



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR FACULTAD DE
INGENIERÍA CIVIL**

TRABAJO DE TITULACIÓN

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:

**MAGÍSTER EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN ESTRUCTURAS
SISMORRESISTENTES**

TEMA:

**DETERMINACIÓN DE LA ECUACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD PARA
HORMIGÓN DE RESISTENCIA $F'C = 210 \text{ KG/CM}^2$, ELABORADO CON MATERIAL
GRANULAR DE LA MINA "HOLCIM" UBICADA EN EL CANTÓN QUITO,
MATERIAL RECICLADO DE ADOQUÍN Y CEMENTO SELVA ALEGRE.**

AUTOR:

LEONARDO ALEJANDRO VIVAR LOAIZA

TUTOR:

WILSON OSWALDO CANDO TIPÁN

QUITO, 25 DE SEPTIEMBRE 2024

I. Contenido

CAPITULO I	10
1.1. JUSTIFICACIÓN	10
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
1.3. Objetivos	11
1.3.1. Objetivo general:	11
1.3.2. Objetivos específicos:	11
1.4. Alcance	12
1.5. Marco Teórico	12
1.5.1. Parroquia Pifo	12
1.5.1.1. Geología	12
1.6. Marco Conceptual	15
1.6.1. El hormigón simple	15
1.6.2. Pasta de cemento	16
1.6.2.1. Tipos de cemento	16
1.6.3. Módulo de elasticidad	17
1.6.3.1. Factores que afectan al módulo de elasticidad del concreto	19
1.6.3.2. Resistencia a la compresión simple	20
1.6.3.3. Ensayo para determinar el módulo de elasticidad	21
1.6.3.4. Fórmulas normativas para el cálculo del módulo de elasticidad	24
CAPITULO II	26
2.1. Ensayos de los agregados	26
2.1.1. Muestreo y cuarteo de agregados	26
2.1.2. Granulometría de agregados	26
2.1.2.1. Granulometría de agregados finos	26

2.1.2.2.	Granulometría de agregados gruesos.....	27
2.1.3.	Gravedad Específica y Porcentaje de Absorción.....	28
2.1.4.	Peso Unitario Suelto y Compactado	30
2.1.5.	Contenido de Humedad	31
2.1.6.	Terrones de Arcilla	31
2.1.7.	Desgaste por abrasión.....	33
2.2.	Ensayos del material reciclado para adoquín.....	34
2.2.1.	Granulometría de agregados finos (Reciclado de Adoquín).....	34
2.2.2.	Gravedad Específica y Porcentaje de Absorción (Reciclado de Adoquín).....	35
2.2.3.	Contenido de Humedad (Reciclado de Adoquín)	35

CAPITULO III37

3.1.	Asentamiento esperado.....	38
3.2.	Tamaño máximo nominal del agregado grueso.....	38
3.3.	Estimación del agua de mezclado e inclusión de aire.....	39
3.4.	Relación agua/cemento (A/C).....	40
3.5.	Contenido de agregado grueso.....	41
3.6.	Contenido de agregado fino	43
3.7.	Ajuste en el contenido de humedad por variaciones en los agregados.....	43
3.7.1.	Ajuste en el contenido de humedad por asentamiento.....	44
3.7.2.	Ajuste en el contenido de humedad por inclusión de aire	44
3.7.3.	Ajuste en el contenido de humedad por resistencia y relación agua cemento.	
	45	
3.8.	Diseño de mezcla para hormigón de 210kg/cm ²	45
3.9.	Resumen diseño de mezcla para hormigón de 210kg/cm ²	53
3.10.	Determinación de las propiedades del hormigón fresco y corrección de la dosificación	53
3.10.1.	Peso unitario y contenido de aire en una mezcla de hormigón fresco	53

3.10.2.	Asentamiento de la mezcla	54
3.10.3.	Modificaciones ejecutadas en la mezcla	55
3.11.	Dosificación de la mezcla incluyendo el reciclado de adoquín.	62
3.12.	Ensayos de hormigón fresco	64
3.12.1.	Asentamiento	65
3.12.2.	Contenido de Aire.....	65
3.12.3.	Temperatura del hormigón fresco	66
CAPITULO IV.....		67
4.1.	Determinación de la resistencia característica del concreto.....	67
4.1.1.	Método del factor de aproximación	70
4.1.2.	Método de la aproximación alternativa	73
4.1.3.	Método de José Corral.....	75
4.1.4.	Resistencia característica de concreto con 2% de adoquín reciclado.....	76
4.1.4.1.	Método del factor de aproximación	76
4.1.4.2.	Método de la aproximación alternativa	77
4.1.5.	Método de José Corral.....	77
4.1.6.	Resistencia característica de concreto con 3% de adoquín reciclado.....	78
4.1.6.1.	Método del factor de aproximación	78
4.1.6.2.	Método de la aproximación alternativa	79
4.1.7.	Método de José Corral.....	79
4.1.8.	Resistencia característica de concreto con 5% de adoquín reciclado.....	80
4.1.8.1.	Método del factor de aproximación	80
4.1.8.2.	Método de la aproximación alternativa	81

