



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL MENSIÓN ESTRUCTURAS SISMORESISTENTES

TEMA:

OBTENCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA $F'C = 300 \text{ kg/cm}^2$, CON MATERIAL RECICLADO, EN LA PROVINCIA DE PICHINCHA, ELABORADO CON MATERIALES DE LA MINA SAN PABLO EL GRANDE, UBICADA EN LA PARROQUIA SAN ANTONIO DE PICHINCHA, SECTOR TANLAHUA Y CEMENTO CHIMBORAZO.

AUTOR:

ARQ. ULLOA HURTADO ANDRÉS ESTEBAN

TUTOR:

ING. WILSON OSWALDO CANDO TIPÁN MSC

QUITO – ECUADOR

2025

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	CAPÍTULO I	1
	1.1 Introducción	1
	1.1.1 Justificación	1
	1.1.2 Planteamiento del Problema	1
	1.1.3 Objetivos	2
	1.1.4 Alcance	2
	1.1.5 Metodología y Técnicas	3
2	CAPÍTULO II	5
	2.1 Marco Teórico y Conceptual	5
	2.1.1 Marco Referencial	5
	2.2 Marco Teórico	6
	2.2.1 Parroquia San Antonio de Pichincha	6
	2.2.2 Proceso de Reciclaje del Hormigón	6
	2.2.3 Aplicaciones y casos de estudio	6
	2.3 Marco Conceptual	7
	2.3.1 Hormigón	7
	2.3.2 Hormigón Reciclado	10
	2.3.3 Cemento	11
	2.3.4 Áridos para Hormigón	13
	2.3.5 Relación sobre el Agua en el Hormigón	14
	2.3.6 Módulo de Elasticidad	16
3	CAPÍTULO III	24
	3.1 Propiedades Físicas y Mecánicas de los Agregados	24
	3.2 Ensayo de los Agregados	26

3.2.1	Determinación de las Impurezas Orgánicas en el Árido Fino para Hormigones.....	26
3.2.2	Análisis Granulométrico en el Árido Fino.....	28
3.2.3	Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino	31
3.2.4	Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico), en árido fino.....	33
3.2.1	Análisis granulométrico en el árido grueso	35
3.2.2	Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm usando la máquina de los ángeles.....	39
3.2.3	Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso	41
3.3	Dosificación Método ACI.....	44
3.3.1	Antecedentes Históricos.....	44
3.3.2	Dosificación al Peso.....	45
3.3.3	Resistencia de la compresión promedio.....	45
3.3.4	Asentamiento	45
3.3.5	Agua Neta y Contenido de Aire	46
3.3.6	Relación Agua Cemento	48
3.3.7	Dosificaciones Previas	49
3.3.8	Muestra Patrón	51
3.3.9	Rotura de Cilindros	52
3.4	Determinación del Módulo de Elasticidad Experimental	53
3.5	Cálculo del Factor Asociado al Módulo de Elasticidad.....	54
3.6	Obtención de la Expresión del Módulo de Elasticidad.....	54
4	CAPÍTULO IV.....	55

4.1	Análisis de Resultados	55
4.1.1	Resultados de la caracterización de los agregados	55
4.1.2	Resultados de Material Reciclado de construcción	55
4.1.3	Resultados Cilindros Dosificaciones previas.....	58
4.1.4	Resultados Muestra Patrón	60
4.1.5	Determinación del Módulo de Elasticidad Experimental Muestra Patrón 62	
4.1.6	Determinación del Factor de Módulo de Elasticidad.....	65
4.1.7	Resumen de Resultados	67
4.2	Ecuaciones del Módulo de Elasticidad con Sustitución Parcial de Agregado Fino por Material Reciclado.....	69
5	CAPÍTULO V	71
5.1	Conclusiones	71
5.2	Recomendaciones	72
6	Bibliografía	74
7	ANEXOS	77
7.1	Resultados del Ensayo de Compresión a los 7 Días para Probetas de Hormigón (Dosificaciones Previas)	77
7.2	Curvas Esfuerzo-Deformación de los Cilindros de la Muestra Patrón	78
7.3	Resultados de la Curva Esfuerzo-Deformación para Sustitución del 4 % de Agregado Fino	79
7.4	Resultados de la Curva Esfuerzo-Deformación para Sustitución del 8 % de Agregado Fino	80
7.5	Resultados de la Curva Esfuerzo-Deformación para Sustitución del 12 % de Agregado Fino	81

7.6	Determinación del Módulo de Elasticidad en la Muestra Patrón	82
7.6.1	Resultados Experimentales del Ensayo en Cilindros.....	82
7.7	Determinación Experimental del Módulo de Elasticidad para la Muestra con 4 % de Sustitución de Árido Fino	85
7.7.1	Resultados Experimentales del Ensayo en Cilindros.....	85
7.8	Determinación Experimental del Módulo de Elasticidad para la Muestra con 8 % de Sustitución de Árido Fino	88
7.8.1	Resultados Experimentales del Ensayo en Cilindros.....	88
7.9	Determinación Experimental del Módulo de Elasticidad para la Muestra con 12 % de Sustitución de Árido Fino	91
7.9.1	Resultados Experimentales del Ensayo en Cilindros.....	91
7.10	Anexo Fotográfico	94

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Normas Técnicas Ecuatorianas (NTE INEN) para Ensayos de Caracterización de Áridos.....	25
Tabla 2	Resultados del Análisis Granulométrico del Árido Fino según la Norma NTE INEN 696:2011.....	29
Tabla 3	Resultados del Ensayo de Densidad Relativa y Capacidad de Absorción del Árido Fino	32
Tabla 4	Densidad Aparente en Condición Suelta y Compactada	34
Tabla 5	Resultados del Análisis Granulométrico del Árido Grueso.....	37
Tabla 6	Características del Árido Grueso	39
Tabla 7	Resultados del Ensayo de Degradación del Árido Grueso mediante la Máquina de Los Ángeles	40

Tabla 8 Resultados de Densidad y Absorción del Árido Grueso.....	42
Tabla 9 Resistencia a la compresión promedio	45
Tabla 10 Rangos típicos de asentamiento para hormigón sin aditivos reductores de agua en distintos tipos de construcción	46
Tabla 11 Contenido aproximado de agua de mezclado y aire para diferentes asentamientos en hormigón sin aditivos reductores de agua y tamaños nominales máximos de los agregados	47
Tabla 12 Relación entre la relación agua/cemento (w/cm) y la resistencia a compresión del hormigón.....	48
Tabla 13 Resultados de los Ensayos de Compresión para Dosificaciones Previas con Diferentes Relaciones Agua-Cemento	50
Tabla 14 Resultados de los Áridos	51
Tabla 15 Dosificación muestra patrón.....	52
Tabla 16 Relación agua/cemento y resistencia a compresión a 7 y 28 días	59
Tabla 17 Resultados de los Ensayos de Compresión para la Muestra Patrón (Relación a/c = 0.41)	61
Tabla 18 Módulo de Elasticidad Experimental del Concreto para la Muestra Patrón.....	63
Tabla 19 Módulo de Elasticidad Experimental del Concreto con Sustitución Parcial de Agregado Fino por Material Reciclado.....	64
Tabla 20 Factor del módulo de elasticidad en función del porcentaje de sustitución del agregado fino	66
Tabla 21 Resumen comparativo de resultados experimentales y normativos del módulo de elasticidad y su factor en función del porcentaje de sustitución de agregado fino	68
Tabla 22 Resultados del Ensayo de Compresión a los 7 Días para Probetas con Diferentes Relaciones Agua/Cemento	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Faro de Eddystone	9
Figura 2 Influencia de la relación A/C en la resistencia del hormigón.	16
Figura 3 Típica curva de esfuerzo - deformación del hormigón.	19
Figura 4 Patrones Típicos de Falla en Cilindros de Hormigón	21
Figura 5 Diagrama de Desplazamientos del Cilindro Durante la Prueba de Compresión.	22
Figura 6 Comparación del color del líquido sobrenadante con el comparador de colores normalizados	27
Figura 7 Curva Granulométrica del Árido Fino	30
Figura 8 Curva Granulométrica del Árido Grueso	38
Figura 9 Proceso de recolección manual de residuos de concreto en la escombrera San Antonio para la obtención de material reciclado	56
Figura 10 Proceso de trituración del material reciclado de construcción mediante una trituradora de mandíbulas.	57
Figura 11 Pesaje del material reciclado de construcción tras el proceso de trituración.	58
Figura 12 Curva de variación de la resistencia a compresión del concreto a 28 días en función de la relación agua/cemento.....	59
Figura 13 Variación del Módulo de Elasticidad según el Porcentaje de Sustitución de Agregado Fino	65
Figura 14 Diagrama del factor del módulo de elasticidad en función del porcentaje de sustitución del agregado fino	67
Figura 15 Comparación del Módulo de Elasticidad según porcentaje de sustitución y referencia normativa	69
Figura 16 Curva Esfuerzo-Deformación de la Muestra Patrón para $f'c = 30$ MPa.....	78

Figura 17 Comportamiento Esfuerzo-Deformación del Hormigón con 4 % de Sustitución de Agregado Fino por Material Reciclado	79
Figura 18 Comportamiento Esfuerzo-Deformación del Hormigón con 8 % de Sustitución de Agregado Fino por Material Reciclado	80
Figura 19 Comportamiento Esfuerzo-Deformación del Hormigón con 12 % de Sustitución de Agregado Fino por Material Reciclado	81
Figura 20 Cálculo del Módulo de Elasticidad de la Muestra Patrón (MP1)	82
Figura 21 Cálculo del Módulo de Elasticidad de la Muestra Patrón (MP2)	82
Figura 22 Cálculo del Módulo de Elasticidad de la Muestra Patrón (MP3)	83
Figura 23 Cálculo del Módulo de Elasticidad de la Muestra Patrón (MP4)	83
Figura 24 Cálculo del Módulo de Elasticidad de la Muestra Patrón (MP5)	84
Figura 25 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 4% (MP1)	85
Figura 26 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 4% (MP2)	85
Figura 27 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 4% (MP3)	86
Figura 28 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 4% (MP4)	86
Figura 29 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 4% (MP5)	87
Figura 30 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 8% (MP1)	88
Figura 31 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 8% (MP2)	88
Figura 32 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 8% (MP3)	89
Figura 33 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 8% (MP4)	89
Figura 34 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 8% (MP5)	90
Figura 35 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 12% (MP1)	91
Figura 36 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 12% (MP2)	91
Figura 37 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 12% (MP3)	92
Figura 38 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 12% (MP4)	92

Figura 39 Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 12% (MP5).....	93
Figura 40 Ensayo de Impurezas Orgánicas en el Árido Fino.....	95
Figura 41 Proceso de Tamizado Manual del Árido Grueso para Ensayos de Caracterización	95
Figura 42 Clasificación Granulométrica del Árido Grueso	96
Figura 43 Máquina de Los Ángeles para el Ensayo de Degradación del Árido Grueso....	96
Figura 44 Mezcladora de Concreto con Agregados	97
Figura 45 Revenimiento del Concreto	97
Figura 46 Trituración del material reciclado.....	98
Figura 47 Cilindros de Concreto de la Muestra Patrón Marcados para Ensayo a Compresión	98
Figura 48 Almacenamiento de Cilindros de Concreto en Zona de Curado Húmedo.....	99
Figura 49 Ensayo de módulo de elasticidad en cilindro de concreto.....	99
Figura 50 Cilindro de concreto tras ensayo de módulo de elasticidad.....	100

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1 Definición del Módulo de Elasticidad.....	17
Ecuación 2 Ecuación del Módulo de Elasticidad.....	19
Ecuación 3 Formula General Módulo de Finura Árido Fino	30
Ecuación 4 Cálculo de la Capacidad de Absorción Árido Fino	32
Ecuación 5 Cálculo de la Densidad Aparente	34
Ecuación 6 Cálculo de la Densidad Aparente Suelta	35
Ecuación 7 Cálculo de la Densidad Aparente Compactada	35
Ecuación 8 Formula General Módulo de Finura Árido Grueso	38
Ecuación 9 Cálculo del Porcentaje de Degradación.....	40
Ecuación 10 Cálculo de la Capacidad de Absorción Árido Grueso	43

Ecuación 11 Interpolación Relación Agua/Cemento.....	49
Ecuación 12 Ecuación para la determinación del Módulo de Elasticidad Secante según ASTM C469/C469M-14.....	53
Ecuación 13 Ecuación 19.2.2.1.b del American Concrete Institute (ACI 318-19).....	54
Ecuación 14 Factor de corrección del módulo de elasticidad	54
Ecuación 15 Ecuación del módulo de elasticidad secante según ASTM C469, evaluado entre una carga inicial de 0.8 MPa y el 40% de la carga máxima.	62
Ecuación 16 Ecuación para la Determinación del Factor de Relación entre el Módulo de Elasticidad y la Resistencia a la Compresión	65
Ecuación 17 Ecuación del Módulo de Elasticidad Normativa en MPa y Kg/cm ²	69
Ecuación 18 Ecuación del Módulo de Elasticidad Muestra Patrón en MPa y Kg/cm ²	70
Ecuación 19 Ecuación del Módulo de Elasticidad Sustitución al 4 % en MPa y Kg/cm ² .	70
Ecuación 20 Ecuación del Módulo de Elasticidad Sustitución al 8 % en MPa y Kg/cm ² .	70
Ecuación 21 Ecuación del Módulo de Elasticidad Sustitución al 12 % en MPa y Kg/cm ²	70

TÍTULO: OBTENCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, CON MATERIAL RECICLADO, EN LA PROVINCIA DE PICHINCHA, ELABORADO CON MATERIALES DE LA MINA SAN PABLO EL GRANDE, UBICADA EN LA PARROQUIA SAN ANTONIO DE PICHINCHA, SECTOR TANLAHUA Y CEMENTO CHIMBORAZO.

AUTOR: Andrés Esteban Ulloa Hurtado

TUTOR: Wilson Oswaldo Cando Tipán

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo establecer una ecuación empírica para la determinación del módulo de elasticidad del hormigón de alta resistencia ($f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$) utilizando material reciclado como sustituto parcial del árido fino. El estudio se desarrolló en la provincia de Pichincha, empleando materiales provenientes de la mina San Pablo el Grande, ubicada en la parroquia San Antonio de Pichincha, sector Tanlahua, y cemento Chimborazo. Se realizaron mezclas patrón y mezclas con sustituciones del 4 %, 8 % y 12 % de agregado fino por material reciclado. Se evaluaron parámetros como la resistencia a compresión y el módulo de elasticidad. Los resultados evidencian que el uso de material reciclado genera un incremento en el módulo de elasticidad en comparación con la mezcla patrón, además, las ecuaciones obtenidas para cada nivel de sustitución presentan coeficientes menores al establecido por el ACI 318-19, por lo que se recomienda la generación de ecuaciones ajustadas a condiciones geográficas en el contexto ecuatoriano.

PALABRAS CLAVE: HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA, MÓDULO DE ELASTICIDAD, MATERIAL RECICLADO, AGREGADO FINO, SAN PABLO EL GRANDE, NORMATIVA ACI, ECUACIÓN EMPÍRICA, PICHINCHA.

TITLE: OBTENCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DEL HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA $f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$, CON MATERIAL RECICLADO, EN LA PROVINCIA DE PICHINCHA, ELABORADO CON MATERIALES DE LA MINA SAN PABLO EL GRANDE, UBICADA EN LA PARROQUIA SAN ANTONIO DE PICHINCHA, SECTOR TANLAHUA Y CEMENTO CHIMBORAZO.

AUTHOR: Andrés Esteban Ulloa Hurtado

TUTOR: Wilson Oswaldo Cando Tipán

ABSTRACT

This research aims to establish an empirical equation to determine the modulus of elasticity of high-strength concrete ($f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$) using recycled material as a partial substitute for fine aggregate. The study was conducted in the province of Pichincha, using materials from the San Pablo el Grande quarry, located in the San Antonio de Pichincha parish, Tanlahua sector, and Chimborazo cement. Control mixtures and mixtures with 4%, 8%, and 12% fine aggregate replacement were prepared. Parameters such as compressive strength and modulus of elasticity were evaluated. The results show that the use of recycled material increases the modulus of elasticity compared to the control mix. Moreover, the equations obtained for each replacement level present lower coefficients than those established by ACI 318-19, suggesting the need to develop equations adjusted to the local geographic and material conditions within the Ecuadorian context.

KEYWORDS: HIGH-STRENGTH CONCRETE, MODULUS OF ELASTICITY, RECYCLED MATERIAL, FINE AGGREGATE, SAN PABLO EL GRANDE, ACI STANDARD, EMPIRICAL EQUATION, PICHINCHA

1 CAPÍTULO I

1.1 Introducción

1.1.1 *Justificación*

La industria de la construcción se enfrenta a desafíos significativos en términos de sostenibilidad y reducción del impacto ambiental. En este contexto, el uso de materiales de construcción reciclados, como el hormigón reciclado, ha surgido como una solución para abordar estos desafíos al permitir la reutilización de residuos de demolición y construcción, reducir la extracción de recursos naturales y minimizar la generación de residuos.

En la provincia de Pichincha, ubicada en Ecuador, se encuentra la Mina San Pablo el Grande, que proporciona áridos normales utilizados en la construcción. Para fomentar una mayor sostenibilidad en la industria de la construcción en esta región, se pretende utilizar residuos de hormigón resultantes de demoliciones, triturarlos y mezclarlos con los áridos de la Mina San Pablo el Grande para obtener un nuevo hormigón reciclado.

Sin embargo, para garantizar la aplicación efectiva del hormigón reciclado en proyectos de construcción sostenible, es fundamental comprender y caracterizar sus propiedades mecánicas y físicas, en particular el módulo de elasticidad. La falta de una ecuación específica para el módulo de elasticidad del hormigón reciclado elaborado con material reciclado limita su uso y dificulta su inclusión en diseños estructurales.

1.1.2 *Planteamiento del Problema*

El uso de materiales de construcción reciclados, como el hormigón reciclado, se ha convertido en una alternativa cada vez más atractiva para promover la sostenibilidad en la industria de la construcción.

Sin embargo, para garantizar la aplicación efectiva del hormigón reciclado, es fundamental comprender y caracterizar sus propiedades mecánicas, en particular el módulo de elasticidad.

1.1.3 Objetivos

1.1.3.1 Objetivo General

Obtener la ecuación del módulo de elasticidad del hormigón reciclado utilizando materiales de la Mina San Pablo el Grande y cemento Chimborazo en la provincia de Pichincha.

1.1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón reciclado obtenido mediante la mezcla de áridos normales de la Mina San Pablo el Grande y residuos de hormigón de demolición.
- Determinar la relación entre los porcentajes de áridos normales y residuos de hormigón en la mezcla y el módulo de elasticidad del hormigón reciclado.
- Comparar el módulo de elasticidad del hormigón reciclado obtenido con los valores de referencia del hormigón convencional.

1.1.4 Alcance

Este estudio experimental tiene como objetivo comparar el módulo de elasticidad del hormigón con resistencia a la compresión de 300 kg/cm², elaborado con agregado fino y grueso proveniente de la mina San Pablo el Grande, ubicada en la parroquia de San Antonio, provincia de Pichincha, y cemento Chimborazo Hidráulico de Alta Resistencia Inicial, tipo HE.

Para establecer una referencia, se fabricará una muestra patrón, sobre la cual se determinará el módulo de elasticidad promedio a partir de cinco ensayos realizados a los 28 días de edad. A partir de esta muestra, se evaluará la influencia del reemplazo parcial del agregado fino en proporciones de 4%, 8% y 12% con material reciclado obtenido de residuos de demolición, recolectado en la escombrera de San Antonio, ubicada en el sector de Tanlahua, provincia de Pichincha.

El material reciclado será sometido a un proceso de selección y limpieza para garantizar su calidad y evitar la presencia de contaminantes que puedan afectar los resultados experimentales.

1.1.5 Metodología y Técnicas

La metodología utilizada en este estudio sigue un enfoque experimental basado en la caracterización de materiales y la evaluación del módulo de elasticidad del hormigón con diferentes proporciones de agregado reciclado. Se empleará la metodología del ACI 318, garantizando que las mezclas de hormigón cumplan con los estándares normativos.

El procedimiento se desarrollará en dos fases principales:

- Elaboración de la muestra patrón, con agregados naturales, que servirá como referencia para determinar el módulo de elasticidad del hormigón convencional.
- Sustitución parcial del agregado fino con material reciclado en proporciones de 4%, 8% y 12%, evaluando su impacto en la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad.

A continuación, se detalla los pasos específicos seguidos en este estudio:

1.1.5.1 Selección de Materiales

- Agregados finos y gruesos provenientes de la Mina San Pablo el Grande.
- Cemento Chimborazo Hidráulico de Alta Resistencia Inicial, tipo HE.
- Material reciclado obtenido de residuos de demolición, debidamente seleccionado y triturado hasta obtener una granulometría adecuada como sustituto del agregado fino.

1.1.5.2 Caracterización de los Agregados

- Se realizarán ensayos físicos y mecánicos para determinar las propiedades de los agregados naturales y reciclados.
- Los ensayos incluirán granulometría, absorción, desgaste por abrasión y contenido de humedad, siguiendo las normas ASTM e INEN correspondientes.

1.1.5.3 Elaboración de la Muestra Patrón

- Se diseñará una mezcla de hormigón para alcanzar una resistencia a la compresión $f'_c = 300 \text{ kg/cm}^2$, siguiendo el método de dosificación del ACI 318.
- Se fabricarán cinco cilindros de hormigón con esta mezcla, los cuales se someterán a ensayos de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad a los 28 días.

1.1.5.4 Sustitución del Agregado Fino con Material Reciclado

- Se prepararán tres nuevas mezclas de hormigón, donde el agregado fino será reemplazado en 4%, 8% y 12% por material reciclado.
- Para cada proporción, se fabricarán cinco cilindros de prueba, totalizando 20 cilindros en todo el experimento, sin contar con los cilindros que se elaboraron para la muestra patrón.

1.1.5.5 Ensayos Mecánicos

- A los 28 días, se realizarán ensayos de resistencia a la compresión (ASTM C39) y módulo de elasticidad (ASTM C469) para cada grupo de cilindros.
- Se determinarán los valores medios de cada serie de probetas.

1.1.5.6 Análisis y Comparación de Resultados

- Se calcularán los módulos de elasticidad promedio para cada porcentaje de reemplazo.

- Se compararán los resultados con los valores obtenidos en la muestra patrón y con las ecuaciones normativas del ACI 318 y la NEC 15.

2 CAPÍTULO II

2.1 Marco Teórico y Conceptual

2.1.1 *Marco Referencial*

La provincia de Pichincha, ubicada en Ecuador, alberga diversas actividades industriales, incluida la extracción de materiales de construcción. Dentro de esta provincia se encuentra la Mina San Pablo el Grande, que juega un papel importante en la provisión de áridos utilizados en la construcción en la región.

La Parroquia San Antonio de Pichincha, donde se ubica la Mina San Pablo el Grande, se caracteriza por su actividad minera y su contribución al suministro de materiales para la construcción en la provincia. La explotación de recursos naturales en esta área influye directamente en la disponibilidad y calidad de los materiales de construcción, incluyendo los áridos utilizados en la producción de hormigón.

La geología de la región también es un factor relevante para considerar. La composición geológica del área de la Mina San Pablo el Grande puede afectar las propiedades de los materiales extraídos y, por lo tanto, la calidad del hormigón producido con estos materiales.

Es importante tener en cuenta este contexto geográfico y geológico al investigar y caracterizar las propiedades del hormigón reciclado elaborado con materiales de la Mina San Pablo el Grande y cemento Chimborazo en la provincia de Pichincha. La comprensión de estos factores ayudará a contextualizar los resultados obtenidos y su relevancia para la industria de la construcción en la región.

