

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**ESCUELA DE CIVIL**

**DISERTACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL HORMIGÓN  
UTILIZANDO PVC RECICLADO, CEMENTO SELVALEGRE Y ÁRIDOS DE LA MINA  
LA CHIMBA - CAYAMBE**

**AUTORES:**

FLORES ROJAS JOHN DAVID

QUEL GUERRÓN ANDRÉS FERNANDO

**DIRECTOR:**

ING. LAURO LARA

QUITO, 2022

## **DEDICATORIA**

A mis padres, quienes me apoyaron por varios años incondicionalmente y me dieron la oportunidad de estudiar en esta prestigiosa universidad.

A mis hermanos, por permitirme ser su guía y ejemplo, ustedes siempre serán mi inspiración para seguir adelante.

***John Flores***

A Dios y mis padres por darme todo lo que soy como persona, por enseñarme a enfrentar toda adversidad sin desistir en el intento, por su amor incondicional, su sabio consejo y ser mis guías en todo mi camino y en esta etapa.

A mis abuelos Eduardo y Lucía por su consentimiento, cariño y apoyo incondicional.

A mi hermana, quien es parte esencial de mi vida y a quien busco darle un buen ejemplo.

A todos ustedes, les dedico este logro.

***Andrés Quel***

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por guiar y cuidar siempre mi camino.

A mis padres, por confiar siempre en mí, por levantarme y apoyarme todas las veces que caí, por impulsarme a seguir adelante y por formar la persona que soy ahora.

A mis hermanos, por acompañarme en todo momento y brindarme infinitas alegrías.

A varios ingenieros de la PUCE que colaboraron en mi proceso de formación universitaria, al Ing. Lauro Lara por su guía en este trabajo, a Diego Cajas y Wilson Cando por compartir sus conocimientos y experiencias profesionales, a Marcelo Guerra por su enseñanza en estructuras y construcciones, y a Óscar Jaramillo por la oportunidad laboral brindada.

A mis amigos, por toda su ayuda y apoyo, especialmente a Andrés y Carlos, desde nivelación luchando por conseguir la ingeniería y ahora lo hemos logrado.

Y a varias personas muy especiales quienes con su tiempo y apoyo me ayudaron a cumplir esta meta.

***John Flores***

A Dios por ser el guía de mi camino.

A mis padres, por darme la oportunidad de estudiar y confiar en mí, por los principios y valores inculcados, siempre serán mi inspiración.

A mis abuelos por ser pieza fundamental en esta etapa de mi vida y darme ánimos en este proceso.

A los docentes que me guiaron en toda la etapa universitaria por los conocimientos impartidos, en especial al Ing. Wilson Cando por su apoyo durante toda la carrera universitaria, al Ing. Juan Carlos Montero, Ing. Marcelo Guerra, Ing. Diego Cajas por su excelente metodología de enseñanza y a mi tutor, el Ing. Lauro Lara, por el tiempo dedicado a la elaboración de esta tesis.

Al American Concrete Institute Student Chapter de la PUCE por su acogida y conocimientos extra aportados.

A mis amigos de facultad que me acompañaron desde los primeros días y por su apoyo diario, en especial a John y Carlos que semestre a semestre nos apoyamos para poder culminar este objetivo.

A todas las personas especiales que aportaron para que esta etapa universitaria haya sido culminada con éxito.

***Andrés Quel***

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>RESUMEN</b> .....	9
<b>ABSTRACT</b> .....	10
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b> .....	11
1.1 Planteamiento del Problema .....	11
1.2 Cuestionamiento durante la Investigación .....	11
1.3 Justificación .....	12
1.4 Objetivos .....	14
1.4.1 Objetivo General .....	14
1.4.2 Objetivos Específicos .....	14
1.5 Alcance .....	15
<b>CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO</b> .....	16
2.1 Antecedentes .....	16
2.2 Hormigón y sus Componentes .....	19
2.2.1 Agregados .....	21
2.2.2 Cemento Portland .....	29
2.2.3 Agua Cruda .....	29
2.2.4 Policloruro de Vinilo (PVC) .....	30
2.3 Propiedades físico-mecánicas del Hormigón .....	32
2.3.1 Trabajabilidad y Consistencia .....	33
2.3.2 Durabilidad .....	35
2.3.3 Segregación .....	35
2.3.4 Resistencia a la Compresión .....	36
2.3.5 Resistencia a la Flexión .....	39
<b>CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA</b> .....	41
3.1 Recolección de Datos .....	41
3.2 Tipo de Investigación .....	43
3.3 Procedimientos e Instrumentos .....	44
3.4 Caracterización de Agregados y Resultados .....	46
3.4.1 Granulometría del Agregado Grueso y Fino .....	46
3.4.2 Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso .....	51
3.4.3 Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino .....	52

3.4.4 Equivalente de Arena.....	53
3.4.5 Resistencia a la Abrasión del Agregado Grueso .....	54
3.4.6 Contenido Orgánico .....	55
3.5 Caracterización de PVC y Resultados.....	56
3.5.1 Granulometría del PVC .....	56
3.5.2 Peso Unitario del PVC .....	57
3.5.3 Gravedad Específica del PVC.....	57
3.6 Propiedades del Cemento.....	58
3.6.1 Propiedades Físicas del Cemento .....	58
3.6.2 Propiedades Químicas del Cemento.....	59
3.7 Diseño de Mezclas de Hormigón .....	60
3.7.1 Métodos de Dosificación .....	60
3.7.2 Datos iniciales para Dosificación.....	62
3.7.3 Estimación de asentamiento y tamaño máximo nominal .....	63
3.7.4 Estimación de cantidad de agua de mezcla y contenido de aire.....	64
3.7.5 Estimación de cantidad de cemento (Relación Agua/Cemento).....	65
3.7.6 Estimación de Agregados (Estado Saturado con Superficie Seca "S.S.S").....	66
3.7.7 Estimación de Agregados (Estado Natural) .....	69
3.7.8 Reestimación de Mezcla de Hormigón .....	70
3.7.9 Dosificaciones Finales del Hormigón .....	71
3.8 Cálculo de Módulo de Elasticidad.....	73
<b>CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
4.1 Resistencia a la Compresión .....	75
4.2 Resistencia a la Flexión .....	81
4.3 Módulo de Elasticidad.....	87
4.4 Análisis Comparativo Económico.....	91
<b>CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>94</b>
5.1 Conclusiones .....	94
5.2 Comentarios.....	98
5.3 Recomendaciones.....	99
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>100</b>
<b>7. ANEXOS.....</b>	<b>105</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resistencia esperada y total de muestras a realizar.....	15
Tabla 2. Formas del agregado.....	24
Tabla 3. Datos informativos de la Mina La Chimba - Cayambe.....	28
Tabla 4. Criterio de aceptación de aguas dudosas.....	29
Tabla 5. Temperatura mínima y máxima del hormigón al ser colocado.....	34
Tabla 6. Ensayos por realizar en agregados.....	44
Tabla 7. Ensayos por realizar en hormigón.....	45
Tabla 8. Requisitos de gradación para áridos gruesos.....	47
Tabla 9. Granulometría del agregado grueso (Mina La Chimba).....	47
Tabla 10. Límites granulométricos para agregado fino (INEN).....	48
Tabla 11. Granulometría del agregado fino (Mina La Chimba).....	49
Tabla 12. Módulo de finura del agregado fino (Mina La Chimba).....	50
Tabla 13. Gravedad específica del agregado grueso (Mina La Chimba).....	51
Tabla 14. Gravedad específica del agregado fino (Mina La Chimba).....	52
Tabla 15. Equivalente de arena.....	53
Tabla 16. Valores mínimos recomendados de equivalente de arena para varios usos.....	54
Tabla 17. Ensayo de abrasión en áridos gruesos (Mina La Chimba).....	55
Tabla 18. Contenido orgánico en áridos finos (Mina La Chimba).....	56
Tabla 19. Granulometría del PVC.....	56
Tabla 20. Peso unitario del PVC.....	57
Tabla 21. Gravedad específica del PVC.....	57
Tabla 22. Propiedades físicas del cemento (Selvalegre).....	58
Tabla 23. Propiedades químicas del cemento (Selvalegre).....	59
Tabla 24. Datos obtenidos de los materiales para dosificación de hormigón.....	62
Tabla 25. Valores de asentamiento recomendados para diferentes tipos de construcción...	63
Tabla 26. Requerimientos aproximados de contenido de aire y agua de mezcla.....	64
Tabla 27. Valores estimados para relación agua / cemento.....	65
Tabla 28. Granulometría ideal según Fuller - Thompson.....	66
Tabla 29. Granulometría de Fuller-Thompson (Mina La Chimba).....	67
Tabla 30. Dosificación para hormigón convencional, $f'c=240$ kg/cm <sup>2</sup> .....	71
Tabla 31. Dosificación para hormigón modificado con PVC al 3%, $f'c=240$ kg/cm <sup>2</sup> .....	71

Tabla 32. Dosificación para hormigón modificado con PVC al 5%, $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ .....	72
Tabla 33. Dosificación para hormigón modificado con PVC al 7%, $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ .....	72
Tabla 34. Dosificación para hormigón modificado con PVC al 9%, $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ .....	72
Tabla 35. Resistencia a la compresión - Hormigón convencional .....	75
Tabla 36. Resistencia a la compresión - Hormigón con PVC al 3% .....	76
Tabla 37. Resistencia a la compresión - Hormigón con PVC al 5% .....	77
Tabla 38. Resistencia a la compresión - Hormigón con PVC al 7% .....	78
Tabla 39. Resistencia a la compresión - Hormigón con PVC al 9% .....	79
Tabla 40. Resistencia a compresión (convencional y con PVC) – Tabla resumen .....	80
Tabla 41. Resistencia a la flexión - Hormigón convencional.....	81
Tabla 42. Resistencia a la flexión - Hormigón con PVC al 3% .....	82
Tabla 43. Resistencia a la flexión - Hormigón con PVC al 5% .....	83
Tabla 44. Resistencia a la flexión - Hormigón con PVC al 7% .....	84
Tabla 45. Resistencia a la flexión - Hormigón con PVC al 9% .....	85
Tabla 46. Módulo de rotura obtenidos (convencional y con PVC) – Tabla resumen .....	86
Tabla 47. Módulo de Elasticidad - Hormigón convencional .....	87
Tabla 48. Módulo de elasticidad - Tabla resumen.....	89
Tabla 49. Cantidades y costos para $1\text{m}^3$ de hormigón convencional, $f'c= 240 \text{ kg/cm}^2$ .....	91
Tabla 50. Cantidades y costos para $1\text{m}^3$ de hormigón con 3% de PVC, $f'c= 240 \text{ kg/cm}^2$ .....	92
Tabla 51. Cantidades y costos para $1\text{m}^3$ de hormigón con 5% de PVC, $f'c= 240 \text{ kg/cm}^2$ .....	92
Tabla 52. Cantidades y costos para $1\text{m}^3$ de hormigón con 7% de PVC, $f'c= 240 \text{ kg/cm}^2$ .....	92
Tabla 53. Cantidades y costos para $1\text{m}^3$ de hormigón con 9% de PVC, $f'c= 240 \text{ kg/cm}^2$ .....	93
Tabla 54. Caracterización de agregados - Tabla resumen .....	94
Tabla 55. Módulo de elasticidad - Hormigón convencional (Muestra 2) .....	105
Tabla 56. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 3% (Muestra 1).....	106
Tabla 57. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 3% (Muestra 2).....	107
Tabla 58. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 5% (Muestra 1).....	108
Tabla 59. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 5% (Muestra 2).....	109
Tabla 60. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 7% (Muestra 1).....	110
Tabla 61. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 7% (Muestra 2).....	111
Tabla 62. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 9% (Muestra 1).....	112
Tabla 63. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 9% (Muestra 2).....	113

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Registro de gestión integral de desechos sólidos - INEC .....	13
Gráfico 2. Material utilizado en cimientos.....	20
Gráfico 3. Material utilizado en estructuras .....	20
Gráfico 4. Material utilizado en cubiertas .....	21
Gráfico 5. Mapa de suelos del cantón Cayambe .....	27
Gráfico 6. Mapa de referencia para ubicación “La Chimba” .....	28
Gráfico 7. Trabajabilidad vs asentamiento .....	33
Gráfico 8. Esquema de los modelos típicos de fractura en cilindros.....	38
Gráfico 9. Curva granulométrica del agregado grueso (Mina La Chimba) .....	48
Gráfico 10. Curva granulométrica del agregado fino (Mina La Chimba) .....	49
Gráfico 11. Flujo de trabajo para elaborar la dosificación del hormigón .....	61
Gráfico 12. Resultados de $f'c$ promedio y $f'c$ característico a diferentes % de PVC.....	80
Gráfico 13. Resultados de MR promedio y MR característico a diferentes % de PVC .....	86
Gráfico 14. Curva Módulo de Elasticidad (Hormigón convencional) – Muestra 1 .....	88
Gráfico 15. Módulos de elasticidad de hormigones con diferentes % de PVC.....	90
Gráfico 16. Valores de $\alpha$ (alfa) para módulo de elasticidad .....	90
Gráfico 17. Valores de $\gamma$ (gamma) para módulo de elasticidad.....	91
Gráfico 18. Comparación de costos entre hormigón convencional y con PVC. ....	93
Gráfico 19. Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón convencional (Muestra 2).....	114
Gráfico 20. Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 3% (Muestra 1).....	115
Gráfico 21. Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 3% (Muestra 2).....	116
Gráfico 22. Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 5% (Muestra 1).....	117
Gráfico 23. Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 5% (Muestra 2).....	118
Gráfico 24. Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 7% (Muestra 1).....	119
Gráfico 25. Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 7% (Muestra 2).....	120
Gráfico 26. Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 9% (Muestra 1).....	121
Gráfico 27. Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 9% (Muestra 2).....	122

## RESUMEN

En la presente investigación se analiza y determina las propiedades físico-mecánicas del hormigón hidráulico al reemplazar en ciertos porcentajes, el agregado grueso de origen pétreo, por PVC (Policloruro de Vinilo) reciclado y triturado; enfocándonos principalmente en el comportamiento a compresión y flexión, a la edad de 28 días.

Se recolecta tubería de PVC de varias obras civiles en las ciudades de Quito y Cayambe, principalmente tubería que no ha sido utilizada o ha sido desechada, para posteriormente triturar el material mediante procesos industriales. El agregado fino y grueso se obtiene de la mina "La Chimba" ubicada en el cantón Cayambe, provincia de Pichincha, el cual es sometido a ensayos estipulados en las normas NTE INEN (Norma Técnica Ecuatoriana) para verificar si cumplen los requisitos de calidad establecidos y son aptos para la elaboración de mezcla de hormigón. Una vez verificado que los agregados cumplen con los requisitos mínimos, se elaboran dosificaciones de hormigón utilizando método ACI modificado, dónde se procede a cuantificar la cantidad de PVC que reemplazará el agregado grueso en porcentajes de 3%, 5%, 7% y 9%. Adicionalmente se realiza una dosificación para elaborar hormigón hidráulico convencional de resistencia requerida  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$  que servirá como base para comparar las propiedades físico-mecánicas de los especímenes modificados con PVC.

Una vez obtenidas las dosificaciones para hormigón convencional y hormigón con PVC, se procede a elaborar especímenes en forma de cilindros y vigas, mismos que serán ensayados considerando la norma NTE INEN 1573 para compresión y para flexión la norma NTE INEN 2554. Finalmente, se procede a realizar el análisis y comparación de resultados para verificar la validez de la hipótesis y obtener conclusiones sobre esta investigación.

**Palabras Clave:** PVC, hormigón, agregados, cemento, compresión, flexión.

## ABSTRACT

In the research, the physical-mechanical properties of hydraulic concrete are analyzed and determined by replacing, in certain percentages, the coarse aggregate of stone origin, by PVC (polyvinyl chloride) recycled and crushed, focusing mainly on the behavior to compression and bending, at the age of 28 days.

PVC pipe is collected from various civil works in the cities of Quito and Cayambe, mainly pipe that has not been used or has been discarded, to subsequently grind the material through industrial processes. The fine and coarse aggregate is obtained from the "La Chimba" mine located in the Cayambe canton, province of Pichincha, which is subjected to tests stipulated in the NTE INEN standards (Ecuadorian Technical Standard) to verify if they meet the established quality requirements. and are suitable for the preparation of concrete mix. Once it has been verified that the aggregates meet the minimum requirements, concrete dosages are prepared using the modified ACI method, where the amount of PVC that will replace the thick aggregate is quantified in percentages of 3%, 5%, 7% and 9%. % . Additionally, a dosage is made to prepare conventional hydraulic concrete with the required resistance  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ , which serves as a basis for comparing the physical-mechanical properties of the specimens modified with PVC.

Once the dosages for conventional concrete and concrete with PVC have been obtained, specimens are made in the form of cylinders and beams, which will be tested considering the NTE INEN 1573 standard for compression and the NTE INEN 2554 standard for bending. proceeds to carry out the analysis and comparison of results to verify the validity of the hypothesis and obtain conclusions about this investigation.

**Keywords:** PVC, concrete, aggregates, cement, compression, bending.

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Planteamiento del Problema**

El hormigón es el material más utilizado en el mundo en el área de la construcción, debido principalmente a la facilidad que se tiene para obtener su materia prima: agregados pétreos, cemento y agua; los cuales provienen de la naturaleza, sin embargo, el manejo y tratamiento de estos materiales producen diversas consecuencias negativas en el ámbito medioambiental.

Por este motivo, se investigan nuevas tecnologías que reduzcan este impacto medioambiental y a la vez mejoren el desempeño del hormigón. Lo más utilizado hoy en día es el uso de aditivos y/o la adición de fibras de polipropileno para la mejora de sus características, sin embargo, nos cuestionamos, ¿existe otro material que pueda mejorar el desempeño del hormigón, y a la vez sea un aporte para mitigar los efectos medioambientales?

En tal virtud, se ha propuesto la producción de hormigón añadiendo a su mezcla residuos de PVC triturado que reemplazarán al agregado grueso en cierto porcentaje, con el fin de analizar sus nuevas propiedades física-mecánicas y comparar con la producción de hormigón convencional, consiguiendo hipotéticamente un mejoramiento en su desempeño físico y mecánico; y, además, beneficios ambientales y económicos en su producción.

### **1.2 Cuestionamiento durante la Investigación**

- ¿Qué impacto tiene el triturado de PVC, en las propiedades físico-mecánicas del hormigón hidráulico, al utilizarlo en reemplazo parcial del agregado grueso?
- ¿Se puede conseguir una mejor resistencia a la compresión y flexión, buena trabajabilidad y alta durabilidad, utilizando hormigón con añadidura de PVC triturado?

### 1.3 Justificación

La generación de desechos sólidos y su gestión inadecuada ha provocado consecuencias graves a nivel mundial por varios años, entre ellos, el mayor problema que podemos observar es la contaminación ambiental.

En nuestro país existe un alto índice de producción industrial: productos alimenticios, textiles, agroindustriales, constructivos, etc. Sin embargo, en la mayoría de estos sectores no se realizan inversiones en procesos de tratamiento de desechos, reciclado o reutilización de materiales, únicamente se gestiona la depuración de estos.

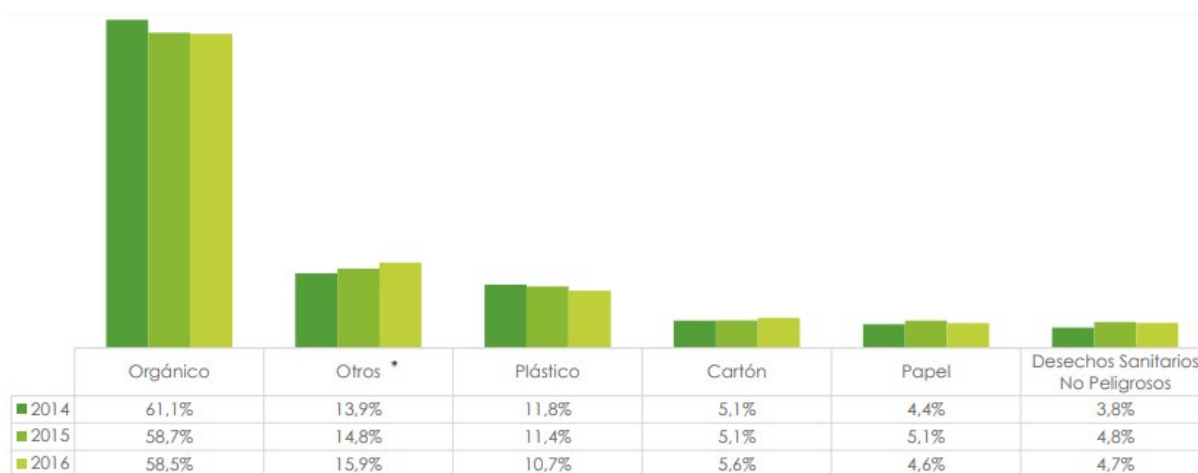
Uno de los sectores productivos en nuestro país es el sector constructivo, en el cual, la tubería de PVC es utilizada en un gran porcentaje para obras civiles, debido a que son elementos que componen casi todo el sistema hidráulico e hidrosanitario.

Mannise (2011) explica que estos elementos generan un porcentaje considerable de desperdicio durante el proceso constructivo, el cual si no recibe un tratamiento de reuso puede afectar al medio ambiente, específicamente al suelo y aguas subterráneas al momento que estos residuos se ponen en contacto con algún vertedero y sus componentes químicos son desprendidos. Por otro lado, puede ser mortal para el ser humano debido a que, al momento de incinerar el PVC desechado, éste libera sustancias químicas que incluyen dioxinas (compuesto químico originado a partir de procesos de combustión los cuales se establecen como un contaminante ambiental), las cuales son liberadas al medio ambiente y contaminan el aire de nuestro entorno. Adicionalmente, el respirar cloruro de vinilo (compuesto principal del PVC) durante un tiempo prolongado puede causar daño permanente al hígado, daño a los nervios e inclusive la muerte.

En varios países se ha optado por el reciclaje como principal solución para la contaminación, evitando que el material desechable como plástico, vidrio, cartón, entre otros; pase por varios procesos industriales que afectan al medio ambiente; procesos de extracción, recolección, transporte, incineración; causando emisión de CO<sub>2</sub>, generación de lixiviados, erosión, etc.

Actualmente en Ecuador no se tiene datos exactos de la cantidad de desperdicios de PVC que se genera, sin embargo, se ha obtenido datos del INEC sobre residuos sólidos en general y se determina que alrededor de 260.000 toneladas al año se tratan como desperdicio, siendo la Sierra la región que más desperdicios genera. Se puede observar que el plástico es el tercer material más desechado en nuestro país, con un 10,7% de desecho total en 2016, y aunque cada año se ha tratado de reducir su porcentaje de desecho, sigue siendo un valor crítico en el ámbito medioambiental. En el gráfico 1 se presentan datos estadísticos de los materiales que se desechan en mayor cantidad en Ecuador.

**Gráfico 1.** Registro de gestión integral de desechos sólidos - INEC



Nota. Datos obtenidos de INEC (2020)

Después de realizar este análisis global y local acerca del uso de residuos sólidos y su mala gestión de desechos, específicamente del PVC, se puede observar los diversos efectos negativos que produce al medio ambiente, por tanto, considerando como principal solución el proceso de reutilización de desechos sólidos, proponemos la siguiente disertación.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

- Diseñar y elaborar mezclas de hormigón convencional y hormigón modificado añadiendo PVC reciclado triturado, utilizando cemento Selvagre y áridos de la Mina La Chimba - Cayambe, para analizar y evaluar su comportamiento en función de sus propiedades físico-mecánicas.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar los agregados que serán utilizados en las mezclas de hormigón y verificar que cumplan con las especificaciones establecidas por normativa local.
- Elaborar especímenes de hormigón convencional y hormigón modificado con residuos de PVC, en porcentajes de reemplazo indicados, diseñados para una resistencia esperada de  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .
- Ensayar las muestras elaboradas y obtener resultados de resistencia característica a compresión y flexión; y módulo de elasticidad, para posteriormente analizarlos y compararlos.
- Realizar un análisis comparativo económico, en base al costo de los materiales, para la elaboración de hormigón convencional y hormigón con residuos de PVC añadido.

## 1.5 Alcance

Se realizará 5 dosificaciones de mezclas de hormigón aplicando método ACI modificado, para la elaboración de hormigón convencional y hormigón modificado con PVC, reemplazando volumen de agregado grueso con residuos de PVC triturado, en porcentajes establecidos de 3%, 5%, 7% y 9%, diseñando para una resistencia esperada de  $f'c$  240 kg/cm<sup>2</sup>.

Se utilizan las dosificaciones obtenidas para elaborar mezclas de hormigón en sitio y obtener 7 especímenes cilíndricos y 4 viguetas por cada dosificación (detallado en la Tabla 1).

A la edad de 28 días se someten los cilindros a ensayos de compresión y las viguetas a ensayos de flexión, siguiendo procedimientos de normativa NTE INEN 1573 y NTE INEN 2554. Adicionalmente, 10 cilindros elaborados, dos por cada dosificación, son destinados para la obtención del módulo de elasticidad del hormigón convencional y hormigón modificado con PVC triturado. Después de obtener los resultados de los ensayos descritos, se procede a realizar los respectivos cálculos, análisis y comparación de valores.

**Tabla 1.** Resistencia esperada y total de muestras a realizar.

<b>Resistencia característica <math>f'c</math></b>	240 kg/cm <sup>2</sup>
<b>Edad</b>	28 días
<b>Mezcla convencional</b>	6 cilindros - 4 viguetas
<b>Reemplazo PVC 3%</b>	6 cilindros - 4 viguetas
<b>Reemplazo PVC 5%</b>	6 cilindros - 4 viguetas
<b>Reemplazo PVC 7%</b>	6 cilindros - 4 viguetas
<b>Reemplazo PVC 9%</b>	6 cilindros - 4 viguetas
<b>Módulo de Elasticidad</b>	10 cilindros
<b>TOTAL</b>	60 especímenes

Nota. Elaboración propia

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes

En América Latina, se ha ido incorporando una conciencia ambiental más fuerte en la población, aumentando la cantidad de material reciclado y reutilizado en varios países.

En Ecuador no existe suficiente información sobre el reciclaje de PVC a nivel industrial, salvo algunas empresas que realizan procesos de reutilización del PVC mediante trituración, para obtener productos nuevos como son tanques, postes o tuberías. Mediante esto podemos deducir que no existe un índice alto de reciclaje de este material en nuestro territorio.

Un país que ha priorizado procesos de reciclaje de PVC en los últimos años y a nivel latinoamericano es Colombia, el cual gracias a la iniciativa “Recicle con Pavco”; que nació en 2016, ha recuperado alrededor de 150 toneladas de residuos de tuberías, accesorios, entre otros productos de PVC empleados en las edificaciones de Bogotá y la Sabana. (FIERROS, 2018)

Se toma como bases de referencia trabajos de investigación realizados en Ecuador y algunos países de Latinoamérica, que tienen relación en varios aspectos con nuestra disertación, considerando el análisis de las propiedades del hormigón hidráulico agregando PVC en diferentes formas y porcentajes.

Localmente, en la investigación de Carlos Alberto Castillo Aroca, estudiante de la Universidad Central del Ecuador, titulada “Análisis de las propiedades físico-mecánicas de un hormigón elaborado con fibras recicladas de tuberías PVC utilizando agregados de la cantera de Pifo y cemento Holcim tipo GU y su correlación con un hormigón convencional.”, donde su

objetivo fue presentar información acerca de la aplicación de fibras de tuberías PVC recicladas, incluyéndolas como refuerzo del concreto.

Los ensayos se realizaron en probetas de hormigón fresco y endurecidos con distintos porcentajes (0%, 0.2%, 0.5% y 0.8%) de dosificación en función del volumen total, concluyendo que la fibra en pequeñas proporciones ayuda al comportamiento del hormigón ante sollicitaciones estructurales.

Añade también que las fibras aportaron un aumento considerable en algunas de las características mecánicas, en los ensayos de resistencia a la flexión no se mostró un cambio significativo en ninguna de las tres mezclas en comparación al hormigón convencional, lo que indica una necesidad de un mayor porcentaje de fibra para mejorar dicha característica, lo que puede comprometer otras características mecánicas.

En cuanto al aumento de fibras de PVC, las mezclas mostraron una disminución en el asentamiento del hormigón fresco, esta disminución en el valor de asentamiento puede llevar a la presencia de vacíos en el hormigón producto del exceso de fibra y muestra la necesidad de un proceso más apropiado de compactación. (Castillo, 2019)

Juan Ortiz y Breiner Durán, mediante su trabajo de investigación “Evaluación Del Comportamiento De Residuo PVC Utilizado Como Reemplazo Parcial De Agregados En Concreto Hidráulico” presentan como objetivo el estudio del hormigón hidráulico con reemplazo parcial del agregado por PVC.

Los autores elaboraron una mezcla con materiales de Colombia, mediante dosificación patrón para obtener un hormigón de resistencia de  $f'c$  280 kg/cm<sup>2</sup>, añadiendo residuos de PVC, reemplazando un 15% de la fracción retenida en el tamiz 3/8” y un 5 % de la fracción

retenida en el tamiz No 4, obteniendo un reemplazo total de agregado grueso del 5.2%. Tanto para el hormigón convencional y el hormigón con residuos de PVC añadidos obtuvieron asentamientos de 4cm y 5cm respectivamente.

Utilizando el hormigón convencional, obtienen a los 7 días una resistencia a la compresión de 306 kg/cm<sup>2</sup>, a los 14 días obtienen 327 kg/cm<sup>2</sup> y a los 28 días obtienen 375 kg/cm<sup>2</sup>. Mediante el hormigón con PVC, obtienen a los 7 días una resistencia a la compresión de 282 kg/cm<sup>2</sup>, a los 14 días obtienen 312 kg/cm<sup>2</sup> y a los 28 días obtienen 320 kg/cm<sup>2</sup>, concluyendo que sí alcanzó la resistencia esperada.

Al mismo tiempo utilizando el mismo hormigón convencional, obtienen a los 7 días una resistencia a la flexión de 34 kg/cm<sup>2</sup>, a los 14 días obtienen 36 kg/cm<sup>2</sup> y a los 28 días obtienen 39 kg/cm<sup>2</sup>. Mediante el hormigón añadido PVC, obtienen a los 7 días una resistencia a la flexión de 30 kg/cm<sup>2</sup>, a los 14 días obtienen 32 kg/cm<sup>2</sup> y a los 28 días obtienen 35 kg/cm<sup>2</sup>, concluyendo que sí alcanzó la resistencia esperada. La resistencia a compresión y a la flexión de la mezcla añadiendo PVC se reduce 14.79% y un 10.74% respectivamente en comparación a la del concreto tradicional. (Ortiz, 2019)

También se considera importante el estudio de Alexander Astopilco, estudiante de la Universidad Privada del Norte en Perú, con su trabajo: “Comparación de las propiedades físico-mecánicas de ladrillos de hormigón elaborados con residuos plásticos de PVC”, donde su objetivo principal es determinar las propiedades físico-mecánicas de los ladrillos reemplazando el agregado grueso convencional por PVC triturado y diseñar las mezclas para ladrillos de concreto considerando procedimientos del ACI. Lo realizan en reemplazos al peso con PVC triturado de 50 y 100%.

En los resultados obtenidos, gran parte de las propiedades físico-mecánicas no mejoran, principalmente la absorción, sin embargo, la resistencia a la compresión da un valor promedio de 224 kg/cm<sup>2</sup>, cumpliendo con su resistencia esperada  $f'c= 210$  kg/cm<sup>2</sup>.

