



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL
ECUADOR**

**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROYECTO DE TITULACIÓN**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:
MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL MENSIÓN ESTRUCTURAS
SISMORRESISTENTES**

TEMA:
DESARROLLO DE UNA ECUACIÓN DEL MÓDULO DE
ELASTICIDAD PARA HORMIGÓN ESTRUCTURAL CON
AGREGADOS RECICLADOS DE ADOQUINES DE LA CIUDAD DE
IBARRA.

AUTOR:
GUANO ZAMBRANO MARGARITA PAULINA

TUTOR:
ING. WILSON OSWALDO CANDO TIPÁN MSC

**QUITO-ECUADOR
2025**

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

Tema: “DESARROLLO DE UNA ECUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA HORMIGÓN ESTRUCTURAL CON AGREGADOS RECICLADOS DE ADOQUINES DE LA CIUDAD DE IBARRA”.

Autor: Ing. Margarita Paulina Guano Zambrano.

Director: Ing. Wilson Oswaldo Cando Tipán, MSc.

Fecha: Quito, mayo de 2025.

RESUMEN

El trabajo de investigación tiene como objetivo principal obtener una ecuación para determinar el módulo de elasticidad del hormigón estructural con resistencia a la compresión de 240 kg/cm², empleando diferentes porcentajes de agregados reciclados provenientes de adoquines de la ciudad de Ibarra. La investigación aporta ante la problemática ambiental originada por la disposición inadecuada de residuos de construcción, específicamente adoquines de desecho, y a la necesidad de adaptar las ecuaciones existentes para el cálculo del módulo de elasticidad a las características específicas de los materiales disponibles en Ecuador.

Se empleó una metodología experimental que comprendió la caracterización física y mecánica de los agregados tanto convencionales como reciclados, el diseño de mezclas siguiendo los lineamientos de las normas INEN 872 y ASTM C33, la elaboración de probetas cilíndricas con diferentes porcentajes de sustitución de agregado fino por material reciclado (4%, 8% y 12%), y la realización de ensayos normalizados de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad a los 28 días de edad.

Los resultados obtenidos permitieron establecer correlaciones entre el porcentaje de material reciclado incorporado y las propiedades mecánicas del hormigón, particularmente su módulo de elasticidad. Se desarrollaron ecuaciones específicas para cada porcentaje de sustitución y se compararon con la ecuación propuesta por el ACI 318-19, encontrando diferencias significativas que justifican la necesidad de ecuaciones adaptadas a los materiales locales y a la incorporación de agregados reciclados.

La investigación concluye que es técnicamente viable la incorporación de hasta un 12% de agregados reciclados de adoquines como sustituto del agregado fino en hormigones estructurales, sin afectar negativamente su resistencia a la compresión. Además, se obtiene una ecuación modificada para el cálculo del módulo de elasticidad que considera el efecto del porcentaje de material reciclado incorporado, contribuyendo así a la utilización más precisa de estos materiales en el diseño y análisis de estructuras de hormigón en Ecuador.

PALABRAS CLAVE: MÓDULO DE ELASTICIDAD / HORMIGÓN ESTRUCTURAL / AGREGADOS RECICLADOS / ADOQUINES / RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

PONTIFICAL CATHOLIC UNIVERSITY OF ECUADOR
Topic: “DEVELOPMENT OF AN EQUATION FOR THE MODULUS OF
ELASTICITY FOR STRUCTURAL CONCRETE WITH RECYCLED
AGGREGATES FROM PAVERS OF THE CITY OF IBARRA”.

Author: Eng. Margarita Paulina Guano Zambrano.

Director: Eng. Wilson Oswaldo Cando Tipán, MSc.

Date: Quito, May 2025.

ABSTRACT

The research work mainly aims to obtain an equation to determine the modulus of elasticity of structural concrete with a compressive strength of 240 kg/cm², using different percentages of recycled aggregates from cobblestones in the city of Ibarra. The research addresses the environmental problems caused by the improper disposal of construction waste, specifically discarded cobblestones, and the need to adapt existing equations for calculating the modulus of elasticity to the specific characteristics of the materials available in Ecuador.

An experimental methodology was employed that included the physical and mechanical characterization of both conventional and recycled aggregates, the design of mixtures following the guidelines of INEN 872 and ASTM C33 standards, the preparation of cylindrical specimens with different percentages of fine aggregate replacement by recycled material (4%, 8%, and 12%), and the conducting of standardized tests for compressive strength and elastic modulus at 28 days of age.

The results obtained allowed for the establishment of correlations between the percentage of recycled material incorporated and the mechanical properties of the concrete, particularly its elastic modulus. Specific equations were developed for each percentage of replacement and were compared with the equation proposed by ACI 318-19, finding significant differences that justify the need for equations adapted to local materials and the incorporation of recycled aggregates.

The research concludes that it is technically feasible to incorporate up to 12% of recycled cobblestone aggregates as a substitute for fine aggregate in structural concrete, without negatively affecting its compressive strength. Additionally, a modified equation for calculating the modulus of elasticity is obtained, which considers the effect of the percentage of recycled material incorporated, thus contributing to the more accurate use of these materials in the design and analysis of concrete structures in Ecuador.

KEYWORDS: MODULUS OF ELASTICITY / STRUCTURAL CONCRETE /
RECYCLED AGGREGATES / COBBLESTONES / COMPRESSIVE STRENGTH

INDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	9
1.1 JUSTIFICACIÓN	9
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.3 OBJETIVOS	11
1.3.1 Objetivo General	11
1.3.2 Objetivos Específicos.....	11
1.4 ALCANCE.....	11
1.5 METODOLOGÍA Y TÉCNICAS	12
1.5.1 Recolección y Procesamiento de Materiales.....	12
1.5.2 Caracterización de Materiales	12
1.5.3 Diseño de Mezclas	12
1.5.4 Elaboración y Curado de Probetas	13
1.5.5 Ensayos Mecánicos	13
1.5.6 Análisis de Resultados y Desarrollo de Ecuaciones.....	13
CAPITULO II MARCO TEÓRICO	13
2.1 Marco Referencial.....	13
2.2 Marco Teórico.....	13
2.2.1 Antecedentes de la Investigación	13
2.2.2 Provincia de Imbabura y Características Geológicas.....	14
2.2.3 Gestión de Residuos de Construcción.....	14
2.3 Marco Conceptual.....	15
2.3.1 Hormigón y sus Componentes	15
2.3.2 Agregados para Hormigón	16
2.3.3 Módulo de Elasticidad.....	17

2.3.4 Ecuaciones para el Cálculo del Módulo de Elasticidad	18
2.3.5 Hormigón con Agregados Reciclados.....	19
CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y METODOLOGÍA	
EXPERIMENTAL	19
3.1 Generalidades.....	19
3.2 Caracterización de Agregados Convencionales.....	19
3.2.1 Agregados Naturales	19
3.2.2 Material Reciclado Proveniente de Adoquines	20
3.3 Ensayos de Caracterización de Agregados	20
3.3.1 Determinación del Contenido de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino	20
3.3.2 Análisis Granulométrico del Agregado Fino	22
3.3.3 Determinación de la Densidad Relativa y Absorción del Agregado Fino	24
3.3.4 Determinación de la Masa Unitaria del Agregado Fino.....	25
3.3.5 Análisis Granulométrico del Agregado Grueso	26
3.3.6 Ensayo de Resistencia a la Abrasión (Máquina de Los Ángeles)	27
3.3.7 Determinación de la Densidad Relativa y Absorción del Agregado Grueso .	28
3.3.8 Determinación de la Masa Unitaria del Agregado Grueso	29
3.3.9 Determinación del Contenido de Humedad de los Agregados	30
3.3.10 Caracterización del Material Reciclado de Adoquines	31
3.4 Diseño de Mezclas	33
3.4.1 Metodología de Diseño – ACI 211	33
3.4.3 Ajuste y Dosificación Final (Muestra Patrón).....	35
3.4.4 Dosificaciones con Material Reciclado.....	36
3.5 Elaboración y Curado de Probetas.....	36
3.5.1 Fabricación de Especímenes Cilíndricos.....	36
3.5.2 Proceso de Curado.....	37
3.6 Ensayos Mecánicos a los 28 Días	37

3.6.1 Ensayo de Resistencia a la Compresión.....	37
3.6.2 Procedimiento del Ensayo.....	37
3.6.3 Cálculo de la Resistencia.....	37
3.6.2 Determinación del Módulo de Elasticidad.....	38
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
4.1 Resultados de la Caracterización de Agregados	42
4.2 Resultados de Resistencia a la Compresión.....	42
4.2.1 Muestra Patrón	42
4.2.2 Mezclas con Material Reciclado	43
4.3 Resultados del Módulo de Elasticidad.....	43
4.3.1 Análisis Comparativo.....	43
4.4 Determinación del Coeficiente del Módulo de Elasticidad.....	44
4.4.1 Coeficientes experimentales para hormigones con agregado fino reciclado .	44
4.4.2 Interpretación técnica y consideraciones de diseño	45
4.4.3 Implicaciones para el diseño estructural:	45
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	46
5.1 Conclusiones.....	46
5.2 Recomendaciones	47
CAPITULO VI : REFERENCIAS	48
CAPITULO VII: ANEXOS	49
7.1 ANEXO FOTOGRÁFICO	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Granulometría agregado fino.....	23
Tabla 2. Peso específico y absorción en el agregado fino	24
Tabla 3. Densidad Suelta y varillada del agregado fino	26
Tabla 4. Resultados de la granulometría agregado grueso	27
Tabla 5. Resultado del ensayo de abrasión (Máquina de los ángeles)	28
Tabla 6. Peso específico y absorción en el agregado grueso.....	29

Tabla 7. Densidad suelta y varillada del agregado grueso	30
Tabla 8. Contenido de humedad	31
Tabla 9. Granulometría adoquín triturado	33
Tabla 10. Propiedades físicas de los materiales	34
Tabla 11. proporciona miento preliminar	34
Tabla 12. Parámetros de diseño	35
Tabla 13. Dosificación final (Muestra patrón)	35
Tabla 14. Resultados de los Ensayos de Compresión para la Muestra Patrón (Relación $a/c = 0.62$)	38
Tabla 15. Determinación del módulo de Elasticidad a compresión en probetas cilíndricas de la muestra Patrón.....	39
Tabla 16. Determinación del módulo de Elasticidad a compresión en probetas cilíndricas al 4%	40
Tabla 17. Determinación del módulo de Elasticidad a compresión en probetas cilíndricas al 8%	41
Tabla 18. Determinación del módulo de Elasticidad a compresión en probetas cilíndricas al 12%	42
Tabla 19. Módulo de Elasticidad Experimental del Concreto con Sustitución Parcial de Agregado Fino por Material Reciclado	43
Tabla 20. Coeficientes del módulo de elasticidad según porcentaje de sustitución de agregado fino y muestra patrón	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Comparación del color del líquido sobrenadante con el comparador de colores normalizados	22
Ilustración 2. Tamizado de agregado fino	23
Ilustración 3. Curva granulométrica del agregado fino	24
Ilustración 4. Curva granulométrica del agregado grueso	27
Ilustración 5. Ensayo de abrasión (Incorporación de 12 esferas en la Máquina de los ángeles).....	28
Ilustración 6. Adoquines de reciclaje de la localidad	31
Ilustración 7. Reducción del tamaño mediante trituración manual	32

Ilustración 8. Tamizado para obtener la fracción deseada como sustituto del agregado fino.....	32
Ilustración 9. Curva granulométrica del adoquín triturado (agregado fino).....	33
Ilustración 10. Fabricación de hormigón 240 kg/cm ²	36
Ilustración 11. Verificación de asentamiento 80cm	36
Ilustración 12. Tendencia observada	44
Ilustración 13. Diagrama comparativo de coeficientes del módulo de elasticidad	45
Ilustración 14. Secado al horno de material los agregados fino y grueso	49
Ilustración 15. Cuarteo manual del agregado Fino.....	52
Ilustración 16. Tamizado de agregado Grueso y Fino.....	53
Ilustración 17. Pesaje de Cemento Selva Alegre.....	56
Ilustración 18. Fabricación de hormigón.....	57
Ilustración 19. Verificación de asentamiento 80mm	58
Ilustración 20. Ensayo de granulometría de Agregado Grueso	59
Ilustración 21. Desmolde de Cilindros de hormigón (muestra patrón)	60
Ilustración 22. Tamizaje de material triturado manualmente (desecho de adoquín).....	61
Ilustración 23. Ensayo de Abrasión.....	62
Ilustración 24. Ensayo de Colorimetría	63
Ilustración 25. Fabricación de hormigón.....	64

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Módulo de Elasticidad	17
Ecuación 2. Ecuación propuesta por ACI 318-19	18
Ecuación 3. Módulo de Elasticidad	38
Ecuación 4. Expresión para el cálculo del coeficiente de proporcionalidad	44
Ecuación 5. Ecuación ACI 318-19, resistencia 240 kg/cm ²	46
Ecuación 6. Ecuación para 4% de sustitución (262 kg/cm ²)	46
Ecuación 7. Ecuación para 8% de sustitución (258 kg/cm ²)	46
Ecuación 8. Ecuación para 12% de sustitución (251 kg/cm ²)	46

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACIÓN

Ecuador afronta actualmente serios inconvenientes relacionados con el manejo inadecuado de desperdicios sólidos que se originan tanto en procesos de derribo de edificaciones como en la generación de fragmentos de especímenes de concreto utilizados durante procedimientos experimentales en los laboratorios técnicos. Esta situación resulta particularmente evidente en el territorio imbabureño, donde la ciudad de Ibarra presenta dificultades en el tratamiento de los residuos que provienen de evaluaciones realizadas a bloques para pavimentación y diversos componentes constructivos prefabricados. Estos materiales de desecho terminan siendo arrojados irregularmente en corrientes de agua naturales, terrenos no habilitados legalmente para recibir este tipo de desperdicios, o simplemente son transportados hacia depósitos municipales donde no reciben el procesamiento técnico adecuado.