2.2 Marco Teórico

2.2.1 Parroquia San Antonio de Pichincha

2.2.1.1 Geología

En el contexto geológico de la Parroquia San Antonio de Pichincha, su configuración está marcada por la influencia de secuencias volcánicas y volcano-sedimentarias depositadas durante el Pleistoceno-Holoceno. A nivel regional, la estratigrafía del área está caracterizada por la presencia de depósitos compuestos por volcanoclastos, brechas, flujos de lodo, sedimentos aluviales y volcánicos, los cuales se encuentran bien compactados y retrabajados. (Pinta, 2019)

2.2.2 Proceso de Reciclaje del Hormigón

En el proceso de reciclaje del hormigón, los residuos de hormigón de demolición o desecho se someten a un tratamiento específico para su reutilización en la producción de nuevo hormigón. Este proceso implica triturar los fragmentos de hormigón en áridos de diferentes tamaños, que luego se pueden utilizar como agregados en la mezcla de hormigón reciclado. Además, se pueden llevar a cabo operaciones de separación y clasificación para eliminar impurezas y garantizar la calidad del material reciclado. Este enfoque de reciclaje del hormigón no solo ayuda a reducir la cantidad de residuos de construcción y demolición que terminan en vertederos, sino que también contribuye a la conservación de los recursos naturales al reutilizar materiales existentes en nuevos proyectos de construcción.

2.2.3 Aplicaciones y casos de estudio

- Pavimentación de carreteras
- Construcción de bases y subbases
- Elementos prefabricados
- Estructuras de contención y barreras acústicas
- Edificación sostenible

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Hormigón

El uso del hormigón, tal como se conoce en la actualidad, tiene sus primeros antecedentes en la época del Imperio Romano, cuando se empleaban materiales cementantes naturales en la construcción. Durante este período, los romanos perfeccionaron el *opus caementicium*, una mezcla compuesta por cal, arena, grava y puzolana que confería a las estructuras una gran resistencia, incluso en condiciones húmedas. Gracias a este material, lograron construir acueductos, templos, puertos y edificaciones monumentales, muchas de las cuales han perdurado hasta nuestros días. Sin embargo, con la caída del Imperio Romano en el 476 d.C., el uso del hormigón sufrió un declive significativo, predominando en la Edad Media la utilización de piedra y madera en la construcción. No fue sino hasta el Renacimiento cuando se retomaron algunas de estas técnicas en edificaciones emblemáticas, como la cúpula de Santa María del Fiore en Florencia y la Basílica de San Pedro del Vaticano, donde arquitectos como Filippo Brunelleschi y Miguel Ángel aplicaron principios de la ingeniería romana.

El verdadero avance hacia el hormigón moderno se dio en el siglo XVIII con los estudios de John Smeaton, considerado uno de los precursores de la ingeniería civil moderna. En 1757, fue encargado de la construcción del faro de Eddystone, ubicado en la bahía de Plymouth, Inglaterra. Anteriormente, diversos intentos de edificación habían fracasado debido a que la roca donde se asentaba la estructura era frecuentemente cubierta por agua, lo que provocaba que el mortero a base de cal tradicional se lavara y perdiera cohesión. Durante su investigación, Smeaton identificó que la cal común carecía de propiedades hidráulicas, lo que la hacía inadecuada para este tipo de condiciones. Sin embargo, descubrió que la cal gris, al contener impurezas de arcilla, presentaba un mejor desempeño. Además, al analizar la pozzolana, observó que esta poseía cualidades hidráulicas superiores a las de la cal gris, debido a su composición química rica en óxido de calcio y silicato de aluminio, elementos clave en la

formación de un material resistente al agua y duradero en ambientes agresivos. Este descubrimiento marcó un hito en la ingeniería civil, ya que permitió el desarrollo de los primeros morteros hidráulicos, los cuales sirvieron como base para la evolución del hormigón moderno, un material indispensable en la construcción actual (Nistal Cordero, María Jesús, & Ruiz Abrio, 2012)

Otro avance crucial se dio con el trabajo del químico francés Louis Vicat (1786-1861), quien identificó la importancia de la combinación de arcilla y piedra caliza calcinada para producir un aglomerante más resistente. Vicat es considerado el inventor del cemento artificial, y sus estudios fueron fundamentales para el desarrollo de los cementos modernos. Posteriormente, en 1824, el albañil inglés Joseph Aspdin patentó el cemento Portland, llamado así por su parecido con la piedra de Portland, Inglaterra. Este cemento se obtenía mediante la calcinación de una mezcla de piedra caliza y arcilla a temperaturas entre 1350 y 1450°C, lo que producía un material más resistente y de fraguado rápido en comparación con los cementos naturales. Gracias a su durabilidad y versatilidad, el cemento Portland permitió la fabricación de un hormigón más uniforme y resistente, lo que impulsó su uso en la construcción de puentes, rascacielos y grandes infraestructuras durante los siglos XIX y XX. Actualmente, el hormigón es el material de construcción más utilizado en el mundo y sigue evolucionando con el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales sostenibles que buscan mejorar su desempeño estructural y reducir su impacto ambiental (Perez, 2014).

Figura 1

Faro de Eddystone



Nota Fuente. Tomado de Historia Civil (2015), Faro de Eddystone. Disponible en <https://historiacivil.wordpress.com/2015/03/23/faro-de-eddystone/>.

2.3.2 Hormigón Reciclado

El hormigón reciclado se define como aquel que emplea áridos reciclados en su composición, ya sea como parte de una mezcla con áridos naturales o exclusivamente con áridos reciclados. Investigaciones previas han examinado el efecto del uso de áridos gruesos y finos reciclados en las propiedades del hormigón. La mayoría de estos estudios han concluido que la inclusión de la fracción fina tiende a disminuir la resistencia del hormigón, por lo que se sugiere sustituir hasta un 20%, 30% o incluso 50% de la fracción fina por áridos gruesos. (Sanchez de Juan, 2004)

2.3.2.1 Antecedentes Históricos del Uso de Áridos Reciclados en Hormigón

El uso de materiales reciclados en la fabricación de hormigón se documentó por primera vez tras la Segunda Guerra Mundial, especialmente en Gran Bretaña y Alemania, donde la necesidad de reconstrucción impulsó la reutilización de escombros como alternativa a los áridos convencionales (González Fonteboa, 2002). Sin embargo, después de este periodo, los estudios sobre este tema fueron limitados hasta que, en la década de los años 80, el interés por el reciclaje de materiales de construcción resurgió debido al incremento en la demolición de edificaciones y a la creciente demanda de áridos naturales (González Fonteboa, 2002).

Un hito clave en esta línea de investigación ocurrió en 1978, cuando Nixon, P.J. realizó una revisión sobre el estado del conocimiento del reciclaje de hormigón, recopilando estudios que abarcan desde 1945 hasta 1977. En este análisis, se evidenció que la mayoría de los estudios optaban por evaluar las propiedades mecánicas de hormigones en los que el agregado grueso era completamente sustituido por material reciclado, proveniente de hormigones demolidos (Nixon, 1978, citado en González Fonteboa, 2002).

En general, la mayoría de las investigaciones realizadas hasta ese momento se centraban en ensayos de laboratorio, llegando a la conclusión de que los hormigones reciclados podían

presentar un comportamiento estructural similar al de los hormigones convencionales, siempre que se garantizaran ciertos criterios de selección y tratamiento de los materiales reciclados (González Fonteboa, 2002).

2.3.3 Cemento

El cemento es un material conglomerante de uso esencial en la construcción, compuesto principalmente por clinker, adiciones minerales y sulfato de calcio. Su función principal es la de actuar como aglutinante en mezclas de hormigón y mortero, proporcionando resistencia y durabilidad a las estructuras construidas. En la actualidad, existen diferentes tipos de cemento, cada uno diseñado para aplicaciones específicas y regulados por normativas nacionales e internacionales.

Uno de los cementos de mayor uso en Ecuador es el Cemento Chimborazo Hidráulico de Alta Resistencia Inicial Tipo HE, el cual cumple con la norma INEN 2380 y se fabrica mediante un proceso tecnológico avanzado que minimiza la emisión de gases de efecto invernadero. Este cemento presenta una molienda de alta fineza y calidad, garantizando un desempeño superior en términos de resistencia y durabilidad. Para asegurar estos estándares, su producción se rige bajo un sistema de gestión de calidad basado en la Norma ISO 9001.

2.3.3.1 Propiedades Físicas y Mecánicas

El Cemento Chimborazo HE posee características físicas que lo diferencian de otros tipos de cemento, tales como un peso específico de 2.92 g/cm^3 , una expansión en autoclave de 0.0013%, y un tiempo de fraguado inicial de 150 minutos, mientras que el fraguado final se produce aproximadamente a los 240 minutos. En cuanto a su resistencia a la compresión, este cemento ofrece valores progresivos que superan los requisitos normativos, alcanzando 18 MPa a 1 día, 25 MPa a 3 días, 33 MPa a 7 días y 45 MPa a 28 días

2.3.3.2 Durabilidad y Resistencia Química

La durabilidad es una de las propiedades más importantes del Cemento Chimborazo HE, ya que otorga al concreto endurecido una mayor capacidad para resistir la acción de los agentes ambientales y prolongar su vida útil. Su composición química y mineralógica, junto con la adición de puzolana, proporciona mayor resistencia a la compresión tanto a corto como a largo plazo, además de ofrecer un bajo calor de hidratación, alta resistencia a los sulfatos y una menor concentración de álcalis solubles, reduciendo el riesgo de reacciones expansivas.

Gracias a su capacidad para fijar el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación y a su baja permeabilidad, este cemento muestra una excelente resistencia a la acción de los sulfatos y otros agentes químicos agresivos, lo que lo hace adecuado para obras expuestas a ambientes corrosivos.

2.3.3.3 Beneficios en el Hormigón: Impermeabilidad y Control de Reacciones Álcali-Agregado

El Cemento Chimborazo HE contribuye significativamente a la impermeabilidad del concreto, ya que la reacción de los aluminatos de la puzolana con los hidróxidos de calcio reduce la porosidad capilar del hormigón. Esto resulta en una menor permeabilidad, lo que protege las estructuras de la corrosión de elementos metálicos, aumentando así su durabilidad.

Además, este cemento minimiza la reacción álcali-agregado, la cual puede generar fisuración y deterioro en el hormigón. La puzolana incorporada en su composición permite remover los álcalis presentes en la pasta de cemento antes de que puedan reaccionar con los agregados, evitando así problemas de expansión y fisuración. También reduce el calor de hidratación, lo que lo hace ideal para aplicaciones en climas cálidos y en estructuras masivas.

En la presente investigación experimental se utilizará Cemento Chimborazo Hidráulico de Alta Resistencia Inicial Tipo HE, conforme a la norma INEN 2380, como aglomerante en la fabricación de las mezclas de hormigón. Este cemento ha sido seleccionado debido a su desempeño en el desarrollo temprano de resistencia y su estabilidad en mezclas estructurales.

El estudio tiene como objetivo determinar el módulo de elasticidad del hormigón con una resistencia a la compresión de 300 kg/cm², incorporando material reciclado como reemplazo parcial del agregado fino. Se evaluarán distintas proporciones de sustitución y su impacto en las propiedades mecánicas del hormigón.

2.3.4 Áridos para Hormigón

Los áridos constituyen uno de los principales componentes del hormigón, desempeñando un papel fundamental en sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Su correcta selección y caracterización son esenciales para garantizar el rendimiento estructural y la longevidad del hormigón en diversas aplicaciones constructivas.

2.3.4.1 Definición y Clasificación de los Áridos

Según la norma ASTM C33/C33M-23, los áridos para hormigón se clasifican en áridos finos y gruesos, dependiendo del tamaño de sus partículas. Los áridos finos incluyen arenas naturales o manufacturadas que pasan por el tamiz No. 4 (4,75 mm), mientras que los áridos gruesos comprenden materiales con tamaños mayores a esta medida (ASTM International, 2023). Además, la norma especifica la granulometría y calidad requerida para su uso en hormigón estructural, estableciendo límites para impurezas, contenido de finos y resistencia a la degradación.

2.3.4.2 Propiedades Físicas y Químicas

El desempeño del hormigón está directamente influenciado por las características de los áridos. Entre las propiedades físicas relevantes se incluyen la distribución granulométrica, la

densidad aparente y la absorción de agua, que afectan la trabajabilidad y resistencia final de la mezcla. En términos químicos, la presencia de impurezas como arcillas, materia orgánica o sales solubles puede comprometer la adherencia entre la pasta de cemento y los áridos, reduciendo la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón (ASTM International, 2023).

2.3.4.3 Áridos Reciclados en el Hormigón

El uso de áridos reciclados en el hormigón ha cobrado importancia en la industria de la construcción debido a su impacto en la sostenibilidad y reducción de residuos. La ASTM C33/C33M-23 reconoce el uso de áridos reciclados, definidos como materiales granulados extraídos de residuos sólidos, los cuales pueden ser procesados para su reutilización en la fabricación de hormigón. Sin embargo, su aplicación requiere una evaluación rigurosa para asegurar que cumplan con los requisitos de calidad y resistencia exigidos para la construcción estructural (ASTM International, 2023).

2.3.5 Relación sobre el Agua en el Hormigón

El agua desempeña un papel fundamental en todo el proceso de fabricación, colocación y endurecimiento del hormigón, influenciando tanto sus propiedades mecánicas como su durabilidad a lo largo del tiempo (Del Valle Rodríguez, 1995). Su correcta dosificación y calidad son factores determinantes para alcanzar una mezcla óptima, asegurando una adecuada trabajabilidad y resistencia estructural.

La relación agua/cemento (A/C) es uno de los parámetros clave en la dosificación del hormigón, ya que incide directamente en la resistencia a la compresión y la durabilidad del material. Un exceso de agua puede reducir la resistencia final del hormigón al aumentar su porosidad, mientras que una cantidad insuficiente puede dificultar la hidratación completa del cemento, afectando su desarrollo estructural (Del Valle Rodríguez, 1995). La hidratación del cemento requiere aproximadamente un 25 % de su peso en agua para reaccionar

completamente, aunque en la práctica se emplea una mayor proporción para mejorar la trabajabilidad y compensar posibles pérdidas por evaporación.

Además, el agua utilizada en la mezcla debe cumplir ciertos requisitos de calidad para evitar problemas de corrosión en las armaduras del hormigón. Se recomienda el uso de agua potable o limpia, libre de impurezas orgánicas y con bajos niveles de sulfatos y cloruros, pues estos compuestos pueden generar fisuras y deterioro en el material (Del Valle Rodríguez, 1995).

Por otro lado, la fluencia y la retracción son fenómenos directamente relacionados con la presencia de agua en el hormigón. La fluencia se refiere a las deformaciones diferidas en el tiempo debido a la redistribución de cargas internas y la pérdida de humedad en la pasta de cemento, lo que puede afectar la estabilidad estructural a largo plazo. La retracción, en cambio, ocurre cuando el agua presente en los poros del hormigón se evapora, reduciendo su volumen y generando tensiones internas que pueden derivar en la formación de fisuras, especialmente en elementos de gran superficie expuesta (Del Valle Rodríguez, 1995).

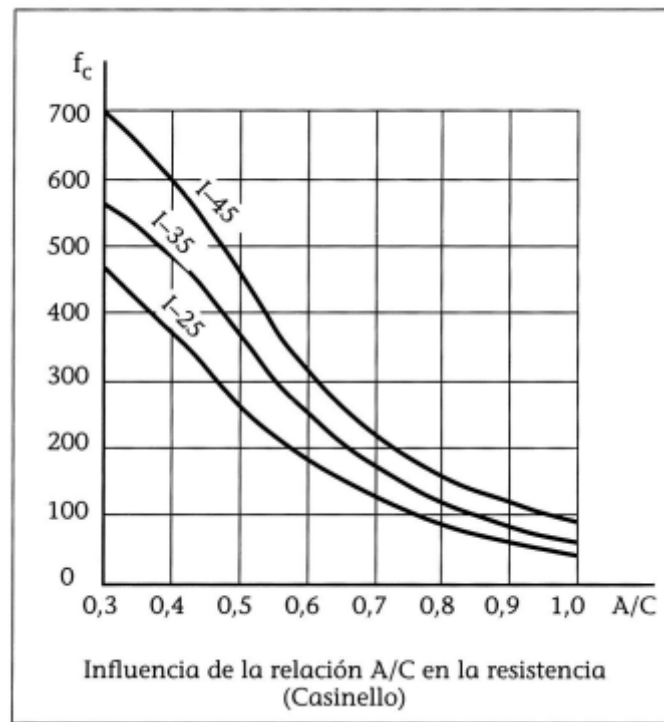
En el caso de las estructuras de hormigón armado, la corrosión de las armaduras es un problema crítico asociado a la presencia de agua y oxígeno en la mezcla. El contacto entre el acero y el agua con impurezas, como cloruros y sulfatos, favorece procesos electroquímicos que debilitan la estructura del material y pueden comprometer su seguridad (Del Valle Rodríguez, 1995). Para minimizar este riesgo, se recomienda mantener una adecuada relación A/C y garantizar una compactación eficiente del hormigón para reducir su permeabilidad.

En conclusión, como se observa en la Figura 2, el agua es un elemento fundamental en todas las etapas del hormigón, desde su mezclado hasta su endurecimiento y vida útil. Su cantidad y calidad deben ser controladas rigurosamente para garantizar un desempeño estructural óptimo, minimizando efectos adversos como la retracción, la fisuración y la corrosión de las armaduras.

Un manejo adecuado de la relación agua/cemento (A/C) y del proceso de curado es esencial para obtener un hormigón con alta resistencia, durabilidad y eficiencia a lo largo del tiempo.

Figura 2

Influencia de la relación A/C en la resistencia del hormigón.



Nota Fuente. Casinello, citado en (Del Valle Rodríguez, 1995, pág. 24).

2.3.6 Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad del hormigón es un parámetro fundamental en la ingeniería estructural, ya que permite predecir y gestionar la deformación de las estructuras bajo carga. Este parámetro mecánico está estrechamente relacionado con la resistencia a la compresión del material y es considerado un indicador clave de su comportamiento estructural.

Las normativas y estándares internacionales establecen una relación entre el módulo de elasticidad del hormigón y su resistencia a la compresión, formulando ecuaciones específicas para su cálculo y evaluación.

El valor del módulo de elasticidad del hormigón a una edad determinada está influenciado por diversos factores, como el tipo y cantidad de cemento utilizado en la mezcla, así como las propiedades de los áridos empleados como agregados. La proporción relativa de estos componentes tiene un impacto significativo en las propiedades mecánicas y en la respuesta estructural del hormigón (Alajeos Gutierrez & Cánov, 1994).

El módulo de elasticidad del hormigón se define como la capacidad del material para deformarse bajo carga y recuperar su forma original cuando la carga es retirada. Aunque en la teoría del hormigón armado se supone que el material es elástico, isotrópico y homogéneo, obedeciendo la Ley de Hooke, en la práctica estas condiciones no se cumplen de manera estricta. El comportamiento del hormigón depende de múltiples factores, como la magnitud de la carga aplicada, la velocidad de aplicación y el tiempo transcurrido antes de registrar las deformaciones (Shraddhu, s.f.).

Desde un punto de vista matemático, el módulo de elasticidad se expresa como la pendiente de la curva esfuerzo-deformación en la región elástica del material, tal como se muestra en la Ecuación 1.

Ecuación 1

Definición del Módulo de Elasticidad.

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

Donde:

$$E = \text{Modulo de elasticidad del material} \left(\frac{MPa}{\varepsilon} \right)$$

σ = Esfuerzo aplicado al material (MPa)

ε = Deformación unitaria (adimensional)

Esta propiedad mide la rigidez del hormigón y su resistencia a la deformación. En términos prácticos, el módulo de elasticidad es crucial para el diseño de estructuras de hormigón armado, ya que influye en el cálculo de deflexiones, distribución de esfuerzos y diseño de secciones estructurales. La precisión del diseño estructural depende en gran medida del valor del módulo de elasticidad del hormigón, dado que el módulo del acero es prácticamente constante y bien definido (Shraddhu, s.f.).

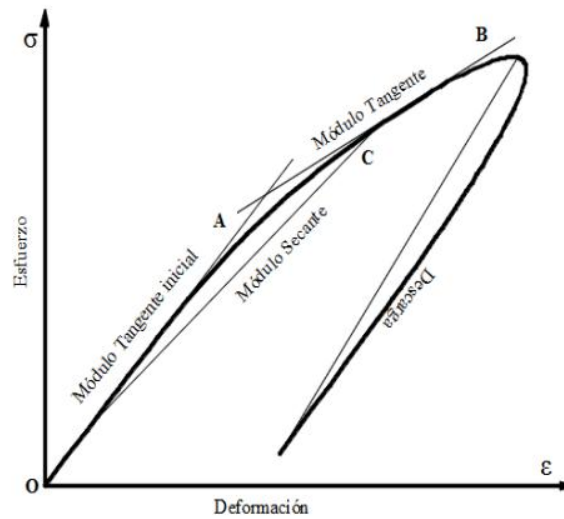
2.3.6.1 Tipos de Módulo de Elasticidad

La evaluación del módulo de elasticidad en compresión del hormigón se realiza a partir de la curva esfuerzo-deformación, siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM C469. Existen distintos métodos para su determinación, entre los cuales se incluyen el módulo tangente inicial, que se calcula a partir de la pendiente en el inicio de la curva, y el módulo tangente, obtenido en un punto específico de la relación esfuerzo-deformación. Además, se puede emplear el módulo secante, que se determina considerando la pendiente entre dos puntos de la curva experimental (Chele, 2019).

La Figura 3 ilustra una curva típica de esfuerzo-deformación del hormigón, en la que se pueden identificar los distintos tipos de módulo de elasticidad.

Figura 3

Típica curva de esfuerzo - deformación del hormigón.



Nota Fuente. (Chele, 2019, pág. 27).

2.3.6.2 Relación entre el Módulo de Elasticidad y la Resistencia del Hormigón

El módulo de elasticidad del hormigón está directamente relacionado con su resistencia a compresión. En general, hormigones de mayor resistencia presentan módulos de elasticidad más elevados. Una expresión empírica ampliamente utilizada para estimar el módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión se indica en la Ecuación 2.

Ecuación 2

Ecuación del Módulo de Elasticidad.

$$E = 15100 * \sqrt{f'c} \quad \frac{kg}{cm^2}$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a la compresión del Hormigón en unidades de $\frac{kg}{cm^2}$

2.3.6.3 Parámetros para la Determinación del Módulo de Elasticidad del Hormigón

El cálculo del módulo de elasticidad del hormigón requiere la consideración de diversos parámetros físicos y mecánicos del espécimen de prueba. Estos parámetros son esenciales para garantizar la precisión de los resultados obtenidos en los ensayos de compresión y reflejan las propiedades del material en su respuesta a cargas aplicadas.

2.3.6.3.1 Dimensiones y Masa del Cilindro

Para obtener una medición confiable del módulo de elasticidad, es necesario determinar con precisión la altura, el diámetro y la masa del cilindro de prueba. La altura se mide en tres puntos distintos del espécimen para obtener un promedio representativo, asegurando que el compresómetro se sitúe correctamente en los extremos del cilindro (Londoño & Terán, 2019).

El diámetro se obtiene promediando dos mediciones tomadas en secciones diferentes del cilindro. Este valor es clave para calcular el área transversal y determinar la resistencia a la compresión del material (Londoño & Terán, 2019).

Por otro lado, la masa del cilindro, expresada en gramos, permite calcular su densidad, lo cual es relevante para la caracterización del hormigón y su desempeño estructural (Londoño & Terán, 2019).