## **2.2 Hormigón y sus Componentes**

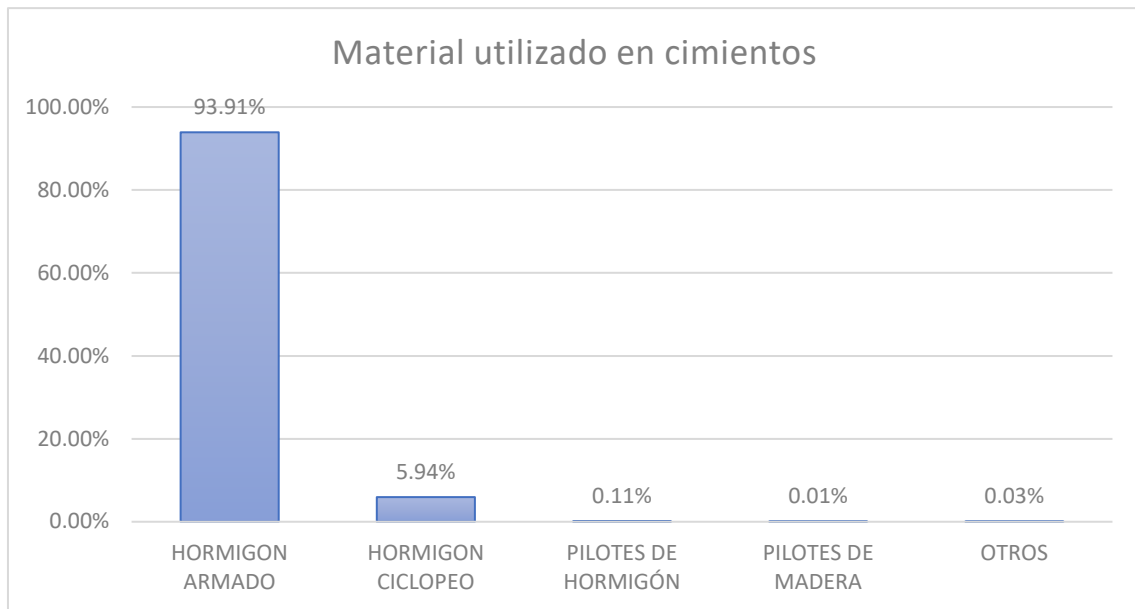
El hormigón, o también llamado concreto, se define como aquel material compuesto que consiste esencialmente de un medio aglutinante en el que están embebidos partículas y fragmentos de áridos; en el hormigón de cemento hidráulico, el aglutinante está formado por una mezcla de cemento hidráulico y agua. (INEN, 2015)

El hormigón, específicamente el elaborado con cemento Portland, posee las cualidades de resistencia, durabilidad, versatilidad y se considera como un material económico.

En Ecuador, el hormigón es el material más utilizado en obra. Mediante un estudio del Instituto Nacional de Estadística y Censos INEC (2019), se puede observar que el hormigón es utilizado en gran porcentaje, tanto para la subestructura como para la superestructura.

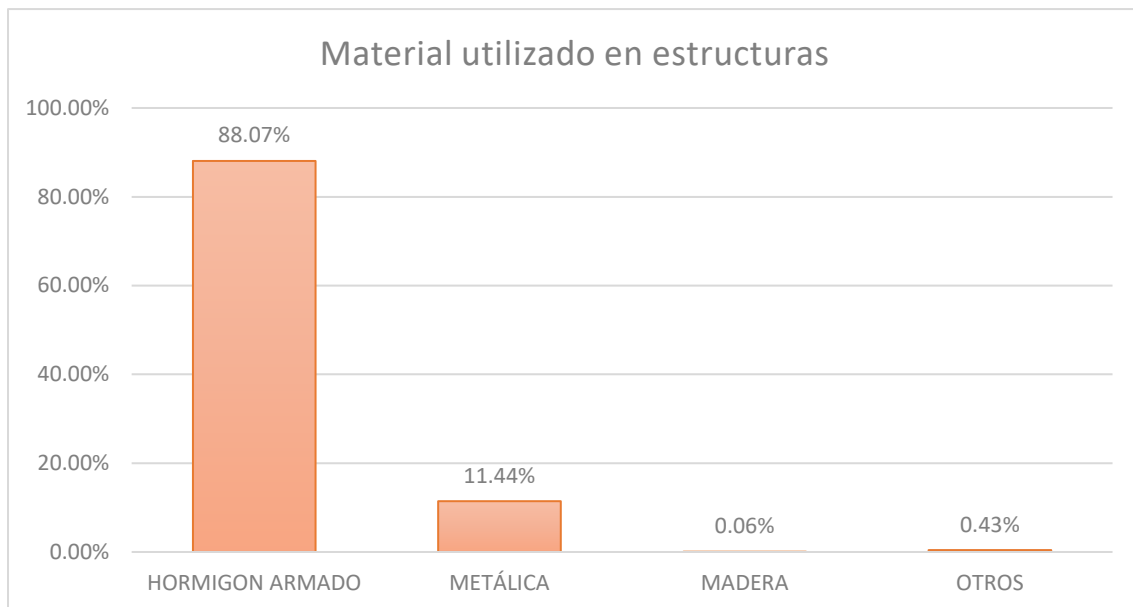
En los gráficos 2, 3 y 4 se presentan datos estadísticos que corroboran su alto uso en construcciones de nuestro país.

**Gráfico 2. Material utilizado en cimientos**



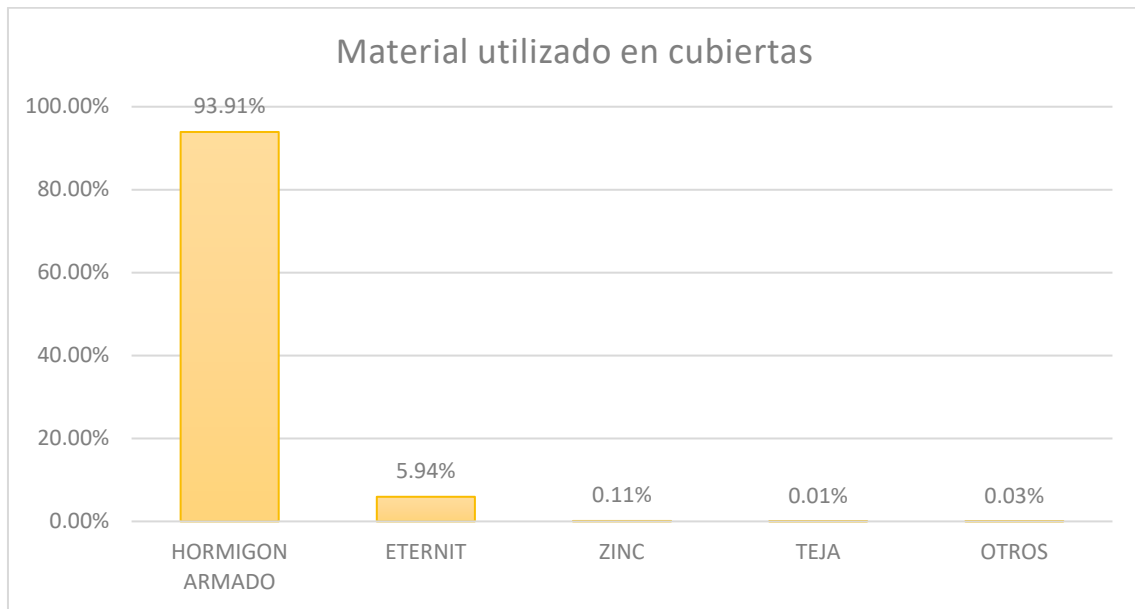
Nota. Elaboración propia. Datos obtenidos del INEC - Encuesta de Edificaciones (2019)

**Gráfico 3. Material utilizado en estructuras**



Nota. Elaboración propia. Datos obtenidos del INEC - Encuesta de Edificaciones (2019)

**Gráfico 4. Material utilizado en cubiertas**



Nota. Elaboración propia. Datos obtenidos del INEC - Encuesta de Edificaciones (2019)

### 2.2.1 Agregados

Se definen como partículas sólidas que provienen de las rocas, las cuales se dividen en áridos finos y áridos gruesos. Son elementos fundamentales en la mezcla principal del hormigón, ocupando alrededor del 70% del volumen total, los cuales junto con la pasta cementante o mortero, generan la resistencia mecánica total y ayudan a evitar fisuras generadas por los cambios volumétricos o contracción del hormigón. (Sono J., Andrade A., 2014)

Se considera árido grueso al material que queda retenidas en el tamiz de 4,75 mm (No. 4). Para ser considerado como árido fino, éste debe pasar por el tamiz de 9,5 mm (3/8") y que la mayor parte de sus partículas pase el tamiz de 4,75 mm (No. 4) y ser retenidas en su mayoría en el tamiz 150 µm (No. 100), o la parte de un árido que pasa por el tamiz de 4,75 mm (No. 4) y ser retenido en el tamiz de 150 µm (No. 100). (INEN, 2015)

Los agregados más comunes utilizados para la producción de hormigón son agregados naturales obtenidos de la explotación de depósitos de arrastres fluviales: arena y gravas de río; y de minas dónde se depositen rocas y minerales diversos.

### **2.2.1.1 Importancia de los agregados**

Los agregados juegan un papel fundamental en la mezcla final de hormigón ayudando en varios aspectos donde destaca lo siguiente:

- Aporta directamente a la resistencia final del hormigón endurecido.
- Controlan los cambios de volumen que se producen en el hormigón debido a sus fases de fraguado, curado, y secado de la mezcla.
- Reducen el costo final de producción de mezcla de hormigón debido a que disminuye el contenido de pasta cementante por metro cúbico.

El agregado fino sirve de base para que el cemento hidratado pueda tomar mayor consistencia y densidad. Sirve como relleno, que se acomoda dentro de los espacios que genera el agregado grueso, forma una fuerte interacción con la pasta cementante y evita fisuras en el hormigón endurecido.

El agregado grueso tiene como función principal actuar como un relleno en la mezcla total, con el objetivo de disminuir el contenido de la pasta cementante y equilibrar los esfuerzos de toda la matriz. También influye en la trabajabilidad y consistencia del hormigón fresco y en la resistencia mecánica del hormigón endurecido.

Los esfuerzos que puede resistir el hormigón dependen principalmente de las propiedades del mortero, es decir su relación agua/cemento; sin embargo, algunos estudios indican que las características de las partículas de agregado tales como el tamaño, la forma,

la textura, la superficie, el tipo de mineral y su resistencia, influyen en las características de la zona de transición con el mortero o interfase y, por lo tanto, influyen en la resistencia del hormigón. (Mehta y Monteiro 1998)

Con lo mencionado anteriormente, en la mayoría de los casos, el principal factor que influye en la resistencia final del concreto no es la resistencia del agregado, debido a que sus partículas son mucho más rígidas y fuertes que toda la matriz. Sin embargo, en ensayos realizados en especímenes de hormigón preparados con roca caliza se ha observado que la falla se puede presentar primeramente en los agregados, especialmente para relaciones agua/cemento relativamente bajas (menores a 0.5). Chan J., et. al. / Ingeniería 7-2 (2003)

Por lo tanto, para lograr alta trabajabilidad, dureza y resistencias mecánicas aceptables en nuestra mezcla de hormigón es importante elegir un buen agregado. A continuación, se detalla las propiedades de los agregados que influyen principalmente en el comportamiento del hormigón.

#### **2.2.1.2 Tamaño del agregado**

Para obtener el tamaño del agregado se realiza un proceso de gradación, o granulometría, el cual consiste en una composición que nos indica la distribución de los diferentes tamaños de las partículas de la muestra ensayada, mediante porcentajes retenidos o pasantes de varios tamices determinados.

Para que la mezcla de hormigón sea eficiente es importante procurar que los agregados produzcan una masa unitaria máxima, en otras palabras, que el volumen existente entre las partículas sea mínimo, consiguiendo que la pasta cementante que llenará estos vacíos sea menor, obteniendo de esta manera una mezcla económica y optimizada.

Un parámetro importante que se obtiene es el tamaño máximo nominal, el cual se define como el tamaño promedio de partículas grandes que hay dentro de la masa del agregado, mientras que el tamaño máximo sólo indica el tamaño de la partícula más grande que hay en la masa, la cual en algunos casos puede ser única. (Asocreto, 2010)

### 2.2.1.3 Forma del agregado

La forma del agregado depende mucho del tipo de roca que lo originó, porque para ciertas piedras resulta determinante el sistema de clivaje, las posibles fracturas en la roca y su estado de meteorización. Las arenas naturales, por su origen geológico, suelen ser de forma redondeada, pero cabe recordar que es posible obtenerlas mediante trituración, y en este caso la forma también va a depender de modo importante del sistema o maquinaria que se use para la fragmentación de la roca original en la producción de arena. (Asocreto, 2010)

La clasificación más utilizada para definir la forma de las partículas del agregado es descrita en la norma británica 812-105, como se indica en la tabla 2.

**Tabla 2.** Formas del agregado

Clasificación	Descripción
Redondeada	Totalmente desgastada por el agua o completamente limitada por frotamiento
Irregular	Irregular natural o parcialmente limitada por frotamiento y con caras redondeadas
Angular	Posee caras bien definidas, que se forman en la intersección de caras más o menos planas
Escamosa	Material en el cual el espesor es pequeño en relación con las otras dos dimensiones
Elongada	Material normalmente angular; en el cual la longitud es considerablemente mayor que las otras dos dimensiones
Escamosa y elongada	Material cuya longitud es considerablemente mayor que el ancho y este es considerablemente mayor que el espesor

Nota. Obtenido de norma británica 8.5.812-105 (British Standard BS 812-105)

Los agregados de forma redonda son los que producen una mezcla más económica debido a que tienen menor superficie por cubrir y por consiguiente necesita menor cantidad de mortero.

Las mezclas con este tipo de agregado generalmente no llegan a altas resistencias debido a la ausencia de fricción entre los agregados, pero su trabajabilidad es mejor. Por otro lado, para hormigones comúnmente utilizados y de alta resistencia se utiliza el agregado grueso angular para producir una trabazón mecánica entre las partículas, logrando una sujeción fuerte entre ellas, y logrando altas resistencias, sin embargo, se sacrifica una buena trabajabilidad.

Las partículas de áridos gruesos alargadas y escamosas son las más perjudiciales, no solo aumentan la demanda de agua, sino que también aumentan la tendencia a la segregación.

#### **2.2.1.4 Porosidad y Absorción**

La porosidad es uno de los factores principales que influyen en la resistencia y durabilidad del concreto; mientras más poroso sea el hormigón menor es su resistencia mecánica y tendrá mayor vulnerabilidad ante la agresividad del medio ambiente. Además, junto con la capacidad de absorción del agregado, la porosidad influye en varias propiedades del concreto, tales como: la resistencia a la abrasión, la estabilidad química, la gravedad específica, la adherencia de la pasta con los agregados, etc. (Moreno, 2006).

Los valores de absorción son de alta importancia en el proceso de dosificación de la mezcla del hormigón, debido a que, al considerar condiciones casi reales de los materiales, se puede determinar de mejor manera la cantidad de agua que formará parte de la mezcla.

La partícula del agregado, considerando sus propiedades de porosidad y absorción, se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Completamente seco, con todos sus poros vacíos.
- Parcialmente húmedo, algunos de sus poros internos están llenos.
- Saturado y superficialmente seco, todos los poros del agregado están llenos, en este punto no absorben ni ceden agua al hormigón.
- Húmedo, cuando además de llenos todos sus poros, internos y superficiales, y de saturada toda su masa, se acumula humedad en la superficie.

#### **2.2.1.5 Dureza y Resistencia a la abrasión**

Propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado. Es importante la selección de un material con un valor aceptable de dureza principalmente en la elaboración de hormigón expuesto a tasas altas de desgaste, como en pavimentos o revestimientos de canales, donde se garantice un desempeño y funcionamiento correcto. (Asocreto, 2010)

La dureza se puede determinar mediante el ensayo “Desgaste en la Máquina de los Ángeles”, el cual se encuentra descrito en la norma INEN 860 o ASTM C131.

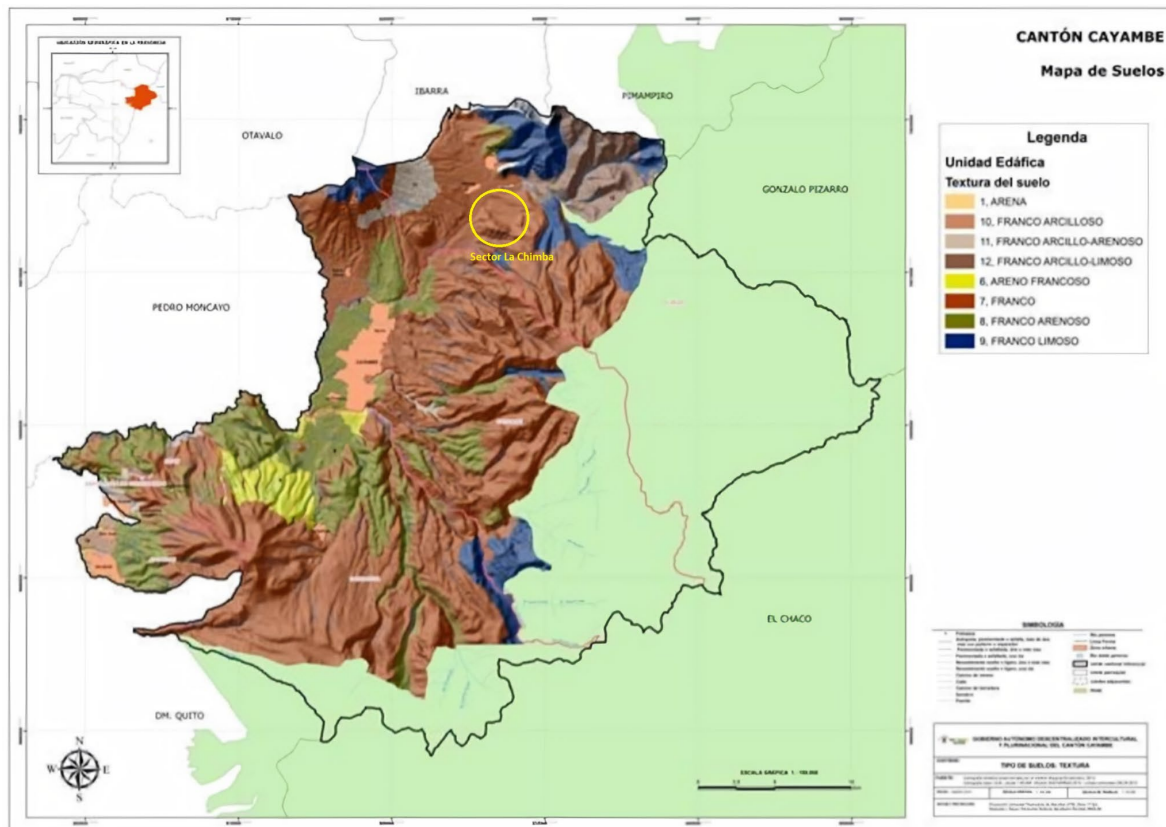
#### **2.2.1.6 Geología de la Mina**

La comunidad de la Chimba se encuentra localizada en Pichincha – Ecuador, en la parroquia de Olmedo, Cantón Cayambe. Aproximadamente a 20 km del centro de la ciudad de Cayambe, en sentido norte.

El suelo en el cantón Cayambe se caracteriza por la predominancia del tipo de suelo Molisol, el cual se compone mayormente de calcita y areniscas, que se encuentran en su mayoría en los ecosistemas de pastizales, los cuales se caracterizan por un horizonte espeso y una superficie oscura, denotando una alta capacidad fértil, formado por la materia orgánica de las raíces de las plantas que afloran en los pastizales. Este suelo cubre una superficie de 43.420 hectáreas, representando 36,4% de la superficie total. (GAD Cayambe, 2015)

El tipo de roca que forma este suelo es: clastos subredondeados a subangulares, asociados a material limoso y arenoso, lavas andesíticas, brechas volcánicas con aglomerados y piroclastos, toba andesítica de color café claro y ceniza. (GAD Cayambe, 2015).

**Gráfico 5. Mapa de suelos del cantón Cayambe**



Nota. Datos obtenidos del IEE (2013)

### 2.2.1.7 Datos Informativos de la Mina

**Tabla 3.** Datos informativos de la Mina La Chimba - Cayambe

<b>Recurso</b>	Mina
<b>Nombre</b>	La Chimba
<b>Minerales</b>	Explotación minera principalmente a cielo abierto, de la que se obtiene rocas industriales, ornamentales y otros materiales usados en la construcción
<b>Tipo de Infraestructura</b>	Cantera
<b>Estado</b>	Inscrita
<b>Concesiones</b>	Libre Aprovechamiento
<b>Superficie Ocupada (Ha)</b>	41,00

Nota. Elaboración propia.

**Gráfico 6.** Mapa de referencia para ubicación “La Chimba”



Nota. Datos obtenidos de Google Earth (2022)

### 2.2.2 Cemento Portland

Es un cemento hidráulico producido mediante la pulverización del Clinker de Portland compuesto esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos y que contiene generalmente una o más de las formas de sulfato de calcio como una adición durante la molienda. (INEN, 2014)

Este material es importante en la fabricación del hormigón ya que actúa como aglutinante, es decir, junta y mantiene unidos a todos los materiales que pertenecen a la mezcla. Esto lo logra debido a que tiene la propiedad de endurecer o fraguar cuando se le añade agua, debido a que es un material hidráulico.

### 2.2.3 Agua Cruda

Es el agua que se encuentra en la naturaleza y que no ha recibido ningún tratamiento para modificar sus características: físicas, químicas o microbiológicas.

El agua de la mezcla debe ser clara y de apariencia limpia, libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materiales orgánicos y otras sustancias que puedan ser dañinas para el hormigón o para el acero de refuerzo. Si contiene sustancias en cantidades que la manchen o le produzcan olor o sabor inusuales, objetables o que causen sospecha, esta agua no debe usarse a menos que existan registros de hormigones elaborados con ella, o información que indique que no perjudica la calidad del hormigón. El agua cuya calidad sea cuestionable debe sujetarse a criterios de aceptación de la Tabla 4. (INEN, 2011)

**Tabla 4.** Criterio de aceptación de aguas dudosas

Ensayos	Límites	Método de ensayo
Resistencia a la compresión, mínimo de control a 7 días.	90	NTE INEN 1573 NTE INEN 1576
Tiempo de fraguado, desviación del testigo h: min.	Desde 1:00 antes hasta 1:30 después	ASTM C403

Nota. Datos obtenidos de INEN (2015)

### **2.2.3.1 Relación Agua / Cemento**

Esta relación se define como el cociente entre la cantidad de agua y de cemento que es utilizado en la mezcla del hormigón fresco. Es un factor clave que determinará las propiedades físicas y mecánicas de la estructura principal del hormigón, como la resistencia, durabilidad, fluidez y trabajabilidad.

En esta relación a/c, el agua tiene una alta importancia e influencia directa en la mezcla final del hormigón, ya que junto al cemento definen sus características físicas y mecánicas iniciales y finales. Por ejemplo, cuanta más agua se aumente a la mezcla, su fluidez aumentará, brindando una mejor trabajabilidad y manejabilidad, sin embargo, esto repercutirá negativamente en la resistencia final, debido al mayor volumen de espacios que generó el agua añadida. (Guevara, G, 2012)

### **2.2.4 Policloruro de Vinilo (PVC)**

El cloruro de polivinilo (PVC) es un termoplástico compuesto por un 57 % de cloro (derivado de la sal común) y un 43 % de carbono (derivado del etileno de materias primas de hidrocarburos, cultivos de azúcar, petróleo crudo y gas natural). Es un recurso que ahorra plástico ya que depende menos del petróleo o el gas natural como muchos otros polímeros. (Safeopedia, 2019)

Entre sus propiedades principales se encuentra la flexibilidad, tenacidad, versatilidad, resistencia y estabilidad. También es deformable, al ser un producto termoplástico, tiene la habilidad de moldearse fácilmente al exponerse a altas temperaturas, y luego convertirse en un material sólido al momento de enfriarse.

Otra ventaja es que es un material inerte, por lo cual es utilizado en lugares donde debe prevalecer la higiene, como por ejemplo en conducciones de agua.

El PVC es mayormente utilizado en la fabricación de diversos objetos como tuberías de agua potable y aguas grises, marcos de puertas y ventanas, suelos, paredes, planchas para impermeabilización (cubiertas, suelos), canalización eléctrica y para telecomunicaciones, etc. (Construmática, 2020)

#### **2.2.4.1 Propiedades principales del PVC**

El PVC como material compuesto presenta numerosas propiedades que hacen de este un material con bastantes ventajas frente a otros, es por esta razón que se lo usa en gran magnitud en el ámbito de la construcción, ya que dicha industria se manifiesta en distintos medios con distintas condiciones de clima, humedad, temperatura, entre otras, para lo cual el PVC es un material que no sufre afectaciones considerables al utilizarlo en dichos medios.

Respecto a lo anterior, el PVC en conjunto con los demás componentes del hormigón puede influir de manera positiva en el comportamiento global del mismo debido a sus características propias, entre las cuales podemos destacar las siguientes:

- **Resistencia a la Corrosión:** No importa en qué condiciones de clima se encuentre el PVC, éste es inmune a todos los tipos de corrosión debido a que no es un material conductor, es por eso que este material no necesita ningún tipo de recubrimiento adicional para prevenir este fenómeno de corrosión.
- **Resistencia al impacto:** Una de las principales razones por la que el PVC es utilizado en la industria de la construcción es por sus ventajas técnicas como la resistencia mecánica, ante la abrasión y al impacto.

- **Densidad:** El PVC tiene un peso específico bajo ( $1.4 \text{ gr/cm}^3$ ) a comparación de otros materiales con los que se realizan tuberías, es decir el PVC es un material liviano, pero no débil, debido a sus condiciones mecánicas.
- **Resistencia a cargas superpuestas:** El PVC es un compuesto rígido, no obstante, no deja de ser un material flexible debido a que puede deformarse hasta un 2% sin sufrir daño alguno ya que libera la energía producida a causa de las fuerzas aplicadas sobre ella mediante su deformación y a su vez redistribuye las cargas que pasan a la superficie con la que se encuentra en contacto.

Por lo contrario, un aspecto negativo del PVC es el daño que se genera en su superficie cuando está en contacto con la luz ultravioleta del sol, requiriendo un recubrimiento adecuado para que no afecte sus propiedades características. Por esta razón el PVC funciona en estado óptimo cuando se encuentra confinado por elementos que impidan el paso de luz solar.

### **2.3 Propiedades físico-mecánicas del Hormigón**

En el hormigón fresco se destacan varias propiedades como su trabajabilidad y consistencia, su homogeneidad, segregación, absorción, etc. En el hormigón endurecido se consideran principalmente las propiedades como su durabilidad, resistencia a agentes abrasivos, resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, entre otros.

Todos estos factores hacen del hormigón un material único y predominante, haciendo difícil la tarea de que otro material pueda igualarlo o superarlo en base a sus características.



Esto puede afectar las propiedades del hormigón endurecido final, principalmente su resistencia mecánica.

### 2.3.1.1 Temperatura

El control de temperatura del hormigón es fundamental para conseguir una buena trabajabilidad y tiempos de fraguado correctos en obra, entre otros beneficios. Caso contrario, esto puede traer consecuencias perjudiciales que afectará la calidad del hormigón.

A bajas temperaturas el tiempo de fraguado se retarda, debido a que el agua en el concreto se enfriará y tenderá a expandirse, causando agrietamiento, oxidación y el hormigón tardará mucho más tiempo en alcanzar la resistencia requerida (ya no serán los 28 días preestablecidos).

Por otro lado, a altas temperaturas, se generan tiempos de fraguado más cortos, pérdida de agua prematura que origina fisuración, pérdida de consistencia que obliga a añadir más agua en obra, porosidad más elevada, entre otros. Para controlar la temperatura del hormigón al ser colocado se recomienda cumplir los límites mínimos y máximos de temperatura que se establece en la INEN 855 (ASTM C94)

**Tabla 5.** Temperatura mínima y máxima del hormigón al ser colocado

Descripción	Valor			
Tamaño de la sección menor (mm)	menor de 300	entre 300 y 900	entre 900 y 1800	mayor de 1800
Temperatura mínima (°C)	13	10	7	5
Temperatura máxima (°C)	32	32	32	32

Nota. Tabla obtenida de INEN 1855

### **2.3.2 Durabilidad**

Es la propiedad que tienen los morteros y hormigones de resistir la acción destructiva de agentes externos. (INEN, 2015)

Existen varios factores que tienen relación directa con la durabilidad del concreto: Resistencia a alta humedad y lluvia, resistencia ultravioleta, resistencia al congelamiento y descongelamiento, resistencia química y ataque de sulfatos, resistencia a la abrasión.

### **2.3.3 Segregación**

Es la separación no intencional de los constituyentes del concreto o de las partículas de un agregado, que causa una falta de uniformidad en su distribución. (INEN, 2015)

Para producir un hormigón eficiente es importante lograr una mezcla homogénea, donde sus componentes estén bien distribuidos en toda la matriz. Esto reducirá el efecto de segregación, aunque se debe considerar que la tendencia a desmoronarse de la mezcla permanecerá debido a los diferentes tamaños de sus partículas constitutivas.

La segregación puede ser de tres tipos:

1. Separación o sedimentación del agregado grueso
2. Separación de la pasta cementante del agregado
3. Separación del agua debido a su densidad menor

Un concreto correctamente dosificado considera propiedades del agregado como su forma, tamaño, clasificación y textura, junto a una óptima cantidad de agua, generando una mezcla cohesiva. Dicho hormigón no mostrará ninguna tendencia a la segregación. Sus características cohesivas no permiten que el agregado se desmorone; la mezcla misma está totalmente contenida por el agregado. De igual manera, el agua tampoco tiene facilidad de moverse libremente del resto de componentes.

Generalmente los agregados que tienen forma plana y/o alargada pueden generar segregación en el hormigón debido a la baja trabajabilidad que generan, obteniendo un concreto muy seco.

El principal tipo de segregación, y el más crítico; que se presenta el hormigón, es el sangrado, o también llamado exudación, en el que parte del agua del hormigón sale a la superficie, debido a su densidad más baja entre todos los ingredientes del hormigón. Generalmente esto se genera por falta de vibrado del concreto, excesivo vibrado, mala dosificación, exceso de agua o agregado, alturas grandes de caída de la mezcla.

El agua, mientras recorre de abajo hacia arriba, forma canales continuos; estos canales de sangrado continuo son a menudo responsables de provocar la permeabilidad de las estructuras de hormigón. (Jamal, 2017)

#### **2.3.4 Resistencia a la Compresión**

Es una medida de la capacidad del hormigón para resistir cargas que tienden a comprimirlo. Este valor se obtiene aplicando una carga axial de compresión a los cilindros moldeados o núcleos de hormigón de cemento hidráulico a una velocidad que se encuentra dentro de un rango definido hasta que ocurra la falla del espécimen. La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo para el área de la sección transversal del espécimen. (INEN, 2010)

Los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión se utilizan principalmente para determinar que la mezcla de concreto entregada cumple con los requisitos de la resistencia especificada,  $f'c$ , según los requerimientos del trabajo.

### 2.3.4.1 Resistencia especificada y característica

Primero se establecen las definiciones de dos términos utilizados en esta sección:

- Resistencia a la compresión especificada ( $f'c$ ): Resistencia utilizada para estimar y diseñar elementos estructurales.
- Resistencia a la compresión requerida ( $f'cr$ ): Resistencia que permite asegurar que no más de una proporción permisible de ensayos caiga por debajo de la resistencia a la compresión especificada, utilizada como base para seleccionar las proporciones de hormigón.

Estas definiciones también son aplicables para determinar la resistencia a tracción (módulo de rotura) (INEN 1855)

Para determinar la resistencia promedio requerida se consideran los procedimientos estadísticos establecidos en normativa ACI 318-19, 26.4.3.1(b), donde también refiere a normativa ACI 301 4.2.3.

$$f'c = f'cr \text{ prom.} - 1.34 S$$

*Donde:*

*$f'cr \text{ prom.}$  = Promedio de los valores obtenidos de  $f'cr$  de los especímenes ensayados ( $\text{kg/cm}^2$ )*

*$S$  = Desviación estándar de los valores obtenidos de  $f'cr$  de los especímenes ensayados ( $\text{kg/cm}^2$ )*

La ecuación se basa en una probabilidad de 1 en 100 de que el promedio de 3 pruebas consecutivas esté por debajo de la resistencia a la compresión especificada. (ACI, 2019)

De esta manera se asegura la confiabilidad de los resultados obtenidos debido a que se considera las variaciones de resultados que pueden existir al realizar los ensayos en laboratorio.

