carga (kN)	$\sigma$ (MPa)	$g_t$	d	$g_t$	d'	$\varepsilon_t$	$\varepsilon_t$
4.5	0.25	0.01	0.005	0	0	0.000025	0
13.3	0.73	0.02	0.01	0	0	0.00005	0
27.2	1.49	0.03	0.015	0	0	0.000075	0
45.2	2.47	0.04	0.02	0	0	0.0001	0
54.6	2.99	0.05	0.025	0	0	0.000125	0
68.6	3.76	0.06	0.03	0.01	0.00444444	0.00015	2.9144E-05
84	4.60	0.07	0.035	0.01	0.00444444	0.000175	2.9144E-05
94.4	5.17	0.08	0.04	0.01	0.00444444	0.0002	2.9144E-05
104.7	5.73	0.09	0.045	0.01	0.00444444	0.000225	2.9144E-05
118.7	6.50	0.1	0.05	0.01	0.00444444	0.00025	2.9144E-05
127.6	6.99	0.11	0.055	0.02	0.00888889	0.000275	5.8288E-05
140.6	7.70	0.12	0.06	0.02	0.00888889	0.0003	5.8288E-05
149.6	8.19	0.13	0.065	0.02	0.00888889	0.000325	5.8288E-05
158.8	8.69	0.14	0.07	0.02	0.00888889	0.00035	5.8288E-05
172.8	9.46	0.15	0.075	0.02	0.00888889	0.000375	5.8288E-05
182.2	9.98	0.16	0.08	0.03	0.01333333	0.0004	8.7432E-05
191.7	10.50	0.17	0.085	0.03	0.01333333	0.000425	8.7432E-05
200.9	11.00	0.18	0.09	0.03	0.01333333	0.00045	8.7432E-05
210.2	11.51	0.19	0.095	0.03	0.01333333	0.000475	8.7432E-05
219.4	12.01	0.2	0.1	0.03	0.01333333	0.0005	8.7432E-05
228.6	12.52	0.21	0.105	0.03	0.01333333	0.000525	8.7432E-05
237.7	13.01	0.22	0.11	0.04	0.01777778	0.00055	0.00011658
	13.492					0.00056583	0.00011658
251.5	13.77	0.23	0.115	0.04	0.01777778	0.000575	0.00011658
260.7	14.27	0.24	0.12	0.04	0.01777778	0.0006	0.00011658
269.8	14.77	0.25	0.125	0.04	0.01777778	0.000625	0.00011658
274.3	15.02	0.26	0.13	0.04	0.01777778	0.00065	0.00011658
283.3	15.51	0.27	0.135	0.05	0.02222222	0.000675	0.00014572
292.4	16.01	0.28	0.14	0.05	0.02222222	0.0007	0.00014572
302.1	16.54	0.29	0.145	0.05	0.02222222	0.000725	0.00014572

**Nota:** La tabla muestra la lectura del deformómetro longitudinal y transversal

**Figura 18**

*Curva esfuerzo - deformación*



De esta manera, mediante el método experimental, hemos obtenido un valor de 24.40 GPa. Al comparar este resultado con los valores experimentales establecidos por la normativa NEC para estructuras de hormigón armado, encontramos las siguientes dos ecuaciones. Estas ecuaciones tienen en cuenta el módulo de elasticidad del árido y la resistencia a compresión del hormigón.

Para la primera ecuación, se ha considerado el tipo de material Andesita, proveniente del Río Jubones – El Oro, con un módulo de elasticidad de 110.5 GPa.

$$E_c = 1.15 \sqrt[3]{E_a} \sqrt{f'_c}$$

$$E_c = 1.15 \sqrt[3]{110.5} \sqrt{24}$$

$$E_c = 27.03 \text{ GPa}$$

Se presume que esta ecuación arroja resultados más precisos, dado que tiene en cuenta materiales específicos de Ecuador y está diseñada principalmente para su aplicación en estimaciones de deflexiones causadas por cargas estáticas en elementos a flexión de hormigón armado o pretensado.

En cuanto a la segunda ecuación, esta se destina a hormigones de densidad normal.

$$E_c = 4.7 \sqrt{f'_c}$$

$$E_c = 4.7 \sqrt{24}$$

$$E_c = 23.03 \text{ GPa}$$

Su aplicación se encuentra relacionada con modelos elásticos de estructuras diseñadas para resistir movimientos sísmicos.

#### **6.6.5. Relación de Poisson**

La relación entre la deformación lateral y deformación longitudinal, denominada como relación de Poisson, es un valor necesario para el diseño estructural de distintos tipos de estructuras, como placas planas de piso, presas en arco y losas de cimientos. Estos valores estarán vinculados al árido, contenido de humedad, edad del hormigón y resistencia a la compresión.