2.3.6.3.2 Altura del Compresómetro y Medición de Deformaciones

El compresómetro es un instrumento clave en la medición de deformaciones en los ensayos de compresión. Su altura se considera constante y se registra en milímetros, permitiendo relacionar la carga aplicada con la deformación unitaria del espécimen (Londoño & Terán, 2019).

Además, la deformación del cilindro se obtiene midiendo distancias perpendiculares desde el centro del cilindro hasta los extremos del soporte giratorio. Se registran dos valores fundamentales: E_r y E_g , los cuales permiten calcular la deformación total del espécimen a lo largo de la longitud efectiva del compresómetro (Londoño & Terán , 2019).

2.3.6.3.3 Patrón de Falla del Hormigón Bajo Carga

El análisis del tipo de falla que presenta un cilindro de hormigón al someterse a carga de compresión permite evaluar su comportamiento mecánico. En condiciones óptimas de fabricación y curado, se espera que la fractura se produzca de forma vertical y uniforme. Sin embargo, pueden presentarse distintos patrones de fisuración que reflejan deficiencias en la mezcla, en la compactación o en el proceso de curado como se muestra en la figura 4 (Londoño & Terán , 2019).

Figura 4

Patrones Típicos de Falla en Cilindros de Hormigón

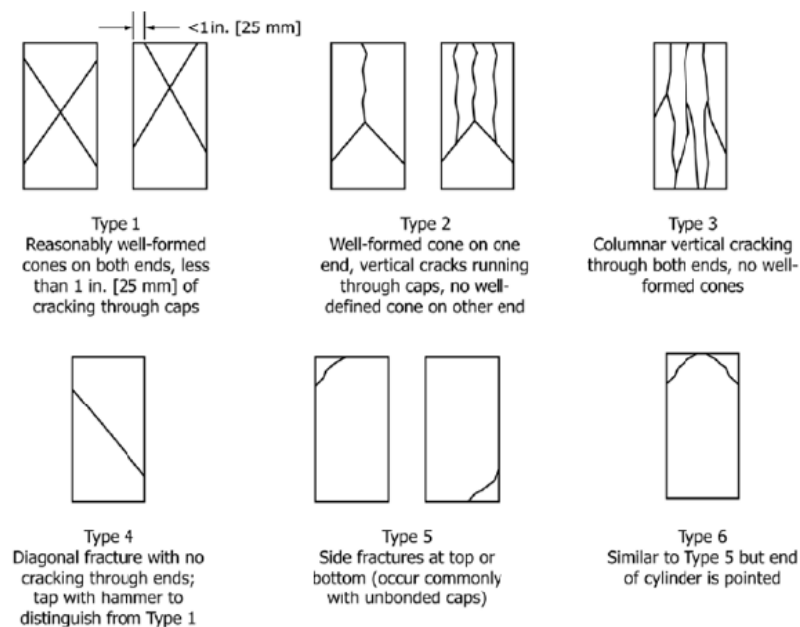


FIG. 2 Schematic of Typical Fracture Patterns

Nota Fuente. Tomado de (Londoño & Terán , 2019), quienes a su vez adaptaron la imagen de American Society for Testing and Materials (ASTM, 2017).

Desplazamientos considerados en el Ensayo

- Desplazamiento total (d): Representa la deformación completa del espécimen bajo carga. Se mide desde la base, hasta la altura total del cilindro.
- Desplazamiento por rotación del dispositivo de apriete (r): Corresponde a la deformación inducida por el giro de los soportes de la máquina de ensayo, que puede afectar la medición real de la deformación unitaria.
- Lectura del deformímetro (g): Es el valor obtenido del instrumento de medición que se utiliza para cuantificar la deformación del cilindro.

Longitudes de Medición en la Zona de Deformación

- E_g y E_r : Representan los desplazamientos medidos en puntos específicos del cilindro a lo largo de la longitud efectiva del deformímetro.
- E_g : Corresponde a la distancia desde el punto “a” hasta el punto “b”.
- E_r : Distancia desde el punto “b” hasta el punto “c”.

3 CAPÍTULO III

3.1 Propiedades Físicas y Mecánicas de los Agregados

La evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de los áridos es esencial en la industria de la construcción, ya que su calidad influye en el desempeño estructural del hormigón. Para estandarizar estos procedimientos, Ecuador cuenta con una serie de normas técnicas que regulan los ensayos de caracterización de los agregados, asegurando su idoneidad para distintas aplicaciones en ingeniería civil.

Entre los aspectos evaluados se encuentran la granulometría, la densidad, la absorción de agua, la presencia de impurezas orgánicas y la resistencia a la degradación. Estas pruebas permiten garantizar que los materiales cumplan con los requisitos de resistencia y durabilidad exigidos en el diseño de estructuras. La siguiente tabla presenta las normativas ecuatorianas aplicadas en los ensayos de caracterización de áridos, diferenciando entre agregado fino y grueso, junto con la referencia normativa correspondiente.

Tabla 1

Normas Técnicas Ecuatorianas (NTE INEN) para Ensayos de Caracterización de Áridos

N.-	Informe de ensayo	Tipo de árido	Norma
1	Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigones	Agregado fino	NTE INEN 855:2010
2	Áridos. análisis granulométrico en el árido fino	Agregado fino	NTE INEN 696:2011
3	Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino	Agregado fino	NTE INEN 856:2010
4	Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico), en árido fino	Agregado fino	NTE INEN 858:2010
5	Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm usando la máquina de los ángeles	Agregado grueso	NTE INEN 860:2011
6	Análisis granulométrico en el árido grueso.	Agregado grueso	NTE INEN 696:2011
7	Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso	Agregado grueso	NTE INEN 857:2010

Nota Fuente. Propia 2025.

3.2 Ensayo de los Agregados

3.2.1 *Determinación de las Impurezas Orgánicas en el Árido Fino para Hormigones*

Para evaluar la presencia de impurezas orgánicas en una muestra de árido fino, se incorpora una solución estandarizada de hidróxido de sodio. Posteriormente, la mezcla se agita y se deja en reposo durante un período de 24 horas. Transcurrido este tiempo, se realiza la comparación del color del líquido sobrenadante con el de una solución de referencia o mediante un comparador de colores, con el fin de determinar si el material analizado contiene niveles inadecuados de impurezas orgánicas (Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2010).

El presente ensayo tiene como finalidad determinar la presencia de impurezas orgánicas en una muestra de árido fino destinado para la producción de hormigón, siguiendo la metodología establecida en la norma NTE INEN 855:2010. La muestra evaluada corresponde a un agregado fino proveniente de la Mina San Pablo el Grande, ubicada en la parroquia San Antonio de Pichincha, en el sector Tanlahua. Este análisis es parte del estudio para la obtención de la ecuación del módulo de elasticidad del hormigón de alta resistencia con $f_c = 300 \text{ kg/cm}^2$, utilizando material reciclado y cemento Chimborazo, la fecha del muestro es el 10 de septiembre del 2024.

3.2.1.1 Procedimiento Experimental

- Preparación de la muestra: Se vertió la muestra de árido fino en un recipiente de vidrio hasta alcanzar un volumen aproximado de 130 cm^3 .
- Adición de la solución reactiva: Se incorporó una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 3%, hasta completar un volumen total de 200 cm^3 después de la agitación.
- Mezclado y reposo: Se agitó vigorosamente la muestra con la solución y se dejó en reposo durante 24 horas para permitir la reacción con posibles impurezas orgánicas presentes en los áridos.

- Comparación del color: Luego del tiempo de reposo, se comparó el color del líquido sobrenadante con un comparador de colores normalizados (No. 815 Hellige Tester, ASTM C40), el cual permite clasificar la presencia de impurezas en función de la tonalidad observada.

Tras la comparación del color con la escala estándar, se determinó que el líquido presentó una tonalidad equivalente al número 1 del comparador de colores, como se visualiza en la figura 6, lo que indica una baja presencia de impurezas orgánicas en la muestra. De acuerdo con la norma NTE INEN 855:2010, este resultado permite concluir que el árido fino es apto para su uso en la producción de mortero y hormigón, sin riesgo de afectar negativamente las propiedades mecánicas de la mezcla.

Figura 6

Comparación del color del líquido sobrenadante con el comparador de colores normalizados



Nota Fuente. Propia 2025.

3.2.2 Análisis Granulométrico en el Árido Fino

El análisis granulométrico del árido fino es un procedimiento esencial en la caracterización de los materiales utilizados en la producción de hormigón. Este ensayo permite determinar la distribución del tamaño de las partículas mediante el tamizado del material a través de una serie de tamices normalizados, lo que proporciona información sobre su gradación y adecuación para su uso en mezclas de hormigón. La correcta distribución granulométrica de los áridos es fundamental para garantizar una adecuada trabajabilidad, resistencia y durabilidad del hormigón (Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2011).

El objetivo de este ensayo es evaluar la distribución granulométrica del árido fino obtenido de la Mina San Pablo el Grande, ubicada en la parroquia San Antonio de Pichincha, con el fin de verificar su cumplimiento con los límites especificados en la norma NTE INEN 696:2011.

3.2.2.1 Procedimiento Experimental

El análisis granulométrico se realizó siguiendo la metodología establecida en la norma NTE INEN 696:2011 (ASTM C136/C136M), utilizando tamices de diferente abertura para determinar la cantidad de material retenido en cada uno de ellos. El procedimiento consistió en los siguientes pasos:

- Preparación de la muestra: Se secó la muestra de árido fino hasta alcanzar una condición de masa constante.
- Tamizado: La muestra se pasó a través de una serie de tamices normalizados con aberturas de diferentes tamaños (No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50, No. 100 y No. 200).
- Pesaje del material retenido: Se determinó la cantidad de material retenido en cada tamiz y se calculó el porcentaje de material pasante.

La Tabla 2 presenta los resultados obtenidos en el ensayo, donde se observan los valores de masa retenida y el porcentaje acumulado de material retenido y pasante en cada tamiz.

Tabla 2

Resultados del Análisis Granulométrico del Árido Fino según la Norma NTE INEN 696:2011

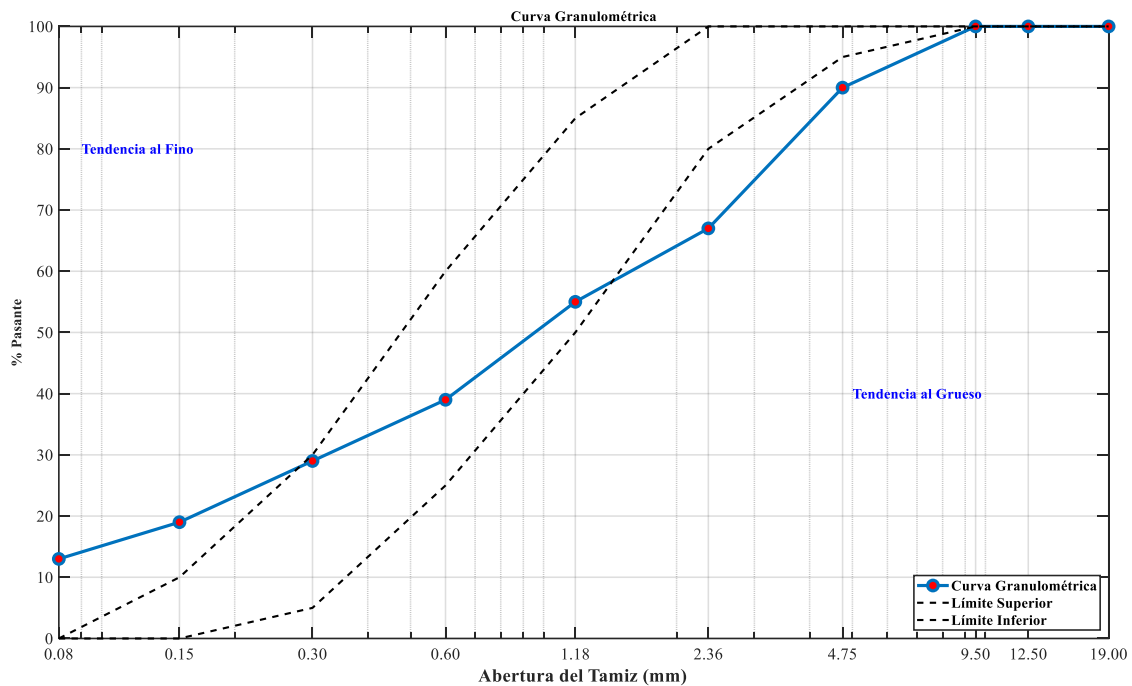
Masa Inicial		725.85 gr				
Tamiz ASTM	Abertura	Masa Retenida		% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado	Limites Especificados
		Parcial	Acumulada			
19.00 mm	3/4 in	0.00 gr	0.00 gr	0 %	100 %	
12.50 mm	1/2 in	0.00 gr	0.00 gr	0 %	100 %	
9.50 mm	3/8 in	0.00 gr	0.00 gr	0 %	100 %	100 % a 100 %
4.75 mm	# 4.00	69.51 gr	69.51 gr	10 %	90 %	95 % a 100 %
2.36 mm	# 8.00	173.31 gr	242.82 gr	33 %	67 %	80% a 100 %
1.18 mm	# 16.00	83.35 gr	326.17 gr	45 %	55 %	50% a 85%
0.60 mm	# 30.00	114.49 gr	440.66 gr	61 %	39 %	25% a 60%
0.30 mm	# 50.00	74.19 gr	514.85 gr	71 %	29 %	5% a 30 %
0.15 mm	# 100.00	72.31 gr	587.16 gr	81 %	19 %	0% a 10%
0.08 mm	# 200.00	45.42 gr	632.58 gr	87 %	13 %	
	Bandeja	91.73 gr	724.31 gr	100 %	0 %	

Nota Fuente. Propia 2025.

La Figura 7 muestra la curva granulométrica obtenida a partir de los datos experimentales, indicando la tendencia del árido a ser más fino o grueso en comparación con los límites establecidos por la norma.

Figura 7

Curva Granulométrica del Árido Fino



Nota Fuente. Propia 2025.

3.2.2.2 Cálculo del módulo de finura Árido Fino

Se sumaron los porcentajes acumulados de material retenido en los tamices especificados y el resultado se dividió por 100.

Ecuación 3

Formula General Módulo de Finura Árido Fino

$$MF = \frac{\sum \% \text{ retenido acumulado}(6''+3'' + 11/2''' + 3/4''' + 3/8''' + \#4 + \#8 + \#16 + \#30 + \#50 + \#100)}{100}$$

$$MF = 3.004$$

3.2.3 Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino

Uno de los aspectos clave en esta evaluación es la determinación de la densidad, gravedad específica y absorción, lo cual permite comprender el comportamiento del material en términos de su capacidad de retención de agua y su compactibilidad dentro de la mezcla. (Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2010).

El objetivo de este ensayo es determinar la densidad aparente, la gravedad específica (densidad relativa) y la absorción del árido fino proveniente de la Mina San Pablo el Grande, ubicada en la parroquia San Antonio de Pichincha. Estos parámetros serán utilizados en el diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia ($f'c = 300 \text{ kg/cm}^2$).

3.2.3.1 Procedimiento Experimental

El ensayo se llevó a cabo en base a la NTE INEN 856:2010, la cual establece el método para la determinación de la densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino.

- **Preparación de la Muestra:**

Se secó la muestra de árido fino en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta masa constante.

Se enfrió a temperatura ambiente antes de iniciar el ensayo.

- **Determinación de la Gravedad Específica en Estado SSS (Saturado y Superficialmente Seco):**

Se utilizó un picnómetro para medir la densidad relativa del árido en estado SSS.

Se pesó el árido en este estado y luego se midió su volumen desplazado en agua.

- **Determinación de la Absorción:**

Se determinó la masa del árido seco después de 24 horas de inmersión en agua.

Se comparó con la masa en estado SSS para obtener la capacidad de absorción del material.

La Tabla 3 presenta los valores obtenidos en el ensayo.

Tabla 3

Resultados del Ensayo de Densidad Relativa y Capacidad de Absorción del Árido Fino

Densidad Relativa		
1	Masa del Picnómetro	194.00 gr
2	Masa del Picnómetro + Árido en estado "SSS"	755.30 gr
3	Masa del Picnómetro + Árido en estado "SSS" + Agua	1030.60 gr
4	Masa del Picnómetro Calibrado	690.00 gr
5	Masa del Árido en estado "SSS"	561.30 gr
6	Volumen Desalojado	220.70 cm ³
7	Densidad Relativa (Gravedad Específica) (SSS)	2.50 gr/cm ³
Capacidad de Absorción		
8	Masa del Recipiente	192.30 gr
9	Masa del Recipiente + Árido en Estado "SSS"	982.70 gr
10	Masa del Recipiente + Árido en Estado "Seco"	951.30 gr
11	Masa del Agua	31.40 gr
12	Masa de la Arena Seca	759.10 gr
13	Capacidad de Absorción	4.10 %

Nota Fuente. Propia 2025.

3.2.3.2 Capacidad de Absorción

La capacidad de absorción de un árido fino representa el porcentaje de agua que el material es capaz de retener en relación con su peso seco.

Según la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 856:2010, la capacidad de absorción se determina mediante la siguiente ecuación 4:

Ecuación 4

Cálculo de la Capacidad de Absorción Árido Fino

$$Absorción = \frac{S - A}{A} * 100$$

$$Absorción = \frac{790.4gr - 759.10gr}{759.10gr} * 100$$

$$\text{Absorción} = 4.1\%$$

Donde:

S = Masa del árido en estado Saturado y Superficialmente Seco (SSS).

A = Masa del Árido Seco

Un valor de 4.1% indica que el árido fino absorbe 4.1 g de agua por cada 100 g de árido seco.

3.2.4 Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico), en árido fino

En este ensayo se determina la densidad aparente en condición suelta y compactada del árido fino proveniente de la Mina San Pablo el Grande, para posteriormente calcular la dosificación de materiales en la mezcla de hormigón.

3.2.4.1 Procedimiento Experimental

El ensayo consistió en la determinación de la masa unitaria del árido fino bajo dos condiciones:

- Condición Suelta: El árido se vierte en el recipiente sin compactación.
- Condición Compactada: El árido se compacta en capas, aplicando golpes controlados para reducir el volumen de vacíos.

Pasos del Ensayo

- Se pesó el recipiente vacío.
- Se llenó el recipiente con árido en estado suelto, determinando su masa.
- Se compactó el árido dentro del recipiente y se midió nuevamente su masa.
- Se calcularon las densidades aparentes en ambas condiciones.

Los valores obtenidos en el laboratorio se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4

Densidad Aparente en Condición Suelta y Compactada

Condición Suelta			
No. Ensayo	1	2	3
Masa del Recipiente		2.60 kg	
Volumen del Recipiente		0.002900 m ³	
Masa del árido suelo + masa del recipiente	7.25 kg	7.25 kg	7.25 kg
Masa del árido suelto	4.65 kg	4.65 kg	4.65 kg
Masa promedio del árido suelto		4.65 kg	
Condición compactada			
Masa del Recipiente		2.60 kg	
Masa del árido compactado + masa del recipiente	7.25 kg	7.25 kg	7.25 kg
Masa del árido compactado	5.05 kg	5.05 kg	5.05 kg
Masa promedio del árido compactado		5.05 kg	

Nota Fuente. Propia 2025.

3.2.4.2 Cálculo de la Densidad Aparente

La densidad aparente (masa unitaria) del árido fino se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 5

Cálculo de la Densidad Aparente

$$M = (G - T)/V$$

Donde:

M = Masa unitaria (peso volumétrico) del árido, kg/m³

G = Masa del árido más el molde, kg

T = Masa del Molde, kg

V = Volumen del molde, m³

Aplicando los valores obtenidos:

Ecuación 6

Cálculo de la Densidad Aparente Suelta

$$M = ((7.25 \text{ kg} - 2.60 \text{ kg})) / 0.002900 \text{ m}^3$$

$$M = 1600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Ecuación 7

Cálculo de la Densidad Aparente Compactada

$$M = ((7.65 \text{ kg} - 2.60 \text{ kg})) / 0.002900 \text{ m}^3$$

$$M = 1740 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.2.1 *Análisis granulométrico en el árido grueso*

Este ensayo se realizó conforme a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 696:2011 (ASTM C136/C136M), la cual establece los métodos para la determinación de la granulometría en áridos finos y gruesos.

El propósito del ensayo es evaluar la gradación del árido fino y grueso proveniente de la Mina San Pablo el Grande, con el fin de verificar su cumplimiento con los límites normativos.

3.2.1.1 Procedimiento Experimental

El ensayo se llevó a cabo bajo las siguientes condiciones:

Preparación de la muestra:

- Se tomó una cantidad representativa de árido fino y grueso.
- Se secó en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta alcanzar masa constante.

Tamizado de la muestra:

- Se utilizaron tamices normalizados con aberturas específicas para árido fino y grueso.
- Se determinó la cantidad de material retenido en cada tamiz.

Cálculo de la granulometría:

- Se calcularon los porcentajes retenidos y pasantes acumulados.
- Se determinó el Módulo de Finura (MF) para el árido fino.
- Se calculó el Coeficiente de Uniformidad (CU) para el árido grueso.

La Tabla 5 presenta los resultados obtenidos en el ensayo, donde se observan los valores de masa retenida y el porcentaje acumulado de material retenido y pasante en cada tamiz.

Tabla 5

Resultados del Análisis Granulométrico del Árido Grueso

Masa Inicial		18405.00 gr				
Tamiz ASTM	Abertura	Masa Retenida		% Retenido Acumulado	% Pasante Acumulado	Limites Especificados
		Parcial	Acumulada			
100.00 mm	4 in	0.00 gr	0.00 gr	0 %	100 %	-
90.00 mm	3 1/2 in	0.00 gr	0.00 gr	0 %	100 %	-
75.00 mm	3 in	0.00 gr	0.00 gr	0 %	100 %	-
63.00 mm	2 1/2 in	0.00 gr	0.00 gr	0 %	100 %	-
50.00 mm	2 in	0.00 gr	0.00 gr	0 %	100 %	-
37.50 mm	1 1/2 in	0.00 gr	0.00 gr	0 %	100 %	100%
25.00 mm	1 in	1510.00 gr	1510.00 gr	8 %	92 %	95 % - 100 %
19.00 mm	3/4 in	3440.00 gr	4950.00 gr	27 %	73 %	-
12.50 mm	1/2 in	3950.00 gr	8900.00 gr	48 %	52 %	25 % a 60 %
9.50 mm	3/8 in	2535.00 gr	11435.00 gr	62 %	38 %	-
4.75 mm	No. 4	4060.00 gr	15495.00 gr	84 %	16 %	0 % a 10 %
2.36 mm	No. 8	1375.00 gr	16870.00 gr	92 %	8 %	0 % a 5 %
1.18 mm	No. 16	425.00 gr	17295.00 gr	94 %	6 %	-
0.30 mm	No. 50	615.00 gr	17910.00 gr	97 %	3 %	-
Bandeja		495.00 gr	18405.00 gr	100 %	0 %	

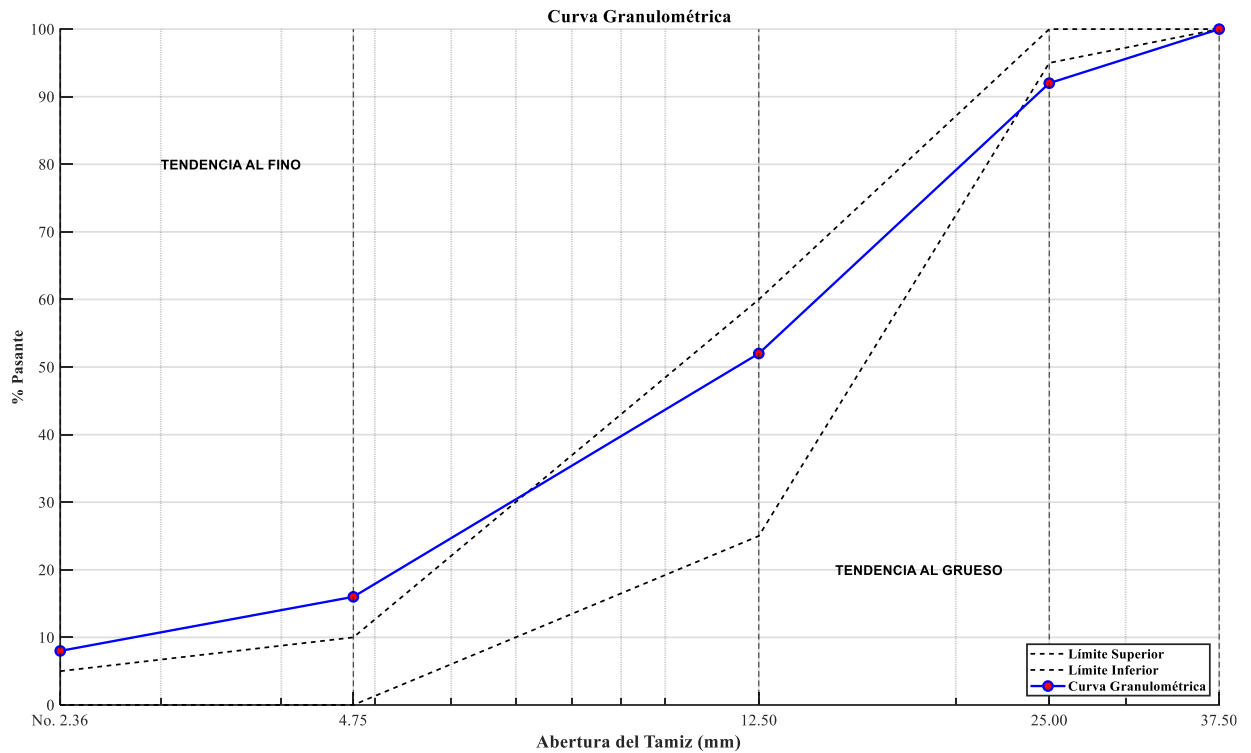
Nota Fuente. Propia 2025.