INEN 1855 (ACI 301 1.6.6) determina que la resistencia del hormigón a compresión obtenida se considera satisfactoria cuando cumple con lo siguiente:

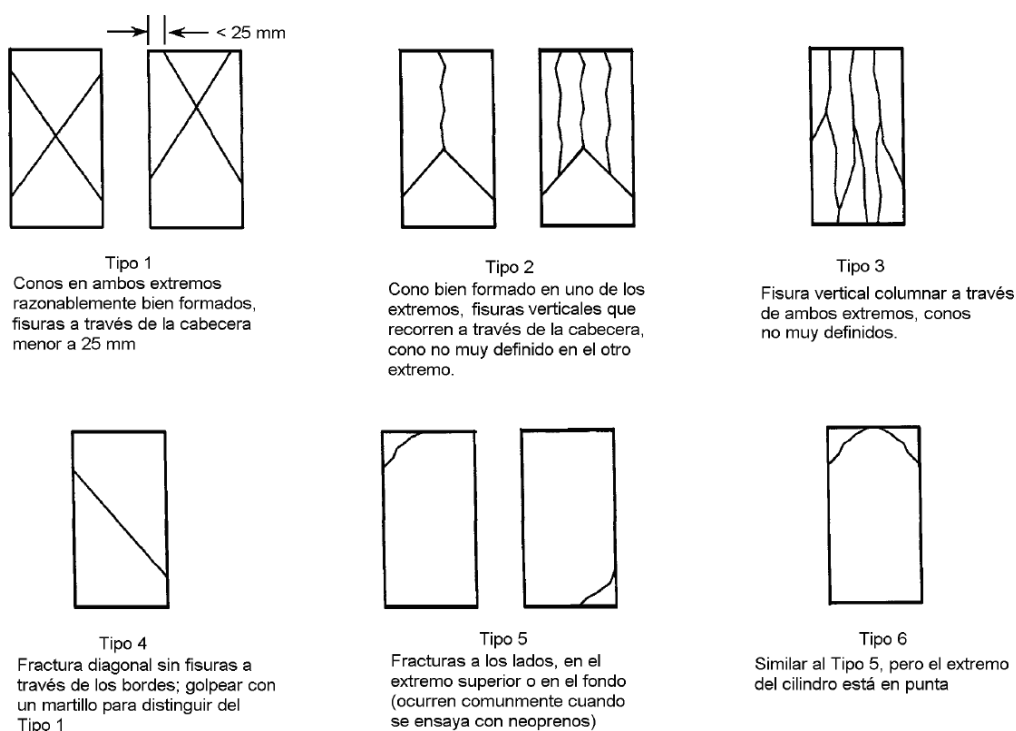
- El promedio de resistencia de cada tres ensayos consecutivos es mayor o igual a  $f'c$
- Ningún resultado de un ensayo individual es menor que  $f'c'$  por más de  $35 \text{ kg/cm}^2$  cuando  $f'c$  es igual o menor que  $350 \text{ kg/cm}^2$ ; o por más de  $0.10 f'c$  cuando  $f'c'$  es mayor a  $350 \text{ kg/cm}^2$ .

### 2.3.4.2 Tipos de fallas

Al realizar el ensayo de compresión de cilindros de hormigón, después de registrar la carga máxima soportada por el espécimen, se debe observar y anotar el tipo de falla o fractura generado, de acuerdo con el Gráfico 8. Si el modelo de falla no se encuentra en los modelos típicos mostrados en el Gráfico 8, se debe graficar y describir brevemente el tipo de falla.

(INEN 1573)

**Gráfico 8.** Esquema de los modelos típicos de fractura en cilindros



Nota: Obtenido de INEN 1573 (ASTM C39)

### **2.3.5 Resistencia a la Flexión**

Es una medida de la capacidad del hormigón para resistir cargas que tienden a flexionarlo, es decir, someterlo a esfuerzos combinados de compresión y tracción. Este valor se obtiene aplicando cargas en una viga de hormigón simplemente apoyada libre en los extremos, es cargada en los tercios medios de la luz libre hasta que ocurra la rotura del espécimen. La carga aplicada es continua, sin impacto a una velocidad constante. La resistencia a la flexión se obtiene mediante el módulo de rotura. (INEN, 2011)

El módulo de rotura es poco utilizado para hormigón estructural, dado a que en elementos como vigas y columnas el hormigón absorbe principalmente esfuerzos de compresión, sin embargo, en este ámbito es utilizado para determinar la calidad del hormigón.

Su principal uso se encuentra en el diseño de losas y pavimentos debido a que en aquellos elementos es muy importante conocer su resistencia ante esfuerzos de flexión, sea para diseño, aceptación o control en campo.

El ensayo comúnmente usado para determinar la resistencia del hormigón a flexión es utilizando una viga simple con carga en los tercios, el procedimiento de ensayo se puede encontrar en la norma INEN 2554 / ASTM C78

Para obtener el módulo de rotura existen dos maneras de calcularlo, esto depende de dónde se genera la fractura.

- Si la fractura se produce en la superficie de tracción dentro del tercio medio de la luz libre

$$R = PL/bd^2$$

R = módulo de rotura, en MPa,

P = carga máxima aplicada, indicada por la máquina de ensayo, en N,

L = Luz libre, en mm,

b = promedio del ancho del espécimen, en la fractura, en mm,

d = promedio de la altura del espécimen, en la fractura, en mm.

- Si la fractura se produce en la superficie de tracción fuera del tercio medio de la luz libre, pero no más allá del 5% de la luz libre.

$$R = Pa/bd^2$$

a = distancia media entre la línea de fractura y el apoyo más cercano medido en la superficie de la tracción de la viga, en mm

Si la fractura se produce en la superficie de tracción fuera del tercio medio de la luz libre, en más de un 5% de la luz libre, se debe desechar los resultados del ensayo.

INEN 1855 determina que la resistencia del hormigón a tracción obtenida se considera satisfactoria cuando cumple con lo siguiente:

- El promedio de todos los conjuntos de tres resultados de ensayos consecutivos de resistencia debe ser igual o superior al módulo de rotura (MR) especificado.
- Ningún resultado individual del ensayo de resistencia puede estar 0,5 MPa por debajo del módulo de rotura especificado.

## CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

### 3.1 Recolección de Datos

Para la elaboración del presente trabajo se realizará una investigación bibliográfica sobre definiciones y conceptos que abarcan el área de construcción y materiales, específicamente sobre el hormigón. Se considerará normativa ecuatoriana e internacional para el proceso de diseño y elaboración del hormigón, el cual se describe en tres etapas detalladas a continuación:

- ETAPA 1: Obtención de materia prima y caracterización de agregados

Como primer paso se obtienen los componentes principales del hormigón, agregados y cemento. Los agregados de origen pétreo se obtienen de la Mina La Chimba ubicado en la provincia de Pichincha, cantón Cayambe, su ubicación se especifica en la sección 2.2.1.6 de este documento. El cemento que se utilizará será marca Selvalegre, el cual se obtiene mediante sacos de 50kg, en ferreterías locales. Para la elaboración de hormigón modificado se utilizará PVC reciclado, obtenido en forma de tuberías, de diversa longitud y diámetro; en diversas obras de Quito y Cayambe, el cual fue triturado posteriormente en una planta recicladora ubicada en Vía a Nono km 4 ½, en la ciudad de Quito.

Posteriormente se realizan ensayos de caracterización de los agregados, para obtener datos de granulometría, peso unitario, gravedad específica, resistencia a la abrasión, cantidad de contenido orgánico y equivalente de arena; en el Laboratorio de Suelos de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador en la ciudad de Quito.

- ETAPA 2: Elaboración de especímenes

Se determina y calcula dosificaciones de hormigón, las cuales son utilizadas para la elaboración de especímenes cilíndricos y vigas, esto se realiza mediante mezcladora de hormigón (concretera) en el laboratorio Geosoil CIA. LTDA. ubicado en Sangolquí, Ecuador, cumpliendo con el procedimiento establecido en la norma INEN 3124, tanto para el proceso de elaboración y curado.

Se utilizan moldes cilíndricos de 150 mm de diámetro, 300 mm de altura; y moldes rectangulares de 150 mm de alto y ancho y 540 mm de largo. La consolidación se realiza mediante varillado, aplicando 25 golpes por capa (en total 3 capas). El curado se realiza mediante sumergimiento de las muestras en tanques con agua, desde el desencofrado hasta el momento que se falla los especímenes en laboratorio.

- ETAPA 3: Obtención de resultados y análisis

A la edad de 28 días, los especímenes elaborados son sometidos a ensayos de laboratorio para la obtención de la resistencia a compresión y flexión, tanto cilindros como vigas respectivamente. También se realizan ensayos para obtener el módulo de elasticidad. Esto se realiza en el laboratorio Geosoil Cia. Ltda, mediante laboratoristas y equipos certificados, cumpliendo con los procedimientos especificados en norma INEN 1573 / 2554.

Luego de obtener los resultados se realiza un análisis correspondiente, primeramente, revisando que las muestras ensayadas cumplan con la resistencia mínima esperada y posteriormente se realiza una comparación de resultados, entre especímenes de hormigón convencional y hormigón modificado con PVC, cumpliendo con los objetivos del presente trabajo.

### 3.2 Tipo de Investigación

El método de investigación que se utilizará será cuantitativo, debido a que los datos a evaluar y comparar son de carácter numérico, hay que tener en cuenta que el valor científico se fundamenta en la validez y fiabilidad de los datos.

Dentro del análisis de datos se usará:

- Estadística descriptiva básica
- Estadística inferencial (no paramétrica)

Estadística no paramétrica: Se trata de una rama de la inferencia estadística cuyos cálculos y procedimientos están fundamentados en distribuciones desconocidas.

La diferencia entre estadística paramétrica y no paramétrica está basada en el conocimiento o desconocimiento de la distribución de probabilidad de la variable que se pretende estudiar. La estadística paramétrica utiliza cálculos y procedimientos asumiendo que conoce cómo se distribuye la variable aleatoria a estudiar. Por el contrario, la estadística no paramétrica utiliza métodos para conocer cómo se distribuye un fenómeno para, más tarde, utilizar técnicas de estadística paramétrica. (LÓPEZ J, 2018)

### 3.3 Procedimientos e Instrumentos

Se determinarán las propiedades de los agregados utilizados y del hormigón dosificado, tanto convencional y modificado con PVC triturado, mediante los ensayos determinados en la Tabla 6 y Tabla 7.

**Tabla 6.** *Ensayos por realizar en agregados*

<b>Título</b>	<b>Norma</b>	<b>Descripción</b>
Análisis granulométrico en los áridos, fino y grueso.	NTE INEN 696	Esta norma establece el método de ensayo para determinar la distribución granulométrica de las partículas de áridos, fino y grueso, por tamizado.
Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad.	NTE INEN 862	Esta norma establece el método de ensayo para determinar el porcentaje de humedad evaporable por secado en una muestra de áridos, tanto el correspondiente a la humedad superficial, como la humedad contenida en los poros del árido.
Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino.	NTE INEN 856	Esta norma establece el método de ensayo para determinar: la densidad, la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del árido fino.
Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido grueso.	NTE INEN 857	Esta norma establece el método de ensayo para determinar: la densidad, la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción del árido grueso.
Áridos. Determinación del material más fino que pasa el tamiz con aberturas de 75 µm (N° 200), mediante lavado.	NTE INEN 697	Esta norma establece el método de ensayo para determinar mediante lavado del árido, la cantidad del material que pasa el tamiz con aberturas de 75 µm (No. 200).
Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas mayores a 19 mm mediante el uso de la máquina de los ángeles.	NTE INEN 861	Esta norma establece el método de ensayo para determinar el valor de la degradación del árido grueso de tamaño mayor a 19 mm, mediante la pérdida de masa por desgaste e impacto utilizando la máquina de Los Ángeles.

Nota. Elaboración propia

**Tabla 7. Ensayos por realizar en hormigón**

<b>Título</b>	<b>Norma</b>	<b>Descripción</b>
Determinación del asentamiento	NTE INEN 1578	Esta norma establece el método de ensayo para determinar el asentamiento del hormigón de cemento hidráulico tanto en el laboratorio como en el campo.
Determinación de la densidad, rendimiento y contenido de aire (método gravimétrico)	NTE INEN 1579	Esta norma establece el método de ensayo para determinar la densidad del hormigón recién mezclado y proporciona las fórmulas para calcular el rendimiento, el contenido de cemento y el contenido de aire del hormigón hidráulico.
Determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico	NTE INEN 1573	Esta norma establece el método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.
Determinación de la resistencia a la flexión del hormigón. (Utilizando una viga simple con carga en los tercios)	NTE INEN 2554	Esta norma establece el método de ensayo para determinar la resistencia a la flexión del hormigón mediante el uso de una viga simple apoyada en los extremos y cargada en los tercios de la luz libre.
Módulo de elasticidad estático y relación de Poisson del concreto en compresión	ASTM C- 469	Este método de ensayo cubre la determinación del módulo de elasticidad secante (de Young) y la relación de Poisson en cilindros de concreto moldeados y núcleos de concreto cuando son sometidos a esfuerzos de compresión longitudinal.

Nota. Elaboración propia

### **3.4 Caracterización de Agregados y Resultados**

*Norma aplicada: NTE INEN 872 / Base de estudio: ASTM C33*

Para la elaboración de mezclas de hormigón se deben cumplir requisitos normativos que permitan asegurar la calidad del agregado, mediante ensayos de abrasión, granulometría, módulo de finura, gravedad específica, equivalente de arena, etc.

#### **3.4.1 Granulometría del Agregado Grueso y Fino**

*Norma aplicada: NTE INEN 696 / Base de estudio: ASTM C136*

El proceso consiste en pasar el material obtenido por cuarteo a través de tamices con aberturas en el orden descendente y registrar los porcentajes que han sido retenidos en cada uno de los tamices. Este proceso puede realizarse con un material alterado o inalterado y a su vez húmedo naturalmente o seco. También se obtendrá la curva granulométrica del agregado que será utilizado para preparar concreto hidráulico.

Los resultados de este ensayo se utilizan para determinar el cumplimiento de la distribución granulométrica de las partículas con los requisitos de las especificaciones aplicables y proporcionar la información necesaria para el control de la producción de diversos productos de áridos y mezclas que contengan áridos. (INEN, 2011)

##### **3.4.1.1 Granulometría del Agregado Grueso**

El árido grueso debe cumplir con los requisitos para el número de tamaño especificado, indicados en la tabla 8. Se puede aceptar la utilización de áridos que no cumplan estrictamente con los requisitos de gradación siempre que el árido propuesto haya sido evaluado con pruebas previas de desempeño que demuestren que se obtienen resultados satisfactorios y que además se cuente con la aprobación expresa del especialista en hormigones y del responsable de la obra. (INEN, 2011)

**Tabla 8. Requisitos de gradación para áridos gruesos**

Número de tamaño	Tamaño nominal (Tamices con aberturas cuadradas) (mm)	Porcentaje acumulado en masa que debe pasar cada tamiz de laboratorio (aberturas cuadradas)													
		100 mm	90 mm	75 mm	63 mm	50 mm	37,5 mm	25,0 mm	19,0 mm	12,5 mm	9,5 mm	4,75 mm	2,36 mm	1,18 mm	300 µm
1	de 90 a 37,5	100	90 a 100	---	25 a 60	---	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---	---
2	de 63 a 37,5	---	---	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---	---
3	de 50 a 25,0	---	---	---	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---	---
357	de 50 a 4,75	---	---	---	100	95 a 100	---	35 a 70	---	10 a 30	---	0 a 5	---	---	---
4	de 37,5 a 19,0	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	---	0 a 5	---	---	---	---
467	de 37,5 a 4,75	---	---	---	---	100	95 a 100	---	35 a 70	---	10 a 30	0 a 5	---	---	---
5	de 25,0 a 12,5	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	---	---	---	---
56	de 25,0, a 9,5	---	---	---	---	---	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	---	---	---
57	de 25,0 a 4,75	---	---	---	---	---	100	95 a 100	---	25 a 60	---	0 a 10	0 a 5	---	---
6	de 19,0 a 9,5	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	---	---	---
67	de 19,0 a 4,75	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	---	20 a 55	0 a 10	0 a 5	---	---
7	de 12,5 a 4,75	---	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	---	---
8	de 9,5 a 2,36	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5	---
89	de 9,5 a 1,18	---	---	---	---	---	---	---	---	100	90 a 100	20 a 55	5 a 30	0 a 10	0 a 5
9 <sup>A</sup>	de 4,75 a 1,18	---	---	---	---	---	---	---	---	---	100	85 a 100	10 a 40	0 a 10	0 a 5

<sup>A</sup> Al árido con número de tamaño 9, se lo define en la NTE INEN 694 como árido fino. Se lo incluye como árido grueso cuando está combinado con un material con número de tamaño 8 para crear el número de tamaño 89, que es árido grueso según se define en la NTE INEN 694.

Nota. Tabla obtenida de Norma INEN 872

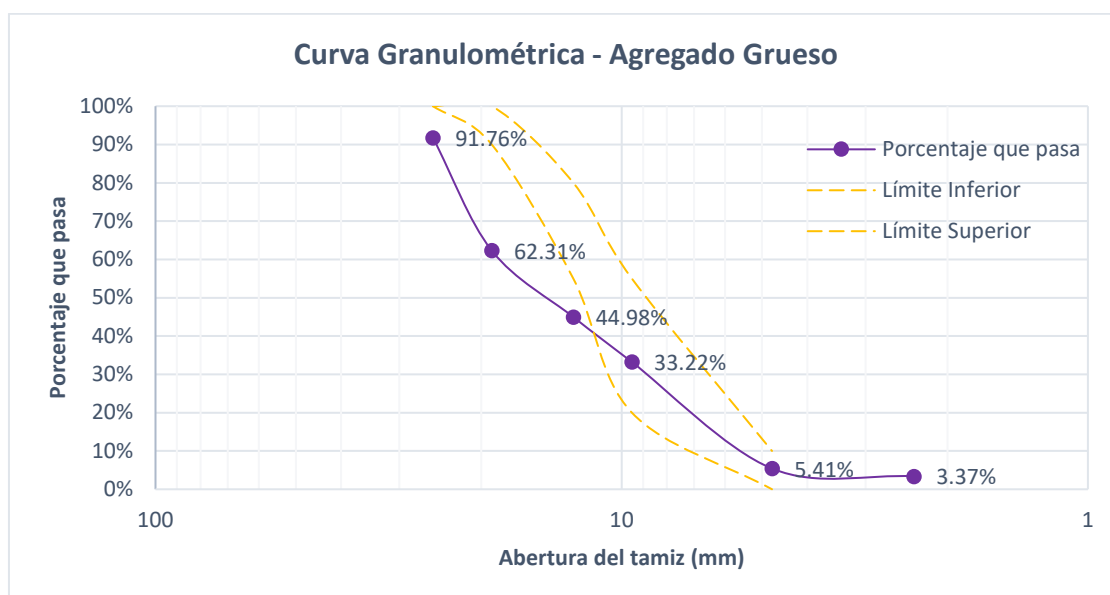
**Tabla 9. Granulometría del agregado grueso (Mina La Chimba)**

Tamiz N°	Abertura del tamiz (mm)	Masa retenida parcial (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje acumulado retenido	Porcentaje acumulado pasante	Límites* (INEN 872)
1"	25.40	885	8.24%	8.24%	91.76%	100%
3/4"	19.00	3162	29.44%	37.69%	62.31%	90 a 100%
1/2"	12.70	1862	17.34%	55.02%	44.98%	55 a 80%
3/8"	9.51	1262	11.75%	66.78%	33.22%	20 a 55%
N°4	4.76	2987	27.81%	94.59%	5.41%	0 a 10%
N°8	2.36	219	2.04%	96.63%	3.37%	0 a 5%
> N°8	-	362	3.37%	100%	0%	-
<i>Masa inicial</i>		10739				

Nota. \*Límites de porcentaje acumulado pasante. Elaboración Propia.

**Conclusión:** el agregado grueso de la Mina La Chimba se encuentra dentro de los límites descritos en la norma INEN 872 a excepción de los tamices de ¾" y ½". En el presente trabajo de investigación se evaluará el efecto de esta granulometría en los resultados de las propiedades físico-mecánicas del hormigón endurecido.

**Gráfico 9.** Curva granulométrica del agregado grueso (Mina La Chimba)



Nota. Elaboración Propia

### 3.4.1.2 Granulometría del Agregado Fino

**Tabla 10.** Límites granulométricos para agregado fino (INEN)

Tamiz	Porcentaje que pasa
3/8 (9.5mm)	100
N° 4 (4.75mm)	95 a 100
N° 8 (2.36mm)	80 a 100
N° 16 (1.18mm)	50 a 85
N°30 (600µm)	25 a 60
N° 100 (150µm)	10 a 3
N° 30 (600µm)	2 a 10

Nota. Tabla obtenida de Norma INEN 872

El árido fino no debe tener más de 45% pasante en cualquier tamiz y retenido en el siguiente consecutivo de aquellos indicados en la tabla 11. El árido fino que no cumple estos requisitos de gradación puede ser aceptado siempre que el proveedor pueda demostrar al comprador o a quien prepara las especificaciones, que el hormigón de la clase especificada, elaborado con el árido fino en consideración, tiene sus propiedades relevantes al menos iguales a las del hormigón elaborado con los mismos ingredientes. (INEN, 2011)

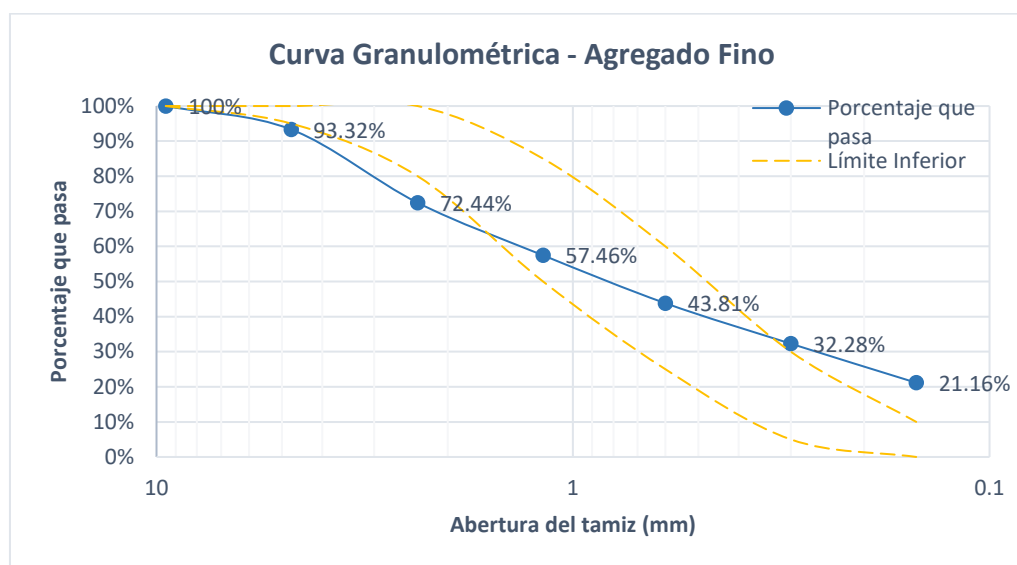
**Tabla 11.** Granulometría del agregado fino (Mina La Chimba)

Tamiz N°	Abertura del tamiz (mm)	Masa retenida parcial (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje acumulado pasante	Límites* (INEN 872)
3/8"	9.50	0	0%	0%	100%	100
N°4	4.75	84.10	6.68%	6.68%	93.32%	95 a 100
N°8	2.36	262.95	20.88%	27.56%	72.44%	80 a 100
N°16	1.18	188.59	14.98%	42.54%	57.46%	50 a 85
N°30	0.60	171.85	13.65%	56.19%	43.81%	25 a 60
N°50	0.30	145.21	11.53%	67.72%	32.28%	5 a 30
N°100	0.15	140.06	11.12%	78.84%	21.16%	0 a 10
> 100	-	266.42	21.16%	100%	0%	-
<i>Masa inicial</i>		1259.18				

Nota.\*Límites de porcentaje acumulado pasante. Elaboración Propia

**Conclusión:** El agregado fino de La Chimba no cumple con los límites de granulometría ideal propuestos en la norma INEN 872, sin embargo, en este trabajo de investigación se evaluará la influencia de la granulometría presentada en los resultados finales. Por otra parte, el agregado cumple con lo establecido en la norma INEN 872 numeral 5.1.2.2: “El árido fino no debe tener más de 45% pasante en cualquier tamiz y retenido en el siguiente consecutivo”.

**Gráfico 10.** Curva granulométrica del agregado fino (Mina La Chimba)



Nota. Elaboración Propia

### 3.4.1.3 Módulo de Finura

Este índice granulométrico nos indica el nivel de grosor o finura de nuestro agregado fino. Se ha encontrado que las arenas con un módulo de finura entre 2.8 a 3.2, mismas que se consideran arenas gruesas, resultan satisfactorias para producir buena trabajabilidad y resistencias a compresiones elevadas. Las arenas más finas, con un módulo de finura de 2.0 a 2.7 pueden generar gran demanda adicional de agua de mezcla y mayor riesgo de agrietamiento por contracción plástica. (Álvarez, 1999)

Según la INEN 696, “cuando se lo requiera, se puede calcular el módulo de finura mediante la sumatoria de los porcentajes totales de material que es más grueso que cada uno de los siguientes tamices (porcentajes retenidos acumulados) y dividiendo la suma para 100: 150 µm (No. 100), 300 µm (No. 50), 600 µm (No. 30), 1,18 mm (No. 16), 2,36 mm (No. 8), 4,75 mm (No. 4), 9,5 mm, 19,0 mm, 37,5 mm y mayores, incrementando en la relación de 2 a 1.”

$$\text{Módulo de Finura} = \frac{\sum \% \text{ Ret. Acumulado}}{100}$$

**Tabla 12.** Módulo de finura del agregado fino (Mina La Chimba)

Descripción	Unidad	Resultado	Límites (INEN 872)
Módulo de finura	Adimensional	2.8	$2.3 \leq MF \leq 3.1$

Nota. Elaboración Propia

**Conclusión:** El material de la Mina La Chimba se encuentra dentro de los límites propuestos en la norma INEN 872 numeral 5.1.2.2.

### 3.4.2 Gravedad Específica y Absorción del Agregado Grueso

Norma aplicada: NTE INEN 857 / Base de estudio: ASTM C127

En la siguiente tabla podemos observar los datos obtenidos del ensayo, teniendo valores de 2.38, 2.49 y 2.68 para la gravedad específica bulk, con superficie seca y aparente, respectivamente. Y un porcentaje de absorción de 4.80%.

$$GE = \frac{A}{(B-C)} \quad GE_s = \frac{B}{(B-C)} \quad GE_a = \frac{A}{(A-C)}$$

Ge= Gravedad específica Bulk

Ges= Gravedad específica del material saturado con superficie seca

Gea= Gravedad específica aparente

A= Masa de la muestra seca

B= Masa de la muestra saturada con superficie seca

C= Masa aparente muestra saturada con superficie seca

**Tabla 13.** Gravedad específica del agregado grueso (Mina La Chimba)

Descripción	Resultado	Unidad
Masa de la muestra seca	4665.00	gr
Masa de la muestra saturada con superficie seca	4889.00	gr
Masa aparente muestra saturada con superficie seca	2926.00	gr
Gravedad específica Bulk	2.38	
Gravedad específica del material S.S.S.	2.49	
Gravedad específica aparente	2.68	
Absorción	4.80	%

Nota. Elaboración Propia

**Conclusión:** En las normas utilizadas como referencia para realizar el ensayo de gravedad específica del agregado grueso no se especifica un rango de valores como límite de cumplimiento.

### 3.4.3 Gravedad Específica y Absorción del Agregado Fino

Norma aplicada: NTE INEN 856 / Base de estudio: ASTM C128

Mediante este ensayo se determina la gravedad específica Bulk, la gravedad específica con superficie seca, la gravedad específica aparente del agregado fino, obteniendo valores de 2.26, 2.39 y 2.59 respectivamente, y el porcentaje de absorción con un valor de 5.72%.

$$GE = \frac{A}{(B+S-C)} \quad GE_s = \frac{S}{(B+S-C)} \quad GE_a = \frac{A}{(B+A-C)}$$

Ge= Gravedad específica Bulk

Ges= Gravedad específica del material saturado con superficie seca

Gea= Gravedad específica aparente

A= Masa de la muestra seca

B= Masa del matraz con agua

C= Masa de la muestra + matraz + agua

S= Masa de la muestra saturada con superficie seca

**Tabla 14.** Gravedad específica del agregado fino (Mina La Chimba)

Descripción	Resultado	Unidad
Masa matraz	152.30	gr
Masa de la muestra seca	475.70	gr
Masa recipiente + Agua	652.30	gr
Masa recipiente + Agua + Muestra	944.40	gr
Masa de la muestra saturada con superficie seca	502.90	gr
Gravedad específica Bulk	2.26	
Gravedad específica del material S.S.S.	2.39	
Gravedad específica aparente	2.59	
Absorción	5.72	%

Nota. Elaboración Propia

*Conclusión:* En las normas utilizadas como referencia para realizar el ensayo de gravedad específica del agregado fino no se especifica un límite de cumplimiento debido a que no existe un material de referencia aceptado para tomar sus propiedades como un valor referencial, esto dependerá igual del uso específico que se le vaya a dar al agregado fino (pavimento rígido, elementos estructurales, acabados de mampostería, etc.)

### 3.4.4 Equivalente de Arena

*Norma aplicada: ASTM D 2419*

El propósito de esta prueba es indicar, bajo condiciones estándar, las proporciones relativas de finos y polvo similares a arcilla o plásticos en suelos granulares y agregados finos que pasan el tamiz de 4.75 mm (No. 4). El término "equivalente de arena" expresa el concepto donde la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezclas de partículas gruesas deseables, arena y, en general, arcilla o finos plásticos indeseables y polvo. (Delgado et. al, 2006)

$$Eq. Arena = 100\% - \frac{(Lectura A - Lectura B) * 100\%}{Lectura A}$$

**Tabla 15.** *Equivalente de arena*

Descripción	Valor	Unidad
Cantidad Azul de Metileno	15.0	ml
Lectura A	6.2	
Lectura B	5.9	
Diferencia (A-B)	0.3	
Equivalente de Arena	95.0	%
Contenido Arcilla / Polvo	5.0	%

Nota. Elaboración Propia

#### 3.4.4.1 Valores Mínimos para Equivalente de Arena

La INEN no especifica en ninguno de sus capítulos un valor mínimo para equivalente de arena. Mediante un artículo donde J. Lowe, D. Wilson y P. Black (2009) recopilaron varias investigaciones de diversos autores, se determinó que un valor mínimo aceptable de equivalente de arena para el uso en hormigón es de 80.

**Tabla 16.** Valores mínimos recomendados de equivalente de arena para varios usos

<b>Tipos de Agregados Finos / Arenas</b>	<b>Mínimo Eq. de Arena</b>
Material base de grava	30
Áridos y materiales seleccionados para el tratamiento de mezclas bituminosas para carreteras	35
Áridos para superficies bituminosas mezcladas en planta	45
Áridos para mezcla asfáltica	55
Áridos para hormigón convencional	80

Nota. Esta tabla ha sido adaptada por J. Lowe, D. Wilson, P. Black (2009) basado en estudios de Francis N. Hveem.

*Conclusión:* El agregado de la Mina La Chimba se encuentra por encima de los límites mínimos referenciales establecidos en la tabla anterior, debido a que presenta un valor de equivalente de arena de 95.

### **3.4.5 Resistencia a la Abrasión del Agregado Grueso**

*Norma aplicada: NTE INEN 860 / Base de estudio: ASTM C131*

Se determinará el valor de degradación del agregado grueso de tamaño inferior a 37.5 mm, mediante la pérdida de masa por desgaste e impacto utilizando máquina de Los Ángeles.

El valor de la degradación es utilizado como indicador de la calidad relativa o de la competencia de áridos y fuentes de áridos, que tienen composiciones mineralógicas similares. Los resultados obtenidos por este ensayo no permiten realizar comparaciones entre fuentes de diferente origen, composición o estructura. (INEN, 2011)

$$\% \text{ Pérdida por Abrasión} = \frac{\text{Masa inicial} - \text{Masa retenida tamíz N}^\circ 12}{\text{Masa inicial}} * 100$$

El límite máximo permisible determinado para el valor de pérdida por abrasión es de 50% para todo tipo de hormigón y cualquier ubicación de la construcción, esto se puede encontrar en la tabla 3 de la INEN 872.

**Tabla 17.** *Ensayo de abrasión en áridos gruesos (Mina La Chimba)*

<b>Descripción</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
Tamaño Máx. Nominal Agregado	1"	plg
Tipo de Gradación	A	
Masa Inicial	5000	gr
M. Retenida Tamiz N°12 (gr)	3350	gr
% Pérdida por Abrasión	33	%
% Máximo Permitido (INEN 872 / ASTM C33)	50	%

Nota. Elaboración Propia

*Conclusión:* El agregado grueso de la Mina La Chimba cumple con los límites establecidos en las normas INEN 872. Adicionalmente en la norma vigente MOP-001F-2002 “Especificaciones generales para la construcción de caminos y puentes” donde tiene igual como límite el 50% de desgaste permitido, por lo que el agregado grueso ensayado puede ser utilizado en proyectos viales para pavimentos y construcción de puentes.