**Tabla 94***Relación de Poisson del hormigón reciclado (19.30% A. R)*

<b>Determinación de la relación de Poisson ASTM C 469</b>			
		<b>1.ª Muestra</b>	<b>2.ª Muestra</b>
<b>Muestra</b>	Diámetro (D)(mm)	152.00	152.50
	Altura (H)(mm)	300.50	300.00
	Área (mm <sup>2</sup> )	18145.84	18265.42
	Altura inicial (Ho)(mm)	200.00	200.00
	Diámetro inicial (Do)(mm)	152.00	152.50
	f'c (MPa)	30.23	33.73
	0.4 f'c (MPa)	12.09	13.49
	$\varepsilon_{t1}$ (-)	0.00	0.00
<b>Resultados</b>	$\varepsilon_{t2}$ (-)	8.77193E-05	0.000116576
	$\varepsilon_1$ (-)	0.00005	0.00005
	$\varepsilon_2$ (-)	0.000505903	0.000565828
	$\mu$ (-)	0.19	0.23
	$\mu$ Promedio (-)	0.21	

**Nota:** La tabla muestra la relación de Poisson del hormigón reciclado (19.30% A. R)

## 6.7. Costos para la elaboración de hormigón convencional y hormigón reciclado

Para poder calcular el costo de elaboración de hormigón, consideramos los precios en el mercado de los distintos materiales que utilizamos en su elaboración.

**Tabla 95**

*Costo de los materiales para la elaboración de hormigón*

<b>Costo de los materiales</b>		
<b>Material</b>	<b>Costo</b>	<b>Unidad</b>
Agua	1.325	m <sup>3</sup>
Cemento	7.75	Saco (50 kg)
Árido grueso	17.50	m <sup>3</sup>
Árido fino	18.00	m <sup>3</sup>

En cuanto al costo del árido grueso reciclado, este se ve influenciado por las actividades realizadas para transformar los materiales obtenidos de demoliciones de estructuras de hormigón en árido grueso. Por tanto, a continuación, se especifican las actividades realizadas para su obtención y el costo establecido para este.

El primer aspecto a considerar es el transporte de los materiales obtenidos de demoliciones hasta la cantera, donde se llevará a cabo la trituración para obtener el árido reciclado. El precio del transporte de la volqueta se estima en 22.50\$ por hora. La distancia entre el punto de recolección de los materiales y la cantera es de 30.6 km, que se recorre en aproximadamente 36 minutos, resultando en un costo de 13.20\$.

En cuanto al costo de producción, se estima que es de 5.00\$ por metro cúbico (m<sup>3</sup>) de árido. Aproximadamente, una volqueta puede transportar 15 toneladas de carga, lo que equivale a unas 10.35 toneladas de árido grueso reciclado (árido mayor a 4.75 mm), representando aproximadamente 4 m<sup>3</sup> de árido reciclado. De esta manera, el costo total se calcula en 20.00\$.

Considerando estos costos, podemos establecer un precio de fabricación para el árido reciclado de 7.30\$ por metro cúbico de árido.

**Tabla 96***Costo de los materiales para la elaboración de hormigón*

Costo de elaboración por m <sup>3</sup> de hormigón convencional						
Material	kg	M. U. S (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad (U)	U	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Cantidad de agua	208.94	-	0.21	m <sup>3</sup>	1.325	0.28
Contenido de cemento	496.65	-	9.93	Saco (50 kg)	7.75	76.98
Contenido de árido grueso	930.63	1352.63	0.69	m <sup>3</sup>	17.50	12.04
Contenido de árido fino	625.38	1421.63	0.44	m <sup>3</sup>	18.00	7.92
<b>Total</b>	2261.60	-	-	-	-	97.22

**Tabla 97***Costo de los materiales para la elaboración de hormigón reciclado (19.30% A. R)*

Costo de elaboración por m <sup>3</sup> de hormigón (19.30% A. R)						
Material	kg	M. U. S (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad (U)	U	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Cantidad de agua	211.65	-	0.21	m <sup>3</sup>	1.325	0.28
Contenido de cemento	503.10	-	10.06	Saco (50 kg)	7.75	77.98
Contenido de árido grueso	739.01	1280.71	0.58	m <sup>3</sup>	17.50	10.10
Contenido de árido reciclado	176.74	1280.71	0.14	m <sup>3</sup>	5.00	0.69
Contenido de árido fino	622.85	1421.63	0.44	m <sup>3</sup>	18.00	7.89
<b>Total</b>	2253.36	-	-	-	-	96.94