El aprovechamiento de dichos materiales sobrantes a través de su integración dentro de los procesos productivos del concreto para uso estructural representa una oportunidad para establecer alternativas ambientalmente responsables que pueden generar beneficios tanto para el entorno natural como para la economía local:

- **Reducción de desperdicios en rellenos sanitarios:** Se lograría una disminución considerable de los efectos negativos sobre el medio ambiente que se derivan del depósito definitivo de estos materiales, lo cual contribuiría a reducir la sobrecarga que enfrentan actualmente los sistemas municipales encargados del manejo de residuos sólidos.
- **Protección del patrimonio natural:** La implementación de estas prácticas permitiría reducir la extracción excesiva en yacimientos de materiales pétreos, lo que favorecería la conservación de formaciones geológicas irreemplazables y la salvaguarda de los hábitats naturales circundantes.
- **Rentabilidad del proyecto:** Se establecería una opción económicamente favorable que facilitaría la reducción de gastos durante la producción de materiales de concreto para construcción, lo que incrementaría la capacidad competitiva de las empresas del ramo constructivo (Etxeberria et al., 2007).

A nivel internacional, el concreto se posiciona como uno de los insumos más requeridos dentro de la industria constructiva. Según los datos presentados por Meyer (2009), el volumen de utilización anual de este material excede las 10 mil millones de toneladas métricas, situación que genera la necesidad de realizar extracciones masivas de materias primas naturales que son transformadas posteriormente en agregados para construcción. Por esta razón, la inclusión de elementos reutilizados durante la preparación de mezclas de concreto destinadas a aplicaciones estructurales se presenta como una alternativa viable para reducir la dependencia de recursos vírgenes y disminuir los problemas asociados al manejo integral de desechos provenientes de actividades constructivas y de demolición.

En la provincia de Imbabura, que forma parte del territorio ecuatoriano, alberga las instalaciones de extracción conocidas como Mina Punto Azul, las cuales suministran materiales granulares convencionales que son empleados en proyectos de construcción a nivel regional. Buscando promover metodologías constructivas más amigables con el

ambiente en esta zona geográfica, se plantea la utilización técnica de fragmentos sobrantes de especímenes de concreto que se generan en laboratorios dedicados al control de calidad y a actividades de investigación aplicada. El procedimiento propuesto incluye el sometimiento de estos residuos, triturarlos, para luego combinarlos con los materiales granulares obtenidos en la Mina Punto Azul, creando de esta manera un producto de concreto reciclado que presente características técnicas apropiadas para las particularidades constructivas de la región imbabureña.

Sin embargo, para asegurar que esta tecnología pueda ser aplicada exitosamente en proyectos de ingeniería estructural, se hace necesario llevar a cabo un estudio detallado de las características mecánicas y físicas que presentan los concretos fabricados utilizando agregados recuperados, haciendo especial énfasis en el módulo de elasticidad. Esta propiedad mecánica fundamental controla el grado de rigidez que presenta el material y establece la manera en que este responde ante las deformaciones que se producen cuando es sometido a diferentes tipos de cargas, por lo que constituye un elemento fundamental para lograr diseños estructurales que sean tanto seguros como eficientes desde el punto de vista técnico.

La inexistencia de modelos matemáticos específicos y de ecuaciones validadas experimentalmente para calcular el módulo de elasticidad de concretos reciclados que han sido preparados utilizando fragmentos de especímenes de laboratorio mezclados con agregados provenientes de la Mina Punto Azul constituye una barrera técnica importante. Esta falta de instrumentos de cálculo especializados limita las posibilidades de aplicación práctica de estos materiales sostenibles e impide su inclusión dentro de las normativas oficiales de diseño estructural, restringiendo de esta manera las oportunidades de implementación de esta tecnología innovadora dentro del contexto de la industria constructiva ecuatoriana.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las ecuaciones actualmente utilizadas para determinar el módulo de elasticidad de hormigones están propuestas en el ACI 318-19, las mismas que fueron desarrolladas utilizando materiales de Estados Unidos, cuyas características difieren significativamente de los materiales disponibles en Ecuador. Esta discrepancia genera inconsistencias entre los valores teóricos calculados mediante dichas ecuaciones y los resultados experimentales obtenidos con materiales locales, como se ha documentado en estudios similares realizados en América Latina (Silva et al., 2016).

Adicionalmente, existe escasa información acerca del comportamiento mecánico de hormigones elaborados a partir de agregados reciclados provenientes de demoliciones de elementos constructivos, particularmente en el contexto ecuatoriano. Esta falta de estudios limita su aplicación en proyectos estructurales, a pesar de su potencial como alternativa sostenible para la industria de la construcción (Etxeberria et al., 2007).

Estudios previos realizados por Rahal (2007) y Yang et al. (2011) han demostrado que las propiedades mecánicas de los hormigones con agregados reciclados pueden variar significativamente respecto a las de hormigones convencionales, dependiendo de la calidad y proporción de material reciclado incorporado. Sin embargo, estas investigaciones se han realizado principalmente con agregados reciclados de hormigón

estructural convencional, no específicamente con materiales procedentes de ensayos de laboratorio, cuya composición y propiedades pueden diferir considerablemente.

De lo anterior surge la pregunta de investigación: ¿Cómo influye la incorporación de agregados reciclados provenientes de restos de ensayos de probetas de hormigón en diferentes porcentajes (4%, 8% y 12%) en la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad del hormigón estructural con $f_c=240 \text{ kg/cm}^2$?

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo General

Desarrollar una ecuación del módulo de elasticidad para hormigón estructural con resistencia a la compresión $f_c = 240 \text{ kg/cm}^2$, incorporando agregados reciclados de adoquines de la ciudad de Ibarra en distintos porcentajes de sustitución (4%, 8% y 12%).

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar las propiedades físicas y mecánicas de los agregados finos y gruesos convencionales, así como del material reciclado de adoquines de Ibarra mediante ensayos de laboratorio normalizados.
2. Desarrollar la dosificación (muestra patrón) para la elaboración de probetas cilíndricas con una resistencia especificada de $f_c = 240 \text{ kg/cm}^2$, considerando diferentes porcentajes de sustitución de agregado fino por material reciclado (4%, 8% y 12%).
3. Determinar experimentalmente el módulo de elasticidad de las probetas elaboradas con los diferentes porcentajes de material reciclado y compararlo con el obtenido de hormigones convencionales (muestra patrón).
4. Formular ecuaciones para estimar el módulo de elasticidad de hormigones con agregados reciclados de adoquines y compararlas con la ecuación propuesta por el ACI 318-19.

1.4 ALCANCE

Este estudio experimental tiene como objetivo comparar el módulo de elasticidad del hormigón con resistencia a la compresión de 240 kg/cm^2 , elaborado con agregado fino y grueso proveniente de la mina Punto Azul, ubicada en la provincia de Imbabura, Ecuador, utilizando cemento selva alegre Portland tipo I como material cementante principal.

Para establecer una línea base de comparación, se fabricará una muestra patrón de hormigón convencional, sobre la cual se determinará el módulo de elasticidad promedio mediante la realización de seis ensayos normalizados ejecutados a los 28 días de edad del material. Esta muestra patrón servirá como referencia para evaluar las modificaciones en el módulo de elasticidad y resistencia a la compresión.

A partir de esta formulación base, se evaluará sistemáticamente la influencia del reemplazo parcial del agregado fino natural en proporciones de 4%, 8% y 12% mediante la incorporación de material reciclado obtenido de restos de ensayos de probetas de

hormigón provenientes de laboratorios especializados de la ciudad de Ibarra, provincia de Imbabura.

El material reciclado será sometido a un riguroso proceso de selección, clasificación y limpieza, con el fin de garantizar su calidad y homogeneidad, eliminando contaminantes orgánicos, materiales extraños y partículas que puedan comprometer la integridad de los resultados experimentales. Este tratamiento previo asegurará la confiabilidad de los datos obtenidos y la validez de las conclusiones derivadas del programa de investigación.

La metodología experimental contempla la caracterización completa de los agregados naturales y reciclados, la optimización de las dosificaciones para cada nivel de sustitución, y la evaluación comparativa del desempeño mecánico mediante ensayos estandarizados de resistencia a la compresión y determinación del módulo de elasticidad.

1.5 METODOLOGÍA Y TÉCNICAS

Esta investigación es de carácter experimental y aplica metodologías estandarizadas para la caracterización de materiales, diseño de mezclas y ensayos de probetas de hormigón, siguiendo los lineamientos del American Concrete Institute (ACI) y las normas de la American Society for Testing and Materials (ASTM). El proceso metodológico comprende las siguientes etapas:

1.5.1 Recolección y Procesamiento de Materiales

- **Agregados convencionales:** Se obtendrán de la Mina Punto Azul y serán caracterizados según normativas vigentes.
- **Material reciclado:** Se recolectarán adoquines de desecho de la ciudad de Ibarra, provenientes de ensayos de laboratorios técnicos. Estos serán procesados mediante trituración manual y clasificación granulométrica para obtener agregados reciclados adecuados para su uso en hormigón.

1.5.2 Caracterización de Materiales

Para todos los agregados (naturales y reciclados) se realizarán los siguientes ensayos:

- Análisis granulométrico (ASTM C136)
- Densidad y absorción (ASTM C127 y C128)
- Peso unitario suelto y compactado (ASTM C29)
- Contenido de humedad (ASTM C566)
- Resistencia a la abrasión para agregado grueso (ASTM C131)
- Contenido de materia orgánica para agregado fino (ASTM C40)

1.5.3 Diseño de Mezclas

- Se diseñará una mezcla patrón con 100% de agregados naturales para obtener una resistencia a la compresión de $f'_c=240 \text{ kg/cm}^2$, siguiendo la metodología del INEN 872 y ASTM C33.
- A partir de esta mezcla patrón, se diseñarán tres mezclas adicionales incorporando 4%, 8% y 12% de material reciclado en sustitución del agregado fino natural.

1.5.4 Elaboración y Curado de Probetas

- Para cada tipo de mezcla se elaborarán probetas cilíndricas estándar de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura según ASTM C192.
- Las probetas serán curadas en condiciones controladas de temperatura ($23\pm 2^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa ($>95\%$) durante 28 días, conforme a lo especificado en ASTM C511.

1.5.5 Ensayos Mecánicos

Se realizarán los siguientes ensayos a los 28 días de edad:

- Resistencia a la compresión (ASTM C39)
- Módulo de elasticidad estático (ASTM C469)

1.5.6 Análisis de Resultados y Desarrollo de Ecuaciones

- Procesamiento estadístico de los datos obtenidos
- Determinación de correlaciones entre el porcentaje de material reciclado y las propiedades mecánicas del hormigón
- Desarrollo de ecuaciones para estimar el módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión y el porcentaje de material reciclado
- Comparación con la ecuación propuesta por el ACI 318-19

CAPITULO II MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Referencial

La investigación en materiales de construcción sostenibles ha adquirido gran relevancia en las últimas décadas debido a la necesidad de reducir el impacto ambiental de la industria constructiva. En Ecuador, particularmente en la provincia de Imbabura, la gestión inadecuada de residuos de construcción y demolición representa un desafío ambiental significativo que requiere soluciones técnicamente viables y ambientalmente responsables.