4.1.9. Método de José Corral.....	81
4.2. Determinación del módulo de elasticidad del hormigón con inclusión de adoquín reciclado.	82
4.2.1. Determinación experimental por medio de la normativa (ASTM C 469/C469M-22, 2022).....	82
4.2.2. Determinación teórica del módulo de elasticidad del concreto con inclusión de adoquín reciclado	98
4.3. Determinación de la ecuación del módulo de elasticidad	102
4.3.1. Distribución t-student y Distribución Normal.....	102
CAPITULO V	111
1.1. CONCLUSIONES.....	111
1.2. RECOMENDACIONES.....	112
6. Referencias Bibliográficas	113
II. Índice de Tablas	
Tabla 1. <i>Resultados de gravedad específica y absorción de agregado fino y grueso</i>	29
Tabla 2. <i>Resultados de pesos unitarios de agregado fino y grueso</i>	30
Tabla 3. <i>Resultados de contenido de humedad total de agregado fino y grueso</i>	31
Tabla 4. <i>Resultados de porcentaje de arcilla en árido fino</i>	32
Tabla 5. <i>Resultados de porcentaje de arcilla en árido grueso</i>	32
Tabla 6. <i>Resultados del ensayo de abrasión en el agregado grueso</i>	33
Tabla 7. <i>Resultados de gravedad específica y absorción del reciclado de adoquín</i>	35
Tabla 8. <i>Resultados de contenido de humedad total de agregado fino (Reciclado de Adoquín)</i> .	36
Tabla 9. <i>Asentamientos comunes en estructuras.</i>	38
Tabla 10. <i>Tamaños máximos nominales</i>	39
Tabla 11. <i>Contenido de agua y aire en mezclas de concreto</i>	39
Tabla 12. <i>Rangos admisibles de resistencia esperada</i>	41
Tabla 13. <i>Valores promedio conservadores de relación agua/cemento</i>	41

Tabla 14. <i>Pies cúbicos de agregado grueso por yarda cúbica de hormigón</i>	42
Tabla 15. <i>Rangos admisibles de resistencia esperada</i>	46
Tabla 16. <i>Resumen de material requerido para el diseño de la mezcla</i>	53
Tabla 17. <i>Rangos de aceptación y desviación estándar para asentamientos</i>	55
Tabla 18. <i>Resumen de material requerido para calibración de la dosificación a emplear</i>	55
Tabla 19. <i>Resistencias obtenidas de probetas de prueba</i>	56
Tabla 20. <i>Resultados peso unitario y contenido de aire</i>	57
Tabla 21. <i>Resumen de material resultando de la mezcla corregida conforme a su peso unitario</i> 62	
Tabla 22. <i>Resultados peso unitario y contenido de aire del ensayo número 2</i>	62
Tabla 23. <i>Cantidad de material requerido para diseño de hormigón 210kg/cm² con 2% de adoquín reciclado</i>	64
Tabla 24. <i>Cantidad de material requerido para diseño de hormigón 210kg/cm² con 3% de adoquín reciclado</i>	64
Tabla 25. <i>Cantidad de material requerido para diseño de hormigón 210kg/cm² con 5% de adoquín reciclado</i>	64
Tabla 26. <i>Asentamientos obtenidos para diseño de hormigón 210kg/cm² con 2%,3%,5% de adoquín reciclado</i>	65
Tabla 27. <i>Peso unitario y contenido de aire para diseño de hormigón 210kg/cm² con 2%,3%,5% de adoquín reciclado</i>	66
Tabla 28. <i>Temperatura para diseño de hormigón 210kg/cm² con 2%,3%,5% de adoquín reciclado</i>	66
Tabla 29. <i>Resistencia de probetas a los 28 días con 2% de adoquín reciclado</i>	68
Tabla 30. <i>Resistencia de probetas a los 28 días con 3% de adoquín reciclado</i>	68
Tabla 31. <i>Resistencia de probetas a los 28 días con 5% de adoquín reciclado</i>	69
Tabla 32. <i>Nivel de confianza de la muestra analizada</i>	71

Tabla 33. <i>Nivel de confianza de la muestra analizada asociada a los factores de corrección de fuerza</i>	72
Tabla 34. <i>Precisión y magnitud de los factores de corrección de fuerzas equivalentes</i>	72
Tabla 35. <i>Factores C</i>	74
Tabla 36. <i>Valores de lambda</i>	75
Tabla 37. <i>Factores omegas para distribución t-student</i>	76
Tabla 38. <i>Estadística descriptiva</i>	77
Tabla 39. <i>Resistencia característica de concreto con 2% de inclusión de adoquín reciclado</i>	78
Tabla 40. <i>Estadística descriptiva</i>	79
Tabla 41. <i>Resistencia característica de concreto con 3% de inclusión de adoquín reciclado</i>	80
Tabla 42. <i>Estadística descriptiva</i>	81
Tabla 43. <i>Estadística descriptiva</i>	82
Tabla 44. <i>Características de la probeta P08</i>	83
Tabla 45. <i>Tabulación Curva esfuerzo – deformación probeta 08</i>	84
Tabla 46. <i>Características de la probeta P09</i>	85
Tabla 47. <i>Tabulación Curva esfuerzo – deformación probeta 09</i>	86
Tabla 48. <i>Módulo de elasticidad experimental de probetas a los 28 días con 2% de adoquín reciclado</i>	88
Tabla 49. <i>Características de la probeta P16</i>	89
Tabla 50. <i>Tabulación Curva esfuerzo – deformación probeta 16</i>	89
Tabla 51. <i>Características de la probeta P17</i>	91
Tabla 52. <i>Tabulación Curva esfuerzo – deformación probeta 17</i>	91
Tabla 53. <i>Módulo de elasticidad experimental de probetas a los 28 días con 3% de adoquín reciclado</i>	93
Tabla 54. <i>Características de la probeta P21</i>	94
Tabla 55. <i>Tabulación Curva esfuerzo – deformación probeta 21</i>	94