**Tabla 98***Costo de los materiales para la elaboración de hormigón reciclado (20% A. R)*

Costo de elaboración por m <sup>3</sup> de hormigón (20% A. R)						
Material	kg	M. U. S (kg/m <sup>3</sup> )	Cantidad (U)	U	Precio Unitario (\$)	Precio Total (\$)
Cantidad de agua	209.71	-	0.21	m <sup>3</sup>	1.325	0.28
Contenido de cemento	498.48	-	9.97	Saco (50 kg)	7.75	77.26
Contenido de árido grueso	729.06	1237.88	0.59	m <sup>3</sup>	17.50	10.31
Contenido de árido reciclado	182.26	1237.88	0.15	m <sup>3</sup>	5.00	0.74
Contenido de árido fino	635.76	1421.63	0.45	m <sup>3</sup>	18.00	8.05
<b>Total</b>	2255.27	-	-	-	-	96.63



## 7. Resultados

Por tanto, a lo largo de esta investigación hemos podido observar que tanto el árido grueso natural como el árido grueso reciclado presentan características que varían un poco, pero, sin embargo, no se alejan de los valores característicos recomendados para la implementación en una dosificación de hormigón. A continuación, destacamos las características considerables que presentan.

En cuanto a la granulometría, a pesar de que el árido grueso reciclado cumple con los límites granulométricos, cuando se incorpora con el árido grueso natural, en cierto tamiz retiene una mayor cantidad de árido, lo que hace que se considere mal graduado. En esta investigación, hemos determinado que al incorporar una cantidad mayor al 30% de árido grueso reciclado, la granulometría queda fuera de los límites establecidos por la norma. Sin embargo, con métodos como el Road Note Laboratory implementado en esta investigación, se puede obtener una optimización de los áridos para poder implementar en la mezcla de hormigón.

Con respecto a la densidad, el contenido de mortero adherido al árido comienza a influir en esta propiedad, presentando una mayor cantidad de poros que afectan a la densidad del árido, lo que tiende a establecer una densidad inferior con respecto al árido grueso natural, sin embargo, su densidad lo mantiene considerando como un árido de peso normal hasta cuando se incorpora el 40% de árido grueso reciclado, a partir de incorporar 50% de árido grueso reciclado su peso tiende a considerarse ya como un árido de peso ligero.

La absorción, al igual que la densidad, es alterada por el contenido de mortero adherido al árido, tendiendo a aumentar el porcentaje de absorción a medida que se incorpora un mayor porcentaje de árido grueso reciclado, aunque la absorción no es una medida de la calidad del árido, si es una medida que influye en el costo para la elaboración de hormigón, tendiendo a necesitar un mayor contenido de agua, lo que también implica en un mayor contenido de cemento para no afectar la relación agua/cemento.

La masa unitaria tiende a disminuir, tanto en estado suelto como compacto, a medida que aumenta el porcentaje de árido grueso reciclado. Esto se debe a la textura angular del árido grueso reciclado, así como de su granulometría, que se ve afectada a medida que se incrementa dicho porcentaje. Esto conlleva un aumento en los espacios vacíos entre partículas, generando

la necesidad de una mayor cantidad de pasta de cemento para rellenar dichos espacios.

En cuanto a las dosificaciones de hormigón, destacan dos puntos importantes a considerar. En primer lugar, el contenido de agua para la dosificación de hormigón reciclado varía debido a los asentamientos bajos que se obtienen al incorporar un mayor porcentaje de árido grueso reciclado. Esto demanda una mayor cantidad de agua para lograr la misma fluidez. De manera similar, el contenido de cemento tiende a aumentar para mantener la misma resistencia y consistencia. En el peor de los casos, se observa un incremento del 3.72% en ambos materiales, mientras que, para el porcentaje óptimo de árido grueso reciclado, el aumento es del 1.31%. Por lo tanto, resulta necesario realizar mezclas de prueba para efectuar las correcciones correspondientes antes de su aplicación en cualquier obra. Esto puede incluir la utilización de árido grueso reciclado previamente saturado o la implementación de aditivos para evitar la necesidad de añadir más agua a la mezcla.

La densidad en estado fresco del hormigón comienza a disminuir a medida que se incorpora un mayor porcentaje de árido grueso reciclado, variando en un rango del 0.04% al 1.67% con respecto al hormigón convencional. Esta reducción se debe principalmente al árido grueso reciclado, específicamente a su densidad y porosidad. Aunque existe esta pequeña variabilidad, la densidad del hormigón reciclado sigue estando dentro del rango del hormigón de peso normal, que varía entre 2200 y 2400 kg/m<sup>3</sup>.

En lo que respecta a la resistencia a compresión, se observa que con la incorporación de árido grueso reciclado no se presenta una disminución considerable en comparación con el hormigón convencional. De hecho, se obtiene un aumento de resistencia para hormigones con hasta un 20% de árido grueso reciclado incorporado. A partir de este porcentaje, se nota una disminución de la resistencia, llegando a ser inferior al hormigón convencional cuando se incorpora un 50% de árido grueso reciclado.

En este contexto, se puede identificar que el porcentaje óptimo para obtener la mejor resistencia a compresión es del 19.30%. No obstante, con la finalidad de facilitar los cálculos, se sugiere redondear este valor al 20%.