La ciudad de Ibarra, como capital provincial, genera una cantidad considerable de residuos constructivos, incluyendo adoquines de desecho provenientes de obras de mantenimiento vial y demoliciones urbanas. Estos materiales, tradicionalmente considerados como desechos, poseen un potencial considerable para ser reincorporados en nuevos procesos constructivos mediante técnicas de reciclaje y reutilización.

A nivel internacional, países como España, Alemania y Japón han desarrollado normativas específicas para el uso de agregados reciclados en hormigón estructural. Estas experiencias proporcionan un marco de referencia técnico que puede ser adaptado a las condiciones locales ecuatorianas, considerando las particularidades de los materiales disponibles en la región

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Antecedentes de la Investigación

La utilización de agregados reciclados en hormigón ha sido objeto de investigación desde mediados del siglo XX. Hansen (1986) fue uno de los pioneros en establecer criterios para la caracterización de agregados reciclados, determinando que la calidad del hormigón reciclado depende principalmente de las propiedades del mortero adherido a los agregados originales.

Investigaciones posteriores realizadas por Mehta & Monteiro (2014) han demostrado que la incorporación de agregados reciclados puede afectar significativamente las propiedades mecánicas del hormigón, particularmente el módulo de elasticidad, debido a la mayor porosidad y menor rigidez de estos materiales en comparación con los agregados naturales.

En el contexto latinoamericano, estudios desarrollados por Silva et al. (2016) en Brasil han establecido correlaciones específicas entre el porcentaje de sustitución de agregados naturales por reciclados y las propiedades elásticas del hormigón resultante, evidenciando la necesidad de desarrollar ecuaciones ajustadas a las características de los materiales locales.

2.2.2 Provincia de Imbabura y Características Geológicas

La provincia de Imbabura se encuentra ubicada en la región norte del Ecuador, caracterizada por una geología compleja influenciada por actividad volcánica histórica. Esta provincia alberga importantes depósitos de materiales pétreos utilizados en la construcción, incluyendo las canteras de la zona de Ibarra que suministran agregados naturales para la industria constructiva regional.

2.2.2.1 Contexto Geológico Regional

La geología de Imbabura está dominada por formaciones volcánicas del Pleistoceno-Holoceno, caracterizadas por la presencia de andesitas, basaltos y depósitos piroclásticos. Estas formaciones han dado origen a agregados naturales con características específicas que influyen en las propiedades del hormigón producido en la región.

Los depósitos de agregados en la zona de Ibarra están compuestos principalmente por materiales de origen volcánico, con características de resistencia y durabilidad que han sido tradicionalmente utilizados en proyectos constructivos locales. Sin embargo, la creciente demanda de materiales y la necesidad de prácticas constructivas sostenibles han motivado la búsqueda de alternativas que incluyan el uso de materiales reciclados.

2.2.3 Gestión de Residuos de Construcción

2.2.3.1 Problemática Actual

En Ibarra, como en muchas ciudades ecuatorianas, la gestión de residuos de construcción y demolición presenta deficiencias significativas. Los adoquines de desecho, que constituyen el material de estudio de esta investigación, son frecuentemente dispuestos en botaderos informales o vertederos municipales sin un tratamiento adecuado.

Esta situación genera múltiples impactos negativos: contaminación visual del paisaje urbano, ocupación innecesaria de espacios en rellenos sanitarios, pérdida de materiales

con potencial de reutilización, y mayor presión sobre yacimientos naturales para la extracción de agregados vírgenes.

2.2.3.2 Oportunidades de Valorización

La valorización de adoquines de desecho mediante su incorporación como agregados reciclados en nuevas mezclas de hormigón representa una oportunidad tanto ambiental como económica. Este enfoque permite:

- Reducir la cantidad de residuos destinados a disposición final
- Disminuir la demanda de agregados naturales
- Generar nuevos materiales de construcción con características técnicas adecuadas
- Contribuir a la economía circular en el sector constructivo

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Hormigón y sus Componentes

2.3.1.1 Definición y Composición

El hormigón es un material compuesto formado por la mezcla de cemento Portland, agregados finos y gruesos, agua y, eventualmente, aditivos químicos. Su estructura final depende de las reacciones de hidratación del cemento, que forman una matriz cristalina que engloba y cohesiona los agregados.

La proporción típica de componentes en el hormigón convencional es aproximadamente: 10-15% cemento, 60-75% agregados, 15-20% agua, y 5-8% aire atrapado. Esta composición puede variar según los requerimientos específicos de resistencia, trabajabilidad y durabilidad.

2.3.1.2 Dosificación y Diseño de Mezclas

El diseño de mezclas para hormigón convencional sigue metodologías establecidas como el método INEN 872 y ASTM C33, que considera:

- Granulometría de los agregados: Las normas INEN 872 y ASTM C33 establecen rangos específicos para la distribución del tamaño de partículas, asegurando una adecuada trabajabilidad y densidad del hormigón.
- Relación agua/cemento: Factor crucial que determina la resistencia, durabilidad y trabajabilidad del hormigón.
- Contenido de cemento: Calculado en función de la resistencia deseada y las condiciones de exposición.
- Proporción de agregados: La proporción entre agregados finos y gruesos influye directamente en la trabajabilidad y acabado.
- Calidad de los materiales: Características físicas y químicas de los agregados (densidad, absorción, forma).
- Condiciones ambientales: Adaptaciones según el clima y condiciones de exposición.
- Aditivos: Incorporación cuando se requieren propiedades específicas (fluidez, retardo o aceleración del fraguado).
- Resistencia de diseño: Generalmente expresada como f_c a los 28 días.

Sin embargo, la incorporación de agregados reciclados requiere ajustes específicos debido a sus características particulares, especialmente en lo referente a la absorción de agua y el contenido efectivo de cemento (Limbachiya et al., 2000).

2.3.1.3 Propiedades en Estado Fresco

Las propiedades del hormigón en estado fresco que pueden verse afectadas por la incorporación de agregados reciclados incluyen:

- Trabajabilidad y consistencia
- Contenido de aire
- Densidad
- Tiempo de fraguado
- Exudación y segregación

2.3.1.4 Propiedades en Estado Endurecido

Las principales propiedades mecánicas del hormigón endurecido que son objeto de esta investigación son:

- **Resistencia a la compresión:** Propiedad fundamental que determina la capacidad del hormigón para soportar cargas axiales. Se ve afectada por la relación agua/cemento, calidad de los agregados, contenido de cemento, grado de compactación y condiciones de curado (Neville, 2011).
- **Módulo de elasticidad:** Representa la rigidez del material y su capacidad para deformarse elásticamente. Es una propiedad esencial para el cálculo de deformaciones y para el diseño de elementos estructurales (ACI 318-19).

2.3.1.5 Hidratación del Cemento

El proceso de hidratación del cemento Portland implica reacciones químicas complejas entre los silicatos y aluminatos del cemento con el agua de mezclado. Los productos principales de esta reacción son el silicato de calcio hidratado (C-S-H), que proporciona la resistencia mecánica, y el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2), que contribuye al ambiente alcalino necesario para la protección de las armaduras.

La cinética de hidratación está influenciada por factores como la temperatura, la relación agua/cemento, la finura del cemento y la presencia de aditivos o adiciones minerales.

2.3.2 Agregados para Hormigón

2.3.2.1 Clasificación y Características

Los agregados se clasifican según su tamaño en:

- **Agregados finos:** partículas que pasan por el tamiz No. 4 (4.75 mm)
- **Agregados gruesos:** partículas retenidas en el tamiz No. 4

Las propiedades fundamentales que influyen en el comportamiento del hormigón incluyen:

- Granulometría y módulo de finura
- Forma y textura superficial
- Densidad y absorción
- Resistencia mecánica
- Composición mineralógica
- Contenido de sustancias deletéreas

2.3.2.2 Agregados Reciclados

Los agregados reciclados se obtienen mediante el procesamiento mecánico de residuos de construcción y demolición. En el caso específico de esta investigación, los agregados reciclados provienen del procesamiento de adoquines de desecho mediante trituración controlada.

Las principales diferencias entre agregados naturales y reciclados incluyen:

- Mayor absorción de agua debido a la porosidad del mortero adherido
- Menor densidad aparente
- Variabilidad en la composición mineralógica
- Presencia de materiales extraños que requieren procesos de limpieza

2.3.3 Módulo de Elasticidad

2.3.3.1 Fundamentos Teóricos

El módulo de elasticidad (E) es una propiedad mecánica fundamental que describe la rigidez de un material, definida como la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación unitaria resultante en el rango elástico de comportamiento.

Ecuación 1. Módulo de Elasticidad

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Donde:

- E = Módulo de elasticidad (MPa o kg/cm²)
- σ = Esfuerzo normal (MPa o kg/cm²)
- ε = Deformación unitaria (adimensional)

2.3.3.2 Determinación Experimental

La determinación experimental del módulo de elasticidad del hormigón se realiza mediante ensayos de compresión axial siguiendo la metodología establecida en la norma ASTM C469. Este ensayo requiere:

- Probetas cilíndricas estándar (150 mm × 300 mm)
- Instrumentación para medición de deformaciones (compresómetros)
- Aplicación de cargas cíclicas controladas
- Registro simultáneo de esfuerzos y deformaciones

El módulo de elasticidad, se calcula como la pendiente de la línea que une dos puntos específicos de la curva esfuerzo-deformación: el punto correspondiente a un esfuerzo de 0.5 MPa y el punto correspondiente al 40% de la resistencia máxima a compresión.

2.3.3.3 Factores que Influyen en el Módulo de Elasticidad

Los principales factores que afectan el módulo de elasticidad del hormigón incluyen:

a) Propiedades de los agregados:

- Módulo de elasticidad de los agregados
- Proporción volumétrica de agregados en la mezcla
- Granulometría y forma de las partículas

b) Características de la pasta de cemento:

- Relación agua/cemento
- Grado de hidratación
- Tipo de cemento utilizado

c) Condiciones de curado:

- Temperatura durante el curado
- Humedad relativa
- Duración del período de curado

2.3.4 Ecuaciones para el Cálculo del Módulo de Elasticidad

2.3.4.1 Formulaciones Normativas

El American Concrete Institute (ACI 318-19) propone la siguiente ecuación para estimar el módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión:

Ecuación 2. Ecuación propuesta por ACI 318-19

$$E = 4700\sqrt{f_c} \text{ (MPa)}$$

ó

$$E = 15100\sqrt{f_c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Esta ecuación fue desarrollada con base en datos experimentales obtenidos con agregados típicos de Estados Unidos y puede no reflejar adecuadamente el comportamiento de hormigones elaborados con materiales de otras regiones geográficas.

2.3.4.2 Limitaciones de las Ecuaciones Normativas

Las ecuaciones normativas presentan limitaciones cuando se aplican a:

- Hormigones elaborados con agregados de diferentes características geológicas

- Mezclas que incorporan agregados reciclados
- Materiales con propiedades significativamente diferentes a los utilizados en el desarrollo de las ecuaciones

Estas limitaciones justifican la necesidad de desarrollar correlaciones específicas para materiales locales y condiciones particulares de uso.

2.3.5 Hormigón con Agregados Reciclados

2.3.5.1 Comportamiento Mecánico

El comportamiento mecánico del hormigón con agregados reciclados presenta características particulares que lo diferencian del hormigón convencional. Estas peculiaridades están directamente relacionadas con las propiedades inherentes de los agregados reciclados, especialmente la presencia de mortero adherido a las partículas originales, lo que modifica la estructura interna del material compuesto (Hansen, 1986).

Las principales alteraciones en el comportamiento mecánico incluyen:

- Reducción del módulo de elasticidad: Se observa una disminución proporcional al porcentaje de sustitución de agregado natural por reciclado, debido a la mayor porosidad y menor rigidez del mortero adherido a los agregados reciclados (Mehta & Monteiro, 2014).
- Incremento de la deformabilidad: El hormigón con agregados reciclados exhibe mayores deformaciones bajo cargas equivalentes, consecuencia directa de la reducción del módulo de elasticidad (Rahal, 2007).
- Cambios en el comportamiento a largo plazo: Se presentan modificaciones significativas en fenómenos diferidos como fluencia y retracción, atribuibles a la mayor absorción de agua y contenido de pasta de cemento del sistema (Yang et al., 2011).