### **3.4.6 Contenido Orgánico**

*Norma aplicada: NTE INEN 855 / Base de estudio: ASTM C40*

Mediante este ensayo podemos obtener una advertencia de la cantidad de impurezas orgánicas que podremos encontrar en el árido fino mediante patrones de colores preestablecidos.

**Tabla 18.** Contenido orgánico en áridos finos (Mina La Chimba)

Descripción	Resultado
Valor en Escala	2
Límite máx. normalizado (INEN 855)	3

Nota. Elaboración Propia

*Conclusión:* El material de la Mina La Chimba presenta un valor dentro del límite máximo normalizado descrito en la norma INEN 855, es decir, no presenta cantidades importantes de material orgánico en su composición y es apto para ser utilizado en hormigón.

### 3.5 Caracterización de PVC y Resultados

Se realizarán ensayos característicos al PVC, con el fin de obtener datos que son fundamentales para el diseño de la mezcla del hormigón modificado.

#### 3.5.1 Granulometría del PVC

**Tabla 19.** Granulometría del PVC

Tamiz N°	Abertura del tamiz (mm)	Masa retenida parcial (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje ret. acum.	Porcentaje que pasa
3/8	9.50	10.90	4.81%	5.00%	95.19%
N°4	4.75	31.54	13.92%	18.73%	81.27%
N°8	2.36	159.60	70.45%	89.19%	10.81%
N°16	1.18	21.10	9.31%	98.50%	1.50%
N°30	0.60	3.20	1.41%	99.91%	0.09%
N°50	0.30	0.20	0.09%	100.00%	0.00%
Pasa N°50	-	0.00	0.00%	100.00%	0.00%
<i>Masa inicial</i>		226.54			

Nota. Elaboración Propia.

### 3.5.2 Peso Unitario del PVC

**Tabla 20.** *Peso unitario del PVC*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Masa del molde	5050.00	gr
Volumen del molde	2980.00	cm <sup>3</sup>
Molde + Mat. Suelto	7465.00	gr
Molde + Mat. Compacto	7674.00	gr
Peso Unitario Suelto	810.40	kg/m <sup>3</sup>
Peso Unitario Compacto	880.54	kg/m <sup>3</sup>

Nota. Elaboración Propia.

### 3.5.3 Gravedad Específica del PVC

**Tabla 21.** *Gravedad específica del PVC*

<b>Descripción</b>	<b>Resultado</b>	<b>Unidad</b>
Masa de la muestra seca	2000	gr
Masa de la muestra SSS	2000	gr
Masa aparente muestra SSS	571.43	gr
Absorción	0	%
Gravedad específica Bulk	1.40	

Nota. Elaboración Propia.

### 3.6 Propiedades del Cemento

En este trabajo se utilizará Cemento Selvalegre (Cemento Portland Puzolánico tipo IP), obtenido de la molienda conjunta de clínker, yeso y puzolana, cumpliendo con los requerimientos especificados en la norma INEN 490 y ASTM C595.

#### 3.6.1 Propiedades Físicas del Cemento

**Tabla 22.** Propiedades físicas del cemento (Selvalegre)

Ensayo	Norma Ecuatoriana	Norma Internacional	Resultado	Requisitos (INEN 490)
Finura Blaine	INEN 192	ASTM C 204	345.4 m <sup>2</sup> /kg	Mín: 260 m <sup>2</sup> /kg
		ASTM C 595		Máx: 430 m <sup>2</sup> /kg
Expansión Autoclave	INEN 200	ASTM C 151	0.04%	Máx: 0.8%
Contenido de Aire	INEN 195	ASTM C 185	4.50%	Máx: 12%
Consistencia Normal	INEN 157	ASTM C 187	25.80%	Porcentaje agua necesaria para la consistencia normal
Fraguado Inicial	INEN 158	ASTM C 191	125 minutos	Mín: 45 minutos
Fraguado Final			326 minutos	Máx: 420 minutos
Resistencia 1 día	INEN 488	ASTM C 109	105.03 kg/cm <sup>2</sup>	N/A
Resistencia 3 días			171.31 kg/cm <sup>2</sup>	Mín: 70 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia 7 días			223.31 kg/cm <sup>2</sup>	Mín: 120 kg/cm <sup>2</sup>
Resistencia 28 días			296.73 kg/cm <sup>2</sup>	N/A

Nota. Datos obtenidos de MORALES L. (2015)

### 3.6.2 Propiedades Químicas del Cemento

**Tabla 23.** Propiedades químicas del cemento (Selvalegre)

	Método de Ensayo Aplicable	Resultado	Requisitos (INEN 490)
Pérdida por calcinación	INEN 160	1.10%	Máx: 5.0%
MgO	INEN 160	2.40%	Máx: 6.0%
SO <sub>3</sub>	INEN 160	2.00%	Máx: 4.0%
SiO <sub>2</sub>	N/A	31.40%	N/A
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	N/A	8.50%	N/A
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	N/A	4.10%	N/A
CaO	N/A	47.90%	N/A
Na <sub>2</sub> O	N/A	1.70%	N/A
K <sub>2</sub> O	N/A	0.50%	N/A
TiO <sub>2</sub>	N/A	0.40%	N/A
<b>Total</b>		100%	

Nota. Datos obtenidos de MORALES L. (2015)

*Conclusión:* El cemento Selvalegre cumple con todos los requisitos de cementos hidráulicos compuestos descritos en la norma INEN 490, por lo que puede ser utilizado satisfactoriamente para fabricar hormigón hidráulico.

### **3.7 Diseño de Mezclas de Hormigón**

Diseñar una mezcla de hormigón consiste principalmente en encontrar las proporciones óptimas y adecuadas para todos los elementos que lo conforman (agua, cemento, agregados), con el objetivo de obtener los resultados esperados.

Existen varios métodos para el diseño de mezclas de hormigón, se puede nombrar los métodos analíticos y los métodos ACI; su principal diferencia es que en el método ACI se realizan correcciones por asentamiento y resistencia progresivas, es decir se corrige la dosificación inicial. Mientras que en los métodos analíticos se supone que cumple los criterios de trabajabilidad y resistencia requeridos debido a que se ha tomado más en cuenta la correlación entre las propiedades de los agregados y la del hormigón y se los ajusta a parámetros obtenidos experimentalmente para que el diseño final de la mezcla cumpla con las propiedades requeridas.

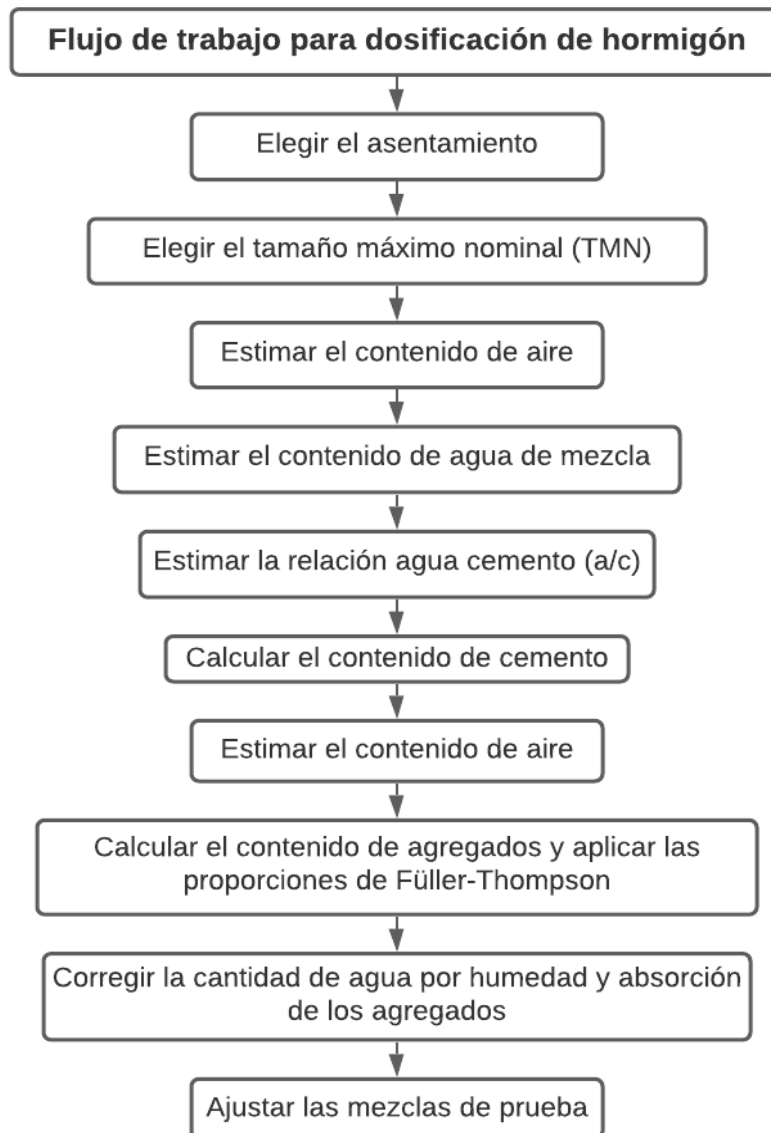
#### **3.7.1 Métodos de Dosificación**

- **Métodos basados en la cantidad de cemento**
  - Método de Füller
  - Método de Bolomey
  - Método de Faury
  
- **Métodos basados en la resistencia a compresión**
  - Método ACI para hormigón convencional
  - Método ACI para hormigones secos
  - Método de la Peña

En el presente trabajo se utilizará la dosificación mediante el método ACI - 211, tomando en cuenta el principio de gradación de Füller-Thompson para la estimación de los agregados.

En el Gráfico 11 se presenta un diagrama de flujo dónde se indican los pasos que se realizarán para el diseño de hormigón.

**Gráfico 11.** Flujo de trabajo para elaborar la dosificación del hormigón



Nota: Elaboración Propia

Cabe recalcar que este flujo de trabajo propuesto puede ser modificado o adaptado a las necesidades e intereses de la persona encargada que realizará la dosificación del hormigón.

### 3.7.2 Datos iniciales para Dosificación

Para realizar la dosificación de hormigón convencional y de hormigón con reemplazo de PVC al agregado grueso tenemos que conocer las siguientes propiedades de los materiales y definir algunos datos iniciales:

- Granulometría de los agregados
- Módulo de finura de los agregados
- Tamaño máximo de los agregados
- Gravedad específica del agregado, cemento y PVC
- Masa unitaria suelta y compacta del agregado, cemento y PVC
- Humedad y absorción de los agregados

**Tabla 24.** Datos obtenidos de los materiales para dosificación de hormigón

Descripción	Cemento	Grava	Arena	Agua	PVC
Densidad Del Agua (kg/m <sup>3</sup> )	-	-	-	1000	-
Densidad Aparente (kg/m <sup>3</sup> )	2950	2380	2260	-	-
Gravedad Específica (SSS)	2.95	2.39	2.49	-	1.40
Masa Unitaria Suelta (kg/m <sup>3</sup> )	1010	1288.54	1570.81	-	810.40
Masa Unitaria Compacta (kg/m <sup>3</sup> )	-	1450.65	1710.74	-	880.54
Módulo De Finura	-	7.0	2.8	-	-
% Absorción	-	4.80%	5.72%	-	-
% Humedad Natural	-	2.00%	2.80%	-	-

Nota. SSS=Saturado con superficie seca. Elaboración Propia

- **Resistencia requerida  $f'_{cr}$  (resistencia utilizada para el diseño de la dosificación)**

En nuestro trabajo se considerará un coeficiente de seguridad de 20%; debido a que no se tiene datos previos de desviación estándar, para determinar el  $f'_{cr}$  requerido, aplicando la siguiente fórmula:

$$f'_{c \text{ requerido}} = f'_{c \text{ esperado}} * (1 + \% \text{ seguridad})$$

$$f'_{c \text{ requerido}} (f'_{cr}) = 288 \text{ kg/cm}^2$$

### 3.7.3 Estimación de asentamiento y tamaño máximo nominal

- **Asentamiento**

Se puede establecer un valor inicial de asentamiento dependiendo del grado de trabajabilidad del hormigón que se requiere en obra o mediante valores propuestos por el ACI establecidos en la tabla 25 que dependen del tipo de elemento estructural.

**Tabla 25.** Valores de asentamiento recomendados para diferentes tipos de construcción

Tipo de Construcción	Asentamiento (cm)	
	Máximo	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación armados	7.5	2.5
Zapatas, cajones y muros de subestructuras sin refuerzo.	7.5	2.5
Vigas y muros armados	10.0	2.5
Columnas estructurales	10.0	2.5
Pavimentos y losas	7.5	2.5
Concreto masivo	5.0	2.5

Nota. Obtenido de ACI 211.1-91 – Tabla 6.3.1

**Asentamiento inicial = 7.5 cm**

- **Tamaño máximo nominal**

Se determina mediante la granulometría realizada, dónde se considerará aquel material retenido en la primera malla, del 5% al 15%.

En ninguna circunstancia el TMN no debe exceder la quinta parte de la dimensión más pequeña entre los lados del elemento, ni mayor que las tres cuartas partes del espaciamiento mínimo entre varillas de refuerzo, ni un tercio del espesor de la losa.

**Tamaño Máximo Nominal = 25 mm (1 plg)**

### 3.7.4 Estimación de cantidad de agua de mezcla y contenido de aire

Se puede establecer un valor inicial de agua de mezcla dependiendo del asentamiento estimado, tamaño máximo nominal obtenido y si se incluye aire en la mezcla; mediante valores propuestos por el ACI establecidos en la tabla 26.

**Tabla 26.** *Requerimientos aproximados de contenido de aire y agua de mezcla*

Asentamiento (cm)	Tamaño máximo de la grava (mm)							
	9.5	12.5	19	25	38	50	75	150
Hormigón sin aire incluido								
2.5 a 5	207	199	190	179	166	154	130	113
7.5 a 10	228	216	205	193	181	169	145	124
15 a 17.5	243	228	216	202	190	178	160	-
Aire atrapado aprox. (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Hormigón con aire incluido								
2.5 a 5	181	175	168	160	150	142	122	107
7.5 a 10	202	193	184	175	165	157	133	119
15 a 17.5	216	205	197	174	174	166	154	-

Promedio recomendado de aire a incluir según tipo de exposición (%)

Exposición ligera	4.5	4	3.5	3	2.5	2	1.5	1
Exposición moderada	6	5.5	5	4.5	4.5	4	3.5	3
Exposición severa	7.5	7	6	6	5.5	5	4.5	4

Nota. Obtenido de ACI 211.1-91 – Tabla 6.3.3

**Contenido de Aire = 1.5%**

**Cantidad de Agua neta = 193 L = 0.193 m<sup>3</sup>**

### 3.7.5 Estimación de cantidad de cemento (Relación Agua/Cemento)

Para estimar la cantidad de cemento se debe elegir un valor de relación a/c, el ACI propone una tabla de relaciones, sin embargo, estos valores son aproximados y relativamente conservadores, dado que puede existir diferentes resistencias de hormigón para una misma relación a/c, debido a la diferencia en las propiedades de los agregados y el cemento. Por eso es recomendable utilizar relaciones a/c donde consideren materiales de la zona de estudio.

En este trabajo se tomará como referencia relaciones a/c propuestas por el Ing. Lauro Lara, docente de la Facultad de Ingeniería de la PUCE.

**Tabla 27.** Valores estimados para relación agua / cemento

Resistencia a la compresión a los 28 Días (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación Agua / Cemento	
	Cemento Portland (ACI 211.1)	Cemento Modificado IP (Ing. Lauro Lara)
150	0.8	0.67
200	0.7	0.58
250	0.62	0.5
300	0.55	0.43
350	0.48	0.38
400	0.43	0.33

Nota. Obtenido de ACI 211.1-91 – Tabla 6.3.4 (a); LARA L. (2018)

Para determinar la relación agua/cemento se realizará una interpolación con los valores dados en la Tabla 27, considerando nuestro cemento como tipo modificado, debido a que son valores mejor estimados para condiciones de nuestro país.

$$\text{Relación agua/cemento (a/c)} = 0.447$$

Después de definir el valor de a/c se obtiene la cantidad de cemento que será utilizada en la mezcla y el volumen que ocupará.

$$\text{Cemento} = \text{Agua Neta} / \text{Relación a/c}$$

$$\text{Vol. Cemento} = \text{Cemento} / \text{Densidad Absoluta del Cemento}$$

### 3.7.6 Estimación de Agregados (Estado Saturado con Superficie Seca "S.S.S")

#### 3.7.6.1 Definición de porcentaje de agregados (Método Fuller - Thompson)

La gradación de agregados de Fuller - Thompson es la más conocida y ha servido como elemento fundamental en el desarrollo de varias curvas granulométricas teóricas. En la tabla que se presenta a continuación se resumen las curvas granulométricas conocidas como "Parábolas de Gessner" que dependen del tamaño máximo nominal del agregado grueso (D) para devolvernos la granulometría ideal.

**Tabla 28.** Granulometría ideal según Fuller - Thompson

TAMIZ	D=50 mm	D=38 mm	D=25 mm	D=19 mm	D=12,5 mm	
plg	mm	(2")	(1 1/2")	(1")	(3/4")	(1/2")
2	50.8	100				
1 1/2	38.1	87	100			
1	25.4	71	82	100		
3/4	19,0	61	71	87	100	
1/2	12.5	50	58	71	82	100
3/8	9.5	43	50	61	71	87
No. 4	4.8	31	35	43	50	62
No. 8	2.4	22	25	31	35	44
No. 16	1.2	15	18	22	25	31
No. 30	0,600	11	12	15	18	22
No. 50	0,300	8	9	11	13	16
No. 100	0,150	5	6	8	9	10

Nota: Obtenido de: "Materiales, propiedades y diseño de mezclas", Jairo René (S/F)

Para nuestro caso tenemos la siguiente tabla donde se considera el porcentaje de peso retenido, mas no el pasante como en la granulometría de Füller-Thompson, quedando de la siguiente manera:

**Tabla 29. Granulometría de Fuller-Thompson (Mina La Chimba)**

Tamiz	3/4	3/8	N°4	N°8	N°16	N°30	N°50	N°100	SUMA
%Retenido	0.13	0.39	0.57	0.69	0.78	0.85	0.89	0.92	522
M. Finura ideal	5.22								
M. Finura A. Fino	2.8								
M. Finura A. Grueso	7.0								

Nota. Elaboración Propia

La suma del agregado grueso y el agregado fino conforman el 100% del agregado, teniendo la siguiente ecuación:

$$x + y = 100\%$$

$$x = \% \text{ agregado fino}$$

$$y = \% \text{ agregado grueso}$$

Poniendo la ecuación de gradación que propone Füller - Thompson en términos del módulo de finura de los agregados se tiene lo siguiente:

$$MF_{ideal} = \frac{MF_{A.Fino}}{100}x + \frac{MF_{A.Grueso}}{100}(100 - x)$$

$$5.22 = \frac{2.8}{100}x + 7 - \frac{7x}{100}$$

$$x = 42\% (A. Fino)$$

$$y = 58\% (A. Grueso)$$

Aplicando este método se puede garantizar una mejor trabajabilidad en estado fresco y la resistencia requerida en estado endurecido.

Después de obtener los porcentajes correspondientes para agregado grueso y fino se puede calcular las cantidades de agregados en estado superficie seca saturada (S.S.S.) que serán utilizadas en la mezcla. Esto se puede realizar mediante dos métodos propuestos por el ACI.

### 3.7.6.2 Estimación de agregados mediante peso total de hormigón

Método obtenido de ACI 211.1-91 - 6.3.7.1.

Primero se estima el peso total del hormigón por unidad de m<sup>3</sup> mediante una fórmula dada por el ACI:

$$Um = 10 * Ga(100 - A) + Cm(1 - Ga/Gc) - Wm(Ga - 1)$$

Ga= Gravedad específica SSS, promedio, del agregado fino y grueso

Gc= Gravedad específica del cemento

A= Aire contenido (%)

Cm= Cemento requerido (kg/m<sup>3</sup>)

Wm= Agua neta (kg/m<sup>3</sup>)

El peso requerido de agregado fino se obtendrá con la diferencia entre el peso del hormigón fresco y el peso total de los demás ingredientes (agua, cemento, aire).

$$\text{Peso sss Agregados} = \text{Peso hormigón} - \text{Peso cemento} - \text{Peso agua} - \text{Peso aire}$$

$$\text{Peso sss fino} = \text{Peso sss agregados} * \% \text{ ag. finos}$$

$$\text{Peso sss grueso} = \text{Peso sss agregados} * \% \text{ ag. grueso}$$

Si se desea obtener una dosificación final mediante volumen (por 1m<sup>3</sup> de hormigón) simplemente se aplicará la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen (m}^3\text{/m}^3\text{)} = \text{Peso sss (kg/m}^3\text{)} / \text{Densidad sss (kg/m}^3\text{)}$$

### 3.7.6.3 Estimación de agregados mediante cálculo de volúmenes

Método obtenido de ACI 211.1-91 - 6.3.7.2.

Un procedimiento más exacto para determinar la cantidad requerida de agregado fino consiste en calcular los volúmenes ocupados por los demás componentes del hormigón. En este caso, el volumen total usado por los otros componentes (agua, aire, cemento) se resta de la unidad de volumen de concreto ( $1\text{m}^3$ ) para obtener el volumen requerido de agregados. Finalmente, el volumen correspondiente para agregado fino y grueso se definirá con los porcentajes obtenidos con la gradación Fuller - Thompson realizada anteriormente.

$$\text{Volumen agregados} = 1\text{m}^3 - \text{Vol. cemento} - \text{Vol. aire} - \text{Vol. aire}$$

$$\text{Vol. ag. fino} = \text{Vol. agregados} * \% \text{ ag. finos}$$

$$\text{Vol. ag. grueso} = \text{Vol. agregados} * \% \text{ ag. grueso}$$

### 3.7.7 Estimación de Agregados (Estado Natural)

Como en obra se utilizan los materiales en su estado natural, es decir con agua contenida, se debe realizar correcciones a la estimación obtenida anteriormente, considerando valores de absorción y humedad.

- Agregados en estado seco

$$\text{Peso seco fino} = \text{Peso sss fino} / (\% \text{ absorción} + 1)$$

$$\text{Peso seco grueso} = \text{Peso sss grueso} / (\% \text{ absorción} + 1)$$

- Agregados en estado natural

$$\text{Peso natural fino} = \text{Peso seco fino} * (\% \text{ humedad} + 1)$$

$$\text{Peso natural grueso} = \text{Peso seco grueso} * (\% \text{ humedad} + 1)$$

- Cálculo humedad superficial

$$\text{Hum. superficial fino} = \text{Peso seco fino} * (\% \text{humedad} - \% \text{absorción})$$

$$\text{Hum. superficial grueso} = \text{Peso seco grueso} * (\% \text{humedad} - \% \text{absorción})$$

- Agua Efectiva

$$\text{Agua efectiva} = \text{Agua neta} - (\text{Hum. superficial fino} + \text{Hum. superficial grueso})$$

Una vez obtenidas nuevas cantidades de agregados (en estado natural) y cantidad de agua efectiva se realiza la estimación final de hormigón que será utilizado para elaborar la mezcla.

### 3.7.8 Reestimación de Mezcla de Hormigón

El diseño de mezcla se realizó considerando un asentamiento inicial estimado, sin embargo, es importante considerar el valor de asentamiento real que se genera. Por tanto, se debe medir el asentamiento real obtenido en obra y realizar correcciones dónde se estime una adecuada cantidad de agua, considerando el asentamiento nuevo obtenido, pero conservando la resistencia requerida.

Se hace una corrección dónde se establece una razón entre el peso total calculado y el peso real obtenido. También se realiza una corrección por asentamiento donde se establece que, por cada 2 kg de agua, un centímetro de asentamiento aumenta o disminuye, en 1 m<sup>3</sup> de hormigón.

- Cálculo de F1

$$\text{Peso real hormigón} = \frac{(\text{Peso molde} + \text{muestra}) - (\text{Peso molde})}{\text{Volumen del espécimen}}$$

$$F1 = \frac{\text{Peso total calculado hormigón}}{\text{Peso total real hormigón}}$$

- Reestimación de agua neta

$$\text{Agua neta reestimada} = \frac{\text{Agua neta utilizada}}{F1 + 2(\text{Asent. requerido} - \text{Asent. obtenido})}$$

Se procede a realizar el diseño de mezcla nuevamente para obtener nuevas cantidades corregidas de material, considerando la cantidad de agua neta reestimada y el peso real del hormigón.

### 3.7.9 Dosificaciones Finales del Hormigón

**Tabla 30.** Dosificación para hormigón convencional,  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$

Descripción	Valor	Unidad
Agua	230.1	kg/m <sup>3</sup>
Cemento	416.1	kg/m <sup>3</sup>
Arena natural	666.3	kg/m <sup>3</sup>
Ripio natural	921.0	kg/m <sup>3</sup>
Peso unit. total	2233.6	kg/m <sup>3</sup>
Asentamiento	12.5	cm

Nota. Elaboración Propia

**Tabla 31.** Dosificación para hormigón modificado con PVC al 3%,  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$

Descripción	Valor	Unidad
Agua	232.4	kg/m <sup>3</sup>
Cemento	422.9	kg/m <sup>3</sup>
Arena natural	662.1	kg/m <sup>3</sup>
Ripio natural	899.9	kg/m <sup>3</sup>
PVC	15.7	kg/m <sup>3</sup>
Peso Unit. Total	2233.1	kg/m <sup>3</sup>
Asentamiento	11.5	cm

Nota. Elaboración Propia

**Tabla 32.** Dosificación para hormigón modificado con PVC al 5%,  $f'c=240$  kg/cm<sup>2</sup>

Descripción	Valor	Unidad
Agua	232.5	kg/m <sup>3</sup>
Cemento	423.9	kg/m <sup>3</sup>
Arena natural	660.4	kg/m <sup>3</sup>
Ripio natural	877.3	kg/m <sup>3</sup>
PVC	26.2	kg/m <sup>3</sup>
Peso Unit. Total	2230.2	kg/m <sup>3</sup>
Asentamiento	11.5	cm

Nota. Elaboración Propia

**Tabla 33.** Dosificación para hormigón modificado con PVC al 7%,  $f'c=240$  kg/cm<sup>2</sup>

Descripción	Valor	Unidad
Agua	232.7	kg/m <sup>3</sup>
Cemento	425.2	kg/m <sup>3</sup>
Arena natural	659.0	kg/m <sup>3</sup>
Ripio natural	875.2	kg/m <sup>3</sup>
PVC	36.7	kg/m <sup>3</sup>
Peso Unit. Total	2228.8	kg/m <sup>3</sup>
Asentamiento	11.5	cm

Nota. Elaboración Propia

**Tabla 34.** Dosificación para hormigón modificado con PVC al 9%,  $f'c=240$  kg/cm<sup>2</sup>

Descripción	Valor	Unidad
Agua	232.9	kg/m <sup>3</sup>
Cemento	426.5	kg/m <sup>3</sup>
Arena natural	657.7	kg/m <sup>3</sup>
Ripio natural	863.1	kg/m <sup>3</sup>
PVC	47.2	kg/m <sup>3</sup>
Peso Unit. Total	2227.4	kg/m <sup>3</sup>
Asentamiento	11.5	cm

Nota. Elaboración Propia

### 3.8 Cálculo de Módulo de Elasticidad

Se determina el módulo de elasticidad estático del hormigón siguiendo el proceso propuesto en la norma ASTM C469 donde se relaciona el esfuerzo normal aplicado en la probeta de hormigón y la deformación unitaria que causa esta, datos obtenidos del gráfico esfuerzo - deformación proveniente del ensayo de laboratorio.

En resumen, lo que se realiza en este ensayo es determinar la pendiente de la recta dentro del rango lineal de deformación que sufre la probeta de hormigón. Las deformaciones pueden ser tomadas continuamente o para simplificar este proceso, la norma ASTM C 469 propone tomar las lecturas cuando la deformación unitaria sea 0.00005 y la segunda lectura sea la correspondiente al aplicar el 40% de la resistencia última del hormigón.

- Cálculo de deformación total de la probeta (d)

$$d = \frac{g * ER}{(ER + EG)}$$

g= Lectura de deformación inicial (mm<sup>-3</sup>)

EG/ER= Factores de corrección por esbeltez del cilindro.

- Cálculo de deformación unitaria (ε)

$$\varepsilon = \frac{d}{h_{equipo}}$$

d= Deformación total de la probeta (mm<sup>-3</sup>)

hequipo= Altura del equipo (mm)

- Cálculo de módulo de elasticidad del hormigón

$$Ec = \frac{0.4\sigma_r - \sigma_{(0.00005)}}{\varepsilon_{(0.4\sigma_{máx})} - 0.00005}$$

0.4σ<sub>r</sub>= Esfuerzo correspondiente al 40% de f'c (kg/cm<sup>2</sup>).

σ<sub>(0.0005)</sub>= Esfuerzo correspondiente a una deformación de 0.00005 (kg/cm<sup>2</sup>).

ε<sub>0.4σ<sub>máx</sub></sub>= Deformación unitaria correspondiente a un esfuerzo de 40% del f'c. (mm/mm)

El código ACI 318-19, en su inciso 19.2.2, propone el cálculo del módulo de elasticidad del hormigón ( $E_c$ ) mediante el uso de fórmulas que están en función de su valor de resistencia a la compresión ( $f'_c$ ), dónde se puede considerar o no el peso unitario del hormigón ( $w_c$ ).

- Para concreto de peso normal

$$E_c = 15100 \sqrt{f'_c} \quad (f'_c \text{ en kg/cm}^2)$$

- Para concreto de peso determinado

$$E_c = 4270 w_c^{1.5} \sqrt{f'_c} \quad (\text{Para valores de } w_c \text{ entre } 1.44 \text{ y } 2.56 \text{ t/m}^3, f'_c \text{ en kg/cm}^2)$$

En este trabajo se pretende encontrar una fórmula que permita calcular el módulo de elasticidad del hormigón elaborado con agregado de la Mina La Chimba y cemento Selvalegre, entre otras características.

- Para concreto de peso normal

Se calcula un valor  $\alpha$  (alfa) para el cálculo directo del módulo de elasticidad.

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

$$\alpha = \frac{E_c}{\sqrt{f'_c}}$$

- Para concreto de peso determinado

Se calcula un valor  $\gamma$  (gamma) para el cálculo del módulo de elasticidad considerando el peso unitario del hormigón.

$$E_c = \gamma * w_c^{1.5} \sqrt{f'_c}$$

$$\alpha = \gamma * w_c^{1.5}$$

$$\gamma = \frac{\alpha}{w_c^{1.5}}$$

Los valores de  $\gamma$  (gamma) y  $\alpha$  (alfa) se pueden observar en las tablas de resultados de módulo de elasticidad en el capítulo 4 de esta disertación.

## CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1 Resistencia a la Compresión

**Tabla 35.** Resistencia a la compresión - Hormigón convencional

Fecha de fabricación	06/01/2022					
Fecha de ensayo	03/02/2022					
Edad	28 días					
Resistencia esperada f'c	240 kg/cm <sup>2</sup>					
% PVC	0%					
Diseñado por:	John Flores - Andrés Quel					
Ensayado por:	Lab. Abraham Pailacho					
Aprobado por:	Geosoil CIA. LTDA.					
Cilindro #	1	2	3	4	5	6
Diámetro 1 (mm)	151	151	150	151	151	151
Diámetro 2 (mm)	151	151	151	150	151	151
Altura 1 (mm)	304	302	301	300	301	301
Altura 2 (mm)	303	303	301	301	300	300
Altura 3 (mm)	303	302	300	301	301	300
Diámetro prom. (mm)	151.0	151.0	150.5	150.5	151.0	151.0
Altura prom. (mm)	303.3	302.3	300.7	300.7	300.7	300.3
Masa (kg)	12.331	12.242	12.280	12.210	12.410	12.398
Carga máxima (N)	448790	433060	449170	459780	458940	462213
Tipo de falla	5	5	5	5	5	5
Resistencia obtenida f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	255.55	246.60	257.47	263.55	261.33	263.20
f'c promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	257.95					
Desviación estándar	5.85					
f'c característico (kg/cm <sup>2</sup> )	250.11					

Nota. Elaboración Propia.