La figura 8 muestra la curva granulométrica del árido grueso obtenido en el ensayo de tamizado. Se representa el porcentaje pasante acumulado en función del tamaño del tamiz.

Las líneas punteadas corresponden a los límites superior e inferior establecidos por la norma, dentro de los cuales debe ubicarse la curva para cumplir con una granulometría adecuada.

Figura 8

Curva Granulométrica del Árido Grueso



Nota Fuente. Propia 2025.

3.2.1.1 Cálculo del módulo de finura Árido Grueso

Se sumaron los porcentajes acumulados de material retenido en los tamices especificados y el resultado se dividió por 100.

Ecuación 8

Formula General Módulo de Finura Árido Grueso

$$MF = \frac{\sum \% \text{ retenido acumulado} (6" + 3" + 11/2" + 3/4" + 3/8" + \#4 + \#8 + \#16 + \#30 + \#50 + \#100)}{100}$$

$$MF = 5.60$$

La tabla 6 presenta las principales características del árido grueso evaluado en el ensayo granulométrico.

Tabla 6

Características del Árido Grueso

Tamaño Máximo	Tamaño Nominal Máximo	Número de Tamaño	Tamaño Nominal	Módulo de Finura
1 1/2 in	1 in	57	De 25.0 a 4.75	5.6

Nota Fuente. Propia 2025.

3.2.2 Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm usando la máquina de los ángeles

El ensayo se realizó conforme a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 860:2011, la cual establece el procedimiento para determinar la resistencia a la degradación de los áridos gruesos de tamaño nominal menor a 37.5 mm.

Se evalúa la resistencia mecánica y durabilidad del árido grueso proveniente de la Mina San Pablo el Grande, mediante la determinación de su pérdida de masa después de ser sometido a impactos y fricción en la máquina de los Ángeles.

3.2.2.1 Procedimiento Experimental

El ensayo consistió en los siguientes pasos:

- Preparación de la muestra: Se seleccionó una cantidad representativa de árido grueso con un tamaño máximo nominal de 1" (25.4 mm).
- Carga del tambor: Se introdujeron 5005 g de árido en la máquina de Los Ángeles junto con una carga de esferas de acero.

Aplicación de ciclos de desgaste:

- Se realizaron dos pruebas: 100 revoluciones y 500 revoluciones.

- Después de cada ciclo, se retiró la muestra y se tamizó a través de un tamiz No. 12 (1.7 mm).
- Medición de la degradación: Se pesó la fracción de árida retenida en el tamiz y se calculó el porcentaje de degradación.

Tabla 7

Resultados del Ensayo de Degradación del Árido Grueso mediante la Máquina de Los Ángeles

Datos del Ensayo		
1	Tamaño máximo nominal del Árido (Del ensayo de granulometría)	1.00 in
2	Designación de la gradación utilizada para el ensayo	A
3	Masa inicial de la muestra	5005.00 gr
4	Masa de la muestra retenida Tamiz No. 12 (100 rev)	4375.00 gr
5	Masa de la muestra retenida Tamiz No. 12 (500 rev)	2580.00 gr
6	Masa de la muestra perdida después de 100 rev	630.00 gr
7	Masa de la muestra perdida después de 500 rev	2425.00 gr

Nota Fuente. Propia 2025.

3.2.2.2 Cálculo de Porcentaje de Degradación

La resistencia a la degradación del árido grueso se evalúa mediante el ensayo de abrasión en la Máquina de Los Ángeles, siguiendo la metodología establecida en la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 860:2011, y se calcula como:

Ecuación 9

Cálculo del Porcentaje de Degradación

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

Donde:

D = Valor de la degradación en porcentaje (%)

B = Masa inicial de la muestra de ensayo

C = Masa de la muestra retenida en el tamiz de 1.70 mm, después del ensayo

Aplicando la fórmula en los datos experimentales se obtiene:

- Para 100 revoluciones

$$D = \frac{5005.00 \text{ gr} - 4375.00 \text{ gr}}{5005.00 \text{ gr}} * 100$$

$$D = 13 \%$$

- Para 500 revoluciones

$$D = \frac{5005.00 \text{ gr} - 2580.00 \text{ gr}}{5005.00 \text{ gr}} * 100$$

$$D = 49 \%$$

3.2.3 Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso

Este ensayo se realizó conforme a los procedimientos establecidos en la Norma ASTM C127-15 y la NTE INEN 857:2010, que regulan la determinación de estas propiedades en áridos gruesos mediante el método de pesado en estado seco, saturado-superficialmente seco (SSS) y sumergido en agua (ASTM, 2015; INEN, 2010).

3.2.3.1 Procedimiento Experimental

El ensayo se llevó a cabo siguiendo los siguientes pasos:

Preparación de la muestra

- Se seleccionó una muestra representativa de árido grueso y se secó en un horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ hasta alcanzar masa constante.
- Posteriormente, se dejó en remojo durante 24 horas para garantizar la saturación total de los poros.

Determinación de la masa en diferentes condiciones

- Se pesó la muestra en su estado saturado-superficialmente seco (SSS).
- Se midió la masa sumergida en agua.
- Finalmente, la muestra se secó al horno nuevamente y se determinó su masa en estado seco.

Cálculo de la densidad, densidad relativa y absorción

- Se aplicaron las ecuaciones establecidas en la norma ASTM C127-15 para obtener los valores de densidad y absorción del árido.

Los valores obtenidos en el ensayo se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8

Resultados de Densidad y Absorción del Árido Grueso

		Densidad
1	Masa de la Bandeja	408.50 gr
2	Masa de la Bandeja + Árido en estado SSS	4461.00 gr
3	Masa de la canastilla sumergida en agua	695.00 gr
4	Masa de la canastilla + Árido en estado "SSS" (Sumergido)	3117.50 gr
5	Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca "SSS"	4052.50 gr
6	Masa aparente en agua de la muestra saturada	2422.50 gr
7	Volumen desalojado	1630.00 gr
8	Densidad "SSS"	2480.00 kg/m ³
		Capacidad de Absorción
9	Masa de la bandeja + Árido en estado Seco	4299.00 gr
10	Masa del Árido Seco	3890.50 gr
11	Capacidad de Absorción	4.20 %

Nota Fuente. Propia 2025.

3.2.3.2 Cálculo de la Capacidad de Absorción

La capacidad de absorción se calcula mediante la siguiente ecuación (Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN), 2010):

Ecuación 10

Cálculo de la Capacidad de Absorción Árido Grueso

$$Absorción = \frac{S - A}{A} * 100$$

$$Absorción = \frac{4052.50gr - 3890.50gr}{3890.50gr} * 100$$

$$Absorción = 4.20\%$$

Donde:

S = Masa en estado SSS.

A = Masa en estado seco.

Este valor indica el porcentaje de agua que el árido grueso puede retener en sus poros después de haber sido saturado.

3.3 Dosificación Método ACI

3.3.1 Antecedentes Históricos

Según el American Concrete Institute (ACI) (2022), la posibilidad de modificar las propiedades del concreto en función de los requerimientos de un proyecto ha sido resultado de avances tecnológicos a lo largo del tiempo. A inicios del siglo XX, se comenzaron a desarrollar métodos para mejorar la resistencia y durabilidad del material. En 1918, se estableció la relación agua/cemento (w/c) como un factor determinante para estimar la resistencia del concreto. Posteriormente, en la década de 1940, la incorporación de aire se reconoció como una estrategia clave para mejorar la durabilidad del concreto en diversas condiciones ambientales.

A lo largo del siglo XX, la investigación sobre aditivos permitió innovaciones adicionales. Entre 1920 y 1939, se desarrollaron y patentaron los aditivos reductores de agua, inicialmente en Europa en 1932 y posteriormente en Estados Unidos en 1939. Sin embargo, no fue hasta la década de 1970 que su uso se generalizó, optimizando la trabajabilidad del concreto y permitiendo ajustes más precisos en su dosificación.

En años recientes, se ha identificado que la incorporación de subproductos industriales en las mezclas de concreto contribuye significativamente a la mejora de sus propiedades. Estos materiales, conocidos como materiales cementantes suplementarios (SCM), no solo han permitido el refinamiento de las características mecánicas y de durabilidad del concreto, sino que también han influido en la sostenibilidad ambiental, reduciendo el impacto de la producción de cemento y promoviendo el uso eficiente de recursos.

Actualmente, la práctica moderna en la producción de concreto considera la inclusión de aditivos químicos, SCM o ambos, dado que estos componentes han demostrado ser

fundamentales en la optimización del rendimiento del material en distintas aplicaciones estructurales (American Concrete Institute (ACI), 2022).

3.3.2 *Dosificación al Peso*

La dosificación al peso es un método ampliamente utilizado en el diseño de mezclas de hormigón debido a su precisión. En el presente trabajo, se ha empleado este método para obtener un hormigón con una resistencia de 300 kg/cm², utilizando áridos de la Mina San Pablo el Grande. Posteriormente, se efectuó la sustitución parcial del árido fino en proporciones del 4%, 8% y 12%, respectivamente.

3.3.3 *Resistencia de la compresión promedio*

En la presente investigación, se ha considerado una resistencia a la compresión especificada ($f'c$) 300 kg/cm². Para determinar la resistencia a la compresión promedio requerida ($f'cr$), se emplea la Tabla 9, la cual establece valores en función del rango de resistencia especificada. Según esta tabla, para un $f'c$ comprendido entre 210 y 350 kg/cm², el incremento correspondiente es de 84 kg/cm², lo que da como resultado una resistencia requerida de 384 kg/cm².

Tabla 9

Resistencia a la compresión promedio

$f'c$ (kg/cm ²)	$f'cr$ (kg/cm ²)
Menos de 210	$f'c+70$
De 210 a 350	$f'c+84$
Sobre 350	$f'c+98$

Nota Fuente. Adaptado de (American Concrete Institute (ACI), 2022).

3.3.4 *Asentamiento*

El asentamiento, también denominado slump, es un parámetro que permite evaluar la consistencia del hormigón, mortero o estuco en estado fresco. Se determina midiendo la reducción en altura de la muestra después de retirar el cono de Abrams o cono de asentamiento,

proporcionando así una indicación de su trabajabilidad (American Concrete Institute (ACI), 2022).

La tabla 9 presenta los rangos típicos de asentamiento (slump) en hormigón sin aditivos reductores de agua, en función del tipo de construcción en el que será empleado. Se establecen valores mínimos y máximos de asentamiento tanto en pulgadas como en milímetros, para la presente investigación se establece un asentamiento de 80 mm, siendo este un valor general para hormigones de alta resistencia.

Tabla 10

Rangos típicos de asentamiento para hormigón sin aditivos reductores de agua en distintos tipos de construcción

Tabla 5.3.1 (American Concrete Institute (ACI), 2022)				
Rango típico de asentamiento				Tipo de construcción
Mínimo (pulgadas)	Máximo (pulgadas)	Mínimo (mm)	Máximo (mm)	
1.00 in	4.00 in	25.40 mm	101.60 mm	Hormigón colocado con encofrado deslizante (Slipformed)
2.00 in	4.00 in	50.80 mm	101.60 mm	Hormigón masivo (Mass concrete)
2.00 in	5.00 in	50.80 mm	127.00 mm	Pavimentos y losas, cimentaciones simples, cajones, estructuras subterráneas, muros de cimentación y zapatas reforzadas
5.00 in	5.00 in	127.00 mm	127.00 mm	Vigas, columnas de hormigón armado y edificios de varias plantas

Nota Fuente. Adaptado de (American Concrete Institute (ACI), 2022).

3.3.5 Agua Neta y Contenido de Aire

La Tabla 10 presenta el contenido aproximado de agua de mezclado y la cantidad de aire atrapado en hormigón sin aire incorporado, en función de distintos rangos de asentamiento y tamaños nominales máximos de agregados. Estos valores son fundamentales en el diseño de mezclas de hormigón, ya que influyen directamente en su trabajabilidad, resistencia y durabilidad.

En la presente investigación, se emplea un asentamiento de 80 mm, el cual, según la Tabla 10, corresponde al rango de 3 a 4 pulgadas. Dado que la caracterización granulométrica del material utilizado determina un tamaño nominal del agregado de 1 pulgada, se selecciona un contenido aproximado de agua de 325 lb/yd³. Para su aplicación en el diseño de la mezcla, este valor se convierte a unidades del Sistema Internacional, obteniendo 193 kg/m³, garantizando así una correcta dosificación del agua en la mezcla de hormigón.

Tabla 11

Contenido aproximado de agua de mezclado y aire para diferentes asentamientos en hormigón sin aditivos reductores de agua y tamaños nominales máximos de los agregados

Agua del hormigón para los tamaños nominales máximos indicados de agregados, lb/yd ³							
Asentamiento en pulgadas	3/8	1/2	3/4	1	1-1/2	2	3
Hormigón sin aire incorporado							
1 a 2	350	335	315	300	275	260	220
3 a 4	385	365	340	325	300	285	245
5 a 6	400	375	350	330	305	290	255
6 a 7	410	385	360	340	315	300	270
Mas de 7	-	-	2	-	-	-	-
Contenido aproximado de aire atrapado en hormigón sin aire incorporado, %	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3
Hormigón con aire incorporado							
1 a 2	305	295	280	270	250	240	205
3 a 4	340	325	305	295	275	265	225
5 a 6	355	335	315	300	280	270	240
6 a 7	365	345	325	310	290	280	260
Mas de 7	-	-	-	-	-	-	-
Aire total requerido, %							
Clase de exposición F I	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5
Clase de exposición F 2 y F3	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5

Nota Fuente. Adaptado de (American Concrete Institute (ACI), 2022).

Asimismo, se selecciona un contenido aproximado de aire atrapado del 1.5% en hormigón sin aire incorporado.

3.3.6 Relación Agua Cemento

La relación agua/cemento (w/c) es un parámetro fundamental en el diseño de mezclas de hormigón, ya que influye directamente en su resistencia a compresión, durabilidad y trabajabilidad. En la Tabla 11, se presentan los valores de w/c correspondientes a diferentes resistencias a compresión a los 28 días, tanto para hormigón sin aire incorporado como con aire incorporado.

Tabla 12

Relación entre la relación agua/cemento (w/cm) y la resistencia a compresión del hormigón

Relación agua / cemento en peso			
Resistencia a compresión a 28 días (psi)		Hormigón sin aire incorporado (w/cm, por peso)	Hormigón con aire incorporado (w/cm, por peso)
Resistencia a compresión a 28 días (psi)	Resistencia a compresión a 28 días kg/cm ²		
7000	492.17	0.34	<0.33
6000	421.86	0.41	0.37
5000	351.55	0.48	0.4
4000	281.24	0.57	0.48
3000	210.93	0.68	0.58
2000	140.62	0.82	0.72

Nota Fuente. Adaptado de (American Concrete Institute (ACI), 2022).

Dado que en la presente investigación se busca alcanzar una resistencia a compresión de 384 kg/cm² (\approx 5462 psi), es necesario determinar la relación agua/cemento correspondiente. Sin embargo, la tabla solo proporciona valores para resistencias estándar de 2000, 3000, 4000, 5000, 6000 y 7000 psi, por lo que se requiere una interpolación lineal para estimar el valor de w/c adecuado.

Para este cálculo, se seleccionan los valores de w/c correspondientes a 5000 psi (0.48) y 6000 psi (0.41), y se realiza la interpolación lineal entre estos puntos, considerando que 384 kg/cm² se encuentra entre ambas resistencias. Aplicando la ecuación de interpolación:

Ecuación 11

Interpolación Relación Agua/Cemento

$$\text{Relación agua / cemento en peso} = 0.41 + \frac{(384 - 421.86)}{(351.55 - 421.86)} * (0.48 - 0.41)$$

$$\text{Relación agua / cemento en peso} = 0.45$$

3.3.7 *Dosificaciones Previas*

En la Tabla 13 se presentan los resultados de los ensayos de compresión realizados sobre probetas de concreto elaboradas con tres diferentes relaciones agua-cemento (0.40, 0.45 y 0.50), identificadas como M1 y M2. Todas las probetas fueron fabricadas el 02 de octubre del 2024 y ensayadas a los 28 días el 30 de octubre de 2024.

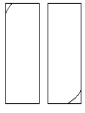
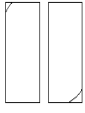
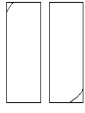
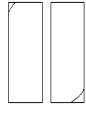

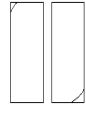
Cada muestra fue sometida a ensayos de compresión axial para determinar su resistencia mecánica y evaluar el comportamiento del hormigón en función de la variación en la relación a/c. Los resultados muestran que las resistencias obtenidas disminuyen conforme aumenta la relación agua-cemento, siendo la más alta 333.5 kg/cm² para una relación a/c de 0.40 (M2) y la más baja 194.8 kg/cm² para una relación a/c de 0.50 (M1).

Además, todas las probetas presentaron un modo de falla tipo 5.

Tabla 13

Resultados de los Ensayos de Compresión para Dosificaciones Previas con Diferentes

Relaciones Agua-Cemento

Probeta N° :	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
Identificación de la probeta*	M1	M2	M1	M2	M1	M2
Descripción*	0.4		0.45		0.5	
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (MPa)*	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4	29.4
Fecha de fabricación*	2024-10-02	2024-10-02	2024-10-02	2024-10-02	2024-10-02	2024-10-02
Fecha de ensayo*	2024-10-30	2024-10-30	2024-10-30	2024-10-30	2024-10-30	2024-10-30
Edad (días)	28	28	28	28	28	28
Hora de ensayo	14:26	14:29	14:32	14:38	14:45	15:00
Diámetro 1 (mm)	151.66	150.99	151.70	150.12	151.01	150.05
Diámetro 2 (mm)	151.26	150.87	151.31	150.24	151.12	150.12
Diámetro promedio (mm)	151.50	151.00	151.50	150.25	151.00	150.00
Relación entre diámetros (%)	0.26	0.08	0.26	0.08	0.07	0.05
Altura promedio (mm)	300	299	300	301	301	301
Relación H/D	1.98	1.98	1.98	2.00	1.99	2.01
Área (mm ²)	18027	17908	18027	17730	17908	17671
Volumen (m ³)	0.0054	0.0054	0.0054	0.0053	0.0054	0.0053
Masa (kg)	11.13	10.91	11.12	11.21	11.41	11.23
Peso unitario (kg/m ³)	2060	2040	2060	2100	2120	2110
Carga máxima (KN)	580.1	585.5	472.5	481.4	341.2	348.5
Factor de corrección	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Resistencia a la Compresión (MPa)	32.2	32.7	26.2	27.1	19.1	19.7
Resistencia a la Compresión (KG/CM²)	328.4	333.5	267.2	276.4	194.8	200.9
Incertidumbre expandida (U), K=2, (MPa)	± 1.0	± 1.0	± 0.8	± 0.9	± 0.6	± 0.6
Tipo de Falla						
	5	5	5	5	5	5

Nota Fuente. Propia 2025.

3.3.8 Muestra Patrón

Tras la aplicación de las correcciones correspondientes, derivadas del análisis de las dosificaciones preliminares, se estableció una relación agua-cemento de 0.41. Este ajuste permitió definir con precisión las cantidades de agregados, agua y cemento necesarias para la elaboración del hormigón, las cuales se presentan en las Tablas 13 y 14.

La Tabla 14 muestra las propiedades físicas de los agregados utilizados en la mezcla, incluyendo el peso específico en estado saturado y superficialmente seco (SSS), la capacidad de absorción, y los pesos unitarios compactado y suelto.

Por otro lado, la Tabla 15 expone la dosificación final adoptada para la muestra patrón, expresada en términos de peso por metro cúbico de hormigón.

Tabla 14

Resultados de los Áridos

Propiedades Físicas	Peso Específico Sss (Kg/m ³)	Capacidad de Absorción (%)	Peso Unitario Compactado (Kg/m ³)	Peso Unitario Suelto (Kg/m ³)	Análisis Colorimétrico
Árido Grueso	2480	4.2	1570	1470	
Árido Fino	2543	4.1	1740	1600	Figura 1

Nota Fuente. Propia 2025.

Tabla 15

Dosificación muestra patrón

Parámetro	Muestra Patrón	
	Ag. Grueso	Ag. Fino
% humedad	0.08	0.56
% absorción	4.2	4.1
Estado SSS	838.70	686.21
Estado seco	805.17	658.94
Estado natural	805.83	662.64
Cemento	519.51	
Agua neta	213.00	
Agua de mezcla	269.43	

Nota Fuente. Propia 2025.

3.3.9 Rotura de Cilindros

La determinación del módulo de elasticidad y la relación de Poisson del concreto en compresión se realiza mediante la prueba de carga de cilindros de concreto, según el método estándar ASTM C469/C469M-14 (ASTM, 2014). Esta prueba permite evaluar el comportamiento mecánico del concreto sometido a esfuerzos de compresión axial.

Los cilindros de concreto deben ser ensayados en una máquina de ensayo que cumpla con la norma ASTM E4, capaz de imponer cargas de manera continua y sin impactos bruscos. Antes del inicio de la prueba, los cilindros deben estar correctamente alineados con el centro de empuje del bloque superior esferoidal de la máquina (American Concrete Institute (ACI), 2022).

La prueba se realiza aplicando carga axial de manera uniforme, siguiendo un procedimiento que consta de tres ciclos de carga, donde el primer ciclo se emplea para el ajuste de los instrumentos de medición, y los dos siguientes para la obtención de datos. (American Concrete Institute (ACI), 2022).