CAPÍTULO III: CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES Y METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

3.1 Generalidades

El presente capítulo describe la metodología experimental empleada para caracterizar los materiales utilizados en la investigación, así como los procedimientos normalizados seguidos para la elaboración y ensayo de las probetas de hormigón estructural. La caracterización de los agregados, tanto convencionales como reciclados, constituye un requisito fundamental para garantizar la validez de los resultados obtenidos y establecer correlaciones confiables entre las propiedades de los componentes y el comportamiento mecánico del hormigón resultante (Mehta & Monteiro, 2014).

Los ensayos de caracterización se ejecutaron conforme a las normativas técnicas ecuatorianas NTE INEN y las normas internacionales ASTM aplicables.

3.2 Caracterización de Agregados Convencionales

3.2.1 Agregados Naturales

Los agregados convencionales empleados en la presente investigación fueron suministrados por la Mina Punto Azul, ubicada en la provincia de Imbabura. Estos materiales de origen de la roca madre, presentan características mineralógicas asociadas a formaciones volcánicas de la región, siendo ampliamente utilizados en proyectos constructivos del sector.

El agregado fino se clasifica como arena natural con partículas que pasan por el tamiz No. 4 (4.75 mm), mientras que el agregado grueso comprende partículas de mayor tamaño, retenidas en dicho tamiz (ASTM International).

3.2.2 Material Reciclado Proveniente de Adoquines

El material reciclado utilizado en esta investigación consiste en fragmentos de adoquines de desecho recolectados en diferentes sectores de la ciudad de Ibarra. Estos adoquines, originalmente empleados en adoquinados urbanos, fueron procesados mediante técnicas de trituración manual controlada para obtener agregados con granulometría compatible con la del agregado fino convencional (Sánchez de Juan, 2004).

El proceso de obtención del material reciclado incluyó las siguientes etapas:

1. **Recolección selectiva:** Los adoquines fueron recolectados de escombreras autorizadas y sitios de demolición controlados, verificando su procedencia y calidad visual.
2. **Limpieza preliminar:** Se removieron contaminantes superficiales, restos de mortero adherido, materiales orgánicos y partículas extrañas mediante cepillado y lavado con agua (González Fonteboa, 2002).
3. **Trituración manual:** Los fragmentos de adoquines fueron reducidos de tamaño mediante herramientas de impacto, obteniendo partículas de dimensiones variables.
4. **Clasificación granulométrica:** El material triturado fue tamizado para separar las fracciones que cumplieran con los requisitos dimensionales del agregado fino, descartando partículas sobredimensionadas o excesivamente finas.

3.3 Ensayos de Caracterización de Agregados

Los ensayos de caracterización se realizaron siguiendo estrictamente las metodologías establecidas en las Normas Técnicas Ecuatorianas NTE INEN y las normas ASTM correspondientes.

Se presenta un resumen de los ensayos realizados.

- Análisis granulométrico (ASTM C136)
- Densidad y absorción (ASTM C127 y C128)
- Peso unitario suelto y compactado (ASTM C29)
- Contenido de humedad (ASTM C566)
- Resistencia a la abrasión para agregado grueso (ASTM C131)
- Contenido de materia orgánica para agregado fino (ASTM C40)

3.3.1 Determinación del Contenido de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino

3.3.1.1 Objetivo y Fundamento Técnico

Este ensayo, normalizado bajo la especificación NTE INEN 855:2010, tiene como finalidad determinar la presencia de compuestos orgánicos en el agregado fino mediante un método colorimétrico (INEN, 2010). Las impurezas orgánicas, tales como humus, material vegetal en descomposición y otros compuestos carbonosos, pueden interferir negativamente con el proceso de hidratación del cemento Portland, afectando tanto el tiempo de fraguado como el desarrollo de resistencias mecánicas del hormigón (Neville, 2011).

3.3.1.2 Procedimiento Experimental

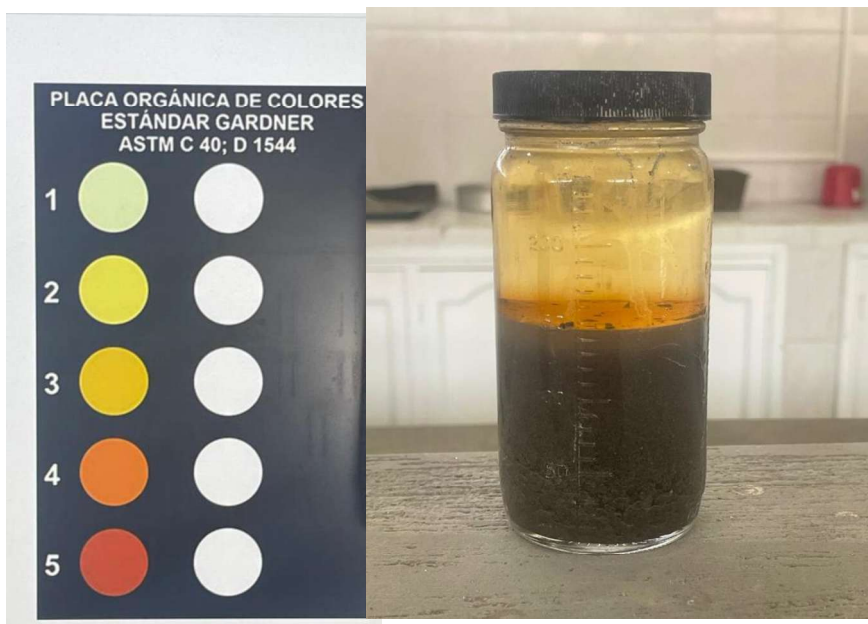
El ensayo se ejecutó conforme al siguiente protocolo establecido por INEN (2010):

1. Se tomó una muestra representativa de agregado fino de aproximadamente 450 gramos y se colocó en un frasco de vidrio de boca ancha con capacidad de 500 ml.
2. Se adicionó la muestra hasta alcanzar un volumen de 130 cm³, compactándola ligeramente mediante golpeteo para eliminar vacíos de aire.
3. Se preparó una solución de hidróxido de sodio al 3% en peso y se agregó al frasco hasta completar un volumen total de 200 cm³.
4. La mezcla se agitó vigorosamente durante 1 minuto para asegurar el contacto íntimo entre la solución reactiva y las partículas del agregado.
5. El frasco se dejó en reposo durante 24 horas en un ambiente con temperatura controlada (20±3°C), permitiendo la reacción completa y la sedimentación del material sólido.
6. Transcurrido el período de reposo, se evaluó el color del líquido sobrenadante comparándolo con la escala colorimétrica normalizada (ASTM International, 2021).

3.3.1.3 Resultados y Análisis

La comparación colorimétrica del líquido sobrenadante con el patrón normalizado indicó una tonalidad correspondiente al número 1 de la escala Hellige. Este resultado confirma un contenido bajo de impurezas orgánicas en el agregado fino evaluado. De acuerdo con la interpretación establecida en la norma NTE INEN 855:2010, las muestras que presentan coloraciones equivalentes o más claras que el patrón No. 3 se consideran aptas para su uso en hormigón estructural (INEN, 2010).

Ilustración 1. Comparación del color del líquido sobrenadante con el comparador de colores normalizados



Fuente, Propia 2025

3.3.2 Análisis Granulométrico del Agregado Fino

3.3.2.1 Objetivo

Determinar la distribución del tamaño de partículas del agregado fino mediante el método de tamizado, conforme a la norma NTE INEN 696:2011 (equivalente a ASTM C136/C136M), para verificar su conformidad con los límites granulométricos establecidos para agregados destinados a hormigón estructural (INEN, 2011).

3.3.2.2 Procedimiento Experimental

El ensayo se desarrolló siguiendo las etapas descritas por ASTM:

1. **Preparación de la muestra:** Se obtuvo una muestra de 851 gramos de agregado fino mediante el método de cuarteo, garantizando su representatividad.
2. **Secado:** La muestra se secó en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta alcanzar masa constante, eliminando la humedad higroscópica.
3. **Tamizado:** Se empleó una serie de tamices normalizados dispuestos en orden descendente ($3/4"$, $1/2"$, $3/8"$, No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100, No. 200 y bandeja colectora).

Ilustración 2. Tamizado de agregado fino



3.3.2.3 Módulo de Finura

El módulo de finura (MF) se calculó mediante la sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices especificados, dividida entre 100 (INEN, 2011):

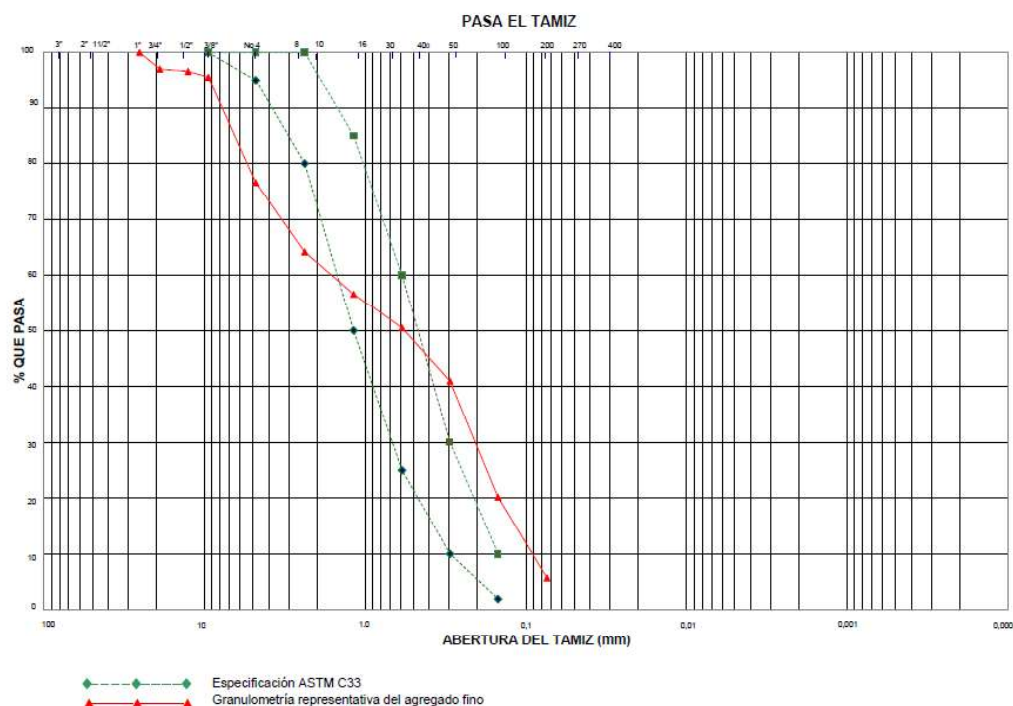
Tabla 1. Granulometría agregado fino

GRANULOMETRIA AGREGADO FINO																				
TAMIZ No.	3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	Pasa No. 4	8	10	16	30	40	50	80	100	200	Pasa No. 200
Peso Reten. Parcial gr					0	25,4	3,4	9,0	161,7		105,56		64,13	52,66		60,52		177,05	123	41
Peso Reten. Acumula. gr					0	25	29	38	200		305		369	422		502		679	803	843
% Retenido					0	3	3	4	23		36		43	50		59		80	94	6
% Que pasa					100	97	97	96	77		64		57	50		41		20	6	
% Especifi.								100	95-100		80-100		50-85	25-60		10-30		2-10		

PESO TOTAL MUESTRA = 851 gr.

MODULO DE FINURA = 2,98

Ilustración 3. Curva granulométrica del agregado fino



Nota Fuente Propia 2025

MF=2.98

Este valor se encuentra dentro del rango aceptable para agregados finos destinados a hormigón estructural (MF entre 2.3 y 3.1), según los criterios establecidos en la norma ASTM C33 (ASTM International, 2023a).

3.3.3 Determinación de la Densidad Relativa y Absorción del Agregado Fino

3.3.3.1 Fundamento del Ensayo

Este ensayo, regulado por la norma NTE INEN 856:2010 (equivalente a ASTM C128), permite determinar tres parámetros fundamentales del agregado fino: densidad relativa en condición saturada y superficialmente seca (SSS), densidad relativa aparente, y capacidad de absorción de agua (ASTM; INEN, 2010).