**Tabla 36. Resistencia a la compresión - Hormigón con PVC al 3%**

Fecha de fabricación	06/01/2022					
Fecha de ensayo	03/02/2022					
Edad	28 días					
Resistencia esperada f'c	240 kg/cm <sup>2</sup>					
% PVC	3%					
Diseñado por:	John Flores - Andrés Quel					
Ensayado por:	Lab. Abraham Pailacho					
Aprobado por:	Geosoil CIA. LTDA.					
Cilindro #	1	2	3	4	5	6
Diámetro 1 (mm)	151	152	152	151	151	152
Diámetro 2 (mm)	152	151	151	150	151	152
Altura 1 (mm)	300	301	305	302	301	301
Altura 2 (mm)	300	302	306	301	301	300
Altura 3 (mm)	300	302	305	301	301	300
Diámetro prom. (mm)	151.5	151.5	151.5	150.5	151.0	152.0
Altura prom. (mm)	300.0	301.7	305.3	301.3	301.0	300.3
Masa (kg)	12.287	12.363	12.494	12.204	12.216	12.398
Carga máxima (N)	613250	637410	590100	630480	609040	610120
Tipo de falla	5	5	5	5	4	5
Resistencia obtenida f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	346.90	360.57	333.80	361.40	346.80	342.86
f'c promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	348.72					
Desviación estándar	9.70					
f'c característico (kg/cm <sup>2</sup> )	335.72					

Nota. Elaboración Propia.

**Tabla 37. Resistencia a la compresión - Hormigón con PVC al 5%**

Fecha de fabricación	06/01/2022					
Fecha de ensayo	03/02/2022					
Edad	28 días					
Resistencia esperada f'c	240 kg/cm <sup>2</sup>					
% PVC	5%					
Diseñado por:	John Flores - Andrés Quel					
Ensayado por:	Lab. Abraham Pailacho					
Aprobado por:	Geosoil CIA. LTDA.					
Cilindro #	1	2	3	4	5	6
Diámetro 1 (mm)	150	151	151	151	151	152
Diámetro 2 (mm)	151	151	152	152	152	151
Altura 1 (mm)	300	300	299	301	301	301
Altura 2 (mm)	300	300	300	301	300	300
Altura 3 (mm)	301	302	300	300	300	301
Diámetro prom. (mm)	150.5	151.0	151.5	151.5	151.5	151.5
Altura prom. (mm)	300.3	300.7	299.7	300.7	300.3	300.7
Masa (kg)	12.126	12.185	12.063	12.212	12.066	12.204
Carga máxima (N)	512410	536510	571700	575420	596160	587340
Tipo de falla	5	5	5	5	5	5
Resistencia obtenida f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	293.72	305.50	323.40	325.50	337.23	332.24
f'c promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	319.60					
Desviación estándar	15.21					
f'c característico (kg/cm <sup>2</sup> )	299.22					

Nota. Elaboración Propia.

**Tabla 38. Resistencia a la compresión - Hormigón con PVC al 7%**

Fecha de fabricación	06/01/2022					
Fecha de ensayo	03/02/2022					
Edad	28 días					
Resistencia esperada f'c	240 kg/cm <sup>2</sup>					
% PVC	7%					
Diseñado por:	John Flores - Andrés Quel					
Ensayado por:	Lab. Abraham Pailacho					
Aprobado por:	Geosoil CIA. LTDA.					
Cilindro #	1	2	3	4	5	6
Diámetro 1 (mm)	152	151	152	152	151	151
Diámetro 2 (mm)	151	151	152	151	152	151
Altura 1 (mm)	300	304	300	303	300	300
Altura 2 (mm)	301	303	300	302	300	300
Altura 3 (mm)	301	304	300	303	301	301
Diámetro prom. (mm)	151.5	151.0	152.0	151.5	151.5	151.0
Altura prom. (mm)	300.7	303.7	300.0	302.7	300.3	300.3
Masa (kg)	12.100	12.425	12.104	12.211	12.108	12.074
Carga máxima (N)	513040	530130	542370	571150	572030	586940
Tipo de falla	5	5	5	5	5	5
Resistencia obtenida f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	290.21	301.87	304.79	323.08	323.58	334.22
f'c promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	312.96					
Desviación estándar	15.14					
f'c característico (kg/cm <sup>2</sup> )	292.68					

Nota. Elaboración Propia.

**Tabla 39. Resistencia a la compresión - Hormigón con PVC al 9%**

Fecha de fabricación	06/01/2022					
Fecha de ensayo	03/02/2022					
Edad	28 días					
Resistencia esperada f'c	240 kg/cm <sup>2</sup>					
% PVC	9%					
Diseñado por:	John Flores - Andrés Quel					
Ensayado por:	Lab. Abraham Pailacho					
Aprobado por:	Geosoil CIA. LTDA.					
Cilindro #	1	2	3	4	5	6
Diámetro 1 (mm)	151	151	151	151	151	151
Diámetro 2 (mm)	150	151	152	151	152	150
Altura 1 (mm)	301	301	301	302	301	301
Altura 2 (mm)	300	301	300	301	300	300
Altura 3 (mm)	301	300	300	301	301	301
Diámetro prom. (mm)	150.5	151.0	151.5	151.0	151.5	150.5
Altura prom. (mm)	300.7	300.7	300.3	301.3	300.7	300.7
Masa (kg)	12.120	12.278	12.173	12.252	12.090	12.117
Carga máxima (N)	508140	513650	529180	541170	552870	579110
Tipo de falla	5	5	5	5	5	5
Resistencia obtenida f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	291.27	292.49	299.34	308.16	312.74	331.95
f'c promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	305.99					
Desviación estándar	13.95					
f'c característico (kg/cm <sup>2</sup> )	287.30					

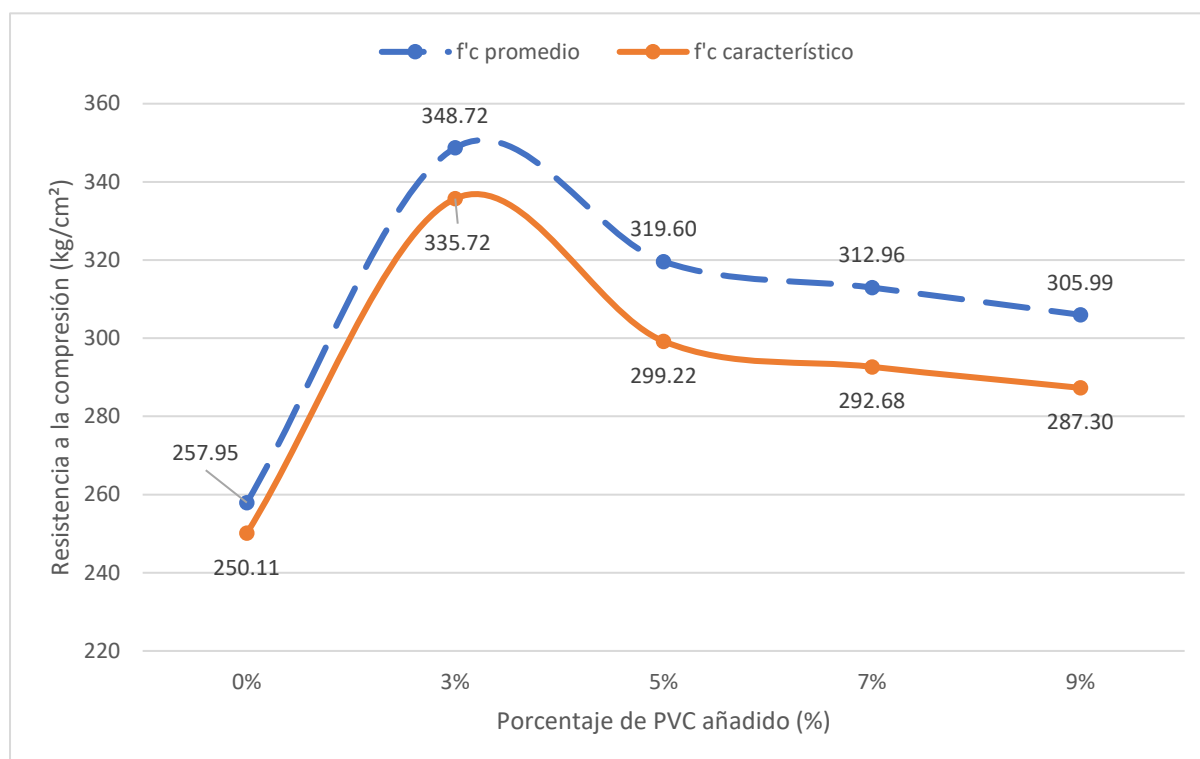
Nota. Elaboración Propia.

**Tabla 40.** Resistencia a compresión (convencional y con PVC) – Tabla resumen

Descripción	Unidad	Valor				
f'c esperado	kg/cm <sup>2</sup>	240				
Edad	días	28				
PVC añadido	%	0%	3%	5%	7%	9%
f'c promedio	kg/cm <sup>2</sup>	257.95	348.72	319.60	312.96	305.99
f'c característico	kg/cm <sup>2</sup>	250.11	335.72	299.22	292.68	287.30
Desempeño	%	0%	34%	20%	17%	15%

Nota. El desempeño es el porcentaje de variación comparado con el f'c característico del hormigón convencional (PVC al 0%). Elaboración Propia.

**Gráfico 12.** Resultados de f'c promedio y f'c característico a diferentes % de PVC



Nota. Elaboración Propia.

## 4.2 Resistencia a la Flexión

**Tabla 41.** Resistencia a la flexión - Hormigón convencional

Fecha de fabricación	06/01/2022			
Fecha de ensayo	03/02/2022			
Edad	28 días			
Resistencia esperada f'c	240 kg/cm <sup>2</sup>			
% PVC	0%			
Diseñado por:	John Flores - Andrés Quel			
Ensayado por:	Lab. Abraham Pailacho			
Aprobado por:	Geosoil CIA. LTDA.			
Viga #	1	2	3	4
Longitud (mm)	542	541	539	541
Ancho (mm)	150	150	150	152
Altura (mm)	152	151	151	151
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450	450
Masa (g)	27987	27647	27745	28012
Carga máxima (N)	30070	30490	30790	31230
Módulo de Rotura (kg/cm <sup>2</sup> )	39.82	40.91	41.31	41.35
MR promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	40.85			
Desviación estándar	0.62			
MR característico (kg/cm <sup>2</sup> )	40.02			

Nota. Elaboración Propia.

**Tabla 42. Resistencia a la flexión - Hormigón con PVC al 3%**

Fecha de fabricación	06/01/2022			
Fecha de ensayo	03/02/2022			
Edad	28 días			
Resistencia esperada f'c	240 kg/cm <sup>2</sup>			
% PVC	3%			
Diseñado por:	John Flores - Andrés Quel			
Ensayado por:	Lab. Abraham Pailacho			
Aprobado por:	Geosol CIA. LTDA.			
Viga #	1	2	3	4
Longitud (mm)	542	540	538	537
Ancho (mm)	150	150	151	152
Altura (mm)	150	150	152	151
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450	450
Masa (g)	27742	27607	27961	28104
Carga máxima (N)	32430	31070	32070	34130
Módulo de Rotura (kg/cm <sup>2</sup> )	44.09	42.24	42.18	45.19
MR promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	43.43			
Desviación estándar	1.27			
MR característico (kg/cm <sup>2</sup> )	41.72			

Nota. Elaboración Propia.

**Tabla 43. Resistencia a la flexión - Hormigón con PVC al 5%**

Fecha de fabricación	06/01/2022			
Fecha de ensayo	03/02/2022			
Edad	28 días			
Resistencia esperada f'c	240 kg/cm <sup>2</sup>			
% PVC	5%			
Diseñado por:	John Flores - Andrés Quel			
Ensayado por:	Lab. Abraham Pailacho			
Aprobado por:	Geosoil CIA. LTDA.			
Viga #	1	2	3	4
Longitud (mm)	543	550	538	542
Ancho (mm)	151	150	152	156
Altura (mm)	154	152	152	148
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450	450
Masa g)	27486	27367	27369	27422
Carga máxima (N)	31230	31330	33890	32370
Módulo de Rotura (kg/cm <sup>2</sup> )	40.02	41.48	44.28	43.47
MR promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	42.31			
Desviación estándar	1.67			
MR característico (kg/cm <sup>2</sup> )	40.07			

Nota. Elaboración Propia.

**Tabla 44.** Resistencia a la flexión - Hormigón con PVC al 7%

Fecha de fabricación	06/01/2022			
Fecha de ensayo	03/02/2022			
Edad	28 días			
Resistencia esperada f'c	240 kg/cm <sup>2</sup>			
% PVC	7%			
Diseñado por:	John Flores - Andrés Quel			
Ensayado por:	Lab. Abraham Pailacho			
Aprobado por:	Geosoil CIA. LTDA.			
Viga #	1	2	3	4
Longitud (mm)	543	544	543	542
Ancho (mm)	153	152	151	151
Altura (mm)	151	150	153	151
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450	450
Masa (g)	27408	27302	27637	27196
Carga máxima (N)	33680	31040	32390	28460
Módulo de Rotura (kg/cm <sup>2</sup> )	44.30	41.65	42.05	37.93
MR promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	41.48			
Desviación estándar	2.29			
MR característico (kg/cm <sup>2</sup> )	38.42			

Nota. Elaboración Propia.

**Tabla 45. Resistencia a la flexión - Hormigón con PVC al 9%**

Fecha de fabricación	06/01/2022			
Fecha de ensayo	03/02/2022			
Edad	28 días			
Resistencia esperada f'c	240 kg/cm <sup>2</sup>			
% PVC	9%			
Diseñado por:	John Flores - Andrés Quel			
Ensayado por:	Lab. Abraham Pailacho			
Aprobado por:	Geosoil CIA. LTDA.			
Viga #	1	2	3	4
Longitud (mm)	541	543	541	541
Ancho (mm)	152	151	150	151
Altura (mm)	151	151	151	150
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450	450
Masa (g)	27607	27359	27598	27341
Carga máxima (N)	28880	32040	30310	29140
Módulo de Rotura (kg/cm <sup>2</sup> )	38.24	42.70	40.67	39.36
MR promedio (kg/cm <sup>2</sup> )	40.24			
Desviación estándar	1.66			
MR característico (kg/cm <sup>2</sup> )	38.02			

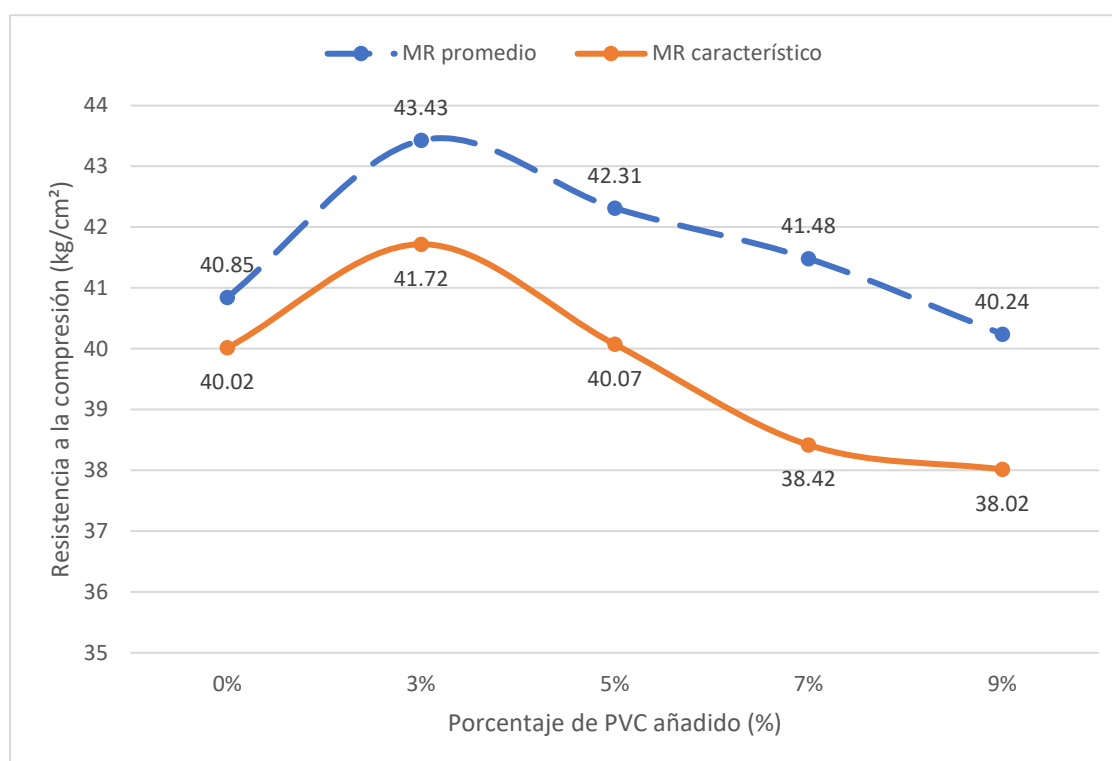
Nota. Elaboración Propia.

**Tabla 46.** Módulo de rotura obtenidos (convencional y con PVC) – Tabla resumen

Descripción	Unidad	Valor				
Edad	días	28				
PVC añadido	%	0%	3%	5%	7%	9%
MR promedio	kg/cm <sup>2</sup>	40.85	43.43	42.31	41.48	40.24
MR característico	kg/cm <sup>2</sup>	40.02	41.72	40.07	38.42	38.02
Desempeño	%	0%	4%	0%	-4%	-5%

Nota. El desempeño es el porcentaje de variación comparado con el MR característico del hormigón convencional (PVC al 0%). Elaboración Propia.

**Gráfico 13.** Resultados de MR promedio y MR característico a diferentes % de PVC



Nota. Elaboración Propia

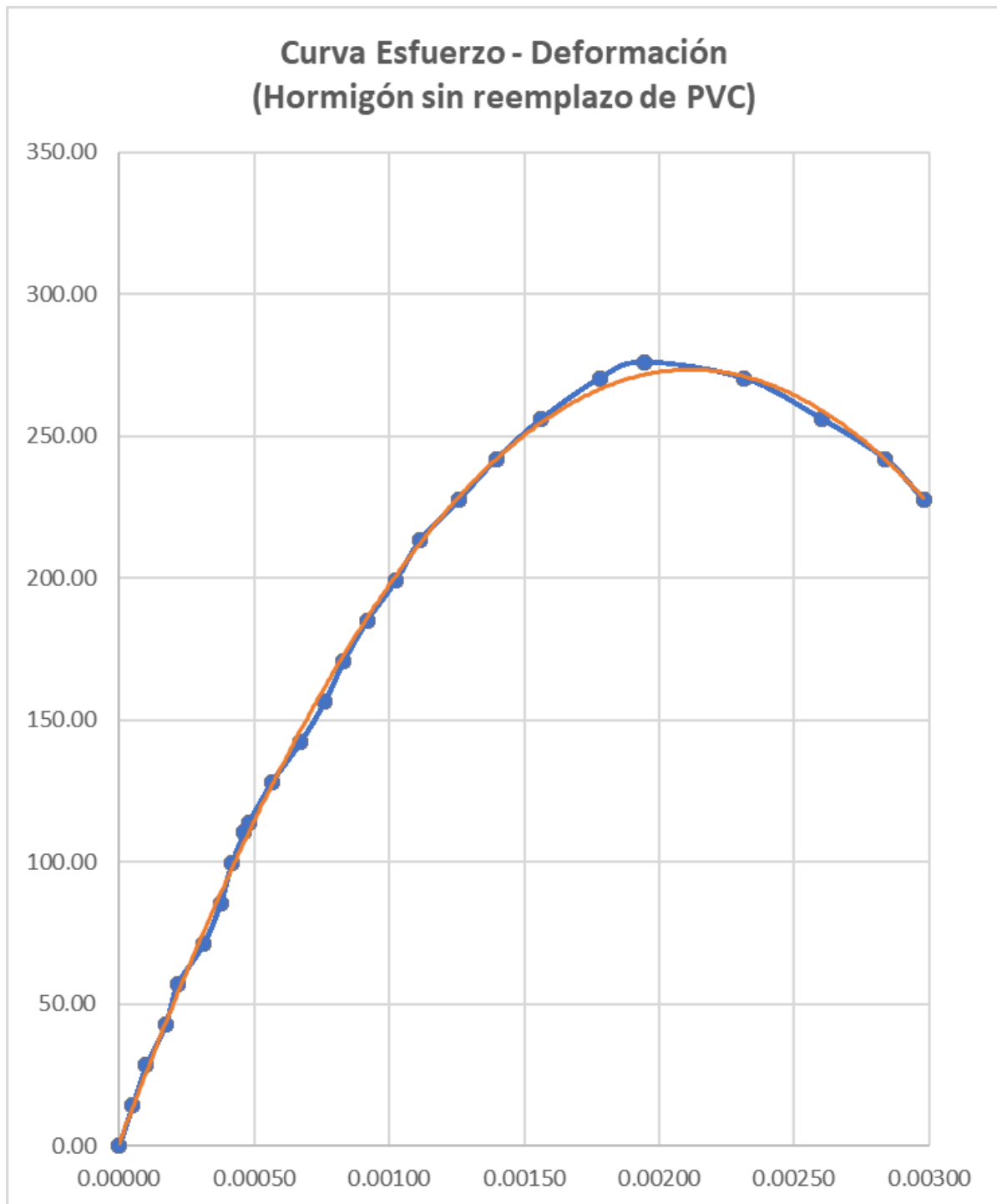
### 4.3 Módulo de Elasticidad

**Tabla 47.** Módulo de Elasticidad - Hormigón convencional

Altura del equipo	203 mm	N° Muestra	PVC0-1
Diámetro de probeta	151 mm	EG	122.3
Área de probeta	17908 mm <sup>2</sup>	ER	123.7
Carga máxima	484.91 kN	Carga en 40%	193.96 kN
Carga kN	Deformación mm <sup>-3</sup>	d	Esf. máx. kg/cm <sup>2</sup>
	0.0		0.00
<b>25</b>	13	0.0098	14.24
50	27	0.0204	28.47
75	46	0.0347	42.71
100	58	0.0437	56.94
125	84	0.0634	71.18
150	101	0.0762	85.41
175	112	0.0845	99.65
<b>194</b>	125	0.0942	110.45
200	129	0.0973	113.88
225	152	0.1146	128.12
250	181	0.1365	142.35
275	205	0.1546	156.59
300	224	0.1690	170.82
325	247	0.1863	185.06
350	276	0.2082	199.30
375	300	0.2263	213.53
400	339	0.2557	227.77
425	376	0.2836	242.00
450	421	0.3175	256.24
475	479	0.3613	270.47
<b>485</b>	523	0.3945	276.17
475	623	0.4699	270.47
450	700	0.5280	256.24
425	764	0.5763	242.00
400	802	0.6049	227.77
	Carga máx.=	484.91	kN
	0.4 $\sigma$ máx.=	110.45	kg/cm <sup>2</sup>
	$\sigma$ (0.00005)=	14.70	kg/cm <sup>2</sup>
	$\epsilon$ (0.4 $\sigma$ máx.)=	0.00046	mm/mm
	<b>Ec=</b>	<b>231235.9</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>
	w=	2.234	T/m <sup>3</sup>
	<b><math>\alpha</math> (alfa)=</b>	<b>13916</b>	
	<b><math>\gamma</math> (gamma)=</b>	<b>4168</b>	

Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 14.** Curva Módulo de Elasticidad (Hormigón convencional) – Muestra 1



Nota. Elaboración Propia

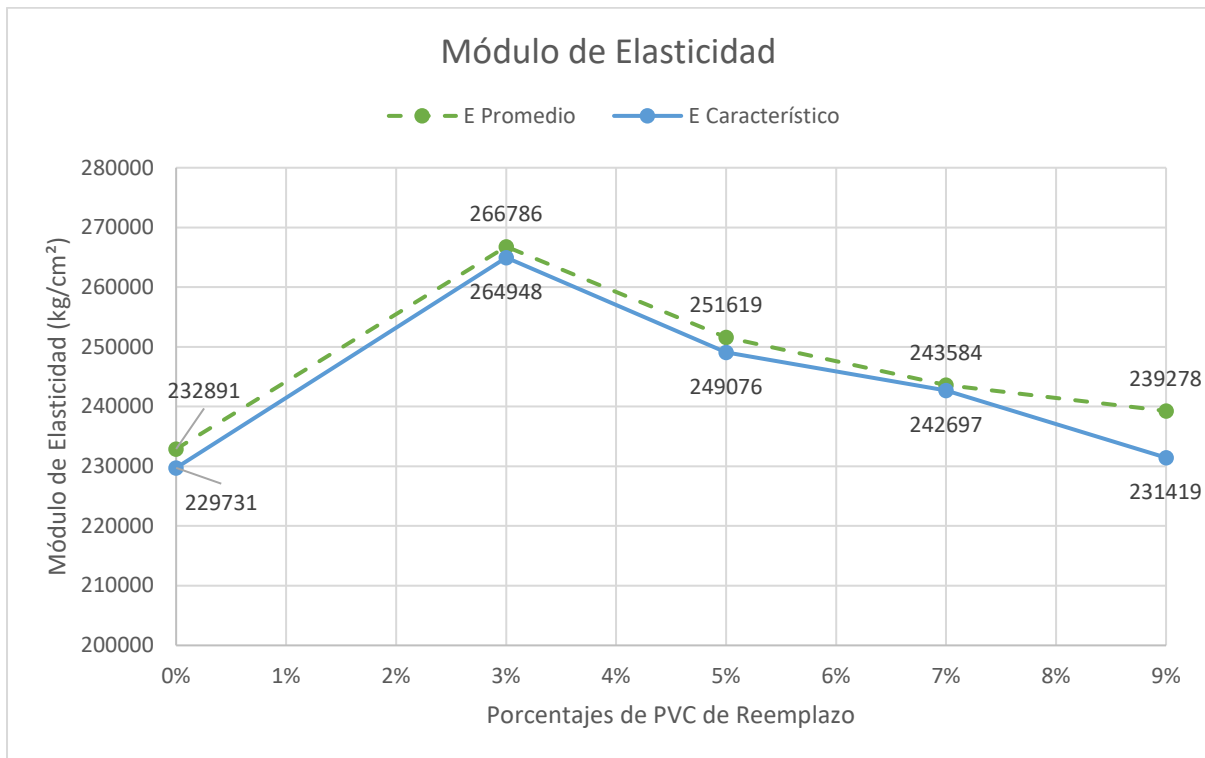
Las tablas y gráficos de módulo de elasticidad de hormigón con reemplazo de PVC se encuentran en la sección de Anexos.

**Tabla 48. Módulo de elasticidad - Tabla resumen**

Descripción	Unidad	Valor									
Cilindro #		PVC0-1	PVC0-2	PVC3-1	PVC3-2	PVC5-1	PVC5-2	PVC7-1	PVC7-2	PVC9-1	PVC9-2
% de reemplazo de PVC	%	0%	0%	3%	3%	5%	5%	7%	7%	9%	9%
Diámetro promedio	mm	151	152	149	150	150	151	150	151	151	150
Altura promedio	mm	304	305	306	306	307	305	303	302	305	303
Masa	kg	12.61	12.59	12.51	12.47	12.37	12.32	12.13	12.17	12.01	12.03
Esfuerzo para $\epsilon=0.00005$	kg/cm <sup>2</sup>	14.70	14.45	17.72	15.93	16.96	15.68	15.09	15.84	16.01	15.01
Esfuerzo para 40% de f'c	kg/cm <sup>2</sup>	110.45	109.84	135.58	135.97	123.83	123.67	118.44	119.44	115.69	115.74
Carga máxima	kN	484.91	488.64	579.60	589.10	536.51	542.96	513.14	524.41	507.94	501.43
Área	mm <sup>2</sup>	17907.86	18145.84	17436.62	17671.46	17671.46	17907.86	17671.46	17907.86	17907.86	17671.46
Ec (Módulo de elasticidad)	kg/cm <sup>2</sup>	231235.86	234545.29	267749.10	265823.50	250287.08	252950.95	244047.67	243119.42	243394.72	235161.86
Ec promedio	kg/cm <sup>2</sup>	232890.58		266786.30		251619.02		243583.55		239278.29	
Desviación Estándar	kg/cm <sup>2</sup>	2340.12		1361.60		1883.64		656.37		5821.51	
<b>Ec característico</b>	kg/cm <sup>2</sup>	<b>229731.42</b>		<b>264948.14</b>		<b>249076.10</b>		<b>242697.44</b>		<b>231419.24</b>	
$\alpha$ (alfa)		13916	14154	14543	14418	14225	14386	14183	14069	14312	13825
<b><math>\alpha</math> promedio (alfa)</b>		<b>14035</b>		<b>14480</b>		<b>14305</b>		<b>14126</b>		<b>14068</b>	
<b>Ec</b>	kg/cm <sup>2</sup>	<b>14035 vf'c</b>		<b>14480 vf'c</b>		<b>14305 vf'c</b>		<b>14126 vf'c</b>		<b>14068 vf'c</b>	
$\gamma$ (gamma)		4168	4242	4358	4327	4272	4329	4273	4231	4312	4163
<b><math>\gamma</math> promedio (gamma)</b>		<b>4205</b>		<b>4343</b>		<b>4301</b>		<b>4252</b>		<b>4238</b>	
<b>Ec</b>	kg/cm <sup>2</sup>	<b>4205*w<sup>1.5</sup>*vf'c</b>		<b>4343*w<sup>1.5</sup>*vf'c</b>		<b>4272*w<sup>1.5</sup>*vf'c</b>		<b>4252*w<sup>1.5</sup>*vf'c</b>		<b>4238*w<sup>1.5</sup>*vf'c</b>	

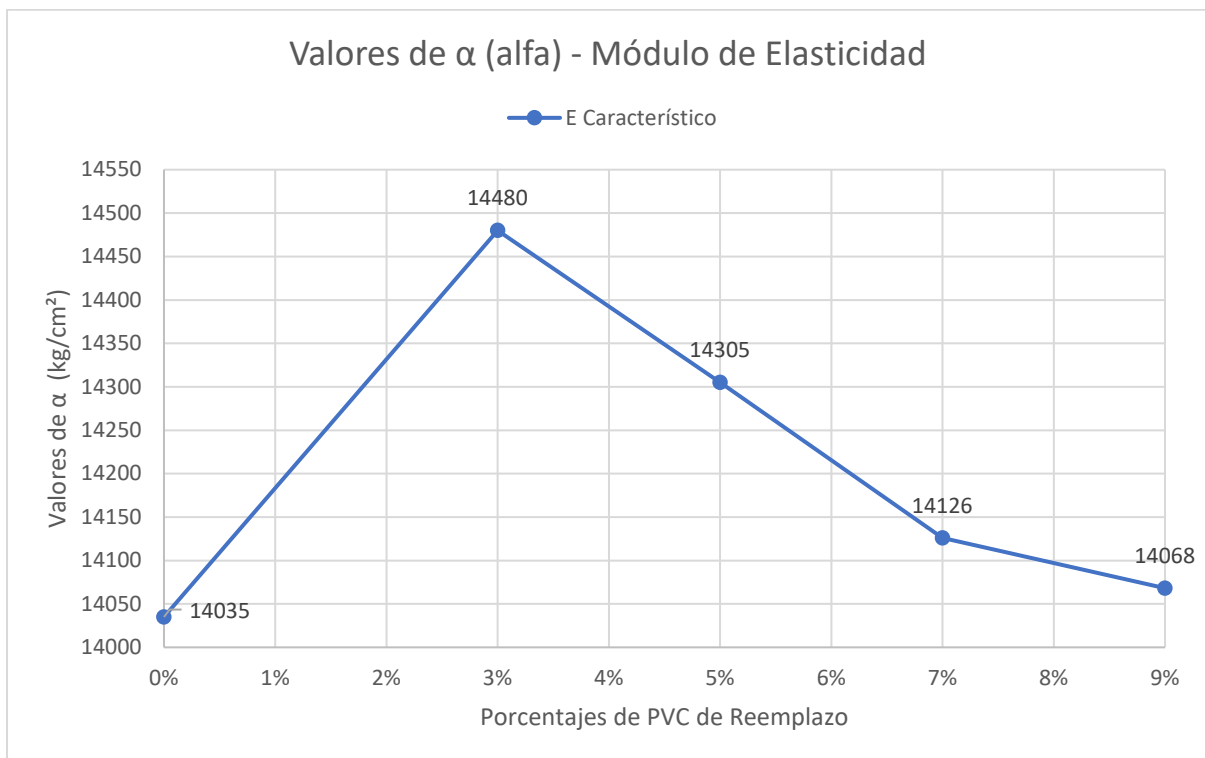
Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 15.** Módulos de elasticidad de hormigones con diferentes % de PVC



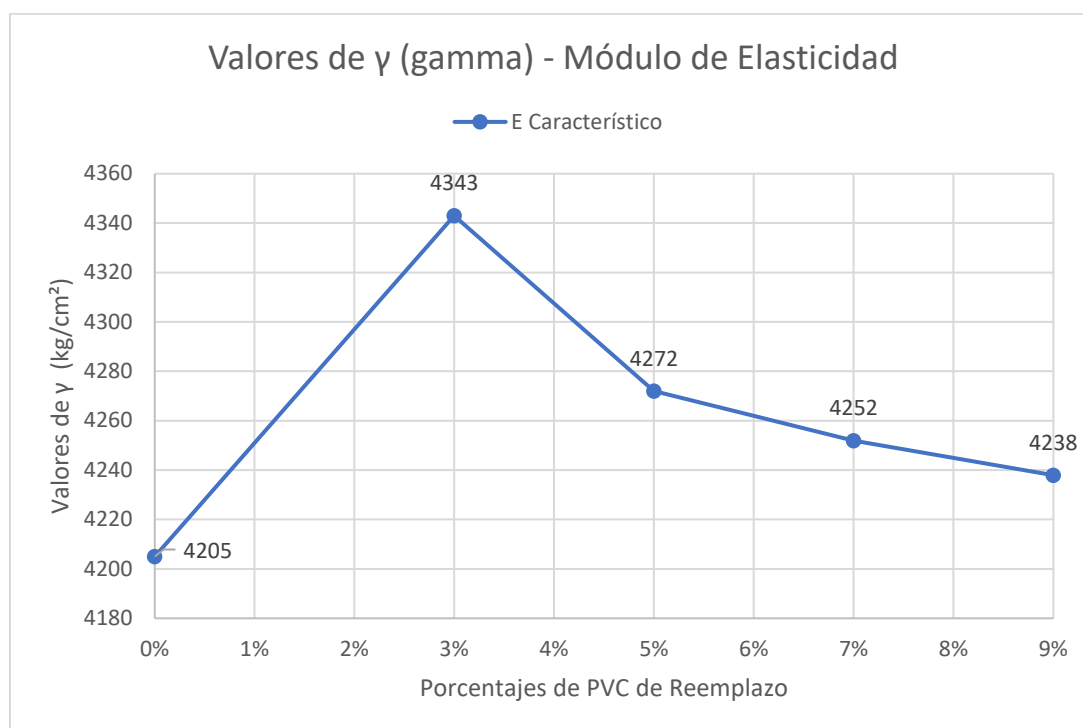
Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 16.** Valores de  $\alpha$  (alfa) para módulo de elasticidad



Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 17.** Valores de  $\gamma$  (gamma) para módulo de elasticidad



Nota. Elaboración Propia

#### 4.4 Análisis Comparativo Económico

Para el desarrollo de este apartado se utilizó como referencia 1m<sup>3</sup> de hormigón para la comparación económica entre la producción de hormigón convencional y el hormigón con PVC triturado en reemplazo del agregado grueso. Se consideran precios del agregado de la Mina La Chimba y cemento Selvalegre. Para el PVC la planta trituradora tiene un precio determinado para la trituración de este material.