El esfuerzo de compresión se determina dividiendo la carga aplicada por el área transversal del cilindro, obtenida a partir del diámetro medido conforme a lo establecido en ASTM

C469/C469M-14. La carga aplicada debe incrementarse de manera constante a una velocidad de 250 ± 50 kPa/s hasta alcanzar el 40% de la carga última promedio de los cilindros compañeros, conforme a la norma ASTM C39/C39M (ASTM, 2014).

3.4 Determinación del Módulo de Elasticidad Experimental

El módulo de elasticidad del concreto es un parámetro fundamental para evaluar su capacidad de deformación ante cargas aplicadas, proporcionando información clave sobre su rigidez y comportamiento estructural. (American Concrete Institute (ACI), 2022).

Durante la prueba de compresión axial, se registran las deformaciones longitudinales y transversales con el fin de determinar este módulo, el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 12

Ecuación para la determinación del Módulo de Elasticidad Secante según ASTM

C469/C469M-14

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000050}$$

Donde:

E = Módulo de Elasticidad

S₂ = Esfuerzo respectivo para el 40 % de la carga máxima (Mpa)

S₁ = Esfuerzo mínimo

ε₁ = Deformación unitaria respectiva para el 40 % de la carga máxima (mm/mm)

3.5 Cálculo del Factor Asociado al Módulo de Elasticidad

Una vez determinado el módulo de elasticidad a partir de los ensayos experimentales, se empleará la ecuación 19.2.2.1.b del American Concrete Institute (ACI 318-19) para obtener el factor correspondiente. La ecuación utilizada es la siguiente:

Ecuación 13

Ecuación 19.2.2.1.b del American Concrete Institute (ACI 318-19)

$$E_c = 4700\sqrt{f'c} \text{ en (Mpa)}$$

De esta ecuación, despejando el factor, se obtiene la siguiente ecuación:

Ecuación 14

Factor de corrección del módulo de elasticidad

$$Factor = \frac{E_c}{\sqrt{f'c}}$$

3.6 Obtención de la Expresión del Módulo de Elasticidad

Para definir una ecuación que represente el comportamiento del módulo de elasticidad en función de los diferentes niveles de reemplazo del agregado fino por material reciclado de construcción, se utilizarán los resultados obtenidos en los ensayos experimentales.

4 CAPÍTULO IV

4.1 Análisis de Resultados

En esta sección se presentan y examinan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados sobre los cilindros de concreto, los cuales fueron elaborados con agregado proveniente de la Mina San Pablo El Grande y cemento Chimborazo. A partir de los ensayos de compresión axial y medición de deformaciones, se determina el módulo de elasticidad tanto para la muestra patrón como para las mezclas en las que se incorporó el reemplazo parcial del agregado fino con material reciclado.

Asimismo, se lleva a cabo un análisis comparativo entre los valores experimentales obtenidos y las estimaciones normativas establecidas en el ACI 318-19.

4.1.1 Resultados de la caracterización de los agregados

Los resultados de la caracterización de los agregados, presentados en el Capítulo 3, Sección 3.1, fueron empleados como parámetros de referencia para la dosificación del hormigón en la elaboración de la muestra patrón.

4.1.2 Resultados de Material Reciclado de construcción

En esta sección se presentan los resultados del procesamiento del material reciclado de construcción, el cual ha sido obtenido y tratado para su posterior uso en la dosificación de concreto.

La Figura 9 muestra el proceso de recolección del material reciclado en la escombrera San Antonio. Se observa la demolición de elementos estructurales de concreto armado, en los cuales se extraen fragmentos de hormigón que serán posteriormente tratados para su reutilización. La recuperación del material se lleva a cabo mediante separación manual y limpieza de residuos no deseados, asegurando que el árido reciclado cumpla con los requisitos para su incorporación en nuevas mezclas de concreto.

Figura 9

Proceso de recolección manual de residuos de concreto en la escombrera San Antonio para la obtención de material reciclado



Nota Fuente. Propia 2025.

Por otro lado, en la Figura 10 se evidencia el proceso de trituración del material reciclado mediante una máquina trituradora de mandíbulas. Esta etapa es fundamental para reducir el tamaño de las partículas y obtener un árido con granulometría controlada. El material triturado es posteriormente clasificado para asegurar su idoneidad en términos de resistencia y trabajabilidad dentro de la mezcla de concreto.

Figura 10

Proceso de trituración del material reciclado de construcción mediante una trituradora de mandíbulas.

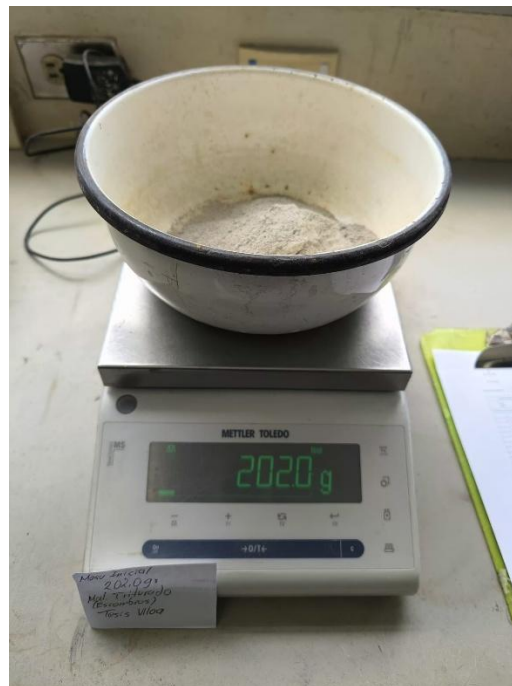


Nota Fuente. Propia 2025.

En la fase final del proceso de trituración del material reciclado se culminó usando la máquina de los ángeles, permitiendo un material fino como se evidencia en la Figura 11, Este material presenta similares características al agregado fino, por lo que se utilizó como reemplazo en proporciones de 4%, 8% y 12%.

Figura 11

Pesaje del material reciclado de construcción tras el proceso de trituración.



Nota Fuente. Propia 2025.

4.1.3 Resultados Cilindros Dosificaciones previas

En esta sección se presentan los resultados de resistencia a compresión obtenidos en los cilindros de concretos fabricados para evaluar tres dosificaciones distintas, con relaciones agua/cemento (a/c) de 0.40, 0.45 y 0.50, como se puede evidenciar en la Tabla 16.

Se observa una disminución progresiva de la resistencia con el incremento de la relación a/c, lo cual es coherente con el comportamiento esperado del concreto. La mezcla con relación a/c de 0.40 alcanzó la mayor resistencia a los 28 días (330.99 kg/cm²), mientras que la mezcla con a/c de 0.50 obtuvo la menor resistencia (197.88 kg/cm²).

Tabla 16

Relación agua/cemento y resistencia a compresión a 7 y 28 días

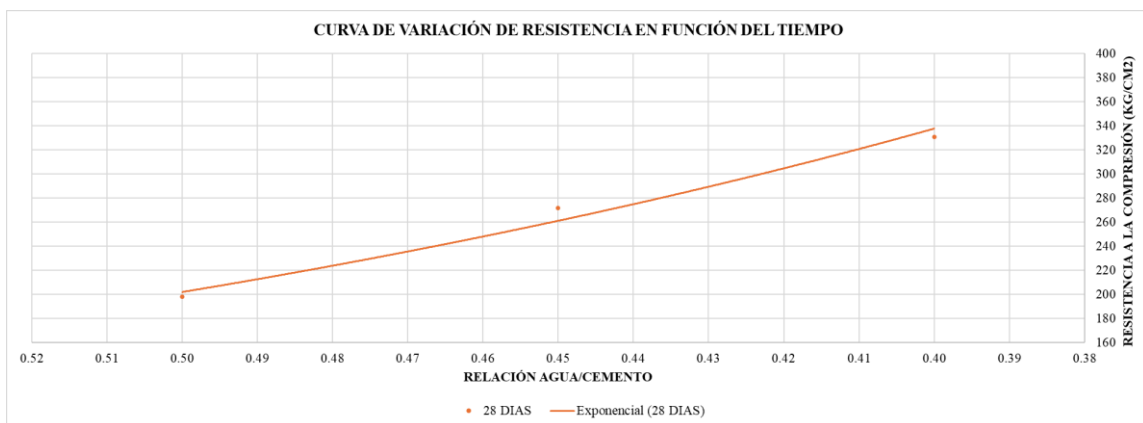
Relación a/c	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	
	7 DIAS	28 DIAS
0.40	208.59	330.99
0.45	171.36	271.83
0.50	126.48	197.88

Nota Fuente. Propia 2025.

La Figura 15 muestra la curva de variación de la resistencia a compresión en función de la relación agua/cemento para los valores a los 28 días.

Figura 12

Curva de variación de la resistencia a compresión del concreto a 28 días en función de la relación agua/cemento



Nota Fuente. Propia 2025.

4.1.4 Resultados Muestra Patrón

Los ensayos de compresión realizados sobre los cilindros correspondientes a la muestra patrón, identificados como MP-0,41, se muestran en la Tabla 17 y se ejecutaron a los 28 días de edad, tras haber sido fabricados el 13 de febrero de 2025 y ensayados el 13 de marzo del mismo año. La muestra fue diseñada para alcanzar una resistencia característica de 30 MPa (300 kg/cm²), utilizando agregados provenientes de la Mina San Pablo el Grande y cemento Chimborazo.

Las probetas presentaron un diámetro promedio cercano a los 151 mm y una altura promedio de 300 mm, manteniendo una relación altura/diámetro (H/D) adecuada (≈ 1.98 a 1.99), según lo recomendado por la norma ASTM C39/C39M. Las cargas máximas aplicadas oscilaron entre 535.5 kN y 572.5 kN, lo que se traduce en resistencias a compresión que varían entre 296.8 kg/cm² y 325.4 kg/cm², con un valor promedio de resistencia de aproximadamente 310.5 kg/cm².

Todas las probetas presentaron un tipo de falla del tipo 5, correspondiente a una rotura normal axial. Este comportamiento indica una adecuada calidad del concreto elaborado con la dosificación patrón, validando su uso como referencia para las mezclas con reemplazo de agregado fino por material reciclado.

Tabla 17

Resultados de los Ensayos de Compresión para la Muestra Patrón (Relación a/c = 0.41)

Probeta No:	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>
Identificación de la probeta*	MP-0,41	MP-0,41	MP-0,41	MP-0,41	MP-0,41
Descripción	Muestra Patrón				
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (MPa)*	30	30	30	30	30
Fecha de fabricación*	2025-02-13	2025-02-13	2025-02-13	2025-02-13	2025-02-13
Fecha de ensayo*	2025-03-13	2025-03-13	2025-03-13	2025-03-13	2025-03-13
Edad (días)	28	28	28	28	28
Hora de ensayo	7:30	8:00	8:30	9:00	9:30
Diámetro 1 (mm)	151.6 8	153.14	152.82	151.25	150.45
Diámetro 2 (mm)	151.9 8	153.05	152.99	151.14	150.37
Diámetro promedio (mm)	151.8 0	153.00	153.00	151.20	150.40
Relación entre diámetros (%)	0.20	0.06	0.11	0.07	0.05
Altura promedio (mm)	300	300	300	301	300
Relación H/D	1.98	1.96	1.96	1.99	1.99
Área (mm ²)	18098	18385	18385	17955	17766
Volumen (m ³)	0.005 4	0.0055	0.0055	0.0054	0.0053
Masa (kg)	12.25	12.20	12.55	12.93	12.85
Peso unitario (kg/m ³)	2260	2210	2280	2390	2410
Carga máxima (KN)	545.1	535.5	551.1	572.5	552.8
Factor de corrección	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Resistencia a la Compresión (MPa)	30.1	29.1	30.0	31.9	31.1
Resistencia a la Compresión (kg/cm²)	307.0	296.8	306.0	325.4	317.2
Tipo de Falla	5	5	5	5	5

Nota Fuente. Propia 2025.

4.1.5 Determinación del Módulo de Elasticidad Experimental Muestra Patrón

Para estimar el módulo de elasticidad del concreto correspondiente a la muestra patrón, se utilizó la Ecuación 12, previamente descrita, la cual se basa en la pendiente de la curva esfuerzo-deformación. Los valores fueron tomados del ensayo axial realizado al cilindro correspondiente a la muestra número 1.

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000050}$$

Sustituyendo los valores experimentales:

Ecuación 15

Ecuación del módulo de elasticidad secante según ASTM C469, evaluado entre una carga inicial de 0.8 MPa y el 40% de la carga máxima.

$$E = \frac{12.05 - 0.8}{0.00094 - 0.000050} = 12600 \text{ MPa}$$

4.1.5.1 Módulo de Elasticidad Experimental Muestra Patrón

En la Tabla 18 se presentan los resultados obtenidos del módulo de elasticidad del concreto a partir de los ensayos realizados sobre cinco cilindros correspondientes a la muestra patrón, con una relación agua/cemento de 0.41.

El módulo de elasticidad promedio obtenido para esta serie fue de:

- 12520 MPa
- 127704 kg/cm²

Tabla 18

Módulo de Elasticidad Experimental del Concreto para la Muestra Patrón

Relación A/C	No. Cilindros	Módulo De Elasticidad (MPa)	Módulo De Elasticidad (Kg/cm ²)	Módulo De Elasticidad Promedio (MPa)	Módulo De Elasticidad Promedio (Kg/cm ²)
0.41	1	12600	128520	12520	127704
	2	12400	126480		
	3	12400	126480		
	4	12600	128520		
	5	12600	128520		

Nota Fuente. Propia 2025.**4.1.5.2 Módulo de elasticidad experimental con sustitución de agregado fino**

En la Tabla 19 se presentan los resultados obtenidos del módulo de elasticidad experimental del concreto al reemplazar parcialmente el agregado fino natural por material reciclado de construcción en proporciones del 4%, 8% y 12%. Para cada porcentaje de sustitución se evaluaron cinco cilindros de concreto, cuyos módulos de elasticidad individuales se expresan en megapascuales (MPa) y kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm²).

Los resultados evidencian una tendencia creciente en el módulo de elasticidad conforme se incrementa el porcentaje de reemplazo.

Tabla 19

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

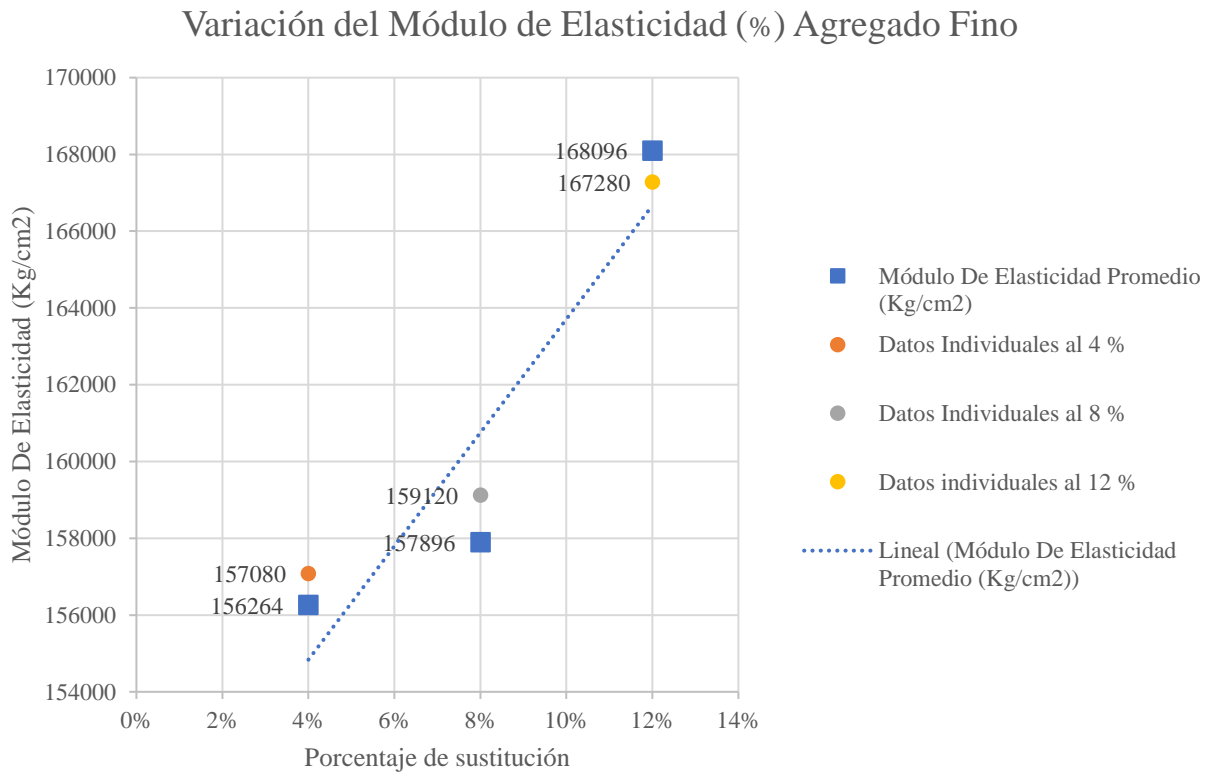
Porcentaje de sustitución	No. Cilindros	Módulo De Elasticidad (Mpa)	Módulo De Elasticidad (Kg/cm ²)	Módulo De Elasticidad Promedio (MPa)	Módulo De Elasticidad Promedio (Kg/cm ²)
4%	1	15400	157080	15320	156264
	2	15200	155040		
	3	15400	157080		
	4	15400	157080		
	5	15200	155040		
8%	1	15600	159120	15480	157896
	2	15600	159120		
	3	15400	157080		
	4	15400	157080		
	5	15400	157080		
12%	1	16400	167280	16480	168096
	2	16600	169320		
	3	16400	167280		
	4	16400	167280		
	5	16600	169320		

Nota Fuente. Propia 2025.

La Figura 13 presenta el un incremento en el módulo de la elasticidad mientras aumenta el reemplazo del agregado, este comportamiento sugiere que el material reciclado mejora la rigidez del concreto.

Figura 13

Variación del Módulo de Elasticidad según el Porcentaje de Sustitución de Agregado Fino



Nota Fuente. Propia 2025.

4.1.6 Determinación del Factor de Módulo de Elasticidad

Para calcular el factor de la ecuación que relaciona el módulo de elasticidad con la resistencia a la compresión del concreto, se utilizó la Ecuación 14 de este documento, aplicando los datos experimentales correspondientes a la muestra patrón. El factor se determina mediante la siguiente expresión:

Ecuación 16

Ecuación para la Determinación del Factor de Relación entre el Módulo de Elasticidad y la Resistencia a la Compresión

$$Factor = \frac{E_c}{\sqrt{f'c}} = \frac{12520}{\sqrt{30}} = 2285.83MPa$$

4.1.6.1 Factor de módulo de elasticidad sustitución de agregado fino

La Tabla 20 presenta los factores obtenidos a partir de la relación empírica entre el módulo de elasticidad promedio y la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión para cada porcentaje de sustitución de agregado fino por material reciclado.

Tabla 20

Factor del módulo de elasticidad en función del porcentaje de sustitución del agregado fino

Factor de módulo de elasticidad sustitución de agregado fino						
Porcentaje de sustitución	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)	Módulo De Elasticidad Promedio (MPa)	Módulo De Elasticidad Promedio (Kg/cm ²)	Factor (MPa)	Factor (Kg/cm ²)
4%	30.00	300.00	15320.00	156264.00	2797.04	9021.91
8%	30.00	300.00	15480.00	157896.00	2826.25	9116.13
12%	30.00	300.00	16480.00	168096.00	3008.82	9705.03

Nota Fuente. Propia 2025.

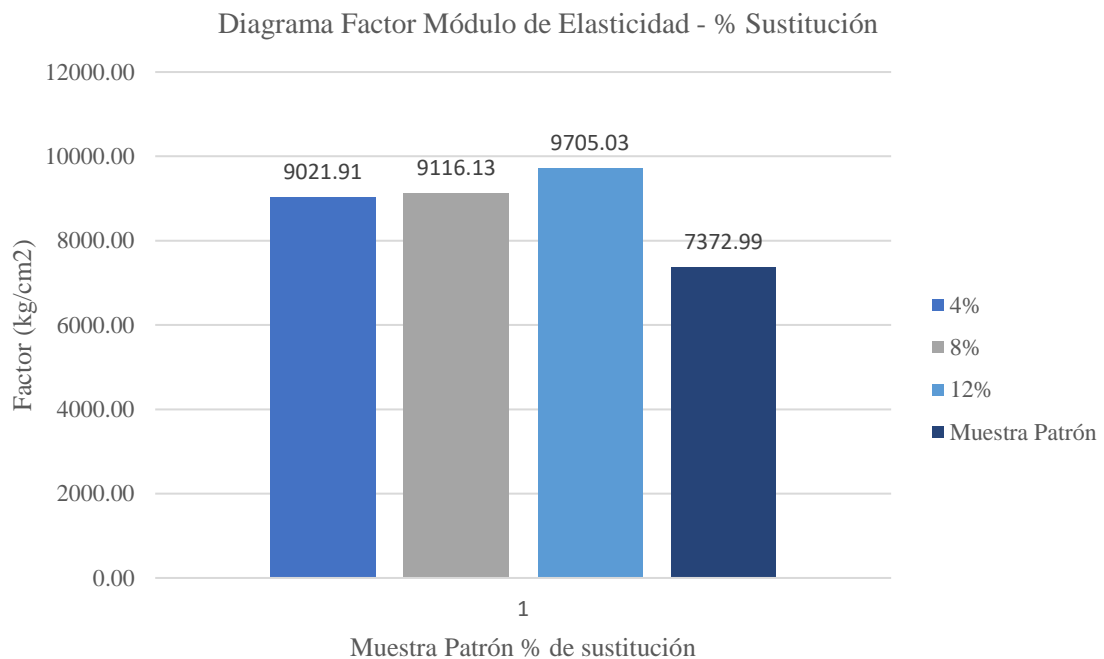
Para ilustrar gráficamente esta tendencia, la Figura 14 muestra un diagrama de barras con los valores del factor del módulo de elasticidad (en kg/cm²) correspondientes a los porcentajes de sustitución evaluados (4%, 8% y 12%), comparados con la muestra patrón. Se evidencia un incremento significativo del factor con la inclusión de material reciclado.

Entre los valores obtenidos, se observa que el mayor factor del módulo de elasticidad corresponde al 12 % de sustitución del agregado fino, con un valor de 9705.03 kg/cm².

Este comportamiento puede atribuirse a la granulometría, textura y propiedades de absorción del material reciclado.

Figura 14

Diagrama del factor del módulo de elasticidad en función del porcentaje de sustitución del agregado fino



Nota Fuente. Propia 2025.

4.1.7 Resumen de Resultados

La Tabla 21 presenta un resumen comparativo de los valores obtenidos experimentalmente para la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad promedio y el factor de módulo de elasticidad en función del porcentaje de sustitución del agregado fino por material reciclado. Se incluyen también los valores correspondientes a la muestra patrón y los parámetros establecidos por la normativa ACI 318-19 para una resistencia de diseño de 300 kg/cm².