3.3.3.2 Resultados y Cálculos

Los resultados obtenidos fueron:

- **Densidad relativa SSS:** $2.691 \text{ g/cm}^3 = 2,691 \text{ kg/m}^3$
- **Capacidad de absorción:** 0.14%

Tabla 2. Peso específico y absorción en el agregado fino

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN EN EL AGREGADO FINO

NORMA: ASTM C-128

DATOS:

PESO MUESTRA S.S.S	500,08	g
PESO PICNOMETRO MAS AGUA:	667,00	g
PESO PIC+AGUA+MUESTRA:	981,26	g
PESO MUESTRA SECA:	499,38	g

PESO ESPECIFICO MASIVO:	2,687	g/cm ³
PESO ESPECIFICO MASIVO SSS	2,691	g/cm³
PESO ESPECIFICO SOLIDOS	2,698	g/cm ³
ABSORCION:	0,14%	

Fuente propia 2025

La capacidad de absorción se calculó mediante la expresión establecida por INEN (2010):

$$\text{Absorción (\%)} = [(\text{Masa SSS} - \text{Masa seca}) / \text{Masa seca}] \times 100 = 0.14\%$$

3.3.4 Determinación de la Masa Unitaria del Agregado Fino

Este ensayo, normalizado bajo la especificación NTE INEN 858:2010 (equivalente a ASTM C29), determina la densidad aparente del agregado fino en dos condiciones: suelta y compactada (ASTM; INEN, 2010).

Resultados obtenidos:

- Masa unitaria suelta: 1,669 kg/m³
- Masa unitaria compactada: 1,863 kg/m³

Tabla 3. Densidad Suelta y varillada del agregado fino

DENSIDAD SUELTA Y VARILLADA DEL AGREGADO FINO

a) DENSIDAD SUELTA

PUNTO No.	PESO NETO	VOLUMEN MOLDE	PESO UNI TARI O
	(gr)	(cm ³)	(gr / cm ³)
1	4.970	2.972	1,672
2	4.930	2.972	1,659
3	4.980	2.972	1,676
VALOR MEDI O:			1,669

b) DENSIDAD COMPACTADA

PUNTO No.	PESO NETO	VOLUMEN MOLDE	PESO UNI TARI O
	(gr)	(cm ³)	(gr / cm ³)
1	5.520	2.972	1,857
2	5.540	2.972	1,864
3	5.550	2.972	1,867
VALOR MEDI O:			1,863

Fuente Propia 2025

3.3.5 Análisis Granulométrico del Agregado Grueso

3.3.5.1 Clasificación del Agregado Grueso

Según la nomenclatura ASTM, el agregado grueso se clasifica como:

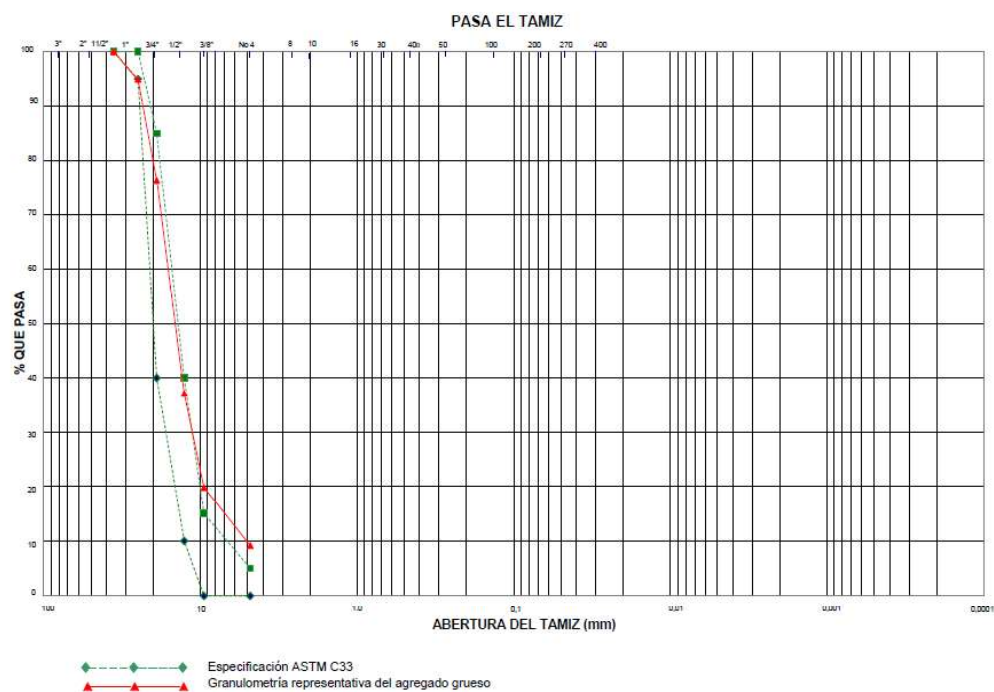
- Tamaño Máximo: 1½" (37.5 mm)
- Tamaño Nominal Máximo: 1" (25 mm)

Tabla 4. Resultados de la granulometría agregado grueso

GRANULOMETRIA AGREGADO GRUESO																				
TAMIZ No.	3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	Pasa No.4	8	10	16	30	40	50	80	100	200	Pasa No.200
Peso Reten. Parcial gr				0	827	2830	6290	2770	1703	1440										
Peso Reten. Acumula. gr				0	827	3757	10047	12817	14520	15960										
% Retenido				0	5	24	63	80	91	100										
% Que pasa				100	95	76	37	20	9	0										
% Especifici.				100	95-100	40-85	10-40	0-15	0-5											

PESO TOTAL MUESTRA = 15960 gr.

Ilustración 4. Curva granulométrica del agregado grueso

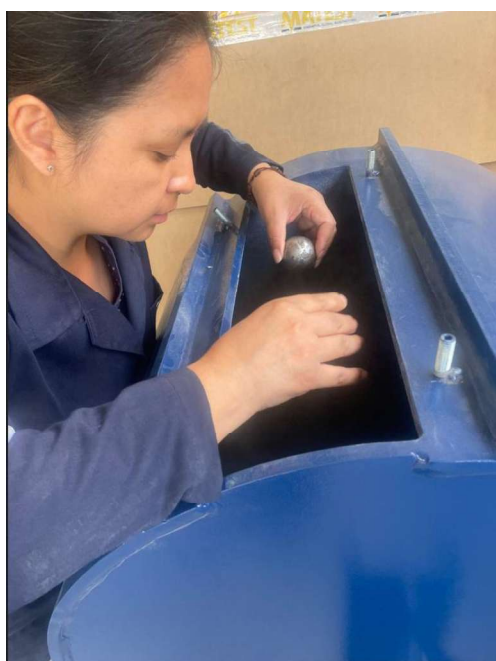


3.3.6 Ensayo de Resistencia a la Abrasión (Máquina de Los Ángeles)

3.3.6.1 Objetivo

Comprende la resistencia a la degradación mecánica del agregado grueso mediante el ensayo de abrasión en la Máquina de Los Ángeles, conforme a la norma NTE INEN 860:2011 (equivalente a ASTM C131).

Ilustración 5. Ensayo de abrasión (Incorporación de 12 esferas en la Máquina de los ángeles)



3.3.6.2 Resultados

El porcentaje de desgaste obtenido fue 46.28%, encontrándose ligeramente por debajo del límite máximo permitido de 50% establecido en la norma NTE INEN 860 para agregados destinados a hormigón estructural (INEN, 2011).

Tabla 5. Resultado del ensayo de abrasión (Máquina de los ángeles)

ENSAYO DE ABRASIÓN

Tamaño Nominal Máximo del Agr. 25,0 mm
N° de Esferas 12,00

TIPO	MASA INICIAL g	MASA FINAL g	% ABRASIÓN
A	5.002,64	2.687,20	46,28%
ESPECIFICADO: MÁX: 50%			

OBSERVACIONES: El porcentaje de abrasión de la muestra es menor al porcentaje especificado. Por lo tanto el material cumple para el presente ensayo.

3.3.7 Determinación de la Densidad Relativa y Absorción del Agregado Grueso

Este ensayo, regulado por la norma NTE INEN 857:2010 (equivalente a ASTM C127), determina las propiedades gravimétricas del agregado grueso necesarias para el diseño preciso de mezclas de hormigón (ASTM; INEN, 2010).

Resultados obtenidos:

- Densidad relativa SSS: 2,361 kg/m³
- Capacidad de absorción: 4.16%

Tabla 6. Peso específico y absorción en el agregado grueso

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN EN EL AGREGADO GRUESO

NORMA: ASTM C-127

DATOS:		
MASA EN EL AIRE:	5109,73	g
MASA SUMERGIDA:	2945,57	g
MASA SECA:	4905,81	g
PESO ESPECÍFICO MASIVO:	2,267	g/cm ³
PESO ESPECÍFICO MASIVO SSS	2,361	g/cm³
PESO ESPECÍFICO SOLIDOS:	2,503	g/cm ³
ABSORCIÓN:	4,16%	

Fuente propia 2025

3.3.8 Determinación de la Masa Unitaria del Agregado Grueso

Siguiendo la metodología descrita en ASTM C29, se determinaron los siguientes valores (ASTM):

- Masa unitaria suelta: 1,391 kg/m³
- Masa unitaria compactada: 1,501 kg/m³

Tabla 7. Densidad suelta y varillada del agregado grueso

DENSIDAD SUELTA Y VARILLADA DEL AGREGADO GRUESO

a) DENSIDAD SUELTA

PUNTO No.	PESO NETO	VOLUMEN MOLDE	PESO UNI TARI O
	(gr)	(cm ³)	(gr / cm ³)
1	19.540	14.060	1,390
2	19.560	14.060	1,391
3	19.570	14.060	1,392
VALOR MEDI O:			1,391

b) DENSIDAD COMPACTADA

PUNTO No.	PESO NETO	VOLUMEN MOLDE	PESO UNI TARI O
	(gr)	(cm ³)	(gr / cm ³)
1	21.180	14.060	1,506
2	21.080	14.060	1,499
3	21.050	14.060	1,497
VALOR MEDI O:			1,501

Fuente propia 2025

3.3.9 Determinación del Contenido de Humedad de los Agregados

Conforme a la norma (ASTM C566), se cuantificó el contenido de humedad natural (ASTM):

- Agregado fino: 0.15%
- Agregado grueso: 0.057%
- Adoquín triturado: 3.75%

Tabla 8. Contenido de humedad

NORMA: ASTM C566

CONTENIDO DE AGUA					
CAPSULA No	Masa Cap + Material Húmedo	Masa Cap + Material Seco	Masa Cápsula	% Humedad	Promedio (%)
Ripio					
G31	1013,18	1012,84	171,93	0,040	0,057
G32	1053,56	1052,9	146,86	0,073	
Polvo de Piedra					
G7	611,34	610,46	64,5	0,16	0,15
G4	661,58	660,73	73,68	0,14	
Adoquin Triturado					
G31	747,07	728,86	171,93	3,27	3,75
G32	904,85	874,12	146,86	4,23	

Fuente propia 2025

3.3.10 Caracterización del Material Reciclado de Adoquines

3.3.10.1 Análisis Granulométrico del Material Reciclado

Ilustración 6. Adoquines de reciclaje de la localidad



Ilustración 7. Reducción del tamaño mediante trituración manual



Ilustración 8. Tamizado para obtener la fracción deseada como sustituto del agregado fino.



El módulo de finura del material reciclado fue de 3.03, ligeramente superior al del agregado fino convencional (2.98), indicando una tendencia hacia partículas de mayor tamaño dentro del rango de agregados finos.