Si analizamos el módulo de elasticidad, el hormigón convencional de densidad normal tiene valores que varían entre 14 y 42 GPa. Observamos que con la implementación del árido grueso reciclado se ha obtenido un valor intermedio de 24.40 GPa, el cual también muestra correlación con las fórmulas establecidas por la normativa NEC. Estas fórmulas arrojan valores de 23.03

y 27.03 GPa al considerar únicamente el módulo de elasticidad del árido y su resistencia a compresión.

De igual manera, al comparar la relación de Poisson, los valores que comúnmente presenta el hormigón convencional están dentro del rango de 0.15 a 0.25, siendo 0.20 el valor más utilizado. Por otro lado, el hormigón reciclado ha arrojado un valor de 0.21, el cual se encuentra dentro del rango característico y cercano al valor comúnmente utilizado.

Por último, en cuanto a las resistencias, se destaca la resistencia a la flexión, la cual se sitúa entre el 10% y el 20% de la resistencia a compresión del hormigón. En relación con el hormigón reciclado, este ha alcanzado una resistencia a la flexión de 4.35 MPa, correspondiente al 18% de la resistencia a compresión. Además, se encuentra por encima de la relación establecida por el Comité Europeo del Concreto. Esto sugiere que el árido grueso reciclado podría ser implementado en el diseño de pavimentos.

En cuanto al costo de producción del hormigón reciclado, se basa en los precios investigados de los materiales y la producción de árido reciclado. El costo de los materiales para realizar hormigón convencional en nuestro diseño es de 97.22\$ por m<sup>3</sup>, mientras que el hormigón con un 19.40% de árido reciclado tiene un valor de 96.94\$ por m<sup>3</sup>, con una diferencia de 0.28 ctvs. Para el hormigón con un 20% de árido reciclado, el precio es de 96.63\$ por m<sup>3</sup>, con una diferencia de 0.59 ctvs en comparación con el hormigón convencional.

## 8. Conclusiones

En primer lugar, se tiene que las características que va a presentar el árido grueso reciclado están relacionadas principalmente con el método de trituración implementado para su obtención.

El árido grueso reciclado como material para la elaboración de hormigón presenta notables diferencias respecto al árido grueso natural. No obstante, a lo largo del presente estudio, hemos identificado que estas diferencias se evidencian de manera mínima cuando incorporamos un porcentaje adecuado de árido grueso reciclado, tanto a nivel granulométrico (cumpliendo con los límites establecidos por la normativa) como en cuanto a su densidad.

En cuanto a las resistencias, como hemos expuesto, todas las mezclas han alcanzado la resistencia establecida de 24 MPa. En el mejor de los casos, cuando se implementa el porcentaje óptimo de 19.30% de árido grueso reciclado, requiriendo un 1.31% más de agua y cemento en comparación con la mezcla de hormigón convencional.

Así como la resistencia a compresión, el hormigón reciclado no presenta grandes diferencias con respecto a sus deformaciones tanto longitudinales como transversales, resultando en un módulo de elasticidad y relación de Poisson con valores similares a los del hormigón convencional. De igual manera, en lo que respecta a su resistencia a flexión, se presenta la posibilidad de implementar el árido grueso reciclado en el diseño de hormigón para pavimentos.

Finalmente, se logró estimar que el costo de los materiales para la realización de mezcla de hormigón reciclado resulta más económico en comparación con el hormigón convencional a medida que se incrementa el porcentaje de árido reciclado. Además, si consideramos que la resistencia a la compresión no ha sido afectada con la implementación de árido reciclado, resulta ser beneficioso tanto a nivel económico como también ambiental.

## 9. Recomendaciones

Con la finalidad de obtener un mayor conocimiento del hormigón reciclado, se puede considerar la implementación de aditivos para determinar cómo será su comportamiento e influencia. Esto ayudaría también a contrarrestar la necesidad de incorporar una mayor cantidad de agua para lograr una fluidez estimada.

Por otra parte, se puede considerar el estudio del árido fino que se obtiene de la trituración del material proveniente de demoliciones con el objetivo de utilizar el 100% del material, en busca de verificar si la implementación de este árido fino puede ser realizada en el diseño de hormigón, de manera similar a como se ha hecho con el árido grueso reciclado. Siendo algo de gran interés por la falta de arenas naturales con aceptables porcentajes de finos.

Además de otros estudios complementarios para analizar la durabilidad del hormigón reciclado frente a fenómenos físicos, como la resistencia al congelamiento y deshielo, y ante fenómenos químicos como la reactividad álcali-árido, carbonatación, resistencia a los cloruros y corrosión de la armadura.