Tabla 21

Resumen comparativo de resultados experimentales y normativos del módulo de elasticidad y su factor en función del porcentaje de sustitución de agregado fino

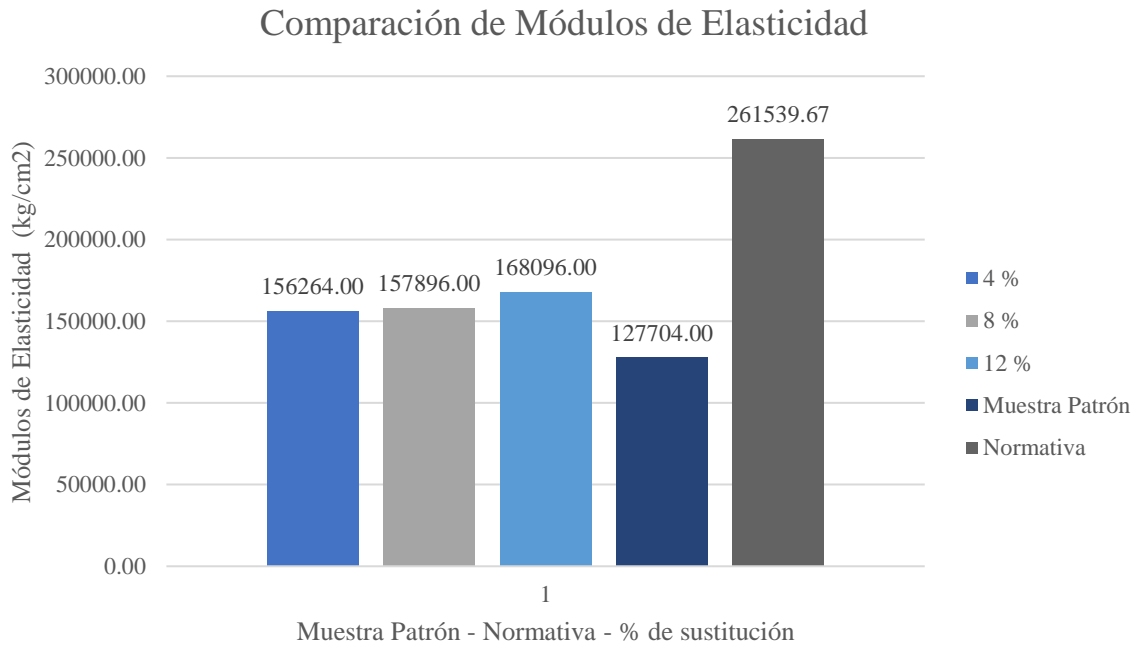
Resumen de Resultados							
Descripción	Resistencia a la compresión (MPa)	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)	Módulo De Elasticidad Promedio (MPa)	Módulo De Elasticidad Promedio (Kg/cm ²)	Factor (MPa)	Factor (Kg/cm ²)	Diferencia en %
4 %	30.00	300.00	15320.00	156264.00	2797.04	9021.91	40.25 %
8 %	30.00	300.00	15480.00	157896.00	2826.25	9116.13	39.63 %
12 %	30.00	300.00	16480.00	168096.00	3008.82	9705.03	35.73 %
Muestra Patrón	30.00	300.00	12520.00	127704.00	2285.83	7372.99	51.17 %
Normativa	30.00	300.00	25742.96	261539.67	4700.00	15100.00	0.00 %

Nota Fuente. Propia 2025.

La Figura 15 muestra la comparación de los valores del módulo de elasticidad (en kg/cm²) obtenidos experimentalmente para distintos porcentajes de sustitución del agregado fino con material reciclado, en contraste con la muestra patrón y el valor normativo establecido por el ACI 318-19. Se observa un aumento progresivo del módulo con el incremento del porcentaje de sustitución, aunque todos los valores se encuentran por debajo del parámetro normativo.

Figura 15

Comparación del Módulo de Elasticidad según porcentaje de sustitución y referencia normativa



Nota Fuente. Propia 2025.

4.2 Ecuaciones del Módulo de Elasticidad con Sustitución Parcial de Agregado Fino por Material Reciclado

A partir de los resultados experimentales y del valor normativo, se establecieron ecuaciones empíricas para estimar el módulo de elasticidad del concreto en función de la resistencia a la compresión (f'_c), expresadas en MPa y kg/cm².

Estas ecuaciones se resumen de la siguiente manera:

Ecuación 17

Ecuación del Módulo de Elasticidad Normativa en MPa y Kg/cm²

$$E = 4700 * \sqrt{f'_c} \text{ (MPa)}$$

$$E = 15100 * \sqrt{f'_c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Ecuación 18

Ecuación del Módulo de Elasticidad Muestra Patrón en MPa y Kg/cm²

$$E = 2285.83 * \sqrt{f'c} \text{ (MPa)}$$

$$E = 7372.99 * \sqrt{f'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Ecuación 19

Ecuación del Módulo de Elasticidad Sustitución al 4 % en MPa y Kg/cm²

$$E = 2797.04 * \sqrt{f'c} \text{ (MPa)}$$

$$E = 9021.91 * \sqrt{f'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Ecuación 20

Ecuación del Módulo de Elasticidad Sustitución al 8 % en MPa y Kg/cm²

$$E = 2826.25 * \sqrt{f'c} \text{ (MPa)}$$

$$E = 9116.13 * \sqrt{f'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

Ecuación 21

Ecuación del Módulo de Elasticidad Sustitución al 12 % en MPa y Kg/cm²

$$E = 3008.82 * \sqrt{f'c} \text{ (MPa)}$$

$$E = 9705.03 * \sqrt{f'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

5 CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

- El árido grueso proveniente de la Mina San Pablo El Grande presentó un porcentaje de degradación del 49 %, determinado mediante el ensayo de la máquina de Los Ángeles. De acuerdo con la norma NTE INEN 860, el valor máximo permitido de pérdida de masa para agregados destinados a concreto es del 50 %, por lo que el material evaluado se encuentra dentro del límite normativo. Sin embargo, dado que el resultado se aproxima considerablemente al valor máximo aceptable, se considera que el árido presenta un comportamiento marginal frente a la abrasión y el impacto. En consecuencia, para aplicaciones estructurales exigentes o en concreto de alta resistencia, se recomienda evaluar agregados de otras fuentes que ofrezcan mayor resistencia a la degradación.
- Se confirma la viabilidad técnica del uso de material reciclado como sustituto parcial del árido fino en mezclas de concreto, ya que se observó un incremento del módulo de elasticidad en comparación con la muestra patrón para todos los porcentajes de reemplazo evaluados (4 %, 8 % y 12 %). Este comportamiento puede atribuirse a las características del árido reciclado, el cual, tras ser procesado mediante la máquina de Los Ángeles, presentó una granulometría más fina y un mayor índice de absorción. Estas propiedades influyen directamente en la relación agua-cemento efectiva de la mezcla, generando una ligera reducción en la misma. Como se evidencia en la Figura 12, una menor relación agua-cemento favorece el desarrollo de mayores resistencias en el concreto. En conjunto, estos resultados sugieren que el material reciclado, adecuadamente tratado y dosificado, puede mejorar el desempeño mecánico del concreto

- En comparación con la ecuación establecida por el ACI 318-19 para el cálculo del módulo de elasticidad del concreto, $E = 15100 * \sqrt{f'c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$, las ecuaciones obtenidas tanto para la muestra patrón como para las mezclas con reemplazo parcial del árido fino presentan valores inferiores. Esto evidencia que el uso de materiales locales, específicamente los provenientes de la Mina San Pablo El Grande, altera la respuesta del concreto ante deformaciones axiales, reflejando un comportamiento diferente al previsto por los modelos normativos. Por tanto, se concluye que es necesario establecer ecuaciones empíricas ajustadas a las condiciones locales, que consideren las propiedades particulares de los materiales disponibles, a fin de mejorar la precisión en el diseño estructural.
- Se evidenció un incremento progresivo en el módulo de elasticidad conforme aumentó el porcentaje de sustitución del agregado fino, alcanzando el valor más alto con el 12% de reemplazo, lo que sugiere una mejora en la rigidez del concreto frente a esfuerzos axiales.
- Se establecieron nuevos factores para la estimación del módulo de elasticidad en función de la resistencia a la compresión, los cuales resultaron inferiores a los propuestos por la normativa ACI 318-19.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda que los resultados obtenidos en esta investigación sirvan como base para el desarrollo de modelos empíricos locales que complementen o ajusten las ecuaciones propuestas por normas internacionales como el ACI 318-19, especialmente cuando se utilicen materiales provenientes de fuentes específicas como la Mina San Pablo El Grande.

- Es fundamental establecer un protocolo de selección, procesamiento y clasificación del material reciclado, asegurando su limpieza, trituración uniforme y adecuada granulometría, para garantizar un comportamiento mecánico constante.
- Dado que el árido grueso de la Mina San Pablo El Grande presentó un valor de degradación cercano al límite normativo (49 %), se recomienda limitar su uso en elementos estructurales exigentes o en hormigones de muy alta resistencia, y considerar la evaluación de agregados alternativos con mayor resistencia a la abrasión.
- Debido al mayor contenido de finos y a la mayor absorción del material reciclado, se recomienda realizar ajustes específicos en la relación agua-cemento en futuras dosificaciones, preferiblemente utilizando métodos que contemplen la humedad efectiva de los agregados.
- Para profundizar en el comportamiento del concreto reciclado, se sugiere evaluar porcentajes de sustitución superiores al 12 %.
- Se recomienda ampliar el estudio a un mayor número de canteras ubicadas en distintas regiones del Ecuador, con el objetivo de establecer ecuaciones del módulo de elasticidad diferenciadas por zonas geográficas. Esta zonificación permitiría incorporar las variaciones propias de los materiales locales y mejorar la precisión en la estimación del comportamiento estructural del concreto, fortaleciendo así el diseño y análisis de estructuras en función de las características regionales.

6 Bibliografía

- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2010). *NTE INEN 856:2010. ÁRIDOS. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2010). *NTE INEN 857:2010. ÁRIDOS. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2011). *NTE INEN 696:2011. ÁRIDOS. Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- (INEN), I. E. (2011). *ÁRIDOS. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de Los Ángeles*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Alajeos Gutierrez, M., & Cánov, F. (1994). *Hormigón y Acero n.- 191*. Málaga.
- American Concrete Institute (ACI). (2022). *ACI PRC-211.1-22: Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete—Guide*. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.
- American Concrete Institute (ACI). (2022). *ACI PRC-211.1-22: Selecting Proportions for Normal-Density and High-Density Concrete—Guide*. Farmington Hills, MI, USA: American Concrete Institute.
- ASTM International. (2023). *ASTM C33/C33M-23 Standard Specification for Concrete Aggregates*. ASTM International, West Conshohocken, PA.

- Chele, C. E. (2019). *DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGONES ESTRUCTURALES DE 21 Y 28 MPa UTILIZANDO AGREGADOS DE LA CANTERA AGRESA*. Jipijapa - Manabí.
- Civil, H. (23 de Marzo de 2015). *Faro de Eddystone*. Obtenido de Historia Civil: <https://historiacivil.wordpress.com/2015/03/23/faro-de-eddystone/>
- Del Valle Rodríguez, F. (Febrero de 1995). El agua y el hormigón. *Revista de Edificación*.
- González Fonteboa, B. (2002). *Hormigones con Áridos Reciclados Procedentes de Demoliciones: Dosificaciones, Propiedades Mecánicas y Comportamiento Estructural a Cortante*. Coruña.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización (INEN). (2010). *NTE INEN 855:2010. ÁRIDOS. Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigón*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito - Ecuador.
- INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN. (2010). *Áridos. Determinación de la masa unitaria (Peso Volumétrico) y el porcentaje de vacíos*. Quito - Ecuador.
- Londoño, D., & Terán, W. (2019). *Determinación de la ecuación del módulo de elasticidad del hormigón en la provincia de Pichincha elaborado con materiales de la mina Holcim, ubicada en la parroquia Pifo y cemento Holcim*. PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR, FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL, Quito - Ecuador.
- Nistal Cordero, Á. F., María Jesús, R. M., & Ruiz Abrio, T. (2012). *EL HORMIGÓN: HISTORIA, ANTECEDENTES EN OBRAS Y FACTORES*. Madrid: Revista Tecnología@ y desarrollo.







- Perez, M. A. (2014). *Aplicaciones avanzadas de los materiales compuestos en la obra civil y la edificación*. Barcelona: OmniaScience (Omnia Publisher SL).
- Pinta, L. M. (2019). *Análisis de estabilidad de los taludes en la cantera Tanlahua, parroquia San Antonio de Pichincha*. Quito.
- Sanchez de Juan, M. (2004). *Estudio sobre la utilización de árido reciclado para la fabricación de hormigón estructural*. Tesis de grado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos., Ingeniería Civil: Construcción, Madrid.
- Shraddhu. (s.f.). *www.engineeringenotes.com*. Recuperado el 05 de 02 de 2025, de Engineering Notes: <https://www.engineeringenotes.com/concrete-technology/concrete/modulus-of-elasticity-of-concrete-concrete-technology/31499>

7 ANEXOS

7.1 Resultados del Ensayo de Compresión a los 7 Días para Probetas de Hormigón (Dosificaciones Previas)

Tabla 22

Resultados del Ensayo de Compresión a los 7 Días para Probetas con Diferentes Relaciones Agua/Cemento

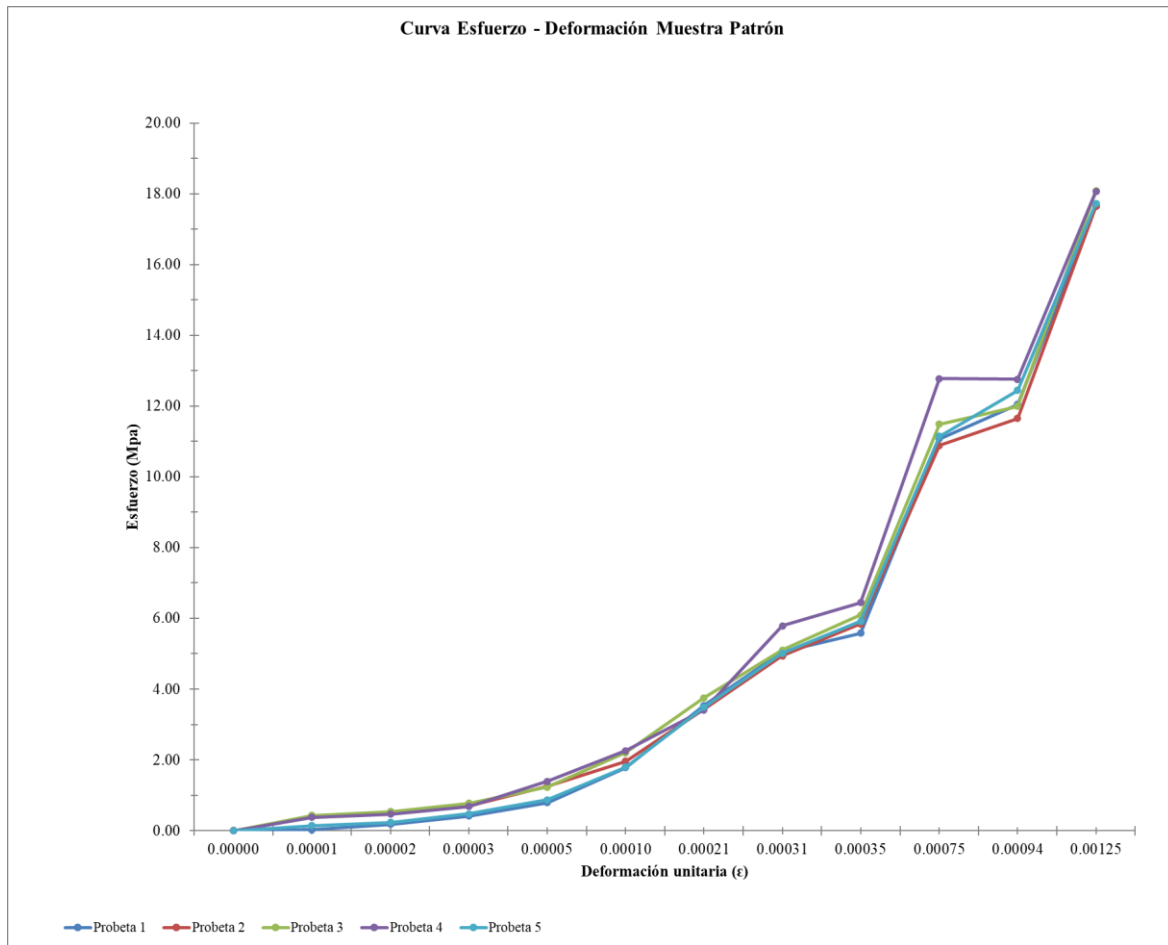
Probeta N° :	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
Identificación de la probeta*	M1	M2	M1	M2	M1	M2
Descripción*	0.4		0.45		0.5	
Resistencia de diseño esperada a los 28 días (MPa)*	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4	29,4
Fecha de fabricación*	2024-10-02	2024-10-02	2024-10-02	2024-10-02	2024-10-02	2024-10-02
Fecha de ensayo*	2024-10-09	2024-10-09	2024-10-09	2024-10-09	2024-10-09	2024-10-09
Edad (días)	7	7	7	7	7	7
Hora de ensayo	15:01	15:04	15:07	15:10	15:13	15:16
Diámetro 1 (mm)	153.47	153.23	152.97	152.71	152.77	152.59
Diámetro 2 (mm)	153.92	152.91	152.66	153.00	153.21	153.07
Diámetro promedio (mm)	153.75	153.00	152.75	152.75	153.00	152.75
Relación entre diámetros (%)	0.29	0.21	0.20	0.19	0.29	0.31
Altura promedio (mm)	305	300	299	300	300	299
Relación H/D	1.98	1.96	1.96	1.96	1.96	1.96
Área (mm ²)	18566	18385	18325	18325	18385	18325
Volumen (m ³)	0.0057	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055	0.0055
Masa (kg)	11.89	11.50	11.50	11.62	11.53	11.50
Peso unitario (kg/m ³)	2100	2080	2100	2110	2090	2100
Carga máxima (KN)	379.5	376.5	310.1	305.5	224.1	231.5
Factor de corrección	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Resistencia a la Compresión (MPa)	20.4	20.5	16.9	16.7	12.2	12.6
Resistencia a la Compresión (KG/CM2)	208.1	209.1	172.4	170.3	124.4	128.5
Incertidumbre expandida (U), K=2, (MPa)
Tipo de Falla						
	5	5	5	5	5	5

Nota Fuente. Propia 2025.

7.2 Curvas Esfuerzo-Deformación de los Cilindros de la Muestra Patrón

Figura 16

Curva Esfuerzo-Deformación de la Muestra Patrón para $f'_c = 30$ MPa

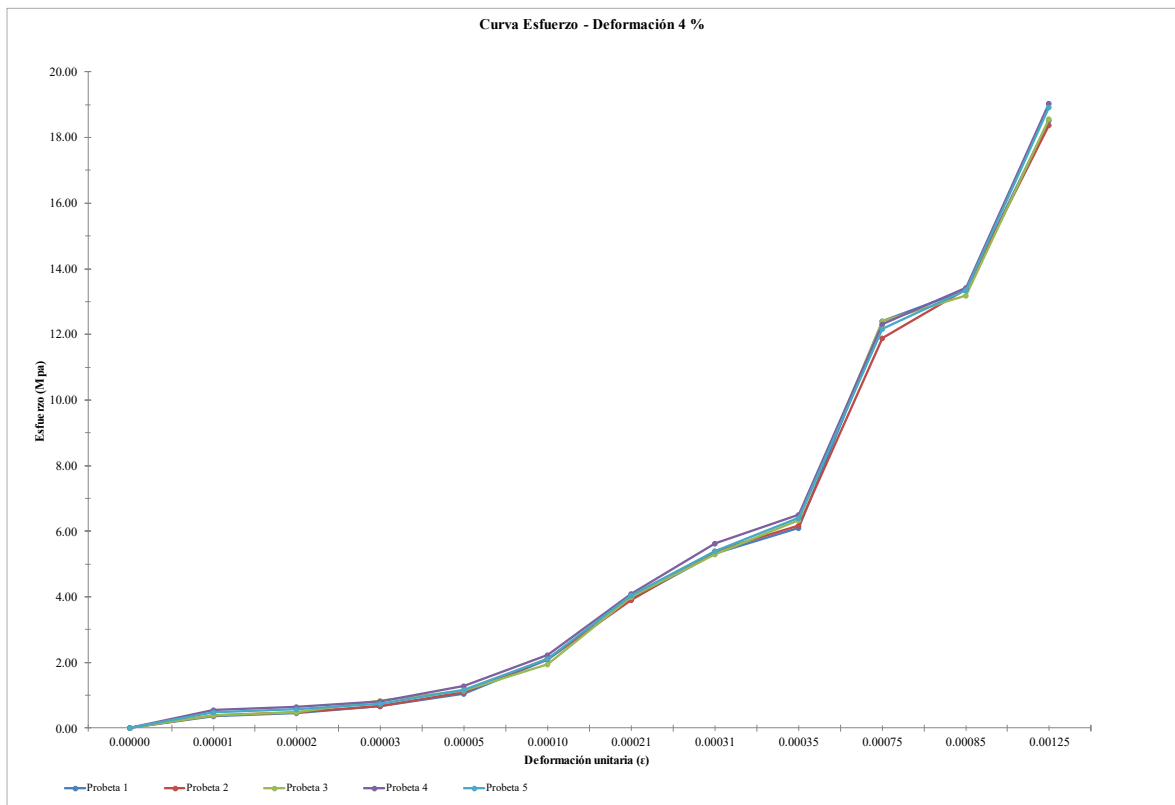


Nota Fuente. Propia 2025.

7.3 Resultados de la Curva Esfuerzo-Deformación para Sustitución del 4 % de Agregado Fino

Figura 17

Comportamiento Esfuerzo-Deformación del Hormigón con 4 % de Sustitución de Agregado Fino por Material Reciclado

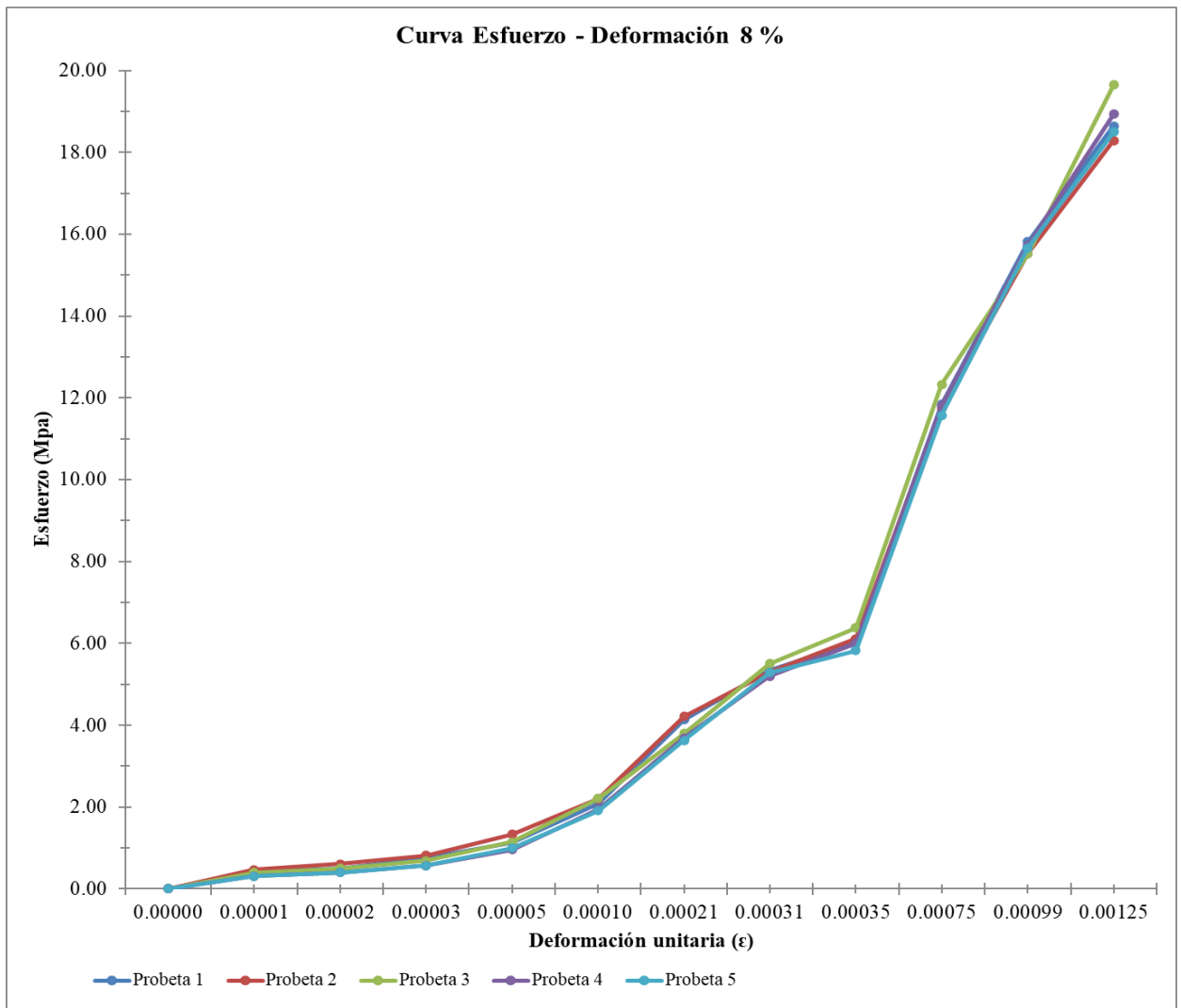


Nota Fuente. Propia 2025.