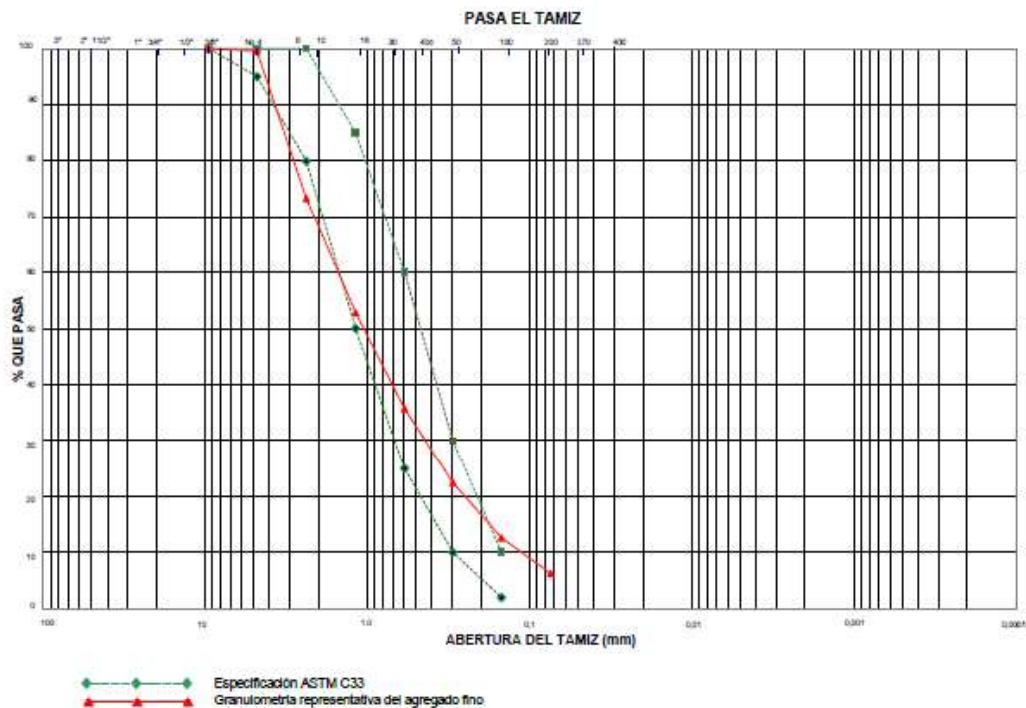
Tabla 9. Granulometría adoquín triturado

GRANULOMETRIA ADOQUIN TRITURADO																				
TAMIZ No.	3"	2 1/2"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	No. 4	Peso No. 4	8	16	30	60	80	100	200	Peso No. 200		
Peso Reten. Parcial gr								0,0	2,4		147,17		115,38	95,89		74,79		55,4	38	34
Peso Reten. Acumula. gr								0	2		150		265	361		435		491	528	561
% Retenido								0	0		27		47	64		78		87	94	98
% Que pasa								100	100		73		53	36		22		13	6	
% Especific.								100	95-100		85-100		80-85	75-80		70-75		65-70	60-65	55-60

PESEO TOTAL MUESTRA = 561,5 gr.

MODULO DE FINURA = 3,03

Ilustración 9. Curva granulométrica del adoquín triturado (agregado fino)



3.4 Diseño de Mezclas

3.4.1 Metodología de Diseño – ACI 211

El diseño de las mezclas de hormigón se realizó siguiendo la metodología establecida por el American Concrete Institute en su documento ACI 211.1.

Tabla 10. Propiedades físicas de los materiales

Propiedades Físicas de los materiales						
Material	Ds (kg/m ³)	PVSS (Kg/m ³)	PVVS (Kg/m ³)	Abs (%)	HO (%)	M.F.
Cemento	3100	1150				
A. Grueso	2361	1391	1501	4.16	0.15	
A. Fino	2691	1669	1863	0.14	0.057	2.905
Agua	1000					

Tabla 11. proporciónamiento preliminar

Proporcionamiento		
Mat. Secos	Masa (kg)	Volumen (L)
Ag. Grueso	989.91	419.28
Ag. Fino	732.78	272.31
Cemento	311.29	100.42
Agua	193.00	193.00
Aire	0.15	15.00
	2227.0	1000.00

Fuente propia 2025

3.4.1.1 Parámetros de Diseño Establecidos

Los criterios fundamentales adoptados fueron:

- Resistencia especificada a la compresión: $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2 = 24 \text{ MPa}$
- Resistencia promedio requerida: $f'_{cr} = 324 \text{ kg/cm}^2$ (ACI)
- Asentamiento objetivo: $80 \pm 20 \text{ mm}$
- Tamaño nominal máximo del agregado: 25 mm (1")

3.4.1.2 Selección de la Relación Agua/Cemento

Utilizando las tablas del ACI 211.1 para hormigón sin aire incorporado, se determinó mediante interpolación lineal una relación agua/cemento de 0.62 (ACI).

Tabla 12. Parámetros de diseño

DATOS		
TMA	1	inch
a/mc	0.62	
Asentamiento	80	mm
% Aire	1.5	%
Agua	193	L
Cemento	311.29	kg
Factor de Vag	0.6595	
M. Ag. Grueso	989.91	kg

3.4.3 Ajuste y Dosificación Final (Muestra Patrón)

Basándose en los resultados experimentales, se determinó que la relación óptima para alcanzar $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ era $a/c = 0.62$.

Tabla 13. Dosificación final (Muestra patrón)

	Dosificación			Datos de Corrección	Dosificación - Corrección homogeneidad y agua	
	1m ³ o 1000L		0,04m ³ o 40L		0,045m ³ o 45L	1m ³ o 1000L
	ABS-kg	HO-kg	kg		kg	Mat. Con HO-kg
Ag. Grueso	1031.09	991.39	39.66		39.66	991.39
Ag. Fino	733.81	733.20	29.33	2.00	31.33	783.20
Cemento	311.29	311.29	12.45	1.61	13.61	302.44
Agua	193.00	233.30	9.33	1.00	10.05	223.33
	2269.19	2269.19	90.77		95.38	2300.36

Fuente propia 2025

Ilustración 10. Fabricación de hormigón 240 kg/cm²



Ilustración 11. Verificación de asentamiento 80cm



3.4.4 Dosificaciones con Material Reciclado

A partir de la dosificación de la muestra patrón, se diseñaron tres mezclas adicionales incorporando material reciclado de adoquines como sustituto parcial del agregado fino en porcentajes de 4%, 8% y 12% (Sánchez de Juan, 2004).

3.5 Elaboración y Curado de Probetas

3.5.1 Fabricación de Especímenes Cilíndricos

Las probetas cilíndricas se elaboraron siguiendo el procedimiento normalizado establecido en la norma ASTM C192.

3.5.1.1 Verificación del Asentamiento

Previo al moldeo, se verificó el asentamiento mediante el cono de Abrams según ASTM C143, confirmando valores dentro del rango objetivo de 80 ± 20 mm.

3.5.2 Proceso de Curado

3.5.2.1 Curado Húmedo

Las probetas desmoldadas se trasladaron a la cámara de curado húmedo, donde permanecieron bajo condiciones controladas conforme a los requisitos de la norma ASTM C511:

- Temperatura: $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$
- Humedad relativa: $>95\%$
- Período: Hasta la edad de ensayo (28 días)

3.6 Ensayos Mecánicos a los 28 Días

3.6.1 Ensayo de Resistencia a la Compresión

El ensayo de resistencia a la compresión se ejecutó siguiendo el procedimiento normalizado establecido en ASTM C39 (ASTM International, 2020). Este ensayo constituye la prueba fundamental para verificar la capacidad del hormigón de soportar cargas axiales y confirmar que cumple con la resistencia especificada de diseño.

3.6.2 Procedimiento del Ensayo

Las probetas cilíndricas de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura se ensayaron a los 28 días de edad, aplicando una carga axial continua y uniforme hasta alcanzar la falla del material. La velocidad de carga se mantuvo constante según los parámetros establecidos por la norma ASTM C39 (ASTM International, 2020).

3.6.3 Cálculo de la Resistencia

La resistencia a la compresión se determinó mediante la siguiente expresión matemática establecida por ASTM International (2020):

$$\text{Resistencia a la compresión} = \frac{P}{A} \quad (\text{MPa})$$

Donde:

P= Carga máxima (KN)

A= Área (mm^2)

Esta fórmula permite obtener el esfuerzo máximo que soportó el hormigón en el momento de la falla, expresado en megapascuales (MPa), unidad estándar del Sistema Internacional para medir la resistencia de materiales establecida por ASTM International (2020).

Tabla 14. Resultados de los Ensayos de Compresión para la Muestra Patrón (Relación a/c = 0.62)

Probeta N°:	1	2	3	4
Identificación de probeta	.....	.....	.....	.....
Descripción	MUESTRA PATRÓN			
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (Mpa)	23.5	23.5	23.5	23.5
Fecha de fabricación*	2025-07-30	2025-07-30	2025-07-30	2025-07-30
Fecha de ensayo*	2025-08-27	2025-08-27	2025-08-27	2025-08-27
Edad (días)	28	28	28	28
Hora de ensayo*	10:00	10:15	10:30	10:45
Diámetro 1(mm)	151.87	152.04	152.23	151.80
Diámetro 2(mm)	151.98	152.14	152.36	151.60
Diámetro promedio (mm)	152.00	152.00	152.20	151.60
Relación entre diámetros (%)	0.07	0.07	0.09	0.13
Altura promedio (mm)	306.00	305.00	303.00	305.00
Relación H/D	2.01	2.01	1.99	2.01
Área (mm ²)	18146	18146	18194	18050
Volumen (m ³)	0.0056	0.0055	0.0055	0.0055
Masa (kg)	12.37	12.30	12.30	12.21
Peso Unitario (kg/m ³)	2230	2220	2230	2220
Carga Máxima (KN)	480	473	465	478
Factor de corrección	1	1	1	1
Resistencia a la Compresión (Mpa)	26.45	26.07	25.56	26.48
Módulo de Elasticidad (Mpa)	16600.00	16700.00	16100.00	16700.00
Tipo de falla				
	5	5	5	5

Fuente propia 2025

3.6.2 Determinación del Módulo de Elasticidad

3.6.2.1 Fundamentación del Ensayo

El módulo de elasticidad representa la rigidez del material y su determinación se realizó conforme a la norma ASTM C469.

3.6.2.2 Cálculo del Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad se calculó mediante la expresión establecida en ASTM C469:

Ecuación 3. Módulo de Elasticidad

$$E = \frac{(S_2 - S_1)}{(\epsilon_2 - 0.000050)}$$

Donde:

E= Módulo de elasticidad (Mpa)

S₂= Corresponde al 40% del esfuerzo último

S₁= Esfuerzo producido en una deformación de 0.00005

ξ₂= deformación longitudinal producida por S₂

Tabla 15. Determinación del módulo de Elasticidad a compresión en probetas cilíndricas de la muestra Patrón

	No. Cilindros	Módulo De Elasticidad (Mpa)	Módulo De Elasticidad (Kg/cm2)	Módulo De Elasticidad Promedio (Mpa)	Módulo De Elasticidad Promedio (Kg/cm2)
MUESTRA PATRÓN	1	16600	169320	16525	168555
	2	16700	170340		
	3	16100	164220		
	4	16700	170340		

Fuente propia 2025

La Tabla 15 presenta los resultados experimentales del módulo de elasticidad del hormigón correspondiente a la muestra patrón (sin agregado reciclado), elaborada con una relación agua/cemento de 0.62.

El módulo de elasticidad promedio obtenido para la muestra patrón es 16525 MPa.

Estos valores representan la **rigidez de referencia** del hormigón convencional sin agregado reciclado y servirán como base de comparación para evaluar el efecto de la incorporación de agregado fino reciclado en las mezclas experimentales.