## Referencias

- Armas, R., y Torres, A. (2020). *Hormigón reciclado reemplazando el árido grueso natural del área minera “pirincay”, por ladrillo triturado.* [Disponible en: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10409>; Accedido el: 2 de mayo del 2023].
- Carrasco, V., Ordoñez, C., y Peña, C. (2021). *Recuperación del hormigón premezclado en obras de la ciudad de cuenca en condiciones fluidas antes de convertirse en residuo.* [Disponible en: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/11593>; Accedido el: 11 de octubre del 2023].
- Cordero, G., Cárdenas, J., y Rojas, J. (2018). *Diseño de mezclas de concreto aplicando el método aci.* Diseño de mezclas de concreto aplicando el método ACI. (1ª ed.). Colombia: Ecoe.
- Haro, K. (2022). *Evaluación mecánica de bordillos prefabricados elaborados con hormigón que contiene áridos reciclados provenientes de elementos estructurales usados como sustituto parcial del árido natural.* [Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23241>; Accedido el: 2 de octubre del 2023].
- Hernández, E., y Saravia, F. (2018). *Análisis de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón elaborado con cerámicos reciclados como sustituto del agregado grueso.* [Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15547>; Accedido el: 2 de octubre del 2023].
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., y Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezcla de concreto.* Diseño y control de mezclas de concreto. (1ª ed.). EEUU: Portland Cement Association.
- Navarro, (2014). *Uso y fomento del árido reciclado en hormigón estructural como oportunidad de mejora medioambiental y económica. aplicación a la comunidad autónoma de la rioja.* [Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=43246>; Accedido el: 13 de octubre del 2023].
- Niño, J. (2010). *Tecnología del concreto.* Colección del concreto - Tecnología del concreto - Tomo 1. Materiales, Propiedades y Diseño de Mezclas. (3ª ed). Colombia: Asocreto.
- Pavón de la Fé, E. (2012). *Empleo del árido reciclado de hormigón en la fabricación de hormigón estructural.* [Disponible en: <https://bibliotecas.ups.edu.ec:3488/es/lc/bibliotecaups/inicio>; Accedido el: 31 de junio del 2023].
- Peters, C. (2022). *Residuos de construcción y demolición.* [Recuperado de: <https://www.construccionlatinoamericana.com/news/residuos-de-construccion-y->

demolicion/8020692.article; Accedido el: 6 de octubre del 2023].

Quiroz, M., y Salamanca, L. (2006). *Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje en la asignatura de "tecnología del hormigón"*. [Recuperado de: <https://www.academia.edu/>; Accedido el: 9 de abril del 2023].

Valle, D., y Torres, A. (2022). *La resistencia a la compresión del hormigón y su influencia en el módulo de elasticidad estático en el cantón tena, provincia de napo.* [Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/35951> ; Accedido el: 15 de octubre del 2023].

Vivar, J. (2021). *Hormigón con áridos reciclables procedentes de residuos de construcción.* [Disponible en: <https://dspace.ucacue.edu.ec/handle/ucacue/11896>; Accedido el: 5 de octubre del 2023].



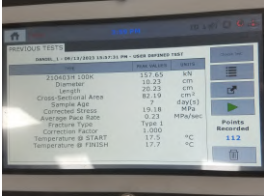
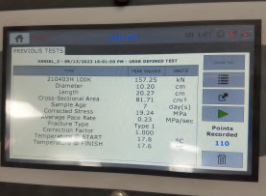
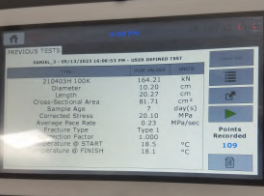

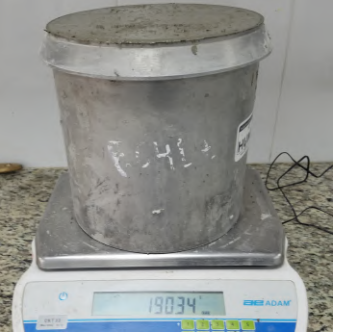
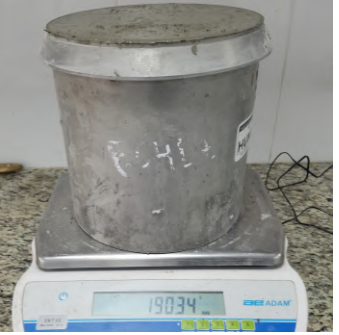
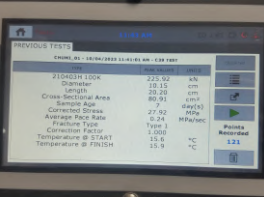
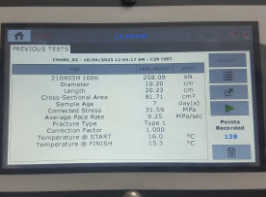
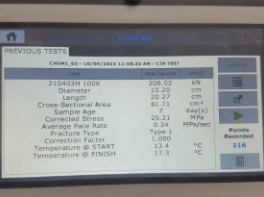
Vásquez, P. (2019). *Desempeño, factibilidad y sostenibilidad de hormigones hidráulicos estándares con el uso de agregados reciclados.* [Disponible en: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/33503>; Accedido el: 4 de octubre del 2023].