7.4 Resultados de la Curva Esfuerzo-Deformación para Sustitución del 8 % de Agregado Fino

Figura 18

Comportamiento Esfuerzo-Deformación del Hormigón con 8 % de Sustitución de Agregado Fino por Material Reciclado

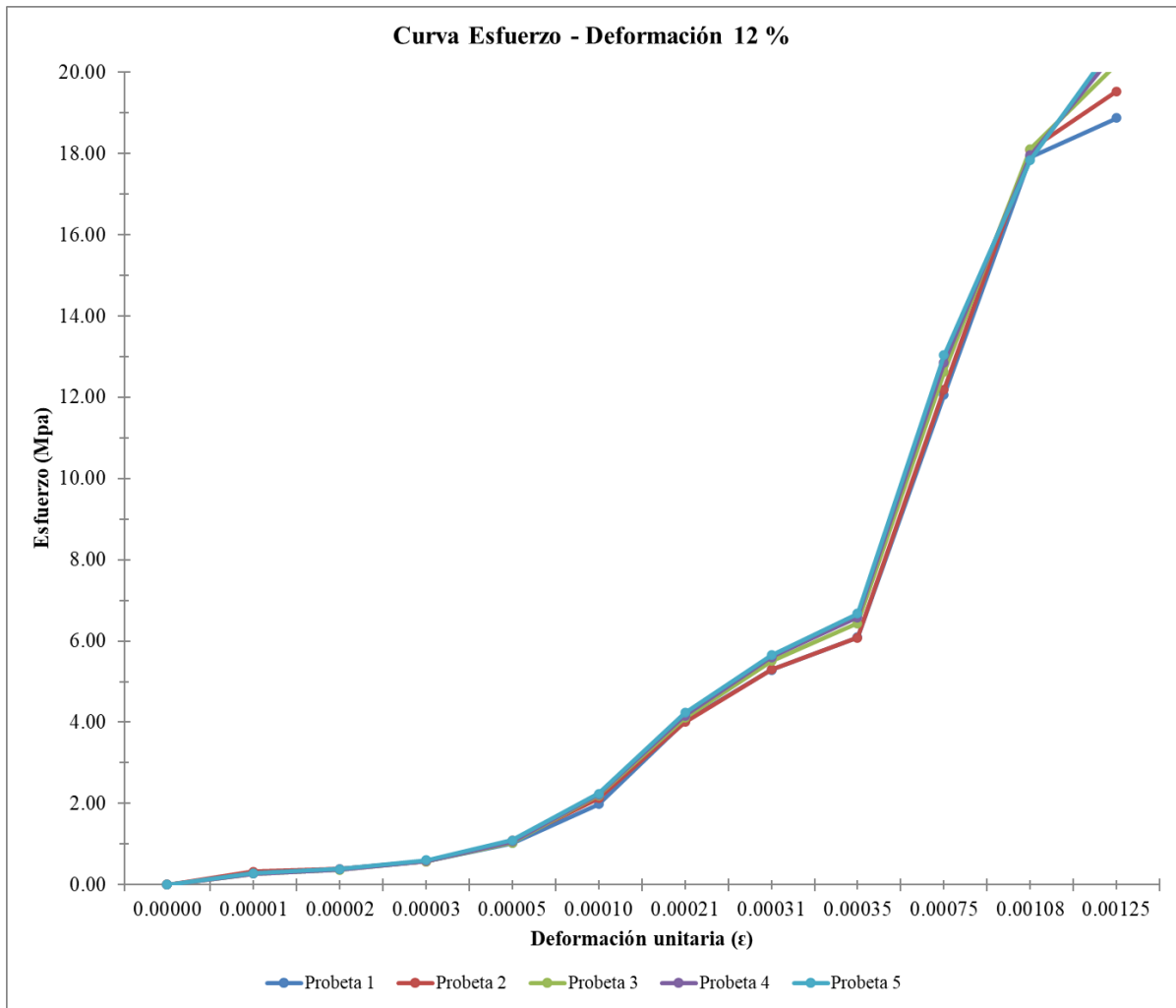


Nota Fuente. Propia 2025.

7.5 Resultados de la Curva Esfuerzo-Deformación para Sustitución del 12 % de Agregado Fino

Figura 19

Comportamiento Esfuerzo-Deformación del Hormigón con 12 % de Sustitución de Agregado Fino por Material Reciclado



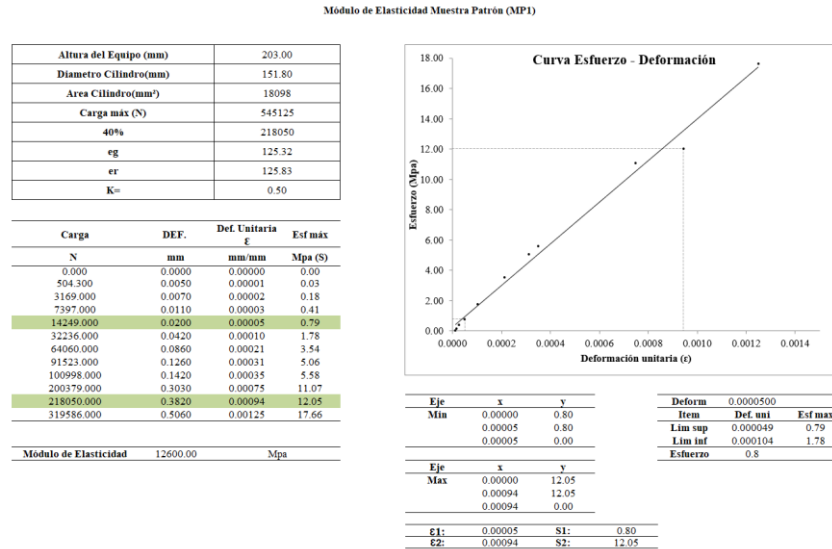
Nota Fuente. Propia 2025.

7.6 Determinación del Módulo de Elasticidad en la Muestra Patrón

7.6.1 Resultados Experimentales del Ensayo en Cilindros

Figura 20

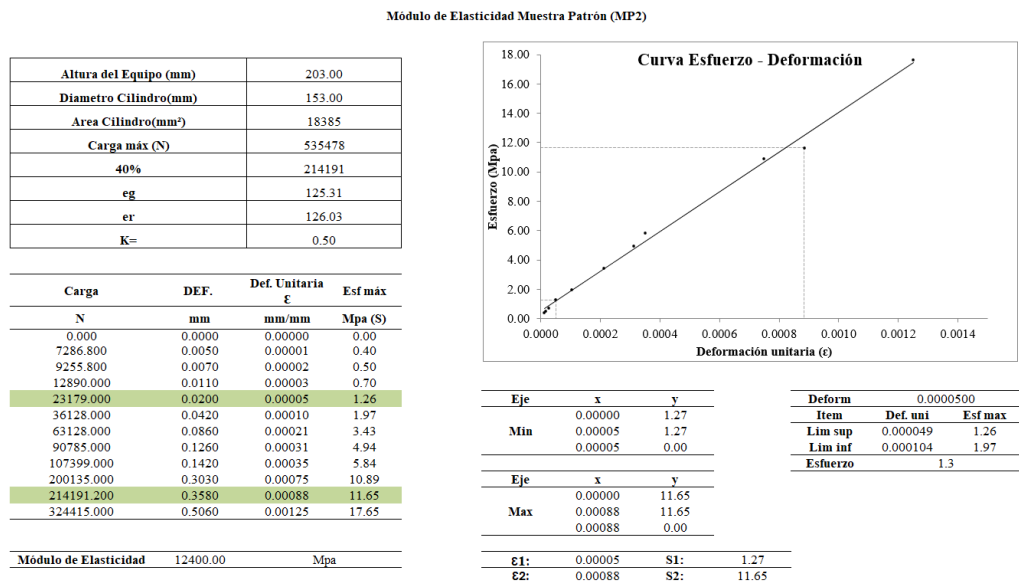
Cálculo del Módulo de Elasticidad de la Muestra Patrón (MP1)



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 21

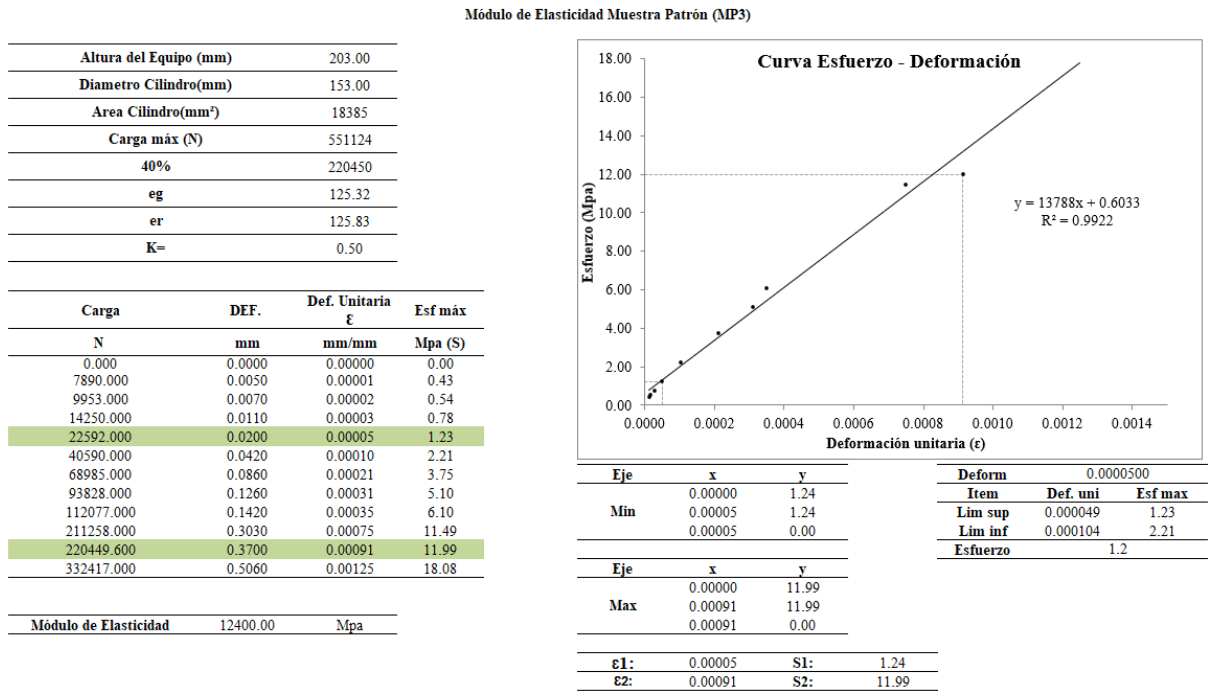
Cálculo del Módulo de Elasticidad de la Muestra Patrón (MP2)



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 22

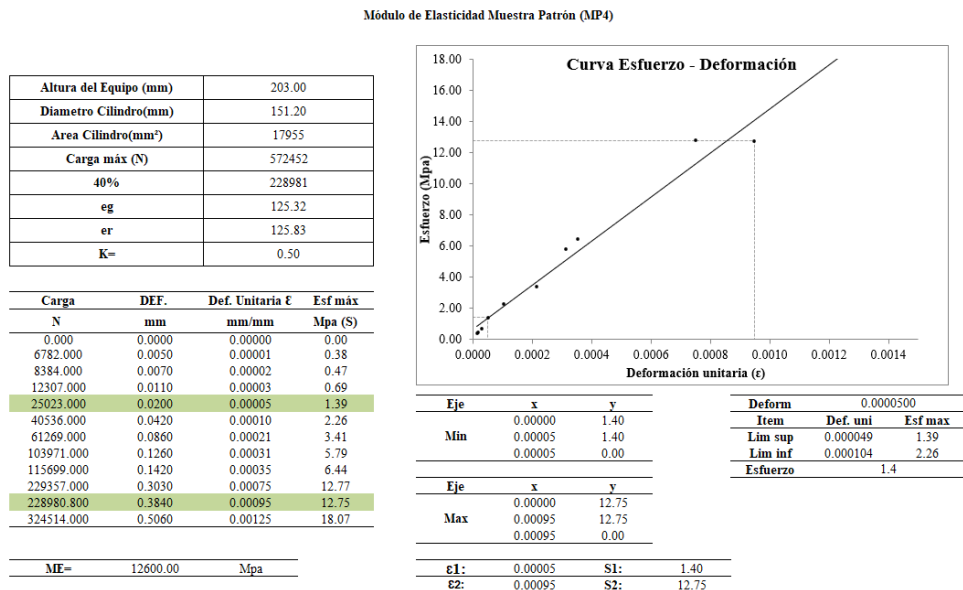
Cálculo del Módulo de Elasticidad de la Muestra Patrón (MP3)



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 23

Cálculo del Módulo de Elasticidad de la Muestra Patrón (MP4)



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 24

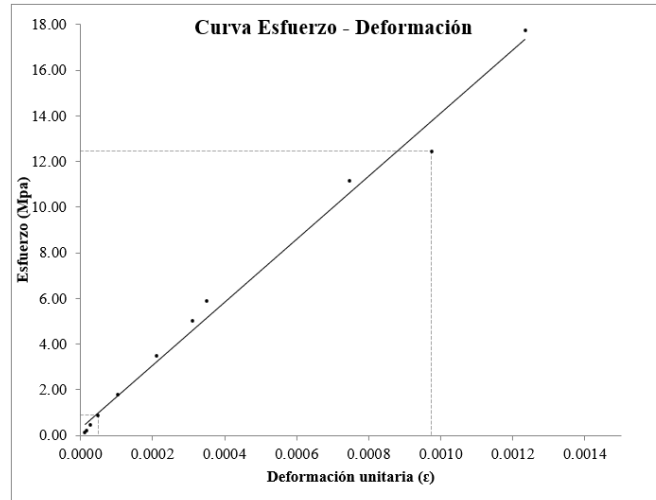
Cálculo del Módulo de Elasticidad de la Muestra Patrón (MP5)

Módulo de Elasticidad Muestra Patrón (MP5)

Altura del Equipo (mm)	203.00
Diametro Cilindro(mm)	150.40
Area Cilindro(mm ²)	17766
Carga máx (N)	552754
40%	221102
eg	125.32
er	125.83
K=	0.50

Carga	DEF.	Def. Unitaria ε	Esf máx
N	mm	mm/mm	Mpa (S)
0.000	0.0000	0.00000	0.00
2541.000	0.0050	0.00001	0.14
4121.000	0.0070	0.00002	0.23
8500.000	0.0110	0.00003	0.48
15500.000	0.0200	0.00005	0.87
32000.000	0.0420	0.00010	1.80
62000.000	0.0860	0.00021	3.49
89000.000	0.1260	0.00031	5.01
105000.000	0.1420	0.00035	5.91
198000.000	0.3030	0.00075	11.14
221101.600	0.3950	0.00097	12.45
315000.000	0.5000	0.00123	17.73

Módulo de Elasticidad	12600.00	Mpa
------------------------------	----------	-----



Eje	x	y
Min	0.00000	0.88
	0.00005	0.88
	0.00005	0.00

Deform	0.0000500	
Item	Def. uni	Esf max
Lim sup	0.000049	0.87
Lim inf	0.000104	1.80
Esfuerzo	0.9	

Eje	x	y
Max	0.00000	12.45
	0.00097	12.45
	0.00097	0.00

ε1:	0.00005	S1:	0.88
ε2:	0.00097	S2:	12.45

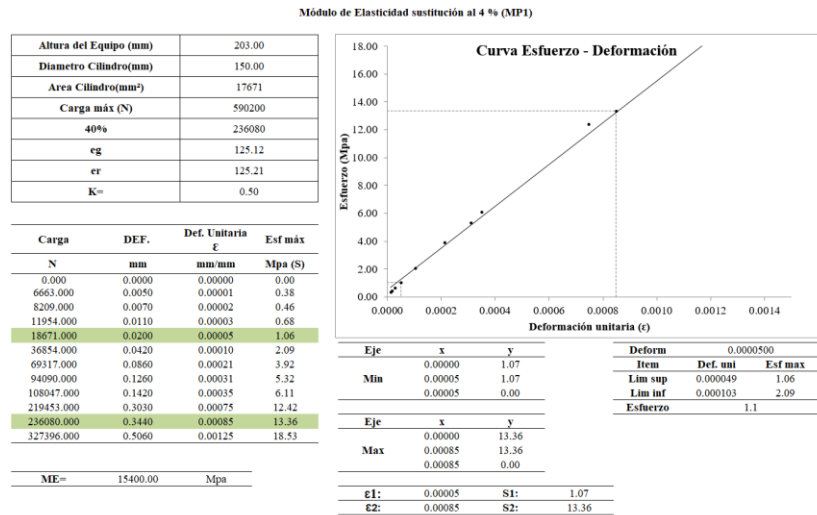
Nota Fuente. Propia 2025.

7.7 Determinación Experimental del Módulo de Elasticidad para la Muestra con 4 % de Sustitución de Árido Fino

7.7.1 Resultados Experimentales del Ensayo en Cilindros

Figura 25

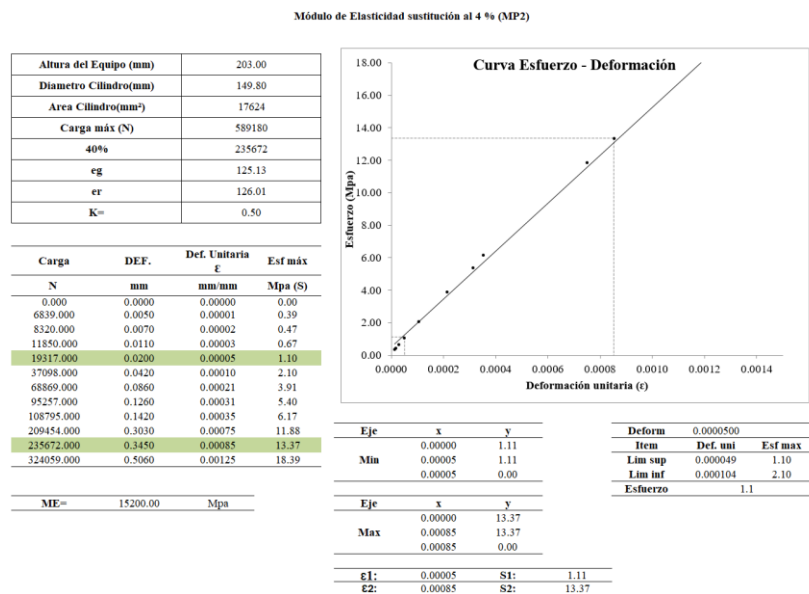
Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 4% (MP1)



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 26

Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 4% (MP2)



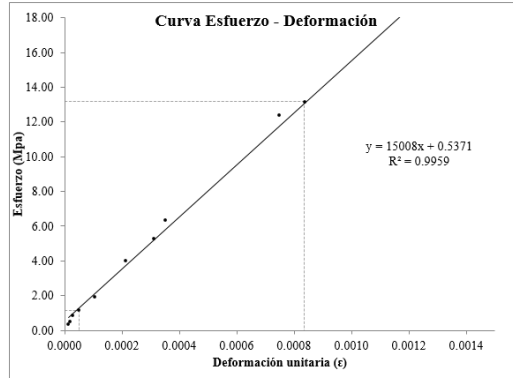
Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 27

Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 4% (MP3)

Módulo de Elasticidad sustitución al 4% (MP3)

Altura del Equipo (mm)	203.00
Diametro Cilindro(mm)	150.00
Area Cilindro(mm ²)	17671
Carga máx (N)	582338
40%	232935
eg	126.13
er	126.23
K=	0.50



Carga	DEF.	Def. Unitaria ε	Esf máx
N	mm	mm/mm	Mpa (S)
0.000	0.0000	0.00000	0.00
6667.000	0.0050	0.00001	0.38
8578.000	0.0070	0.00002	0.49
14872.000	0.0110	0.00003	0.84
20250.000	0.0200	0.00005	1.15
34205.000	0.0420	0.00010	1.94
70863.000	0.0860	0.00021	4.01
93622.000	0.1260	0.00031	5.30
112008.000	0.1420	0.00035	6.34
219187.000	0.3030	0.00075	12.40
232935.200	0.3390	0.00084	13.18
328341.000	0.5060	0.00125	18.58

Eje	x	y
Min	0.00000	1.16
	0.00005	1.16
	0.00005	0.00

Deform	Def. uni	Esf max
Lim sup	0.000049	1.15
Lim inf	0.000103	1.94
Esfuerzo		1.2

Eje	x	y
Max	0.00000	13.18
	0.00084	13.18
	0.00084	0.00

ε1:	0.00005	S1:	1.16
ε2:	0.00084	S2:	13.18

ME=	15400.00	Mpa
-----	----------	-----

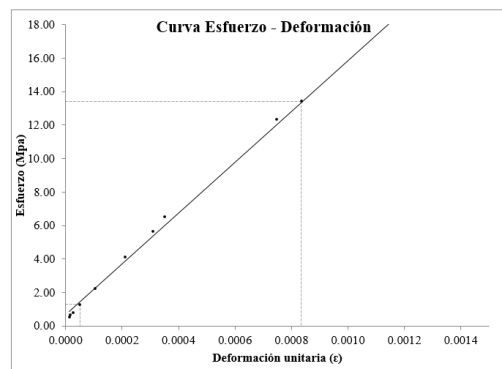
Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 28

Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 4% (MP4)

Módulo de Elasticidad sustitución al 4% (MP4)

Altura del Equipo (mm)	203.00
Diametro Cilindro(mm)	150.60
Area Cilindro(mm ²)	17813
Carga máx (N)	598123
40%	239249
eg	125.12
er	125.1
K=	0.50



Carga	DEF.	Def. Unitaria ε	Esf máx
N	mm	mm/mm	Mpa (S)
0.000	0.0000	0.00000	0.00
9666.000	0.0050	0.00001	0.54
11578.000	0.0070	0.00002	0.65
14429.000	0.0110	0.00003	0.81
22928.000	0.0200	0.00005	1.29
39916.000	0.0420	0.00010	2.24
73133.000	0.0860	0.00021	4.11
100384.000	0.1260	0.00031	5.64
116009.000	0.1420	0.00035	6.51
219451.000	0.3030	0.00075	12.32
239249.200	0.3390	0.00083	13.43
339151.000	0.5060	0.00125	19.04

Eje	x	y
Min	0.00000	1.30
	0.00005	1.30
	0.00005	0.00

Deform	Def. uni	Esf max
Lim sup	0.000049	1.29
Lim inf	0.000103	2.24
Esfuerzo		1.3