Tabla 16. Determinación del módulo de Elasticidad a compresión en probetas cilíndricas al 4%

Probeta N°:	1	2	3	4
Identificación de probeta	.....	.....	.....	.....
Descripción	4% de Material Reciclado			
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (Mpa)	23.5	23.5	23.5	23.5
Fecha de fabricación*	2025-08-07	2025-08-07	2025-08-07	2025-08-07
Fecha de ensayo*	2025-09-04	2025-09-04	2025-09-04	2025-09-04
Edad (días)	28	28	28	28
Hora de ensayo*	10:15	10:30	10:45	11:00
Diámetro 1(mm)	151.88	151.76	151.80	151.79
Diámetro 2(mm)	151.98	151.94	152.25	151.60
Diámetro promedio (mm)*	152	151.80	152	151.6
Relación entre diámetros (%)	0.07	0.12	0.30	0.13
Altura promedio (mm)	306.00	304.00	305.00	305.00
Relación H/D	2.01	2.00	2.01	2.01
Área (mm ²)	18146	18098	18146	18050
Volumen (m ³)	0.0056	0.0055	0.0055	0.0055
Masa (kg)*	12.37	12.33	12.37	12.21
Peso Unitario (kg/m ³)*	2230	2240	2240	2220
Carga Máxima (KN)*	478	477.8	428.1	474.9
Factor de corrección	1	1	1	1
Resistencia a la Compresión (Mpa)	26.34	26.40	23.59	26.31
Módulo de Elasticidad (Mpa)	16600	16200	16600	16600
Tipo de falla				
	5	5	5	5

Fuente propia 2025

Tabla 17. Determinación del módulo de Elasticidad a compresión en probetas cilíndricas al 8%

Probeta N°:	1	2	3	4
Identificación de probeta	.....	.....	.....	.....
Descripción	8% de Material Reciclado			
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (Mpa)	23.5	23.5	23.5	23.5
Fecha de fabricación*	2025-08-12	2025-08-12	2025-08-12	2025-08-12
Fecha de ensayo*	2025-09-10	2025-09-10	2025-09-10	2025-09-10
Edad (días)	29	29	29	29
Hora de ensayo*	9:45	10:00	10:15	10:30
Diámetro 1(mm)	151.55	151.66	149.68	151.71
Diámetro 2(mm)	151.85	152.00	150.01	152.11
Diámetro promedio (mm)*	151.60	151.80	150	152.0
Relación entre diámetros (%)	0.20	0.22	0.22	0.26
Altura promedio (mm)*	305.00	305.00	304.00	305.00
Relación H/D	2.01	2.01	2.03	2.01
Área (mm ²)	18050	18098	17624	18146
Volumen (m ³)	0.0055	0.0055	0.0054	0.0055
Masa (kg)*	12.12	12.18	11.87	12.27
Peso Unitario (kg/m ³)*	2200	2210	2220	2220
Carga Máxima (KN)*	459.3	448.65	439.95	472.7
Factor de corrección	1	1	1	1
Resistencia a la Compresión (Mpa)	25.45	24.79	24.96	26.05
Módulo de Elasticidad (Mpa)	16200.00	16200.00	15400.00	15400.00
Tipo de falla				
	5	5	5	5

Fuente propia 2025

Tabla 18. Determinación del módulo de Elasticidad a compresión en probetas cilíndricas al 12%

Probeta N°:	1	2	3	4
Identificación de probeta	.....	.....	.....	.....
Descripción	12% de Material Reciclado			
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (Mpa)	23.5	23.5	23.5	23.5
Fecha de fabricación*	2025-08-21	2025-08-21	2025-08-21	2025-08-21
Fecha de ensayo*	2025-09-18	2025-09-18	2025-09-18	2025-09-18
Edad (días)	28	28	28	28
Hora de ensayo*	11:00	11:15	11:30	11:45
Diámetro 1(mm)	151.77	152.16	152.22	151.96
Diámetro 2(mm)	151.88	151.61	151.93	151.81
Diámetro promedio (mm)*	151.80	151.80	152.00	151.8
Relación entre diámetros (%)	0.07	0.36	0.19	0.10
Altura promedio (mm)*	305.00	305.00	305.00	304.00
Relación H/D	2.01	2.01	2.01	2.00
Área (mm ²)	18098	18098	18146	18098
Volumen (m ³)	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055
Masa (kg)*	12.02	12.03	11.97	12
Peso Unitario (kg/m ³)*	2180	2180	2160	2180
Carga Máxima (KN)*	440.6	419.5	451.8	470.5
Factor de corrección	1	1	1	1
Resistencia a la Compresión (Mpa)	24.35	23.18	24.90	26.00
Módulo de Elasticidad (Mpa)	15600	15200	15200.00	15200
Tipo de falla				
	5	5	5	5

Fuente propia 2025

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Resultados de la Caracterización de Agregados

Los ensayos de caracterización confirmaron que los agregados de la Mina Punto Azul cumplen con los requisitos normativos para su uso en hormigón estructural (ASTM).

4.2 Resultados de Resistencia a la Compresión

4.2.1 Muestra Patrón

La resistencia promedio obtenida (256.97 kg/cm²) supera en 1.07% la resistencia especificada de 240 kg/cm², confirmando la adecuada dosificación de la mezcla patrón según los criterios del ACI.

4.2.2 Mezclas con Material Reciclado

4.3 Resultados del Módulo de Elasticidad

4.3.1 Análisis Comparativo

Los resultados experimentales muestran una tendencia decreciente del módulo de elasticidad a medida que aumenta el porcentaje de agregado fino reciclado. El módulo disminuye progresivamente desde 16,500 MPa en la mezcla con 4% de sustitución hasta 15,300 MPa en la mezcla con 12% de sustitución.

Este comportamiento es consistente con investigaciones previas realizadas por Rahal (2007) y Yang et al. (2011) sobre hormigones con agregados reciclados, quienes identificaron factores similares que explican esta reducción.

Tabla 19. Módulo de Elasticidad Experimental del Concreto con Sustitución Parcial de Agregado Fino por Material Reciclado

Porcentaje de sustitución	No. Cilindros	Módulo De Elasticidad (Mpa)	Módulo De Elasticidad (Kg/cm2)	Módulo De Elasticidad Promedio (Mpa)	Módulo De Elasticidad Promedio (Kg/cm2)
4%	1	16600	169320	16500	168300
	2	16200	165240		
	3	16600	169320		
	4	16600	169320		
8%	1	16200	165240	15800	161160
	2	16200	165240		
	3	15400	157080		
	4	15400	157080		
12%	1	15600	159120	15300	156060
	2	15200	155040		
	3	15200	155040		
	4	15200	155040		

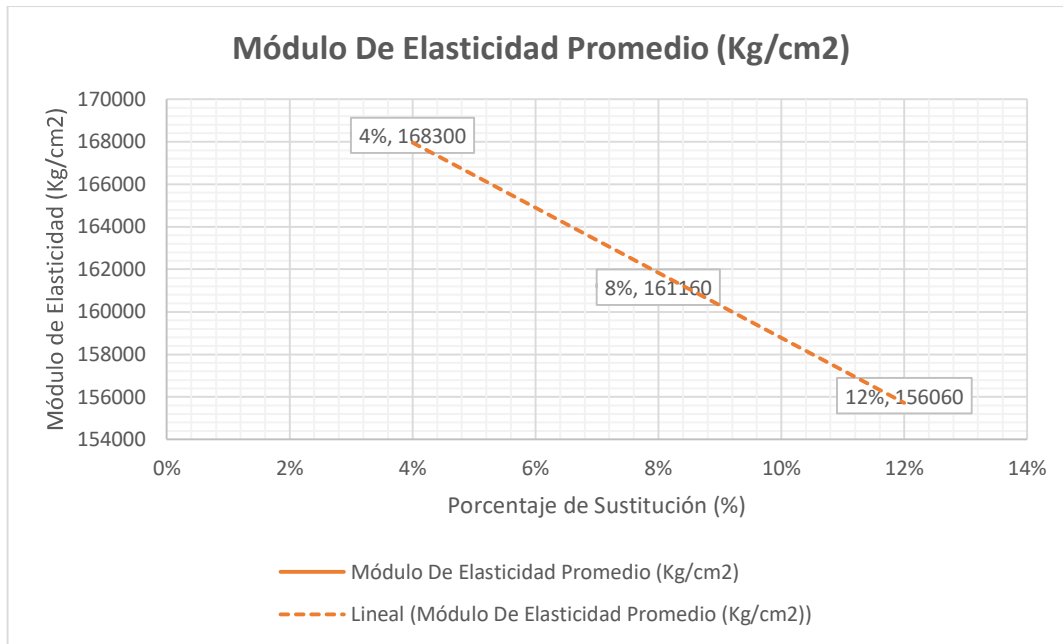
Fuente Propia 2025

La sustitución al 4% presenta el mejor comportamiento, manteniendo un módulo elevado (16,500 MPa) con excelente consistencia experimental. Esta mezcla demuestra que pequeños porcentajes de sustitución no comprometen significativamente la rigidez del hormigón.

La mezcla al 8% muestra una reducción moderada del módulo de elasticidad. La mayor dispersión entre probetas (4.9%) sugiere posible variabilidad en la distribución del agregado reciclado, aunque los valores permanecen dentro de rangos aceptables para aplicaciones estructurales.

La sustitución al 12% presenta la mayor reducción del módulo de elasticidad, aunque mantiene excelente uniformidad entre probetas. La repetibilidad en tres cilindros (15,200 MPa) indica buena homogeneidad del material a pesar del mayor contenido de agregado reciclado.

Ilustración 12. Tendencia observada



4.4 Determinación del Coeficiente del Módulo de Elasticidad

Para establecer el coeficiente de proporcionalidad que relaciona el módulo de elasticidad con la resistencia a la compresión del hormigón, se aplicó la metodología de análisis dimensional sobre los datos experimentales obtenidos. Este coeficiente representa el factor constante que, multiplicado por la raíz cuadrada de la resistencia a compresión, permite predecir el módulo de elasticidad del material (American Concrete Institute [ACI], 2019).

Ecuación 4. Expresión para el cálculo del coeficiente de proporcionalidad

$$\text{Coeficiente} = \frac{Ec}{\sqrt{f'_c}}$$

4.4.1 Coeficientes experimentales para hormigones con agregado fino reciclado

La Tabla 20, presenta los coeficientes calculados a partir de los resultados experimentales para cada porcentaje de sustitución del agregado fino por material reciclado de adoquines.

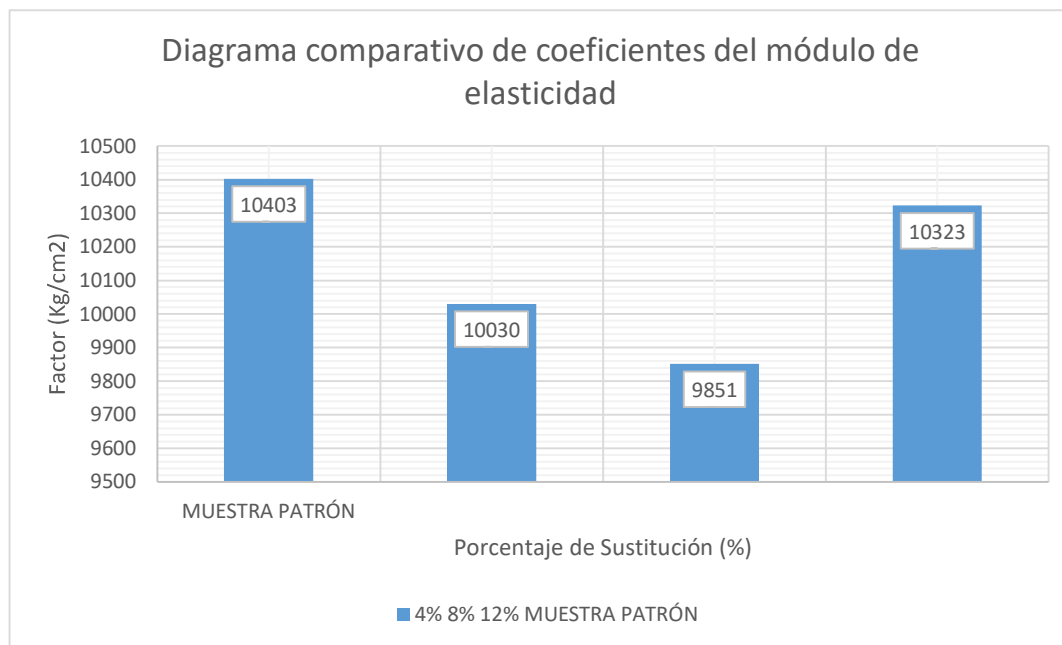
Los valores evidencian la influencia del contenido de material reciclado sobre la relación rigidez-resistencia del hormigón (Silva et al., 2016).

Tabla 20. Coeficientes del módulo de elasticidad según porcentaje de sustitución de agregado fino y muestra patrón

Factor de módulo de elasticidad sustitución de agregado fino						
% Sustitución	Resistencia a la compresión (Mpa)	Resistencia a la compresión (Kg/cm2)	Módulo De Elasticidad Promedio (Mpa)	Módulo De Elasticidad Promedio (Kg/cm2)	Factor (Mpa)	Factor (Kg/cm2)
4%	26	262	16500	168300	3257.21	10403
8%	25	258	15800	161160	3140.47	10030
12%	25	251	15300	156060	3084.47	9851

Nota: Los coeficientes se calcularon mediante la relación Coeficiente = $E_c/\sqrt{f'_c}$. Fuente Propia 2025

Ilustración 13. Diagrama comparativo de coeficientes del módulo de elasticidad



4.4.2 Interpretación técnica y consideraciones de diseño

El coeficiente experimental de la mezcla con 4% de sustitución (10,403 kg/cm²) es superior al de la muestra patrón (10,323 kg/cm²), representando un incremento del 0.77%.