# 10. Anexos

## Proyecto de Investigación

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

Descripción: Hormigón convencional  
 Fecha muestreo: 6/9/2023





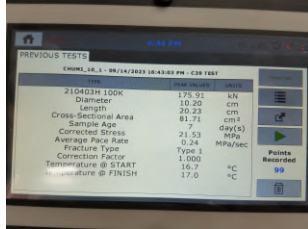
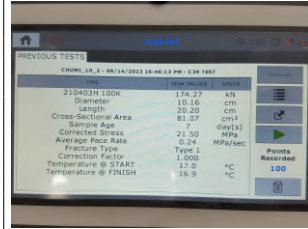
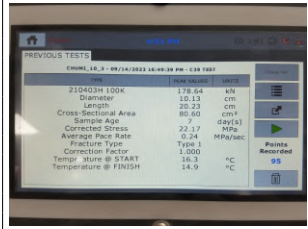


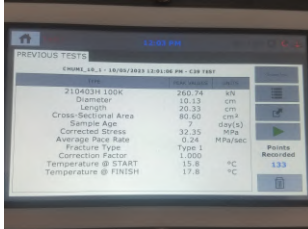
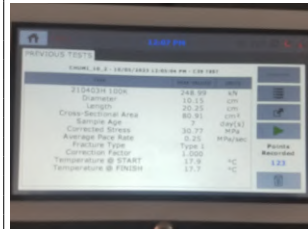
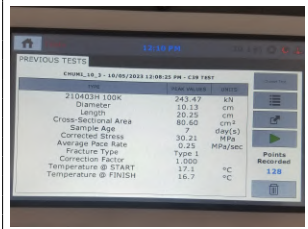

Dosificación			Dosificación Corregida			Descripción de los especímenes					Roturas				
Material	kg		Material	kg		Edad	φ (cm)	h (cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)		
Contenido de aire	0.00		Contenido de aire	0.00		7	10.23	20.23	3831.80	157.65	2304.44	19.18	19.51		
Cantidad de agua	2.66		Cantidad de agua	4.68			10.20	20.27	3828.20	157.25	2311.27	19.24			
Contenido de cemento	7.13		Contenido de cemento	12.41			10.20	20.27	3834.50	164.21	2315.07	20.10			
Contenido de árido grueso	13.91		Contenido de árido grueso	23.52											
Contenido de árido fino	10.33		Contenido de árido fino	16.94											
<b>Total</b>	<b>34.03</b>		<b>Total</b>	<b>57.55</b>											
<b>Asentamiento</b>			<b>Asentamiento</b>												
Obtenido	7.00	cm	Obtenido	10.00	cm										
															
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>			<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>			Edad	φ (cm)	h (cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)		
Peso (Olla)	2.828	kg	Peso (Olla)	2.828	kg	28	10.15	20.20	3871.5	225.92	2368.68	27.92	26.57		
Volumen (Olla)	0.00704	m³	Volumen (Olla)	0.00704	m³		10.20	20.23	3904.00	258.09	2361.69	31.59			
Peso (Hormigón + Olla)	19.034	kg	Peso (Hormigón + Olla)	19.034	kg		10.20	20.27	3855.6	206.02	2327.81	25.21			
Densidad	2301.99	kg/m³	Densidad	2301.99	kg/m³										
															



Proyecto de Investigación

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

Descripción: Hormigón reciclado (10% A. R)  
 Fecha muestreo: 7/9/2023

Dosificación			Dosificación Corregida			Descripción de los especímenes							Roturas		
Material	kg		Material	kg		Edad	φ (cm)	h (cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)		
Contenido de aire	0.00		Contenido de aire	0.00		7	10.20	20.23	3828.50	175.91	2316.02	21.53	21.73		
Cantidad de agua	2.74		Cantidad de agua	4.92			10.16	20.20	3831.20	174.27	2339.41	21.50			
Contenido de cemento	7.13		Contenido de cemento	12.66			10.13	20.23	3826.90	178.64	2347.16	22.17			
Contenido de árido grueso	12.43		Contenido de árido grueso	21.04											
Contenido de árido reciclado	1.38		Contenido de árido reciclado	2.34											
Contenido de árido fino	10.31		Contenido de árido fino	16.57											
<b>Total</b>	<b>33.99</b>		<b>Total</b>	<b>57.52</b>											
<b>Asentamiento</b>			<b>Asentamiento</b>												
Obtenido	5.00	cm	Obtenido	10.00	cm										
															