**Tabla 49.** Cantidades y costos para 1m<sup>3</sup> de hormigón convencional,  $f'c= 240 \text{ kg/cm}^2$

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Agregado grueso	m <sup>3</sup>	0.71	13.74	9.76
Agregado fino	m <sup>3</sup>	0.42	7.02	2.95
Cemento	saco 50kg	8.32	8.00	66.56
Agua	m <sup>3</sup>	0.23	0.43	0.10
			<b>Total</b>	<b>\$79.36</b>

Nota. Elaboración Propia. Valores en USD (dólares americanos)

**Tabla 50.** Cantidades y costos para 1m<sup>3</sup> de hormigón con 3% de PVC, f'c= 240 kg/cm<sup>2</sup>

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Agregado grueso	m <sup>3</sup>	0.70	13.74	9.62
Agregado fino	m <sup>3</sup>	0.42	7.02	2.95
Cemento	saco 50 kg	8.46	8.00	67.68
Agua	m <sup>3</sup>	0.23	0.43	0.10
PVC	kg	15.73	0.55	8.65
<b>Total</b>				<b>\$89.00</b>

Nota. Elaboración Propia. Valores en USD (dólares americanos)

**Tabla 51.** Cantidades y costos para 1m<sup>3</sup> de hormigón con 5% de PVC, f'c= 240 kg/cm<sup>2</sup>

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Agregado grueso	m <sup>3</sup>	0.69	13.74	9.48
Agregado fino	m <sup>3</sup>	0.42	7.02	2.95
Cemento	saco 50 kg	8.48	8.00	67.84
Agua	m <sup>3</sup>	0.23	0.43	0.10
PVC	kg	26.21	0.55	14.42
<b>Total</b>				<b>\$94.78</b>

Nota. Elaboración Propia. Valores en USD.

**Tabla 52.** Cantidades y costos para 1m<sup>3</sup> de hormigón con 7% de PVC, f'c= 240 kg/cm<sup>2</sup>

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Agregado grueso	m <sup>3</sup>	0.68	13.74	9.34
Agregado fino	m <sup>3</sup>	0.42	7.02	2.95
Cemento	saco 50 kg	8.50	8.00	68.00
Agua	m <sup>3</sup>	0.23	0.43	0.10
PVC	kg	36.69	0.55	20.18
<b>Total</b>				<b>\$100.57</b>

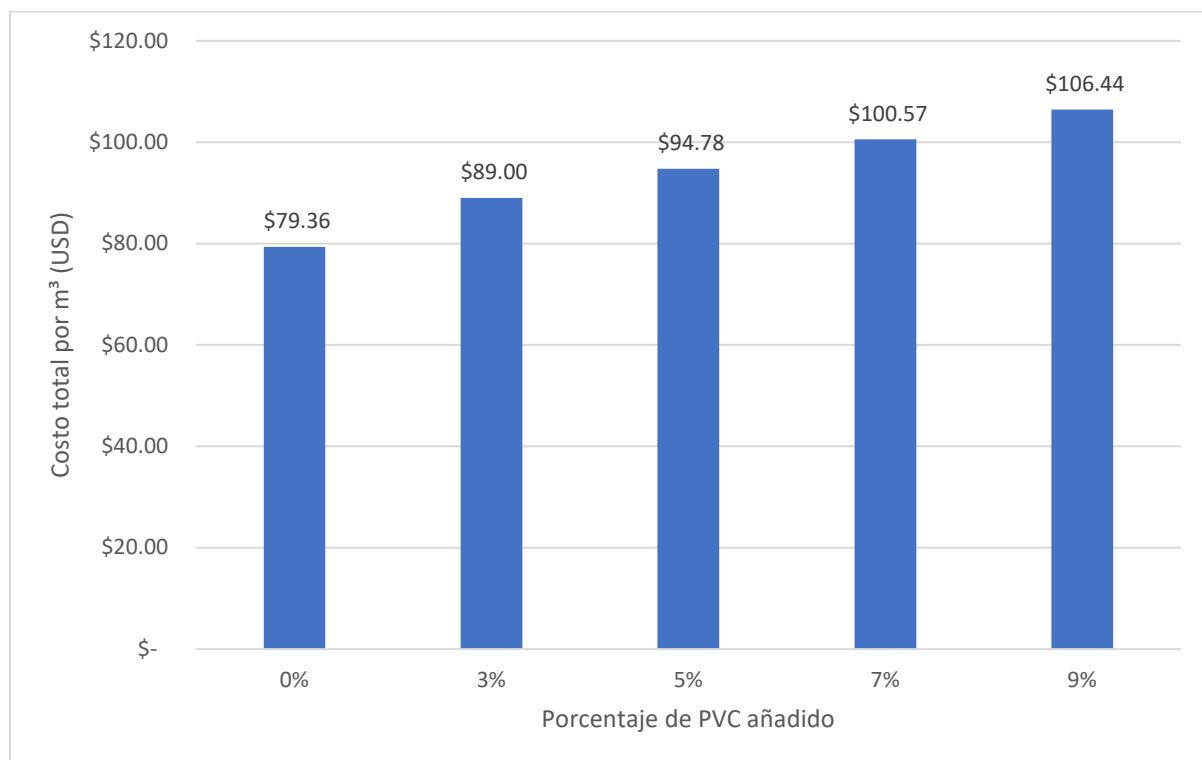
Nota. Elaboración Propia. Valores en USD.

**Tabla 53.** Cantidades y costos para 1m<sup>3</sup> de hormigón con 9% de PVC, f'c= 240 kg/cm<sup>2</sup>

Descripción	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Precio Total
Agregado grueso	m <sup>3</sup>	0.67	13.74	9.21
Agregado fino	m <sup>3</sup>	0.42	7.02	2.95
Cemento	saco 50 kg	8.53	8.00	68.24
Agua	m <sup>3</sup>	0.23	0.43	0.10
PVC	kg	47.18	0.55	25.95
<b>Total</b>				<b>\$106.44</b>

Nota. Elaboración Propia. Valores en USD.

**Gráfico 18.** Comparación de costos entre hormigón convencional y con PVC.



Nota. Elaboración Propia. Valores en USD.

## CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, COMENTARIOS Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

- Los áridos obtenidos de la Mina La Chimba cumplen con los estándares establecidos en la norma NTE INEN 872, a excepción del parámetro de granulometría, sin embargo, no es un factor limitante para el desarrollo de esta investigación, debido a que se ha trabajado con un módulo de finura ideal propuesto por Füller – Thompson, lo cual nos permite obtener dosificaciones correctas. A continuación, se presenta una tabla resumen de la caracterización de agregados, con sus respectivas especificaciones.

**Tabla 54.** Caracterización de agregados - Tabla resumen

<b>AGREGADO GRUESO</b>					
<b>Propiedades</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>	<b>Límite</b>	<b>Observación</b>
Granulometría	INEN 872	DENTRO DE ESPECIFICACIÓN			NO CUMPLE
Gravedad Específica	INEN 857	-	2.38	-	-
Absorción	INEN 857	%	4.80	-	-
Resistencia a la Abrasión	INEN 860	%	33	< 50	CUMPLE
<b>AGREGADO FINO</b>					
<b>Propiedades</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>	<b>Límite</b>	<b>Observación</b>
Granulometría	INEN 872	DENTRO DE ESPECIFICACIÓN			NO CUMPLE
Módulo de Finura	INEN 872	-	2.8	2.3 - 3.1	CUMPLE
Gravedad Específica	INEN 856	-	2.26	-	-
Absorción	INEN 856	%	5.72	-	-
Equivalente de Arena	ASTM D 2419	%	95	> 80	CUMPLE
Contenido Orgánico	INEN 855	-	2	< 3	CUMPLE
<b>CEMENTO SELVALEGRE</b>					
<b>Propiedades</b>	<b>Norma</b>	<b>Unidad</b>	<b>Valor</b>	<b>Límite</b>	<b>Observación</b>
Finura Blaine	INEN 192	m <sup>2</sup> /kg	345.4	260-430	CUMPLE
Expansión Autoclave	INEN 200	%	0.04	< 0.8	CUMPLE
Contenido de Aire	INEN 195	%	4.50	< 12	CUMPLE
Consistencia normal del cemento	INEN 157	%	25.8	-	-
Fraguado Inicial	INEN 158	min	125	> 45	CUMPLE
Fraguado Final	INEN 158	min	326	< 420	CUMPLE
Resistencia a la compresión morteros normalizados (28 días)	INEN 488	kg/cm <sup>2</sup>	296.73	> 250	CUMPLE

Nota. Elaboración Propia

- Los especímenes cilíndricos de hormigón convencional elaborados con cemento Selvalegre y agregados de la Mina La Chimba cumplen con la resistencia a la compresión esperada de  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ , obteniendo una resistencia característica de  $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$  y un asentamiento final de 12.5 cm.
- Los especímenes cilíndricos de hormigón modificado elaborados con PVC triturado, cemento Selvalegre y agregados de la Mina La Chimba, en todos los porcentajes determinados, cumplen con la resistencia a la compresión esperada de  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .
- El máximo desempeño se obtiene con 3% de PVC de reemplazo, dando una resistencia característica  $f'c = 336 \text{ kg/cm}^2$ , es decir un aumento del 34% de resistencia en comparación con la resistencia característica obtenida con hormigón convencional.
- Se puede observar que los valores de resistencia a compresión tienden a disminuir cuando el porcentaje de PVC triturado de reemplazo aumenta. En todas las mezclas se obtiene un asentamiento final de 11.5 cm, es decir, una trabajabilidad menor que el hormigón convencional.
- La resistencia a la compresión máxima se obtiene con hormigón modificado con 3% de PVC incluido, sin embargo, considerando la justificación medioambiental que se presenta en este trabajo, la mejor opción sería utilizar 9% de PVC en hormigón modificado, obteniendo una resistencia característica de  $f'c = 287 \text{ kg/cm}^2$ ; de esta manera se cumple con la resistencia a la compresión esperada  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ , y se promueve el reúso PVC reciclado en mayor cantidad.

- El módulo de elasticidad obtenido con hormigón convencional (sin reemplazo de PVC) es de 229731 kg/cm<sup>2</sup> y el máximo valor obtenido es de 264948 kg/cm<sup>2</sup>, en hormigón con reemplazo del 3% de PVC. En todos los casos en los que el hormigón es alterado con PVC, presenta un aumento en el módulo de elasticidad a comparación del hormigón convencional, sin embargo, se observa una tendencia decreciente de este valor a medida que el porcentaje de PVC de reemplazo aumenta.
- Se obtiene un valor de  $\alpha$  (alfa) de 14035 para hormigón convencional, comparado con el valor que sugiere el ACI 318 que es de 15100; se concluye que es un valor aceptable y mejor adaptado para nuestro medio, debido a que se considera las propiedades del material nacional utilizado. Por tanto, la fórmula para obtener el módulo de elasticidad en función de la resistencia a la compresión del hormigón se definiría de la siguiente manera:

$$E_c = 14035\sqrt{f'_c} \quad (f'_c \text{ en kg/cm}^2)$$

- Se obtiene un valor de  $\gamma$  (gamma) de 4205 para hormigón convencional, comparado con el valor que sugiere el ACI 318 que es de 4270; se concluye que es un valor aceptable y mejor adaptado para nuestro medio, debido a que se considera el peso unitario real de las mezclas realizadas con las dosificaciones presentadas en esta disertación. Por tanto, la fórmula para obtener el módulo de elasticidad en función de la resistencia a la compresión del hormigón y peso unitario se definiría de la siguiente manera:

$$E_c = 4205w^{1.5}\sqrt{f'_c} \quad (f'_c \text{ en kg/cm}^2, w \text{ en t/m}^3)$$

- Los valores de  $\gamma$  (gamma) y  $\alpha$  (alfa) obtenidos en hormigones modificados con PVC superan los valores obtenidos con hormigón convencional, siendo el máximo valor obtenido de  $\alpha=14480$ ,  $\gamma=4343$ , en hormigón con reemplazo de PVC al 3%. Se observa que a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo de PVC los valores de alfa y gamma tienden a disminuir.
- Los especímenes prismáticos (vigas) de hormigón convencional elaborados con cemento Selvalegre y agregados de la Mina La Chimba dan como resultado un módulo de rotura característico  $MR= 40 \text{ kg/cm}^2$ . Únicamente los especímenes prismáticos (vigas) de hormigón modificado, elaborados con 3% y 5% de PVC utilizado como reemplazo de agregado grueso, igualan o sobrepasan el valor de módulo de rotura obtenido con el hormigón convencional.
- El máximo desempeño se obtiene con 3% de PVC de reemplazo, dando un módulo de rotura  $MR= 41.7 \text{ kg/cm}^2$ , es decir un aumento del 4% de resistencia a flexión en comparación con la resistencia característica obtenida con hormigón convencional. Con 5% de PVC añadido, el módulo de rotura es semejante al valor obtenido con hormigón convencional. Por tanto, se concluye que al utilizar 5% de PVC añadido se puede obtener un módulo de rotura convencional, promoviendo el reúso de PVC reciclado. También se observa que los valores de módulo de rotura tienden a disminuir cuando el porcentaje de PVC triturado aumenta.
- El costo por añadir 1% de PVC reciclado y triturado a la mezcla original de hormigón tiene un precio aproximado de \$3.21 USD. El  $\text{m}^3$  de hormigón modificado con 3% de PVC de reemplazo por agregado grueso tiene un precio aproximado de \$89.00 USD.

Se debe considerar que esta mezcla modificada con PVC mejoró la resistencia en un 34% en comparación con la mezcla de hormigón convencional.

## 5.2 Comentarios

Al añadir PVC triturado a la mezcla en pequeños porcentajes se puede mejorar las propiedades físico-mecánicas, tanto del hormigón fresco y hormigón endurecido, de las siguientes maneras:

- El PVC tiene una densidad relativamente menor que los agregados comúnmente utilizados, por tanto, se podría elaborar hormigones livianos conservando su desempeño mecánico.
- Se obtienen hormigones con menor inestabilidad volumétrica debido a que el PVC se acomoda de mejor manera con los demás materiales, considerando la granulometría del PVC presentada en este trabajo.
- El PVC, debido a su estructura, aporta en la reducción del agrietamiento que se pueda generar en el proceso de fraguado y secado; de igual manera en el proceso de aplicación de fuerzas.

Sin embargo, también puede perjudicar a las propiedades del hormigón de la siguiente manera:

- Las mezclas elaboradas con PVC triturado generan un menor asentamiento, esto debido al efecto hidrofóbico que posee este material, provocando una menor trabajabilidad y manejabilidad en la mezcla.

### 5.3 Recomendaciones

- Se recomienda reforzar la hipótesis y conclusiones obtenidas en esta investigación, mediante elaboración de mezclas con materiales de diferentes minas del país, manteniendo la misma granulometría de PVC utilizada en este trabajo.
- Se recomienda profundizar más el uso de PVC triturado en mezclas de hormigón, con porcentajes de reemplazo mayores a 10%, con el fin de obtener un porcentaje de PVC aproximado que iguale en resistencia al hormigón convencional.
- Se recomienda elaborar las mezclas con usos de aditivos acelerantes y plastificantes para verificar sus nuevas propiedades físico-mecánicas, principalmente la resistencia a compresión y trabajabilidad.
- Se recomienda realizar ensayos con un mejor nivel de detalle para definir la interacción y comportamiento de la interfase que existe entre el PVC, de características iguales al utilizado en esta investigación, y la matriz de hormigón.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

American Concrete Institute [ACI] (2011). Guide to Evaluation of Strength Test Results of Concrete 212-R. U.S.A.

ACI (2019). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19). U.S.A.

American Society for Testing and Materials [ASTM] (2018) ASTM-C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. U.S.A.

ASTM (2018) ASTM-C78: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading) U.S.A.

ASTM (2018) ASTM C33: Standard Specification for Concrete Aggregates. U.S.A.

ASTM (2002) ASTM C469: Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. U.S.A.

Álvarez, J. (1999) Durabilidad del concreto de alto comportamiento.

<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/5824/Capitulo2.pdf>

Andrade & Sono (2014) Aplicación del ensayo de curado acelerado en cilindros de hormigón sometidos a compresión simple.

<http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/6443/9.20.000694.pdf>

Asocreto (2010). Tecnología del Concreto Tomo 1. Nomos Impresores Ed. Bogotá-Colombia

British Standard (1989) BS 812-105: Methods for determination of particle shape. U.K.

Castañeda, D. (2017). Análisis de la granulometría de la concha de abanico triturada para su uso como agregado en concretos.

[https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3011/ICI\\_236.pdf](https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3011/ICI_236.pdf)

Castillo C. (2019). Análisis de las propiedades físico–mecánicas de un hormigón elaborado con fibras recicladas de tuberías PVC utilizando agregados de la cantera de Pifo y cemento HOLCIM tipo GU y su correlación con un hormigón convencional.

<http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/20326>

Construmática (2020) PVC. <https://www.construmatica.com/construpedia/PVC>

CHRYSO (2020) Fraguado del hormigón, temperatura y tiempo.

<https://www.chryso.es/news/362/fraguado-del-hormig-n-temperatura-y-tiempo-chryso>

Delgado et. al. (2006) Influencia de la granulometría en las propiedades volumétricas de la mezcla asfáltica.

<https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt299.pdf>

FIERROS (2018) “Ferreteros se vinculan a programa para reciclaje del PVC”.

<https://fierros.com.co/noticias/ferreteros-se-vinculan-a-programa-reciclaje-del-pvc/>

GAD Cayambe (2015) Plan de desarrollo y organización territorial del gobierno autónomo descentralizado intercultural y plurinacional municipal de Cayambe 2015-2025.

[http://www.municipiocayambe.gob.ec/images/lev\\_transparencia/LOTAIP/PDYOT%20GADIP%20Cayambe%2010-06-2015.pdf](http://www.municipiocayambe.gob.ec/images/lev_transparencia/LOTAIP/PDYOT%20GADIP%20Cayambe%2010-06-2015.pdf)

Guevara, G., Hidalgo, C., Pizarro, M., Rodríguez, I., Rojas, L. D., & Segura, G. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. Revista Tecnología En Marcha, 25(2), pág.

80–86. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i2.1632>

Guzmán A., Zambrano M., Zavala M. (2014). Análisis de Calidad Físico y Mecánico de los Agregados Pétreos Para Concreto, De Los Principales Bancos De Materiales De La

Zona Oriental De El Salvador. Universidad de El Salvador - San Miguel, El Salvador.

<http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/6274/1/50107996.pdf>

Instituto Ecuatoriano de Normalización [INEN] (2011) NTE INEN 490: Cementos Hidráulicos

Compuestos - Requisitos. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/490.pdf>

INEN (2011) NTE INEN 1108: Agua Potable - Requisitos.

[https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_1855-2.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_1855-2.pdf)

INEN (2015) NTE INEN 1762: Hormigón. Definiciones Y Terminología.

<https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte-inen-1762-1.pdf>

INEN (2015) NTE INEN 1855: Hormigones. Hormigón Premezclado. Requisitos.

[https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_1855-2.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_1855-2.pdf)

INEN (2010) NTE INEN 1573: Hormigón De Cemento Hidráulico. Determinación De La

Resistencia A La Compresión De Especímenes Cilíndricos De Hormigón De Cemento

Hidráulico. [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_1855-2.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_1855-2.pdf)

INEN (2011) NTE INEN 2554: Hormigón De Cemento Hidráulico. Determinación De La

Resistencia A La Flexión Del Hormigón. (Utilizando Una Viga Simple Con Carga En Los

Tercios). [https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte\\_inen\\_1855-2.pdf](https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_1855-2.pdf)

Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC] (2020) Encuesta Nacional de Edificaciones -

2019. Ecuador. <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web->

[inec/Estadisticas Economicas/Encuesta Edificaciones/2019/2.%202019 ENED Principales resultados.pdf](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Economicas/Encuesta_Edificaciones/2019/2.%202019_ENED_Principales_resultados.pdf)

Jamal, H. (2017) Properties of Fresh Concrete and Factors Affecting Properties.

<https://www.aboutcivil.org/Properties-of-concrete-factors-affecting-them.html>

Mannise, R. (2011) PVC: El tóxico que nos rodea. <https://ecocosas.com/ecologia/pvc-toxico/>

Lara, L. (2018) Guías de Prácticas de Laboratorio de Hormigones. Facultad de Ingeniería  
PUCE. Ecuador.

Lowe, J.S., Wilson, D.J., & Black, P.M. (2009). A review of New Zealand specifications and  
laboratory test methods for fine aggregate and sand.

<https://www.semanticscholar.org/paper/A-review-of-New-Zealand-specifications-and-test-for-Lowe-Wilson/ced0910494435ba03d56e716e16d1cce93e92aa2>

Mishra, G. (2021) Properties of Fresh Concrete for Construction Works.

<https://theconstructor.org/concrete/properties-of-fresh-concrete/6490>

Morales, L. (2015) Durabilidad del Hormigón Elaborado con Cemento Selvalegre de  
Composición P30 y Cemento Campeón de Composición P40.

<http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/5158/1/T-UCE-0011-80.pdf>

Moreno, E., Solís, R., Chan, J. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las  
características del concreto. Ingeniería, 7(2),39-46.

<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46770203>

Moreno, E., Solís, R., (2006). Análisis de la porosidad del concreto con agregado calizo.

[http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0798-40652006000300004&lng=es&tlng=es.](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652006000300004&lng=es&tlng=es)

Ortiz, J. (2019). Evaluación del comportamiento de residuo PVC utilizado como reemplazo  
parcial de agregados en concreto hidráulico.

<http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/6473>

Pérez, N. (2018). Evaluación de las propiedades físicas y mecánicas de un agregado de concreto reciclado. Sanfandila, Qro - México.

Portland Cement Association [PCA] (2019) Durability of Concrete.

<https://www.cement.org/learn/concrete-technology/durability>

Safeopedia (2019) Polyvinyl Chloride (PVC).

<https://www.safeopedia.com/definition/117/polyvinyl-chloride-pvc>

Shelton, D. & Harper, J. (1982) G82-623 An Overview of Concrete as a Building Material.

<https://digitalcommons.unl.edu/extensionhist/603>

Zita, A. (2017) “Métodos De Investigación” Obtenido de:

<https://www.todamateria.com/metodos-de-investigacion/>

## 7. ANEXOS

- Tabla y Gráficos de Módulo de Elasticidad

**Tabla 55.** Módulo de elasticidad - Hormigón convencional (Muestra 2)

Altura del equipo	203 mm	N° Muestra	PVC0-2	
Diámetro de probeta	152 mm	EG	122.3	
Área de probeta	18146 mm <sup>2</sup>	ER	123.7	
Carga máxima	488.64 kN	Carga en 40%	195.46 kN	
Carga kN	Deformación mm- <sup>3</sup> d		Esf. máx. kg/cm <sup>2</sup>	Def. unitaria $\epsilon$ mm/mm
	0		0.00	0.00000
<b>25</b>	13	0.0098	14.05	0.00005
50	29	0.0219	28.10	0.00011
75	49	0.0370	42.15	0.00018
100	64	0.0483	56.19	0.00024
125	84	0.0634	70.24	0.00031
150	99	0.0747	84.29	0.00037
175	109	0.0822	98.34	0.00041
<b>195</b>	123	0.0927	109.84	0.00046
200	126	0.0950	112.39	0.00047
225	148	0.1116	126.44	0.00055
250	179	0.1350	140.49	0.00067
275	206	0.1554	154.54	0.00077
300	231	0.1742	168.58	0.00086
325	259	0.1954	182.63	0.00096
350	291	0.2195	196.68	0.00108
375	324	0.2444	210.73	0.00120
400	359	0.2708	224.78	0.00133
425	394	0.2972	238.83	0.00146
450	441	0.3326	252.88	0.00164
475	499	0.3764	266.92	0.00185
<b>490</b>	560	0.4224	275.35	0.00208
475	630	0.4752	266.92	0.00234
450	690	0.5204	252.88	0.00256
425	744	0.5612	238.83	0.00276
400	797	0.6012	224.78	0.00296
	Carga máx.=	488.64	kN	
	0.4 $\sigma$ máx.=	109.84	kg/cm <sup>2</sup>	
	$\sigma$ (0.00005)=	14.45	kg/cm <sup>2</sup>	
	$\epsilon$ (0.4 $\sigma$ máx.)=	0.00046	mm/mm	
	<b>Ec=</b>	<b>234545.3</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	
	w=	2.233	T/m <sup>3</sup>	
	<b><math>\alpha</math> (alfa)=</b>	<b>14154</b>		
	<b><math>\gamma</math> (gamma)=</b>	<b>4242</b>		

Nota. Elaboración Propia

**Tabla 56. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 3% (Muestra 1)**

<b>Altura del equipo</b>	203 mm	<b>N° Muestra</b>	PVC3-1	
<b>Diámetro de probeta</b>	149 mm	<b>EG</b>	122.3	
<b>Área de probeta</b>	17437 mm <sup>2</sup>	<b>ER</b>	123.7	
<b>Carga máxima</b>	579.60 kN	<b>Carga en 40%</b>	231.84 kN	
<b>Carga</b> kN	<b>Deformación</b> mm <sup>-3</sup>	<b>d</b>	<b>Esf. máx.</b> kg/cm <sup>2</sup>	
			<b>Def. unitaria <math>\epsilon</math></b> mm/mm	
	0		0.00	0.00000
<b>25</b>	9	0.0068	14.62	0.00003
50	30	0.0226	29.24	0.00011
75	38	0.0287	43.86	0.00014
100	49	0.0370	58.48	0.00018
125	71	0.0536	73.10	0.00026
150	90	0.0679	87.72	0.00033
175	102	0.0769	102.34	0.00038
200	117	0.0882	116.96	0.00043
225	127	0.0958	131.58	0.00047
<b>232</b>	132	0.0995	135.58	0.00049
250	145	0.1094	146.20	0.00054
275	174	0.1312	160.82	0.00065
300	196	0.1478	175.44	0.00073
325	218	0.1644	190.06	0.00081
350	236	0.1780	204.68	0.00088
375	261	0.1969	219.30	0.00097
400	279	0.2104	233.92	0.00104
425	304	0.2293	248.54	0.00113
450	330	0.2489	263.16	0.00123
475	357	0.2693	277.78	0.00133
500	384	0.2896	292.40	0.00143
525	422	0.3183	307.02	0.00157
550	467	0.3522	321.64	0.00174
<b>580</b>	534	0.4028	339.19	0.00198
575	594	0.4480	336.26	0.00221
550	683	0.5152	321.64	0.00254
525	756	0.5702	307.02	0.00281
500	807	0.6087	292.40	0.00300
	Carga máx.=	579.60	kN	
	0.4 $\sigma$ máx.=	135.58	kg/cm <sup>2</sup>	
	$\sigma$ (0.00005)=	17.72	kg/cm <sup>2</sup>	
	$\epsilon$ (0.4 $\sigma$ máx.)=	0.00049	mm/mm	
	<b>Ec=</b>	<b>267749.1</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	
	w=	2.233	T/m <sup>3</sup>	
	<b><math>\alpha</math> (alfa)=</b>	<b>14543</b>		
	<b><math>\gamma</math> (gamma)=</b>	<b>4358</b>		

Nota. Elaboración Propia

**Tabla 57. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 3% (Muestra 2)**

<b>Altura del equipo</b>	203 mm	<b>N° Muestra</b>	PVC3-2
<b>Diámetro de probeta</b>	150 mm	<b>EG</b>	123.4
<b>Área de probeta</b>	17671 mm <sup>2</sup>	<b>ER</b>	122.9
<b>Carga máxima</b>	589.10 kN	<b>Carga en 40%</b>	235.64 kN
<b>Carga</b>	<b>Deformación</b>	<b>Esf. máx.</b>	<b>Def. unitaria <math>\epsilon</math></b>
<b>kN</b>	<b>mm<sup>-3</sup></b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>mm/mm</b>
	0	0.00	0.00000
<b>25</b>	12	0.0090	0.00004
50	27	0.0202	0.00010
75	32	0.0240	0.00012
100	49	0.0367	0.00018
125	65	0.0487	0.00024
150	86	0.0644	0.00032
175	103	0.0771	0.00038
200	121	0.0906	0.00045
225	128	0.0958	0.00047
<b>236</b>	136	0.1018	0.00050
250	142	0.1063	0.00052
275	164	0.1228	0.00060
300	188	0.1407	0.00069
325	209	0.1564	0.00077
350	224	0.1677	0.00083
375	246	0.1841	0.00091
400	271	0.2028	0.00100
425	289	0.2163	0.00107
450	318	0.2380	0.00117
475	342	0.2560	0.00126
500	367	0.2747	0.00135
525	400	0.2994	0.00147
550	435	0.3256	0.00160
575	481	0.3600	0.00177
<b>590</b>	537	0.4019	0.00198
575	630	0.4715	0.00232
550	692	0.5179	0.00255
500	791	0.5920	0.00292
	Carga máx.=	589.10	kN
	0.4 $\sigma$ máx.=	135.97	kg/cm <sup>2</sup>
	$\sigma$ (0.00005)=	15.93	kg/cm <sup>2</sup>
	$\epsilon$ (0.4 $\sigma$ máx.)=	0.00050	mm/mm
	<b>Ec=</b>	<b>265823.5</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>
	w=	2.231	T/m <sup>3</sup>
	<b><math>\alpha</math> (alfa)=</b>	<b>14418</b>	
	<b><math>\gamma</math> (gamma)=</b>	<b>4327</b>	