Sin embargo, todos los coeficientes experimentales (9,851-10,403 kg/cm²) permanecen significativamente inferiores al coeficiente normativo del ACI 318-19 (15,100 kg/cm²) (ACI, 2019), lo que confirma la necesidad de utilizar valores calibrados experimentalmente para hormigones con agregado reciclados, es decir, que los diseñadores estructurales deben **obligatoriamente realizar ensayos de laboratorio** para determinar el módulo de elasticidad real antes de su aplicación en proyectos de construcción.

4.4.3 Implicaciones para el diseño estructural:

La relación experimental entre módulo de elasticidad y resistencia para hormigones con material reciclado difiere sustancialmente de la relación normativa establecida por el ACI (2019). Para efectos prácticos de diseño:

Ecuación 5. Ecuación ACI 318-19, resistencia 240 kg/cm²

$$E_{ACI} = 15,100x\sqrt{f'c} \quad (kg/cm^2)$$

Ecuaciones experimentales propuestas:

Ecuación 6. Ecuación para 4% de sustitución (262 kg/cm²)

$$E_{4\%} = 10,403x\sqrt{f'c} \quad (kg/cm^2)$$

Ecuación 7. Ecuación para 8% de sustitución (258 kg/cm²)

$$E_{8\%} = 10,030x\sqrt{f'c} \quad (kg/cm^2)$$

Ecuación 8. Ecuación para 12% de sustitución (251 kg/cm²)

$$E_{12\%} = 9,851x\sqrt{f'c} \quad (kg/cm^2)$$

4.4.3.1 Ejemplo de aplicación:

Para un hormigón con 4% de sustitución y $f'c = 258 \text{ kg/cm}^2$:

- **Módulo según ACI:** $E = 15,100 \times \sqrt{258} = 242,542 \text{ kg/cm}^2$
- **Módulo experimental:** $E = 10,403 \times \sqrt{258} = 167,096 \text{ kg/cm}^2$
- **Diferencia:** 45.14% de sobreestimación por la ecuación ACI

Los resultados demuestran que la ecuación del ACI 318 sobrestima el módulo de elasticidad en un 45.14% **cuando se aplica a hormigones con 4% de sustitución de agregado fino reciclado.**

Esta sobrestimación tiene implicaciones críticas en el diseño estructural.

- Las flechas reales en vigas y losas serían mayores que las calculadas.
- Los modelos computacionales darían valores no conservadores, es decir, presentaría una redistribución incorrecta de esfuerzos en sistemas hiperestáticos.
- Se calcularía una rigidez lateral del edificio superior a la real.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Es técnicamente viable incorporar hasta un 12% de agregados reciclados de adoquines como sustituto del agregado fino en hormigones estructurales con $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$, manteniendo resistencias a la compresión superiores a la especificada (251-262 kg/cm²). Esto demuestra que el uso de materiales reciclados no compromete la capacidad resistente del hormigón, confirmando hallazgos similares reportados por Etxeberria et al. (2007) sobre la viabilidad técnica de agregados reciclados en aplicaciones estructurales.
- El módulo de elasticidad disminuye gradualmente a medida que aumenta el porcentaje de sustitución: desde 16,525 MPa en la muestra patrón hasta 15,300

MPa con 12% de sustitución. Esta reducción del 7.4% debe considerarse en el diseño estructural para evitar subestimar las deformaciones reales, comportamiento consistente con las investigaciones de Rahal (2007) y Yang et al. (2011), quienes documentaron variaciones significativas en las propiedades mecánicas de hormigones con agregados reciclados.

- La ecuación del ACI 318-19 (American Concrete Institute, 2019) sobrestima el módulo de elasticidad en un rango de 45-54% cuando se aplica a hormigones con agregados de la Mina Punto Azul. Utilizar esta ecuación sin validación experimental conduciría a predicciones de rigidez no conservadoras y potencialmente peligrosas en el diseño estructural, corroborando las discrepancias identificadas por Silva et al. (2016) entre valores teóricos y experimentales al utilizar materiales latinoamericanos.
- Se desarrollaron ecuaciones de módulo de elasticidad específicas para cada nivel de sustitución: $E_{4\%}=10,403\sqrt{f_c}$, $E_{8\%}=10,030\sqrt{f_c}$ y $E_{12\%}=9,851\sqrt{f_c}$ (kg/cm²). Estas ecuaciones proporcionan predicciones precisas adaptadas a las características de los materiales locales y el contenido de agregado reciclado, siguiendo la metodología propuesta por Silva et al. (2016) para el desarrollo de correlaciones regionales específicas.
- La mezcla con 4% de sustitución presenta el mejor balance entre resistencia (262 kg/cm²) y rigidez (16,500 MPa), con excelente consistencia experimental y mínima reducción del módulo de elasticidad. Este nivel de sustitución representa la opción más favorable para aplicaciones estructurales, alineándose con las recomendaciones de Yang et al. (2011) sobre niveles óptimos de reemplazo de agregados naturales.
- La utilización de agregados reciclados de adoquines contribuye a reducir la disposición inadecuada de residuos de construcción en Ibarra, disminuir la extracción de agregados naturales según los principios establecidos por Meyer (2009), y ofrecer una alternativa económicamente viable para la industria constructiva local, promoviendo prácticas sostenibles conforme a los lineamientos de economía circular propuestos por Etxeberria et al. (2007).

5.2 Recomendaciones

- Los diseñadores estructurales deben realizar ensayos de laboratorio conforme a ASTM C469 (ASTM International, 2021) para determinar experimentalmente el módulo de elasticidad antes de utilizar hormigones con agregados reciclados en proyectos de construcción. No se debe confiar exclusivamente en ecuaciones normativas desarrolladas con materiales diferentes.
- Se recomienda extender la investigación evaluando porcentajes de sustitución adicionales (16%, 20%, 25%) y diferentes niveles de resistencia ($f_c=210, 280, 350$ kg/cm²), así como estudiar el comportamiento a largo plazo (fluencia, retracción) siguiendo el enfoque metodológico de Yang et al. (2011), para consolidar un cuerpo normativo regional completo.
- Es necesario desarrollar una norma técnica ecuatoriana que establezca criterios, límites y ecuaciones específicas para el diseño de hormigones con agregados reciclados, considerando las características geológicas y mineralógicas de diferentes regiones del país (Costa, Sierra, Amazonía), siguiendo los lineamientos establecidos por el Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN, 2010, 2011).

CAPITULO VI : REFERENCIAS

- American Concrete Institute. (2019). *ACI 318-19: Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*.
- American Society for Testing and Materials. (2014). *ASTM C469/C469M: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*.
- American Society for Testing and Materials. (2020). *ASTM C39/C39M: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*.
- Etxeberria, M., Vázquez, E., Marí, A., & Barra, M. (2007). Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*, 37(5), 735-742.
- Fédération Internationale du Béton. (2013). *fib Model Code for Concrete Structures 2010*. Ernst & Sohn.
- Guimaraes, L. (2021, Julio 02). El reciclaje de hormigón gana cada vez más fuerza. *Construcción Latinoamericana*. <https://www.construccionlatinoamericana.com/news/el-reciclaje-de-hormigon-gana-cada-vez-mas-fuerza/8013322.article>
- Limbachiya, M. C., Leelawat, T., & Dhir, R. K. (2000). Use of recycled concrete aggregate in high-strength concrete. *Materials and Structures*, 33(9), 574-580.
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.
- Poon, C. S., Shui, Z. H., & Lam, L. (2004). Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 18(6), 461-468.
- Rahal, K. (2007). Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. *Building and Environment*, 42(1), 407-415.
- Silva, R. V., de Brito, J., & Dhir, R. K. (2016). Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2171-2186.
- Xiao, J., Li, J., & Zhang, C. (2005). Mechanical properties of recycled aggregate concrete under uniaxial loading. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1187-1194.
- Yang, K. H., Chung, H. S., & Ashour, A. F. (2008). Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. *ACI Materials Journal*, 105(3), 289-296.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

CAPITULO VII: ANEXOS

7.1 ANEXO FOTOGRÁFICO

Ilustración 14. Secado al horno de material los agregados fino y grueso







Ilustración 15. Cuarteo manual del agregado Fino



Ilustración 16. Tamizado de agregado Grueso y Fino







Ilustración 17. Pesaje de Cemento Selva Alegre

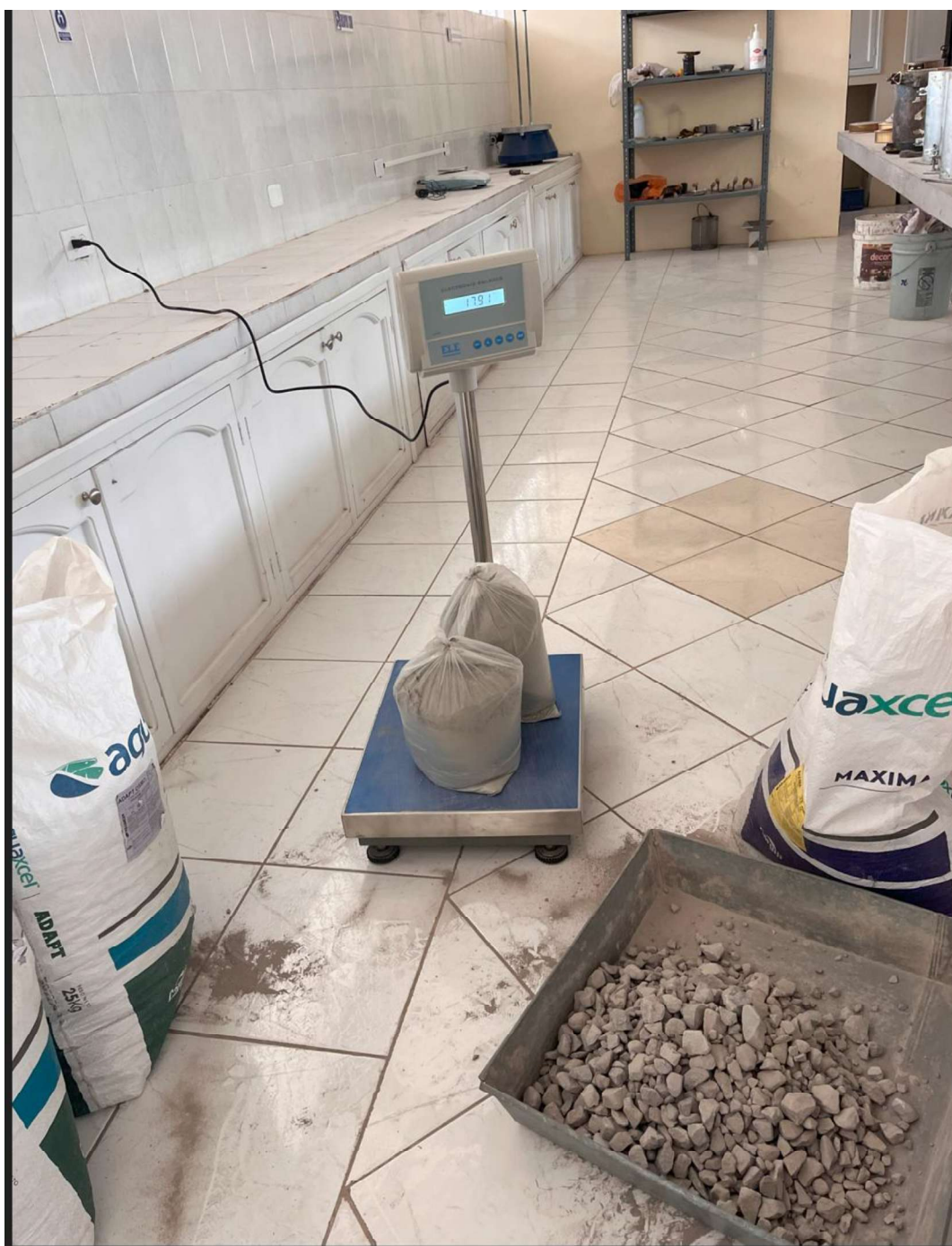


Ilustración 18. Fabricación de hormigón



Ilustración 19. Verificación de asentamiento 80mm



Ilustración 20. Ensayo de granulometría de Agregado Grueso



Ilustración 21. Desmolde de Cilindros de hormigón (muestra patrón)



Ilustración 22. Tamizaje de material triturado manualmente (desecho de adoquín)



Ilustración 23. Ensayo de Abrasión



Ilustración 24. Ensayo de Colorimetría



Ilustración 25. Fabricación de hormigón