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>			<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>			<b>Descripción de los especímenes</b>							<b>Promedio (MPa)</b>		
Peso (Olla)	2.828	kg				28	10.13	20.33	3879.2	260.74	2367.53	32.35	31.11		
Volumen (Olla)	0.00704	m³					10.15	20.25	3870.5	248.99	2362.22	30.77			
Peso (Hormigón + Olla)	19.027	kg					10.13	20.25	3870.3	243.47	2371.43	30.21			
Densidad	2300.99	kg/m³													
														<b>Materiales utilizados</b> 	

**Proyecto de Investigación**

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

**Descripción:** Hormigón reciclado (20% A. R)  
**Fecha muestreo:** 7/9/2023

Dosificación		Dosificación Corregida		Descripción de los especímenes							Roturas			
Material	kg	Material	kg	Edad	φ (cm)	h (cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	 		
Contenido de aire	0.00	Contenido de aire	0.00	7	10.20	20.26	3821.70	190.07	2308.48	23.26	22.85			
Cantidad de agua	2.37	Cantidad de agua	4.22		10.13	20.25	3805.20	181.60	2331.54	22.53				
Contenido de cemento	7.13	Contenido de cemento	12.46		10.16	20.20	3809.40	184.47	2326.10	22.75				
Contenido de árido grueso	10.88	Contenido de árido grueso	18.48											
Contenido de árido reciclado	2.72	Contenido de árido reciclado	4.62											
Contenido de árido fino	10.77	Contenido de árido fino	17.74											
<b>Total</b>	33.88	<b>Total</b>	57.52											
<b>Asentamiento</b>		<b>Asentamiento</b>												
Obtenido	7.00	cm	Obtenido	10.00	cm									
 		  												
				<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>		Edad	φ (cm)	h (cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	
				Peso (Olla)	2.828									kg
Volumen (Olla)	0.00704	m³												
Peso (Hormigón + Olla)	19.025	kg	28	10.18	20.28	3861.30	278.13	2339.27	34.17	34.06				
Densidad	2300.71	kg/m³		10.20	20.30	3858.30	277.33	2326.00	33.94					
		  									<b>Materiales utilizados</b> 			

Proyecto de Investigación

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

Descripción: Hormigón reciclado (30% A. R)  
 Fecha muestreo: 16/10/2023

Dosificación		Dosificación Corregida		Descripción de los especímenes								
Material	kg	Material	kg	Edad	φ (cm)	h (cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)	
Contenido de aire	0.00	Contenido de aire	0.00	7	10.20	20.30	3816.90	209.87	2301.04	25.68	24.33	
Cantidad de agua	2.94	Cantidad de agua	4.18		10.18	20.28	3805.40	193.37	2305.40	23.76		
Contenido de cemento	7.13	Contenido de cemento	10.10		10.25	20.30	3841.60	194.38	2293.39	23.56		
Contenido de árido grueso	9.47	Contenido de árido grueso	12.72									
Contenido de árido reciclado	4.06	Contenido de árido reciclado	5.45									
Contenido de árido fino	10.25	Contenido de árido fino	13.01									
<b>Total</b>	<b>33.84</b>	<b>Total</b>	<b>45.47</b>									
Asentamiento		Asentamiento										
Obtenido	4.50	cm	Obtenido	10.00	cm							
Densidad del hormigón en estado fresco			Edad	φ (cm)	h (cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)		
Peso (Olla)	2.828	kg	28	10.25	20.30	3861.00	247.80	2304.97	30.03	30.03		
Volumen (Olla)	0.00704	m³		10.20	20.30	3836.50	215.91	2318.57	26.42			
Peso (Hormigón + Olla)	18.833	kg		10.20	20.33	3851.4	289.74	2318.41	35.46			
Densidad	2273.44	kg/m³										



Roturas



Proyecto de Investigación

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

Descripción: Hormigón reciclado (40% A. R)  
 Fecha muestreo: 13/9/2023

Dosificación		Dosificación Corregida		Descripción de los especímenes							Roturas		
Material	kg	Material	kg	Edad	φ (cm)	h (cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)		
Contenido de aire	0.00	Contenido de aire	0.00	7	10.13	20.27	3808.60	169.20	2331.33	20.99	20.88		
Cantidad de agua	2.89	Cantidad de agua	5.27		10.20	20.27	3808.80	132.36	2299.56	16.20			
Contenido de cemento	7.13	Contenido de cemento	12.88		10.20	20.30	3809.00	169.76	2296.28	20.78			
Contenido de árido grueso	7.35	Contenido de árido grueso	12.42										
Contenido de árido reciclado	4.90	Contenido de árido reciclado	8.28										
Contenido de árido fino	11.43	Contenido de árido fino	18.08										
<b>Total</b>	<b>33.70</b>	<b>Total</b>	<b>56.92</b>										
Asentamiento		Asentamiento											
Obtenido	3.00	cm	Obtenido										10.00
													