Nota. Elaboración Propia

**Tabla 58. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 5% (Muestra 1)**

<b>Altura del equipo</b>	203 mm	<b>N° Muestra</b>	PVC5-1
<b>Diámetro de probeta</b>	150 mm	<b>EG</b>	124.1
<b>Área de probeta</b>	17671 mm <sup>2</sup>	<b>ER</b>	122.2
<b>Carga máxima</b>	536.51 kN	<b>Carga en 40%</b>	214.60 kN
<b>Carga</b>	<b>Deformación</b>	<b>Esf. máx.</b>	<b>Def. unitaria <math>\epsilon</math></b>
<b>kN</b>	<b>mm<sup>-3</sup></b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>mm/mm</b>
	0	0.00	0.00000
25	11	0.0082	0.00004
50	26	0.0193	0.00010
75	38	0.0283	0.00014
100	52	0.0387	0.00019
125	71	0.0528	0.00026
150	88	0.0655	0.00032
175	97	0.0722	0.00036
200	112	0.0834	0.00041
<b>215</b>	130	0.0968	0.00048
225	143	0.1064	0.00052
250	154	0.1146	0.00056
275	171	0.1273	0.00063
300	189	0.1407	0.00069
325	210	0.1563	0.00077
350	218	0.1622	0.00080
375	235	0.1749	0.00086
400	261	0.1942	0.00096
425	289	0.2151	0.00106
450	317	0.2359	0.00116
475	352	0.2620	0.00129
500	391	0.2910	0.00143
525	442	0.3289	0.00162
<b>537</b>	515	0.3833	0.00189
525	622	0.4629	0.00228
500	684	0.5090	0.00251
475	737	0.5485	0.00270
450	810	0.6028	0.00297
	Carga máx.=	536.51	kN
	0.4 $\sigma$ máx.=	123.83	kg/cm <sup>2</sup>
	$\sigma$ (0.00005)=	16.96	kg/cm <sup>2</sup>
	$\epsilon$ (0.4 $\sigma$ máx.)=	0.00048	mm/mm
	<b>Ec=</b>	<b>250287.1</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>
	w=	2.230	T/m <sup>3</sup>
	<b><math>\alpha</math> (alfa)=</b>	<b>14225</b>	
	<b><math>\gamma</math> (gamma)=</b>	<b>4272</b>	

Nota. Elaboración Propia

**Tabla 59. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 5% (Muestra 2)**

<b>Altura del equipo</b>	203 mm	<b>N° Muestra</b>	PVC5-2
<b>Diámetro de probeta</b>	151 mm	<b>EG</b>	123.8
<b>Área de probeta</b>	17908 mm <sup>2</sup>	<b>ER</b>	124.1
<b>Carga máxima</b>	542.96 kN	<b>Carga en 40%</b>	217.18 kN
<b>Carga</b>	<b>Deformación</b>	<b>Esf. máx.</b>	<b>Def. unitaria <math>\epsilon</math></b>
<b>kN</b>	<b>mm<sup>-3</sup></b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>mm/mm</b>
	0	0.00	0.00000
25	12	0.0090	0.00004
50	27	0.0203	0.00010
75	34	0.0255	0.00013
100	49	0.0368	0.00018
125	69	0.0518	0.00026
150	88	0.0661	0.00033
175	95	0.0713	0.00035
200	109	0.0818	0.00040
<b>217</b>	129	0.0968	0.00048
225	138	0.1036	0.00051
250	143	0.1074	0.00053
275	165	0.1239	0.00061
300	185	0.1389	0.00068
325	196	0.1472	0.00073
350	223	0.1675	0.00082
375	237	0.1780	0.00088
400	258	0.1937	0.00095
425	280	0.2103	0.00104
450	309	0.2320	0.00114
475	335	0.2516	0.00124
500	385	0.2891	0.00142
525	442	0.3319	0.00163
<b>545</b>	509	0.3822	0.00188
525	614	0.4611	0.00227
500	677	0.5084	0.00250
475	721	0.5414	0.00267
450	791	0.5940	0.00293
	Carga máx.=	542.96	kN
	0.4 $\sigma$ máx.=	123.67	kg/cm <sup>2</sup>
	$\sigma$ (0.00005)=	15.68	kg/cm <sup>2</sup>
	$\epsilon$ (0.4 $\sigma$ máx.)=	0.00048	mm/mm
	<b>Ec=</b>	<b>252951.0</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>
	w=	2.227	T/m <sup>3</sup>
	<b><math>\alpha</math> (alfa)=</b>	<b>14386</b>	
	<b><math>\gamma</math> (gamma)=</b>	<b>4329</b>	

Nota. Elaboración Propia

**Tabla 60. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 7% (Muestra 1)**

<b>Altura del equipo</b>	203 mm	<b>N° Muestra</b>	PVC7-1
<b>Diámetro de probeta</b>	150 mm	<b>EG</b>	123.1
<b>Área de probeta</b>	17671 mm <sup>2</sup>	<b>ER</b>	121.9
<b>Carga máxima</b>	513.14 kN	<b>Carga en 40%</b>	205.26 kN
<b>Carga</b>	<b>Deformación</b>	<b>Esf. máx.</b>	<b>Def. unitaria <math>\epsilon</math></b>
<b>kN</b>	<b>mm<sup>-3</sup></b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>mm/mm</b>
	0	0.00	0.00000
25	13	0.0097	0.00005
50	26	0.0194	0.00010
75	39	0.0291	0.00014
100	61	0.0455	0.00022
125	72	0.0537	0.00026
150	88	0.0657	0.00032
175	103	0.0769	0.00038
200	125	0.0933	0.00046
<b>205</b>	129	0.0961	0.00047
225	143	0.1067	0.00053
250	159	0.1187	0.00058
275	174	0.1299	0.00064
300	188	0.1403	0.00069
325	204	0.1523	0.00075
350	231	0.1724	0.00085
375	244	0.1821	0.00090
400	279	0.2082	0.00103
425	299	0.2232	0.00110
450	329	0.2455	0.00121
475	375	0.2799	0.00138
500	441	0.3291	0.00162
<b>514</b>	508	0.3791	0.00187
500	579	0.4321	0.00213
475	646	0.4821	0.00238
450	699	0.5217	0.00257
425	744	0.5553	0.00274
400	800	0.5971	0.00294
	Carga máx.=	513.14	kN
	0.4 $\sigma$ máx.=	118.44	kg/cm <sup>2</sup>
	$\sigma$ (0.00005)=	15.09	kg/cm <sup>2</sup>
	$\epsilon$ (0.4 $\sigma$ máx.)=	0.00047	mm/mm
	<b>Ec=</b>	<b>244047.7</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>
	w=	2.225	T/m <sup>3</sup>
	<b><math>\alpha</math> (alfa)=</b>	<b>14183</b>	
	<b><math>\gamma</math> (gamma)=</b>	<b>4273</b>	

Nota. Elaboración Propia

**Tabla 61. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 7% (Muestra 2)**

Altura del equipo	203 mm	N° Muestra	PVC7-2	
Diámetro de probeta	151 mm	EG	123.4	
Área de probeta	17908 mm <sup>2</sup>	ER	122.6	
Carga máxima	524.41 kN	Carga en 40%	209.76 kN	
Carga kN	Deformación mm- <sup>3</sup>	d	Esf. máx. kg/cm <sup>2</sup>	Def. unitaria $\epsilon$ mm/mm
	0		0.00	0.00000
25	12	0.0090	14.24	0.00004
50	26	0.0194	28.47	0.00010
75	37	0.0277	42.71	0.00014
100	59	0.0441	56.94	0.00022
125	67	0.0501	71.18	0.00025
150	91	0.0680	85.41	0.00034
175	104	0.0777	99.65	0.00038
200	125	0.0934	113.88	0.00046
<b>210</b>	129	0.0967	119.44	0.00048
225	136	0.1017	128.12	0.00050
250	151	0.1129	142.35	0.00056
275	161	0.1204	156.59	0.00059
300	174	0.1301	170.82	0.00064
325	197	0.1473	185.06	0.00073
350	211	0.1577	199.30	0.00078
375	232	0.1734	213.53	0.00085
400	250	0.1869	227.77	0.00092
425	269	0.2011	242.00	0.00099
450	305	0.2280	256.24	0.00112
475	344	0.2572	270.47	0.00127
500	385	0.2878	284.71	0.00142
<b>525</b>	518	0.3872	298.94	0.00191
500	627	0.4687	284.71	0.00231
475	681	0.5091	270.47	0.00251
450	733	0.5480	256.24	0.00270
425	796	0.5951	242.00	0.00293
	Carga máx.=	524.41	kN	
	0.4 $\sigma$ máx.=	119.44	kg/cm <sup>2</sup>	
	$\sigma$ (0.00005)=	15.84	kg/cm <sup>2</sup>	
	$\epsilon$ (0.4 $\sigma$ máx.)=	0.00048	mm/mm	
	<b>Ec=</b>	<b>243119.4</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	
	w=	2.228	T/m <sup>3</sup>	
	<b><math>\alpha</math> (alfa)=</b>	<b>14069</b>		
	<b><math>\gamma</math> (gamma)=</b>	<b>4231</b>		

Nota. Elaboración Propia

**Tabla 62. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 9% (Muestra 1)**

Altura del equipo	203 mm	N° Muestra	PVC9-1	
Diámetro de probeta	151 mm	EG	122.8	
Área de probeta	17908 mm <sup>2</sup>	ER	123.5	
Carga máxima	507.94 kN	Carga en 40%	203.18 kN	
Carga kN	Deformación mm- <sup>3</sup>	d	Esf. máx. kg/cm <sup>2</sup>	Def. unitaria $\epsilon$ mm/mm
	0		0.00	0.00000
25	12	0.0090	14.24	0.00004
50	24	0.0181	28.47	0.00009
75	41	0.0308	42.71	0.00015
100	63	0.0474	56.94	0.00023
125	75	0.0564	71.18	0.00028
150	99	0.0745	85.41	0.00037
175	106	0.0797	99.65	0.00039
200	122	0.0918	113.88	0.00045
<b>203</b>	124	0.0933	115.69	0.00046
225	138	0.1038	128.12	0.00051
250	165	0.1241	142.35	0.00061
275	178	0.1339	156.59	0.00066
300	201	0.1512	170.82	0.00074
325	217	0.1632	185.06	0.00080
350	231	0.1737	199.30	0.00086
375	249	0.1873	213.53	0.00092
400	267	0.2008	227.77	0.00099
425	301	0.2264	242.00	0.00112
450	337	0.2535	256.24	0.00125
475	378	0.2843	270.47	0.00140
500	450	0.3385	284.71	0.00167
<b>508</b>	507	0.3813	289.26	0.00188
500	631	0.4746	284.71	0.00234
475	694	0.5220	270.47	0.00257
450	752	0.5656	256.24	0.00279
425	803	0.6040	242.00	0.00298
	Carga máx.=	507.94	kN	
	0.4 $\sigma$ máx.=	115.69	kg/cm <sup>2</sup>	
	$\sigma$ (0.00005)=	16.01	kg/cm <sup>2</sup>	
	$\epsilon$ (0.4 $\sigma$ máx.)=	0.00046	mm/mm	
	<b>Ec=</b>	<b>243394.7</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	
	w=	2.225	T/m <sup>3</sup>	
	<b><math>\alpha</math> (alfa)=</b>	<b>14312</b>		
	<b><math>\gamma</math> (gamma)=</b>	<b>4312</b>		

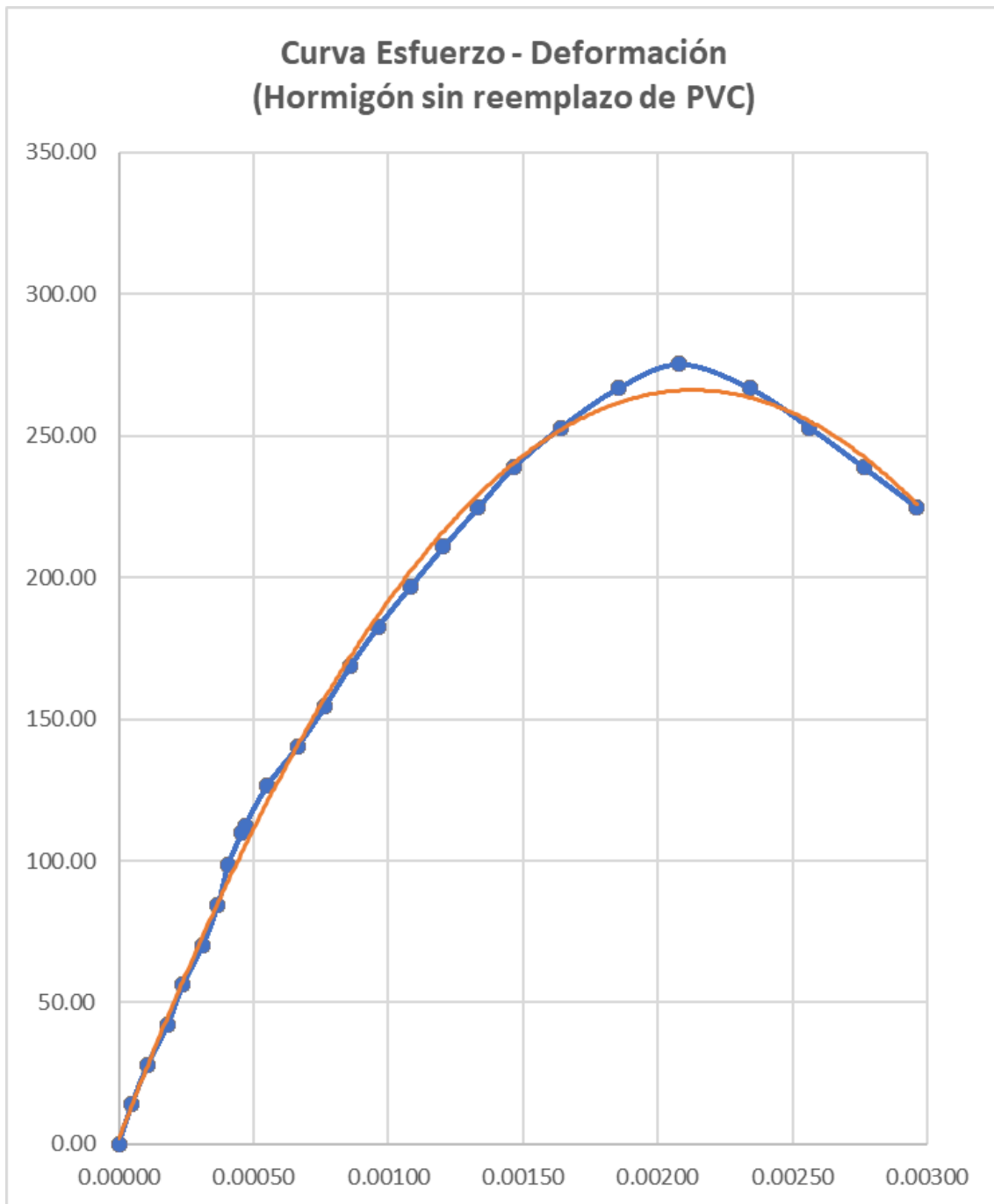
Nota. Elaboración Propia

**Tabla 63. Módulo de elasticidad - Hormigón con PVC al 9% (Muestra 2)**

<b>Altura del equipo</b>	203 mm	<b>N° Muestra</b>	PVC9-2
<b>Diámetro de probeta</b>	150 mm	<b>EG</b>	123.5
<b>Área de probeta</b>	17671 mm <sup>2</sup>	<b>ER</b>	122.1
<b>Carga máxima</b>	501.43 kN	<b>Carga en 40%</b>	200.57 kN
<b>Carga</b>	<b>Deformación</b>	<b>Esf. máx.</b>	<b>Def. unitaria <math>\epsilon</math></b>
<b>kN</b>	<b>mm<sup>-3</sup></b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>	<b>mm/mm</b>
	0	0.00	0.00000
25	13	0.0097	0.00005
50	28	0.0209	0.00010
75	43	0.0321	0.00016
100	59	0.0440	0.00022
125	77	0.0574	0.00028
150	102	0.0761	0.00037
175	115	0.0858	0.00042
200	130	0.0969	0.00048
<b>201</b>	130	0.0971	0.00048
225	139	0.1037	0.00051
250	171	0.1275	0.00063
275	189	0.1409	0.00069
300	205	0.1529	0.00075
325	227	0.1693	0.00083
350	249	0.1857	0.00091
375	267	0.1991	0.00098
400	291	0.2170	0.00107
425	314	0.2342	0.00115
450	341	0.2543	0.00125
475	385	0.2871	0.00141
500	469	0.3497	0.00172
<b>502</b>	518	0.3863	0.00190
500	544	0.4057	0.00200
475	647	0.4825	0.00238
450	705	0.5257	0.00259
425	754	0.5623	0.00277
400	783	0.5839	0.00288
	Carga máx.=	501.43	kN
	0.4 $\sigma$ máx.=	115.74	kg/cm <sup>2</sup>
	$\sigma$ (0.00005)=	15.01	kg/cm <sup>2</sup>
	$\epsilon$ (0.4 $\sigma$ máx.)=	0.00048	mm/mm
	<b>Ec=</b>	<b>235161.9</b>	<b>kg/cm<sup>2</sup></b>
	w=	2.226	T/m <sup>3</sup>
	<b><math>\alpha</math> (alfa)=</b>	<b>13825</b>	
	<b><math>\gamma</math> (gamma)=</b>	<b>4163</b>	

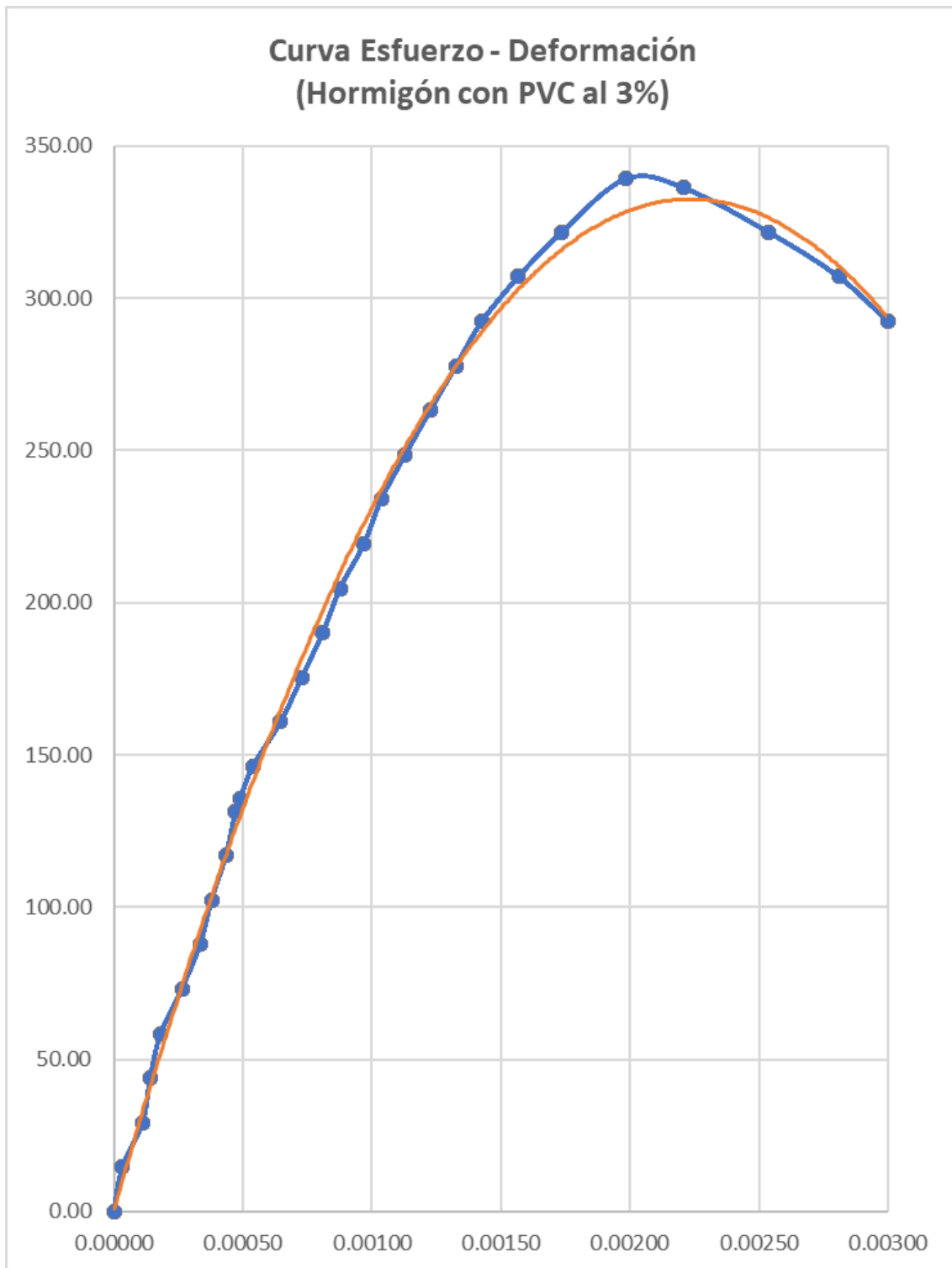
Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 19.** Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón convencional (Muestra 2)



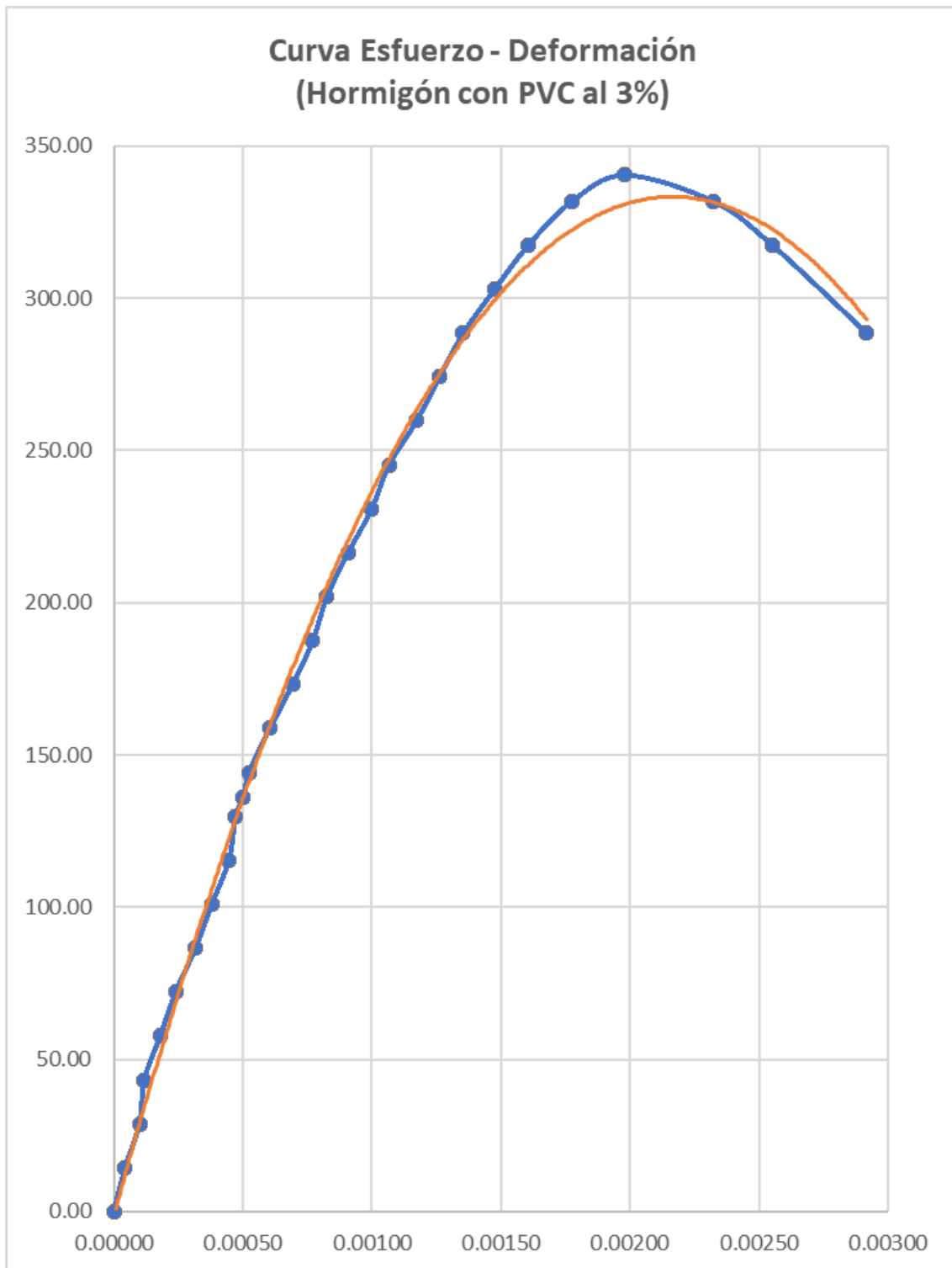
Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 20.** Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 3% (Muestra 1)



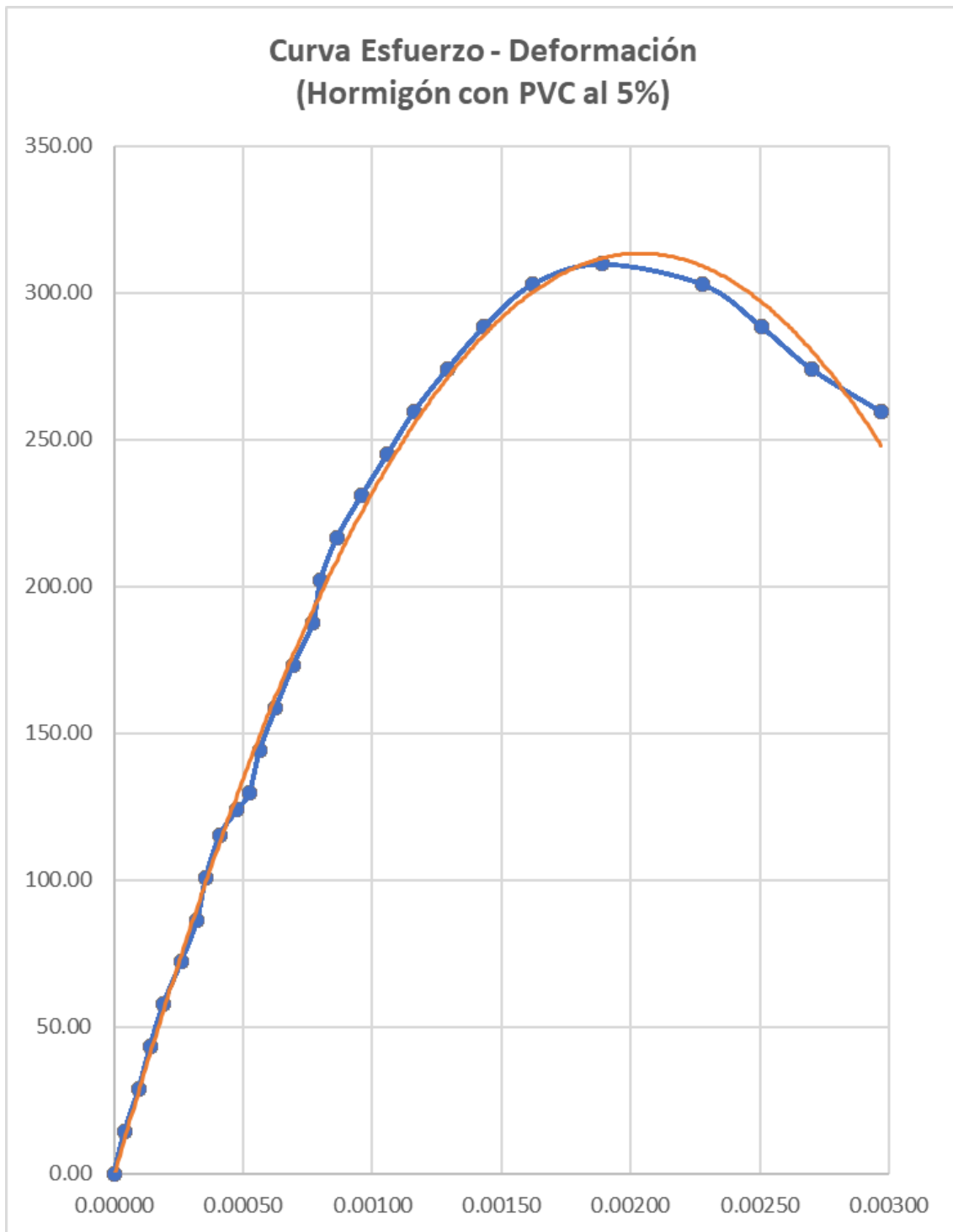
Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 21.** Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 3% (Muestra 2)



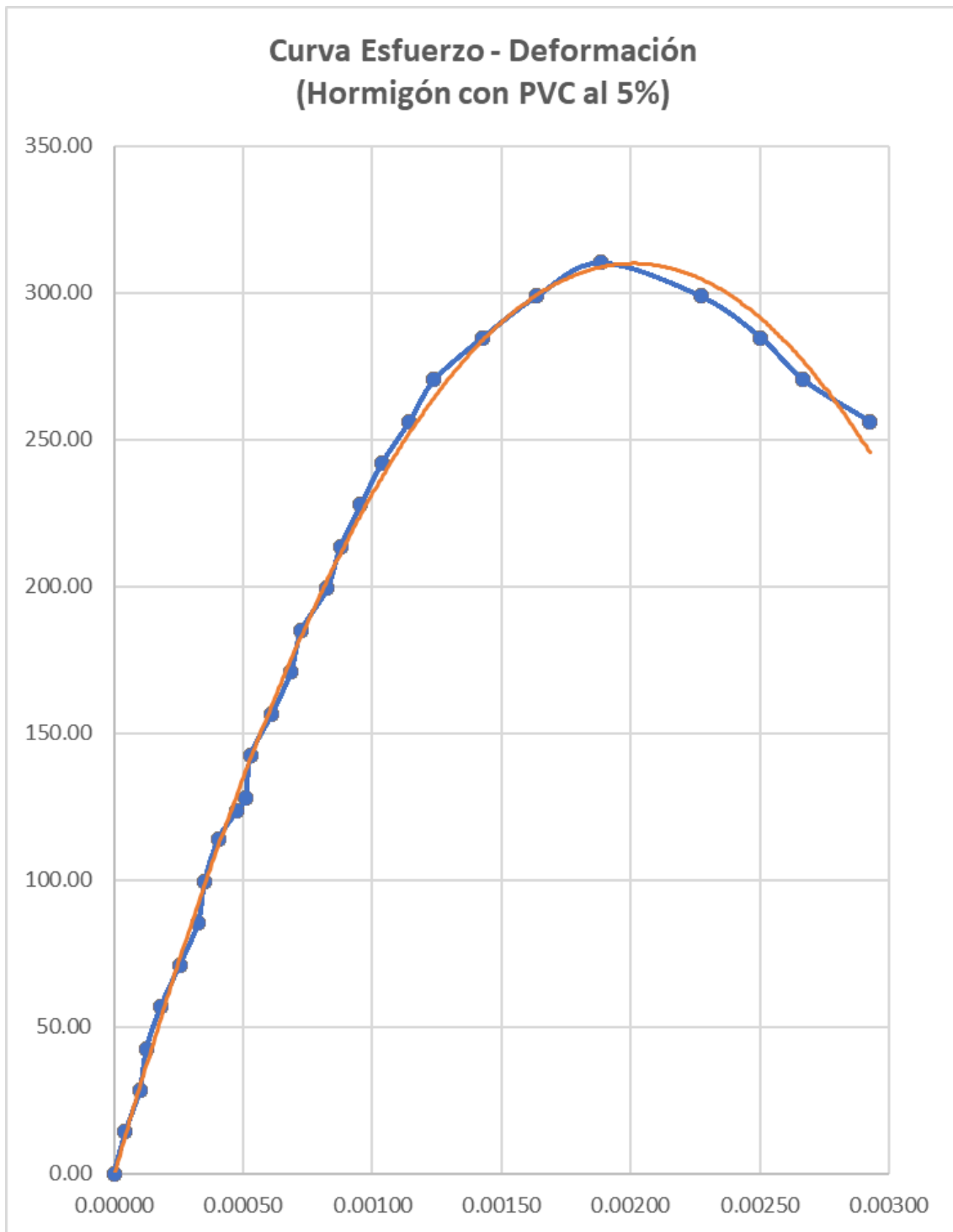
Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 22.** Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 5% (Muestra 1)