Eje	x	y
Max	0.00000	13.43
	0.00083	13.43
	0.00083	0.00

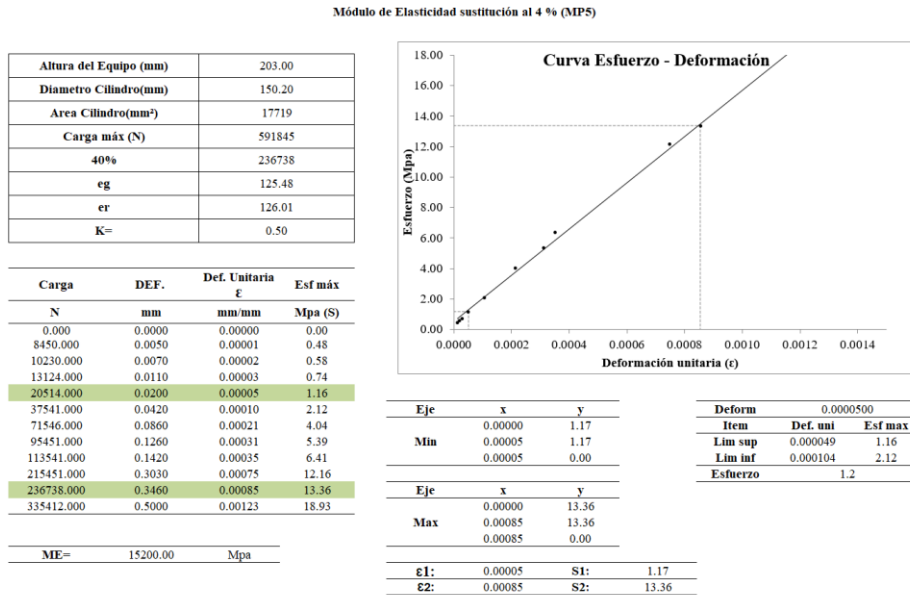
ε1:	0.00005	S1:	1.30
ε2:	0.00083	S2:	13.43

ME=	15400.00	Mpa
-----	----------	-----

Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 29

Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 4% (MP5)



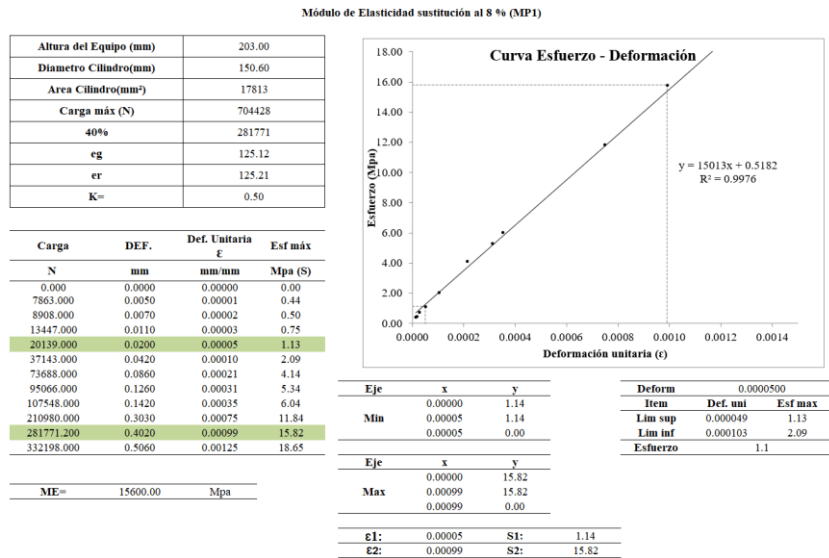
Nota Fuente. Propia 2025.

7.8 Determinación Experimental del Módulo de Elasticidad para la Muestra con 8 % de Sustitución de Árido Fino

7.8.1 Resultados Experimentales del Ensayo en Cilindros

Figura 30

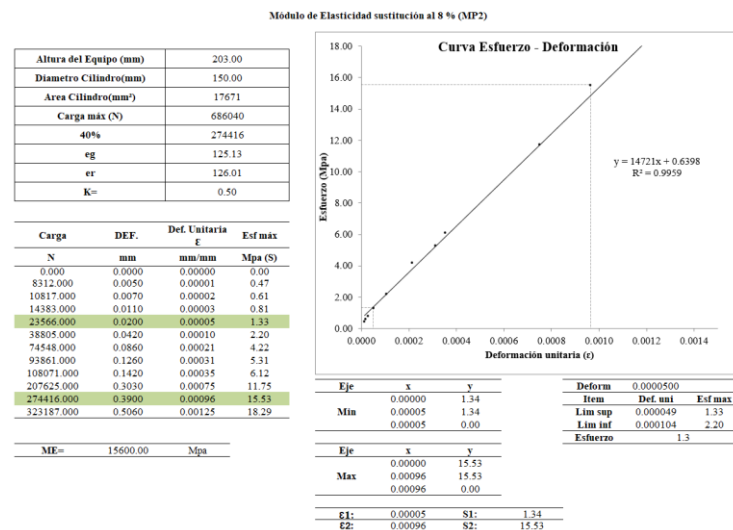
Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 8% (MP1)



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 31

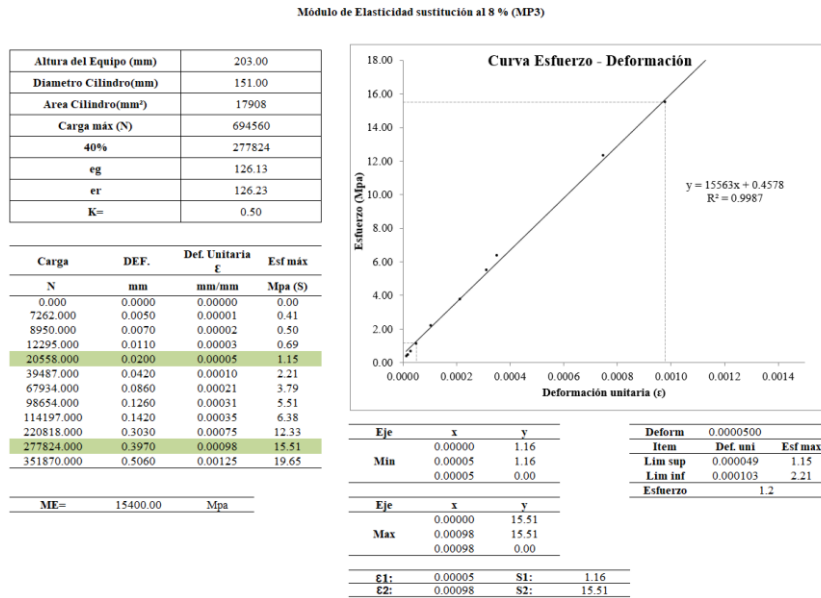
Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 8% (MP2)



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 32

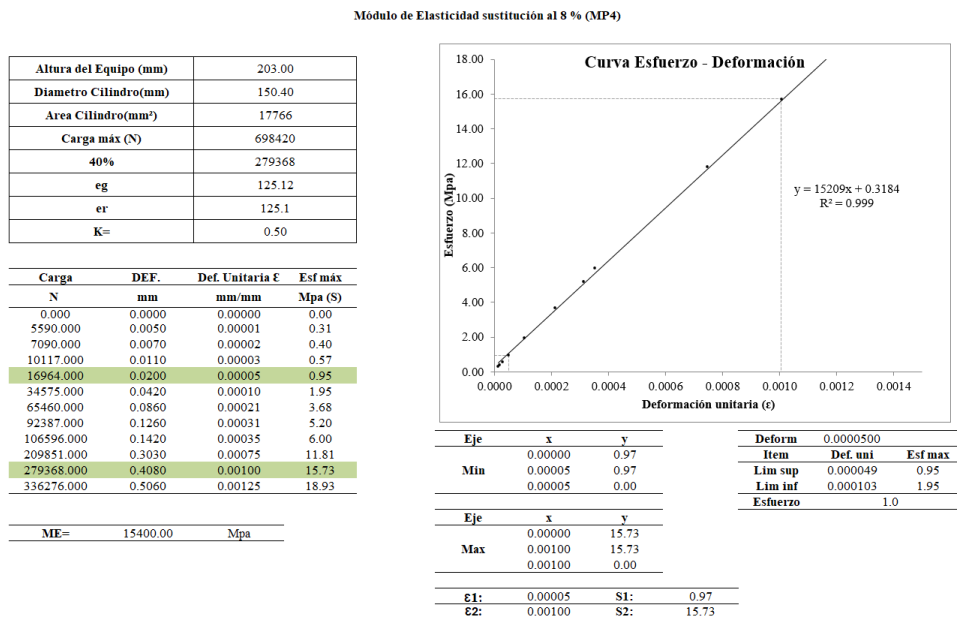
Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 8% (MP3)



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 33

Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 8% (MP4)



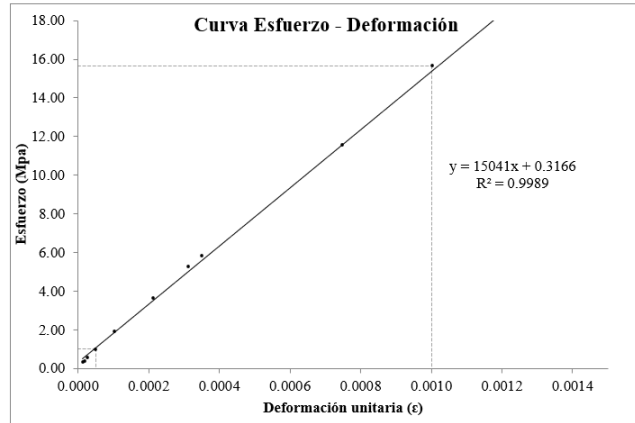
Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 34

Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 8% (MP5)

Módulo de Elasticidad sustitución al 8 % (MP5)

Altura del Equipo (mm)	203.00
Diametro Cilindro(mm)	151.00
Area Cilindro(mm²)	17908
Carga máx (N)	701415
40%	280566
eg	125.48
er	126.01
K=	0.50



Carga	DEF.	Def. Unitaria ε	Esf máx
N	mm	mm/mm	Mpa (S)
0.000	0.0000	0.00000	0.00
5599.000	0.0050	0.00001	0.31
7203.000	0.0070	0.00002	0.40
10191.000	0.0110	0.00003	0.57
17825.000	0.0200	0.00005	1.00
34176.000	0.0420	0.00010	1.91
65060.000	0.0860	0.00021	3.63
94600.000	0.1260	0.00031	5.28
104268.000	0.1420	0.00035	5.82
207324.000	0.3030	0.00075	11.58
280566.000	0.4060	0.00100	15.67
331158.000	0.5000	0.00123	18.49

ME=	15400.00	Mpa
-----	----------	-----

Eje	x	y
Min	0.00000	1.01
	0.00005	1.01
	0.00005	0.00

Deform	0.0000500	
Item	Def. uni	Esf max
Lim sup	0.000049	1.00
Lim inf	0.000104	1.91
Esfuerzo	1.0	

Eje	x	y
Max	0.00000	15.67
	0.00100	15.67
	0.00100	0.00

ε1:	0.00005	S1:	1.01
ε2:	0.00100	S2:	15.67

Nota Fuente. Propia 2025.

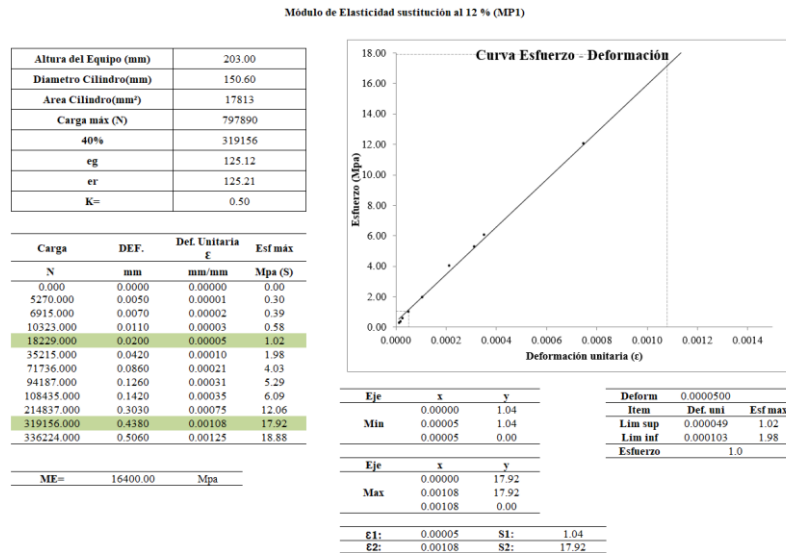
7.9 Determinación Experimental del Módulo de Elasticidad para la Muestra con 12

% de Sustitución de Árido Fino

7.9.1 Resultados Experimentales del Ensayo en Cilindros

Figura 35

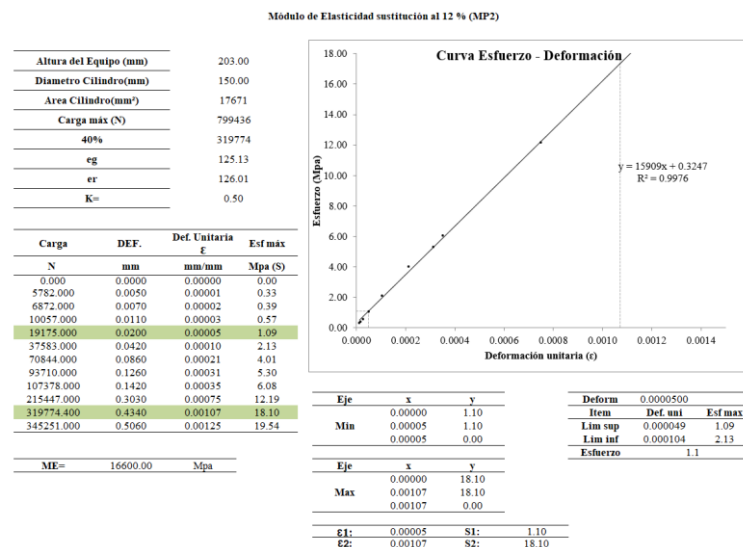
Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 12% (MP1)



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 36

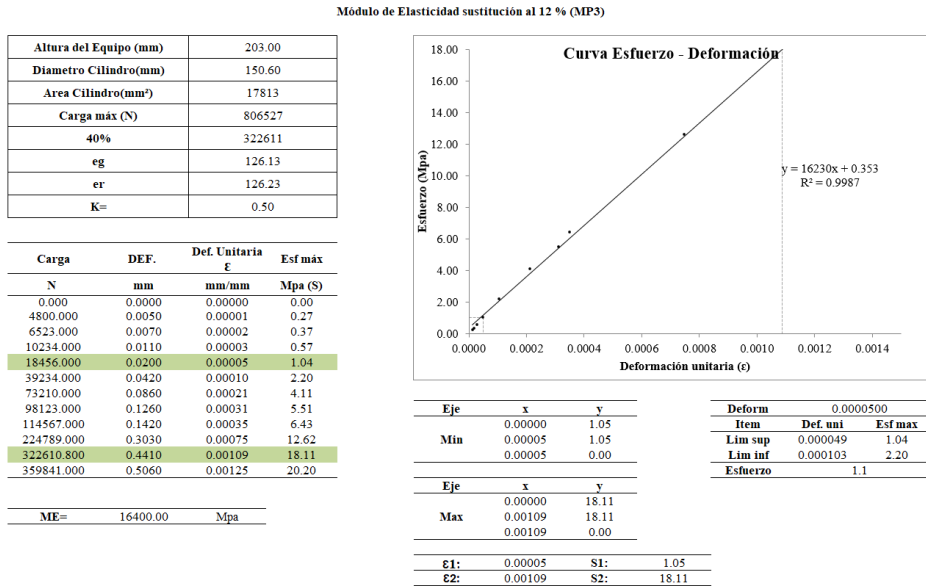
Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 12% (MP2)



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 37

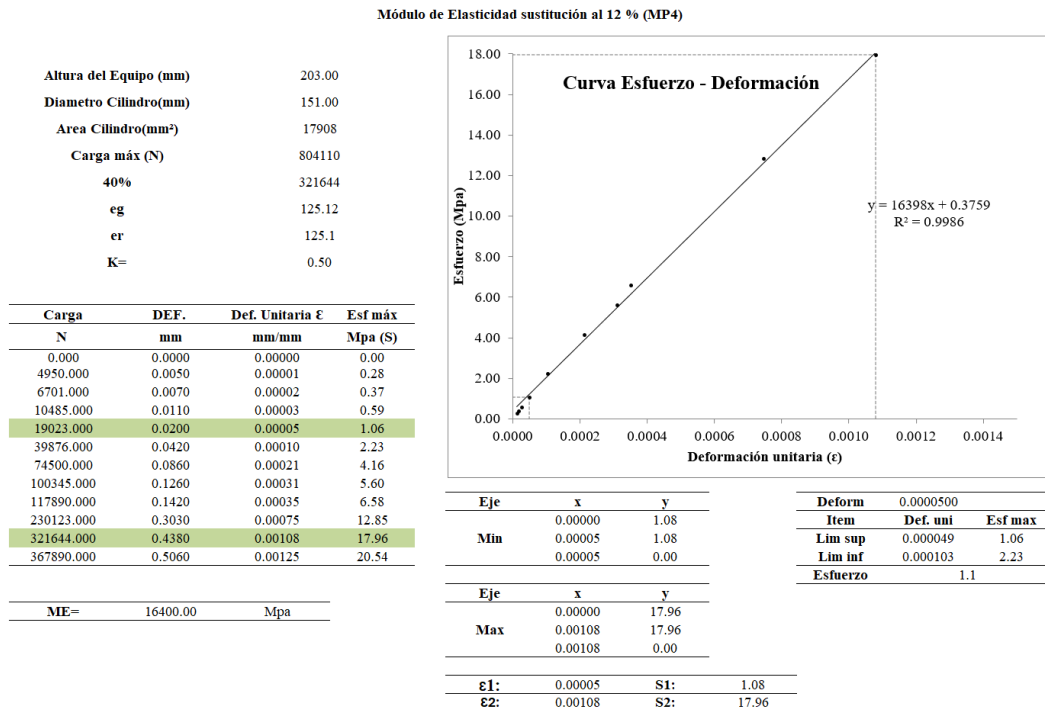
Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 12% (MP3)



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 38

Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 12% (MP4)



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 39

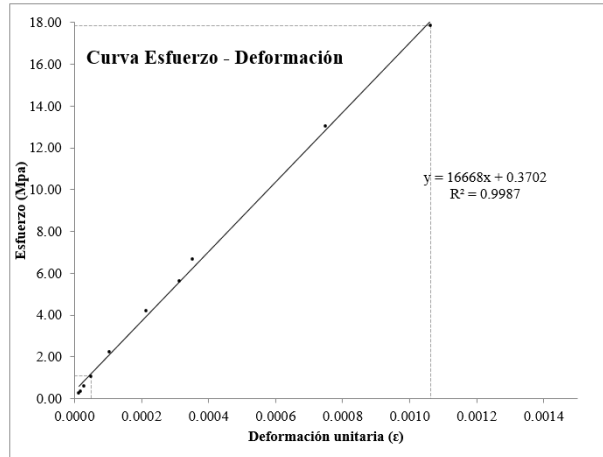
Cálculo del Módulo de Elasticidad con sustitución al 12% (MP5)

Módulo de Elasticidad sustitución al 12 % (MP5)

Altura del Equipo (mm)	203.00
Diametro Cilindro(mm)	151.00
Area Cilindro(mm ²)	17908
Carga máx (N)	798952
40%	319581
eg	125.48
er	126.01
K=	0.50

Carga	DEF.	Def. Unitaria ε	Esf máx
N	mm	mm/mm	Mpa (S)
0.000	0.0000	0.00000	0.00
5123.000	0.0050	0.00001	0.29
6890.000	0.0070	0.00002	0.38
10876.000	0.0110	0.00003	0.61
19540.000	0.0200	0.00005	1.09
40234.000	0.0420	0.00010	2.25
75890.000	0.0860	0.00021	4.24
101234.000	0.1260	0.00031	5.65
119567.000	0.1420	0.00035	6.68
233456.000	0.3030	0.00075	13.04
319580.800	0.4300	0.00106	17.85
372345.000	0.5000	0.00123	20.79

ME=	16600.00	Mpa
-----	----------	-----



Eje	x	y
Min	0.00005	1.10
Max	0.00106	17.85

Item	Def. uni	Esf max
Lim sup	0.000049	1.09
Lim inf	0.000104	2.25
Esfuerzo		1.1

Eje	x	y
Min	0.00000	17.85
Max	0.00106	0.00

ε1:	0.00005	S1:	1.10
ε2:	0.00106	S2:	17.85

Nota Fuente. Propia 2025.

7.10 Anexo Fotográfico

Tabla 1

Normas Técnicas Ecuatorianas (NTE INEN) para Ensayos de Caracterización de Áridos

N.-	Informe de ensayo	Tipo de árido	Norma
1	Determinación de las impurezas orgánicas en el árido fino para hormigones	Agregado fino	NTE INEN 855:2010
2	Áridos. análisis granulométrico en el árido fino	Agregado fino	NTE INEN 696:2011
3	Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino	Agregado fino	NTE INEN 856:2010
4	Determinación de la masa unitaria (peso volumétrico), en árido fino	Agregado fino	NTE INEN 858:2010
5	Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.5 mm usando la máquina de los ángeles	Agregado grueso	NTE INEN 860:2011
6	Análisis granulométrico en el árido grueso.	Agregado grueso	NTE INEN 696:2011
7	Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso	Agregado grueso	NTE INEN 857:2010

Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 40

Ensayo de Impurezas Orgánicas en el Árido Fino



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 41

Proceso de Tamizado Manual del Árido Grueso para Ensayos de Caracterización



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 42

Clasificación Granulométrica del Árido Grueso



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 43

Máquina de Los Ángeles para el Ensayo de Degradación del Árido Grueso



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 44

Mezcladora de Concreto con Agregados



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 45

Revenimiento del Concreto



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 46

Trituración del material reciclado



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 47

Cilindros de Concreto de la Muestra Patrón Marcados para Ensayo a Compresión



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 48

Almacenamiento de Cilindros de Concreto en Zona de Curado Húmedo



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 49

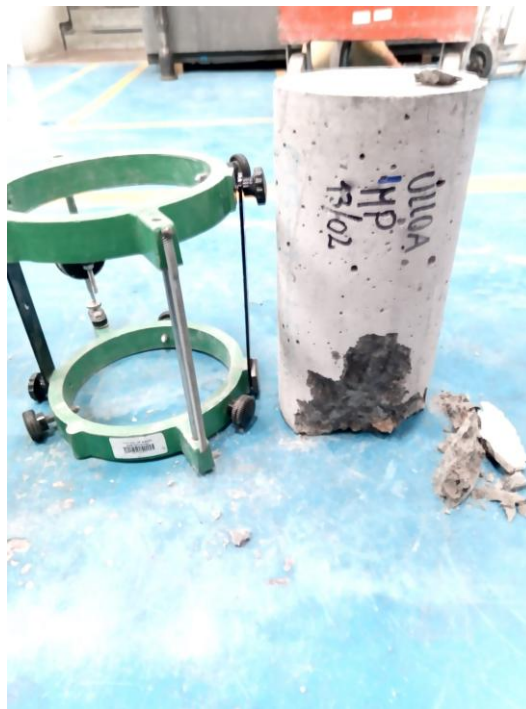
Ensayo de módulo de elasticidad en cilindro de concreto



Nota Fuente. Propia 2025.

Figura 50

Cilindro de concreto tras ensayo de módulo de elasticidad



Nota Fuente. Propia 2025.