Densidad del hormigón en estado fresco				Edad	φ (cm)	h (cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)		
Peso (Olla)	2.828	kg		28	10.18	20.23	3830.8	208.91	2326.53	25.67	27.06		
Volumen (Olla)	0.00704	m³			10.23	20.28	3833.5	260.11	2299.78	31.65			
Peso (Hormigón + Olla)	18.858	kg			10.20	20.35	3845.5	232.51	2312.59	28.45			
Densidad	2276.99	kg/m³											
													
Materiales utilizados													
													

Proyecto de Investigación

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

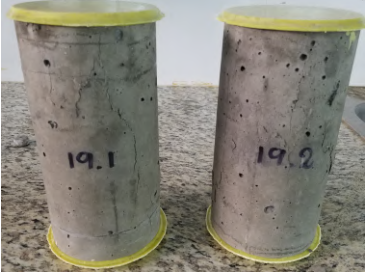
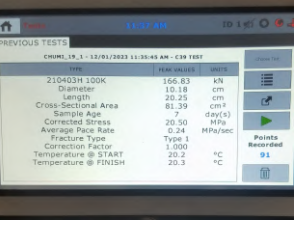
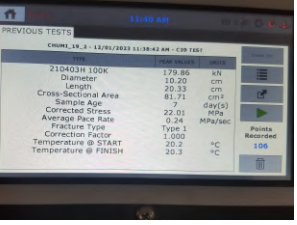
Descripción: Hormigón reciclado (50% A. R)  
 Fecha muestreo: 16/10/2023

Dosificación		Dosificación Corregida		Descripción de los especímenes							Roturas		
Material	kg	Material	kg	Edad	φ (cm)	h (cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)		
Contenido de aire	0.00	Contenido de aire	0.00	7	10.20	20.33	3765.30	184.72	2266.58	22.61	23.23		
Cantidad de agua	3.02	Cantidad de agua	4.37		10.23	20.23	3793.00	192.71	2281.11	23.45			
Contenido de cemento	7.13	Contenido de cemento	10.28		10.35	20.28	3899.10	198.77	2285.21	23.63			
Contenido de árido grueso	5.77	Contenido de árido grueso	7.78										
Contenido de árido reciclado	5.77	Contenido de árido reciclado	7.78										
Contenido de árido fino	11.89	Contenido de árido fino	15.06										
<b>Total</b>	<b>33.58</b>	<b>Total</b>	<b>45.27</b>										
<b>Asentamiento</b>	<b>3.00</b>	<b>Asentamiento</b>	<b>10.00</b>										
Obtenido	3.00	Obtenido	10.00										
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
Peso (Olla)	2.828		kg										
Volumen (Olla)	0.00704		m³										
Peso (Hormigón + Olla)	18.763		kg										
Densidad	2263.49		kg/m³	28	10.23	20.33	3782.6	242.5	2263.66	29.50	26.48		
					10.20	20.25	3814	216.37	2304.97	26.48			
					10.20	20.33	3792.1	184.23	2282.72	22.55			
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													
<b>Densidad del hormigón en estado fresco</b>													

Proyecto de Investigación

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

Descripción: Hormigón reciclado (19.30% A. R)  
 Fecha muestreo: 24/11/2023

Dosificación		Dosificación Corregida		Descripción de los especímenes							Roturas			
Material	kg	Material	kg	Edad	φ (cm)	h (cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)			
Contenido de aire	0.00	Contenido de aire	0.00	7	10.18	20.25	3833.60	166.83	2325.93	20.50	21.25			
Cantidad de agua	3.03	Cantidad de agua	6.41		10.20	20.33	3843.30	179.86	2313.54	22.01				
Contenido de cemento	7.13	Contenido de cemento	15.09		-	-	-	-	-	-				
Contenido de árido grueso	11.06	Contenido de árido grueso	22.51											
Contenido de árido reciclado	2.64	Contenido de árido reciclado	5.38											
Contenido de árido fino	9.99	Contenido de árido fino	19.53											
<b>Total</b>	<b>33.85</b>	<b>Total</b>	<b>68.94</b>											
Asentamiento		Asentamiento												
Obtenido	6.00	cm	Obtenido	10.00	cm									
														
Densidad del hormigón en estado fresco				Edad	φ (cm)	h (cm)	Peso (g)	Carga (kN)	Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Promedio (MPa)			
Peso (Olla)	2.828	kg	28	10.21	20.26	3851.4	287.06	287.06	2321.87	35.06	35.36			
Volumen (Olla)	0.00704	m³		10.33	20.28	3955	288.80	288.80	2326.96	34.46				
Peso (Hormigón + Olla)	19.005	kg		10.23	20.30	3817	300.55	300.55	2287.63	36.57				
Densidad	2297.87	kg/m³												
										