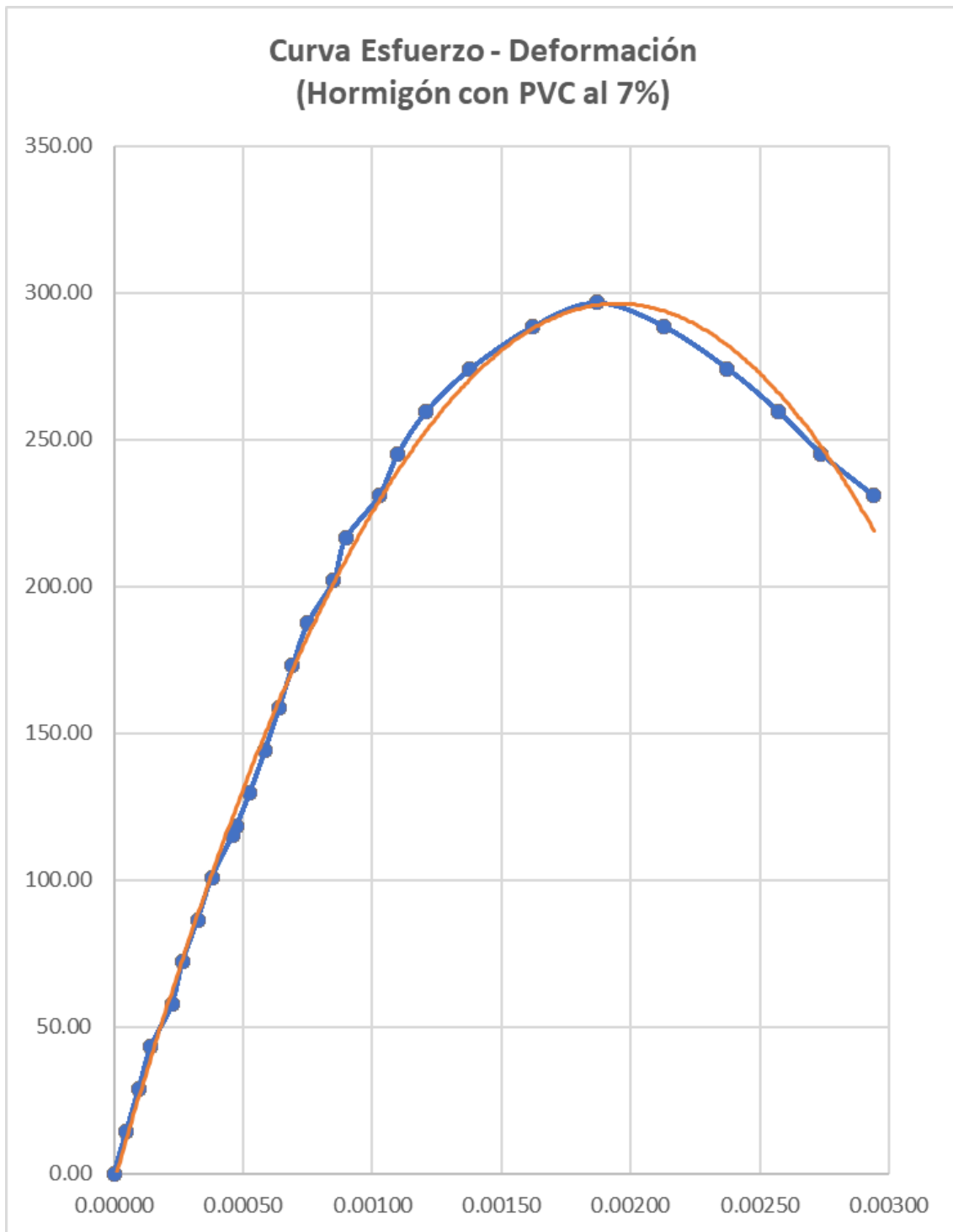
Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 23.** Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 5% (Muestra 2)



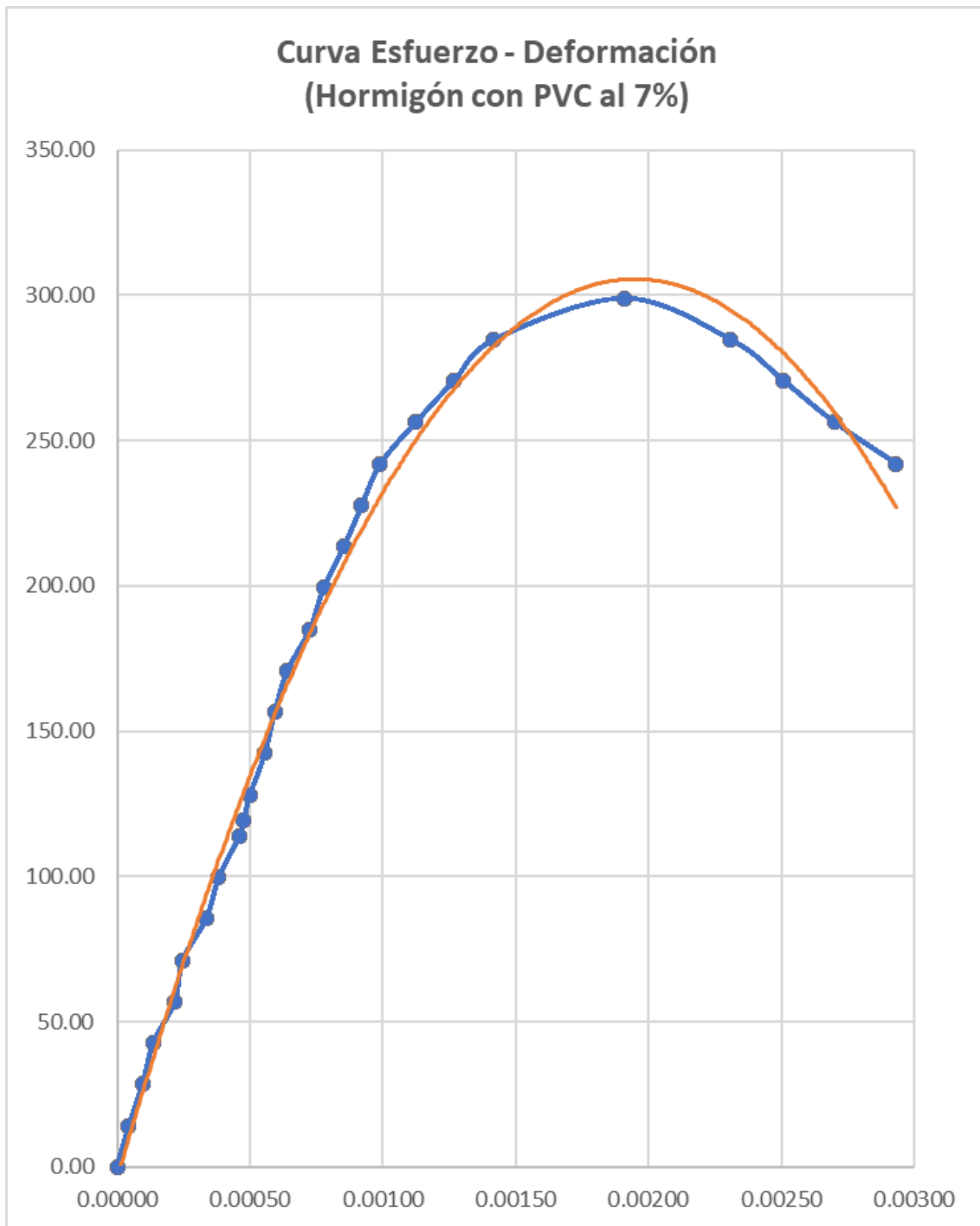
Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 24.** Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 7% (Muestra 1)



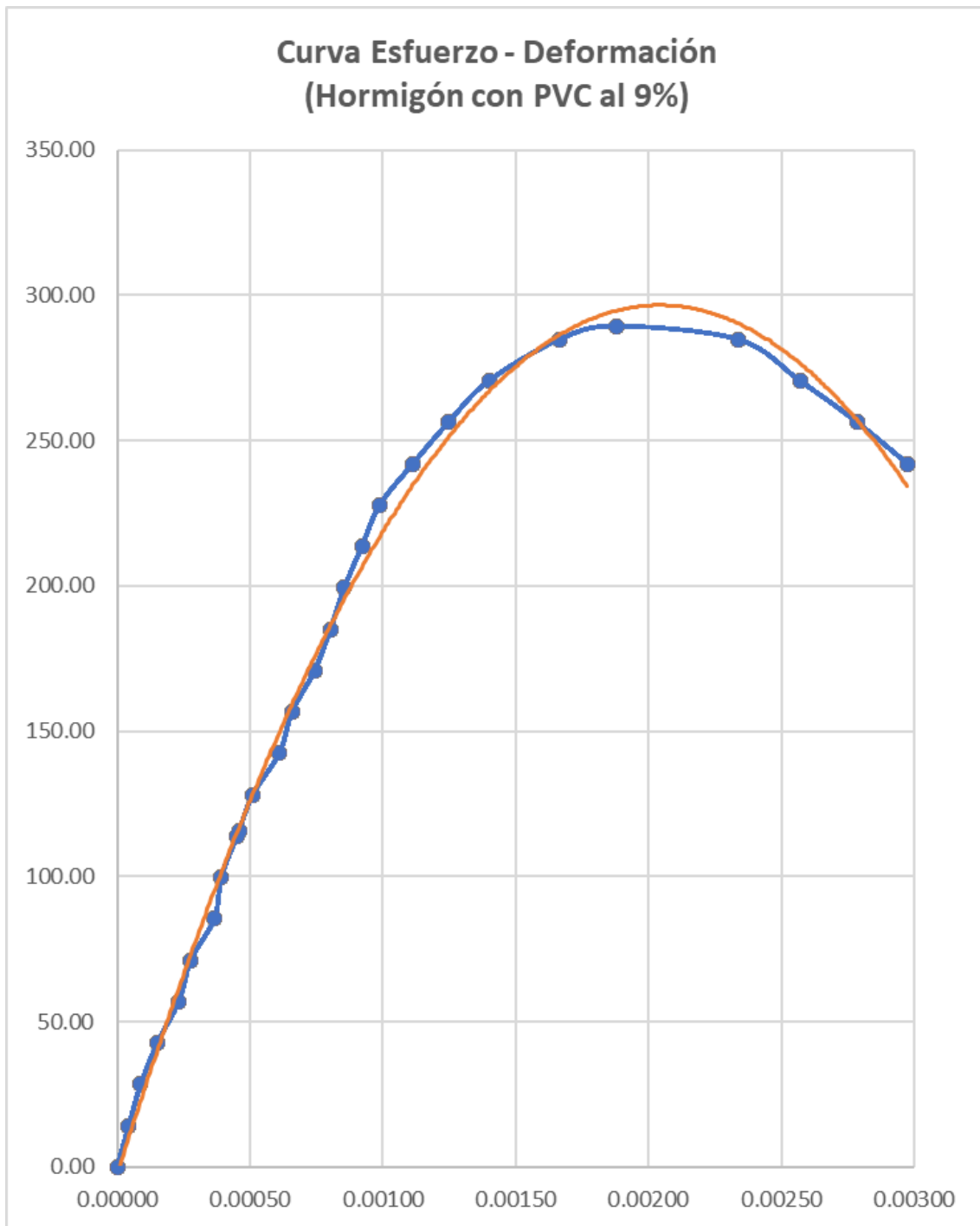
Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 25.** Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 7% (Muestra 2)



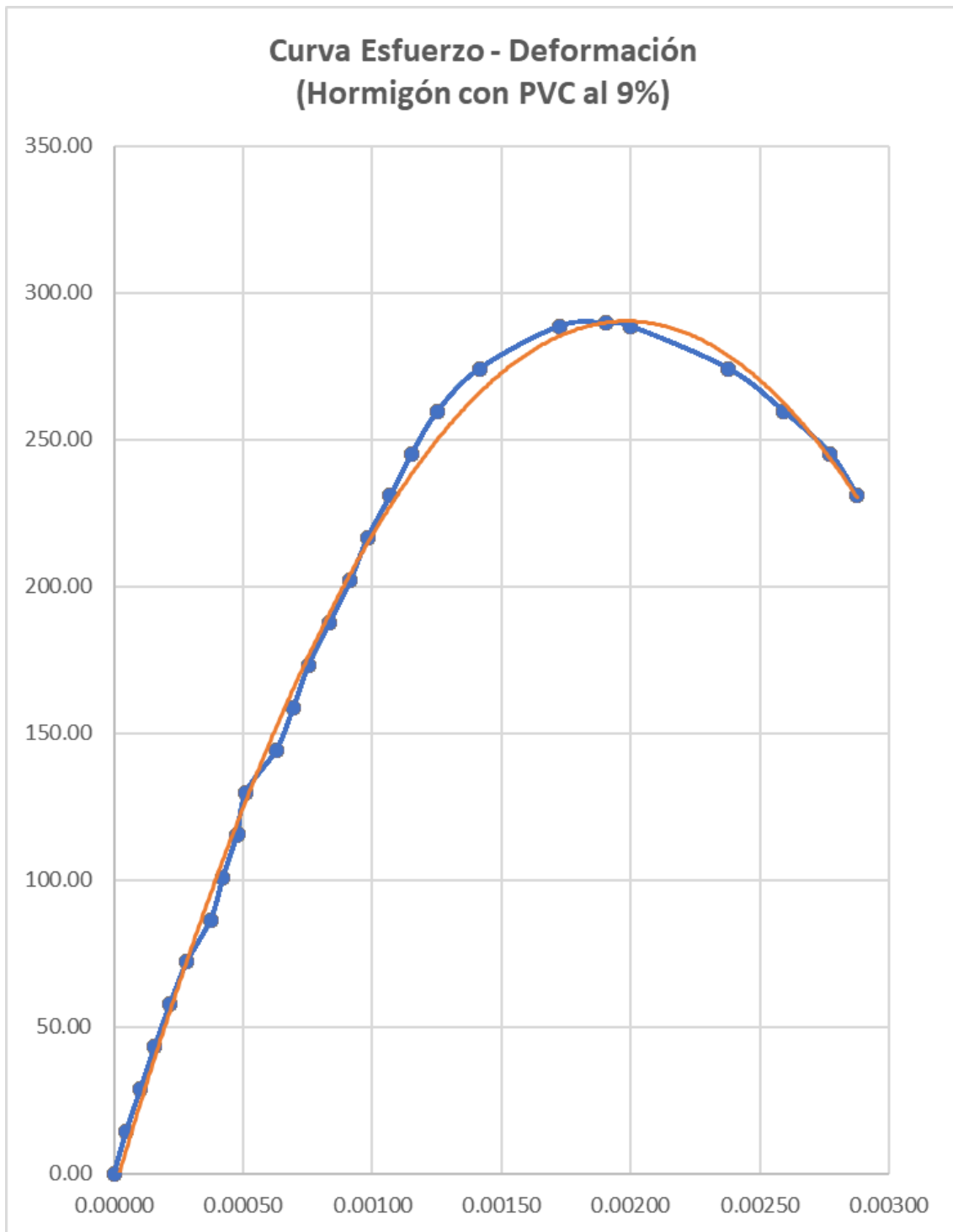
Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 26.** Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 9% (Muestra 1)



Nota. Elaboración Propia

**Gráfico 27.** Curva Módulo de Elasticidad - Hormigón con PVC al 9% (Muestra 2)



Nota. Elaboración Propia

- Tablas de resistencia a la compresión y flexión



ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES  
HOJA DE CAMPO:  
DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN PROBETAS CILÍNDRICAS DE HORMIGÓN -  
Superficies de Carga Pulidas o Sin Refrentar

ORDEN DE TRABAJO N°:							
Próbeta N°							
Identificación	1	2	3	4	5	6	
Descripción	0%	0%	0%	0%	0%	0%	
Resistencia de diseño esperada a los 28 días MPa <input type="checkbox"/> Kg/cm <sup>2</sup> <input checked="" type="checkbox"/>	240	240	240	240	240	240	
Fecha de fabricación (día/mes/año)	06/01/22	"	"	"	"	"	
Fecha de ensayo (día/mes/año)	03/02/22	"	"	"	"	"	
Desviación de la Superficie de Carga (mm)							
Desviación al eje Transversal de la probeta(mm/100mm)							
Desviación al eje Longitudinal de la probeta(mm/100mm)							
Diámetro 1 (mm)	151	151	151	151	151	151	
Diámetro 2 (mm)	151	151	151	150	151	151	
Altura 1 (mm)	304	302	301	300	301	301	
Altura 2 (mm)	303	303	301	301	300	300	
Altura 3 (mm)	303	302	300	301	301	300	
Masa (Kg)	12,331	12,242	12,280	12,210	12,410	12,318	
Hora de ensayo (hh:mm)	12:30pm	12:30pm	12:35pm	12:40	12:45	12:50	
Carga máxima (KN)	448790	43306	449170	459780	458440	462213	
Tipo de falla	V	V	II	II	V	II	

OBSERVACIONES

FIRMAS RESPONSABLES DE FISCALIZACIÓN DE ENSAYOS		
FECHA	NOMBRE Y APELLIDO	FIRMA

FIRMAS DE RESPONSABILIDAD							
PREPARA							
ENSAYA							
INFORME							





**ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES**  
**HOJA DE CAMPO:**  
**DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN PROBETAS CILÍNDRICAS DE HORMIGÓN -**  
**Superficies de Carga Pulidas o Sin Refrentar**

ORDEN DE TRABAJO N°: \_\_\_\_\_

Probeta N°									
Identificación	1	2	3	4	5	6			
Descripción	5%	5%	5%	5%	5%	5%			
Resistencia de diseño esperada a los 28 días MPa <input type="checkbox"/> Kg/cm2 <input checked="" type="checkbox"/>	240	"	"	"	"	"			
Fecha de fabricación (día/mes/año)	06/01/2022	"	"	"	"	"			
Fecha de ensayo (día/mes/año)	03/02/2022	"	"	"	"	"			
Desviación de la Superficie de Carga (mm)									
Desviación al eje Transversal de la probeta (mm/100mm)									
Desviación al eje Longitudinal de la probeta (mm/100mm)									
Diámetro 1 (mm)	150	151	151	151	151	152			
Diámetro 2 (mm)	151	151	152	152	152	151			
Altura 1 (mm)	300	300	299	301	301	301			
Altura 2 (mm)	300	300	300	301	300	300			
Altura 3 (mm)	301	302	300	300	300	301			
Masa (Kg)	12,126	12,185	12,063	12,212	12,066	12,204			
Hora de ensayo (hh:mm)	2:00 pm	2:05 pm	2:10 pm	2:15 pm	2:20 pm	2:25 pm			
Carga máxima (KN)	512 410	536 510	571 700	575 420	546 160	587 340			
Tipo de falla	V	IV	IV	IV	V	IV			

FIRMAS DE RESPONSABILIDAD

PREPARA									
ENSAYA									
INFORME									

OBSERVACIONES

FIRMAS RESPONSABLES DE FISCALIZACIÓN DE ENSAYOS		
FECHA	NOMBRE Y APELLIDO	FIRMA



ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES  
 HOJA DE CAMPO:  
 DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN PROBETAS CILÍNDRICAS DE HORMIGÓN -  
 Superficies de Carga Pulidas o Sin Refrentar

ORDEN DE TRABAJO N°:

Probeta N°									
Identificación	1	2	3	4	5	6			
Descripción	7%	7%	7%	7%	7%	7%			
Resistencia de diseño esperada a los 28 días MPa <input type="checkbox"/> Kg/cm2 <input checked="" type="checkbox"/>	240	"	"	"	"	"			
Fecha de fabricación (día/mes/año)	06/01/22	"	"	"	"	"			
Fecha de ensayo (día/mes/año)	03/02/22	"	"	"	"	"			
Desviación de la Superficie de Carga (mm)									
Desviación al eje Transversal de la probeta(mm/100mm)									
Desviación al eje Longitudinal de la probeta(mm/100mm)									
Diámetro 1 (mm)	152	151	152	152	151	151			
Diámetro 2 (mm)	151	151	152	151	152	151			
Altura 1 (mm)	300	304	300	303	300	300			
Altura 2 (mm)	301	303	300	302	300	300			
Altura 3 (mm)	301	304	300	303	301	301			
Masa (Kg)	12,100	12,425	12,104	12,211	12,108	12,074			
Hora de ensayo (hh:mm)	2:30 p.m.	2:35 p.m.	2:40 p.m.	2:45 p.m.	2:50 p.m.	2:55 p.m.			
Carga máxima (KN)	513 040	530 130	542 370	571 150	572 030	586 940			
Tipo de falla	II	II	II	II	II	II			

OBSERVACIONES

FIRMAS RESPONSABLES DE FISCALIZACIÓN DE ENSAYOS		
FECHA	NOMBRE Y APELLIDO	FIRMA

FIRMAS DE RESPONSABILIDAD

PREPARA									
ENSAYA									
INFORME									



ÁREA DE RESISTENCIA DE MATERIALES  
 HOJA DE CAMPO:  
 DETERMINACIÓN DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN PROBETAS CILÍNDRICAS DE HORMIGÓN -  
 Superficies de Carga Pulidas o Sin Refrentar

ORDEN DE TRABAJO N°:

Próbeta N°									
Identificación	1	2	3	4	5	6			
Descripción	9%	9%	9%	9%	9%	9%			
Resistencia de diseño esperada a los 28 días MPa <input type="checkbox"/> Kg/cm2 <input checked="" type="checkbox"/>	240	"	"	"	"	"			
Fecha de fabricación (día/mes/año)	06/01/22	"	"	"	"	"			
Fecha de ensayo (día/mes/año)	03/02/22	"	"	"	"	"			
Desviación de la Superficie de Carga (mm)									
Desviación al eje Transversal de la probeta(mm/100mm)									
Desviación al eje Longitudinal de la probeta(mm/100mm)									
Diámetro 1 (mm)	151	151	151	151	151	151			
Diámetro 2 (mm)	150	151	152	151	152	150			
Altura 1 (mm)	301	301	301	302	301	301			
Altura 2 (mm)	300	301	300	301	300	300			
Altura 3 (mm)	301	300	300	301	301	301			
Masa (Kg)	12.120	12.278	12.173	12.252	12.090	12.117			
Hora de ensayo (hh:mm)	3:00 pm	3:05 pm	3:10 pm	3:15 pm	3:20 pm	3:25 pm			
Carga máxima (KN)	508.140	513.650	529.180	541.170	552.870	579.110			
Tipo de falla	II	V	V	V	V	V			

OBSERVACIONES

FIRMAS RESPONSABLES DE FISCALIZACIÓN DE ENSAYOS		
FECHA	NOMBRE Y APELLIDO	FIRMA

FIRMAS DE RESPONSABILIDAD

PREPARA									
ENSAYA									
INFORME									



TOPOGRAFÍA - GEOLOGÍA - GEOTECNIA - GEOFÍSICA  
LABORATORIO DE SUELOS, HORMIGONES Y ASFALTOS

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS

N° de orden \_\_\_\_\_

Muestra N°	1	2	3	4								
Fecha de fabricación	06/01/22	"	"	"								
Fecha de Ensayo	03/02/22	"	"	"								
Identificación	0%	0%	0%	0%								
Longitud (mm)	542	541	537	541								
Ancho (mm)	150	150	150	152								
Altura (mm)	152	151	151	151								
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450	450								
Masa (gr)	27987	27647	27745	28012								
Carga Máxima (N)	30020	30490	30790	31230								



RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS

N° de orden \_\_\_\_\_

Muestra N°	1	2	3	4								
Fecha de fabricación	06/01/22	"	"	"								
Fecha de Ensayo	03/02/22	"	"	"								
Identificación	3%	3%	3%	3%								
Longitud (mm)	542	540	538	537								
Ancho (mm)	150	150	151	152								
Altura (mm)	150	150	152	151								
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450	450								
Masa (gr)	27742	27607	27961	28104								
Carga Máxima (N)	32430	31070	32070	34130								



N° de orden \_\_\_\_\_

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS

Muestra N°	1	2	3	4								
Fecha de fabricación	06/01/22	"	"	"								
Fecha de Ensayo	03/02/22	"	"	"								
Identificación	57.	57.	57.	57.								
Longitud (mm)	543	550	538	542								
Ancho (mm)	157	150	152	156								
Altura (mm)	154	152	152	148								
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450	450								
Masa (gr)	27486	27367	27367	27422								
Carga Máxima (N)	31230	31330	33890	32370								



RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS

N° de orden \_\_\_\_\_

Muestra N°	1	2	3	4								
Fecha de fabricación	06/01/22	"	"	"								
Fecha de Ensayo	03/02/22	"	"	"								
Identificación	7%	7%	7%	7%								
Longitud (mm)	543	544	543	542								
Ancho (mm)	153	152	151	151								
Altura (mm)	151	150	153	151								
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450	450								
Masa (gr)	27408	27302	27637	27196								
Carga Máxima (N)	33680	31040	32390	28460								



N° de orden \_\_\_\_\_

RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DE VIGAS

Muestra N°	1	2	3	4								
Fecha de fabricación	06/01/22	"	"	"								
Fecha de Ensayo	02/02/22	"	"	"								
Identificación	9%	9%	9%	9%								
Longitud (mm)	541	543	541	541								
Ancho (mm)	152	151	150	151								
Altura (mm)	151	151	151	150								
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450	450								
Masa (gr)	27607	27351	27578	27341								
Carga Máxima (N)	28880	32040	30310	29140								

- Panel Fotográfico



Recolección de agregados en la Mina “La Chimba” en Olmedo - Cayambe



Recolección de tubería de PVC desechado en obras civiles



Trituración de PVC reciclado y recolección en la planta trituradora



Caracterización de los agregados - Granulometría agregado grueso



Caracterización de los agregados - Granulometría agregado grueso



Caracterización de los agregados - Granulometría agregado fino



Caracterización de los agregados - Granulometría agregado fino



Caracterización de los agregados - Gravedad específica agregado grueso



Caracterización de los agregados - Gravedad específica agregado fino



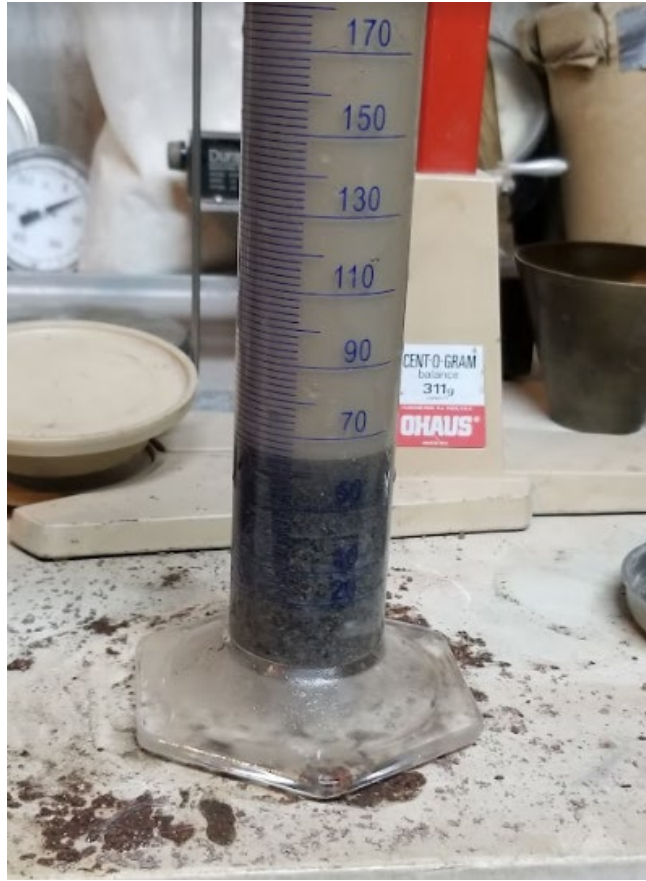
Caracterización de los agregados - Gravedad específica agregado fino



Caracterización de los agregados - Gravedad específica agregado fino



Caracterización de los agregados - Gravedad específica agregado fino



Caracterización de los agregados - Equivalente de arena



Dosificación de materiales para la elaboración de mezcla de hormigón



Elaboración de la mezcla en campo



Elaboración de la mezcla en campo



Elaboración de la mezcla en campo



Elaboración de la mezcla en campo



Toma de temperatura en el hormigón



Medición de asentamiento



Medición de asentamiento



Elaboración de la mezcla en campo



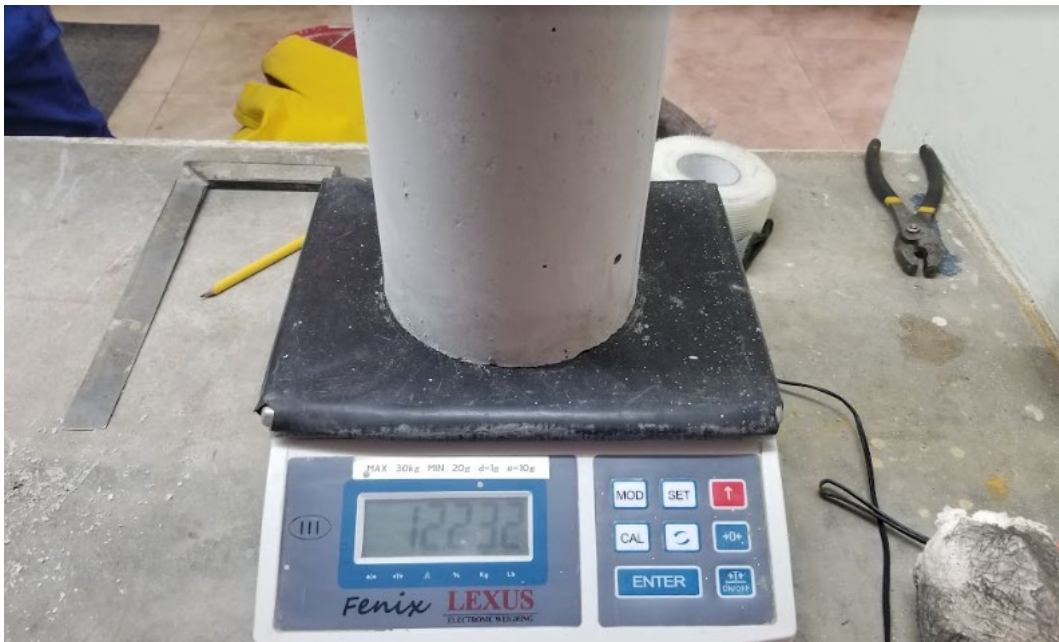
Elaboración de las muestras



Toma de pesos del hormigón fresco



Curado de muestras



Toma de pesos de hormigón endurecido



Ensayos a compresión de cilindros



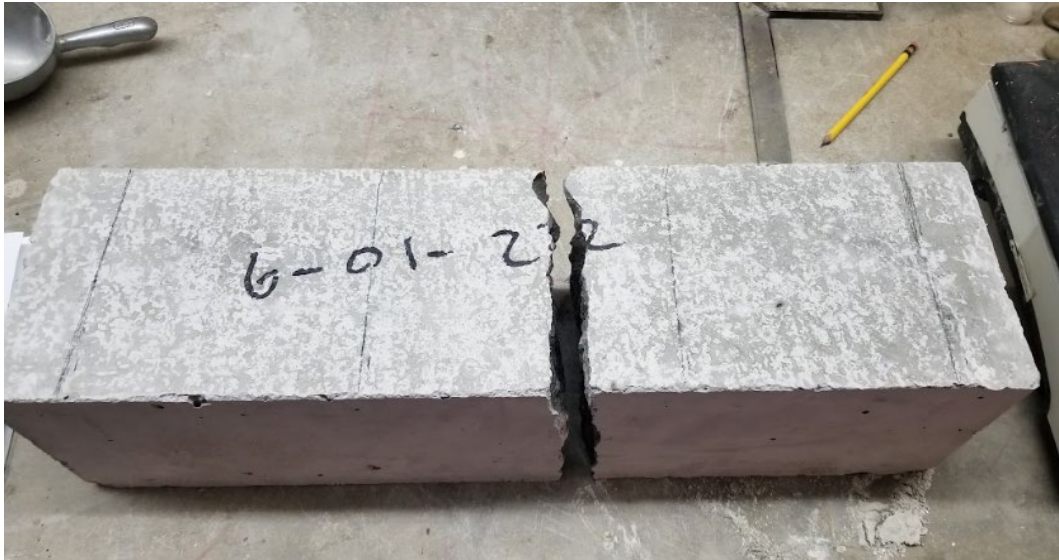
Falla en cilindro de hormigón



Falla en cilindro de hormigón con PVC



Ensayo a flexión de viguetas



Falla en viga de hormigón



Falla en viga de hormigón con PVC