Tabla 56. <i>Características de la probeta P22</i>	96
Tabla 57. <i>Tabulación Curva esfuerzo – deformación probeta 22</i>	96
Tabla 58. <i>Módulo de elasticidad experimental de probetas a los 28 días con 5% de adoquín reciclado</i>	98
Tabla 59. <i>Módulo de elasticidad teórico de probetas a los 28 días con 2% de adoquín reciclado</i>	100
Tabla 60. <i>Módulo de elasticidad teórico de probetas a los 28 días con 3% de adoquín reciclado</i>	100
Tabla 61. <i>Módulo de elasticidad teórico de probetas a los 28 días con 5% de adoquín reciclado</i>	101
Tabla 62. <i>Módulo de elasticidad teórico con resistencia característica de concreto con 2%,3% y 5% de adoquín reciclado</i>	102
Tabla 63. <i>Medidas de tendencia central y de variabilidad para módulos de elasticidad con 2% de adoquín reciclado</i>	105
Tabla 64. <i>Módulo de elasticidad teórico de probetas a los 28 días con 2% de adoquín reciclado, con intervalo de confianza del 95%</i>	106
Tabla 65. <i>Medidas de tendencia central y de variabilidad para módulos de elasticidad con 3% de adoquín reciclado</i>	107
Tabla 66. <i>Módulo de elasticidad teórico de probetas a los 28 días con 3% de adoquín reciclado, con intervalo de confianza del 95%</i>	108
Tabla 67. <i>Medidas de tendencia central y de variabilidad para módulos de elasticidad con 5% de adoquín reciclado</i>	108
Tabla 68. <i>Módulo de elasticidad teórico de probetas a los 28 días con 5% de adoquín reciclado, con intervalo de confianza del 95%</i>	109

III. Índice de Figuras

Figura 1. Planta de agregados pétreos de la mina Holcim Pifo - Papallacta.....	13
Figura 2. Estratigrafía y formaciones de las distintas zonas de Pifo.....	14
Figura 3. <i>Tipos de fallas en probetas de concreto</i>	21
Figura 4. <i>Diagrama de desplazamientos</i>	22
Figura 5. <i>Curva granulométrica de agregados finos</i>	27
Figura 6. <i>Curva granulométrica de agregados gruesos</i>	28
Figura 7. <i>Curva granulométrica de agregados finos (Reciclado de Adoquín)</i>	34
Figura 8. <i>Curva resistencia característica vs Porcentaje de Inclusión de Adoquín</i>	63
Figura 9. <i>Curva Esfuerzo-Deformación Probeta P08</i>	84
Figura 10. <i>Curva Esfuerzo-Deformación Probeta P09</i>	87
Figura 11. <i>Curva Esfuerzo-Deformación Probeta P16</i>	90
Figura 12. <i>Curva Esfuerzo-Deformación Probeta P17</i>	92
Figura 13. <i>Curva Esfuerzo-Deformación Probeta P21</i>	95
Figura 14. <i>Curva Esfuerzo-Deformación Probeta P22</i>	97
Figura 15. <i>Distribución normal</i>	103

CAPITULO I

1.1. JUSTIFICACIÓN

Los materiales de construcción se han impulsado en cuanto a su desarrollo con el avance tecnológico y la demanda de la sociedad, teniendo como principal recurso la implementación de insumos naturales. Siendo de importancia, el conservar el medio ambiente mediante el uso de materiales reciclados para el desarrollo de proyectos civiles.

El módulo de elasticidad, permite determinar la rigidez que impondrá un material, al verse expuesto a acciones externas siendo el resultado de la relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante. (Polaridad.es, 2024), permitiendo predecir el comportamiento estructural frente a acciones de servicio. Este precedente, representa el interés que se tiene en investigar los causales de comportamiento y la resistencia del hormigón armado y su relación con su resistencia última a la compresión simple, mediante la inclusión de materiales reciclados.

En el medio, diariamente se pierden materiales de construcción producto del propio proceso industrial, entre estos encontramos: PET, residuos de adoquines, bloques, limallas e incluso el propio concreto estructural producto de demoliciones o de los ensayos que solicita fiscalización. La gestión de estos residuos se ha implementado de distintas formas, entre estas: elaboración de adoquines, bloques y procesamiento de plásticos (Cevallos, 2021); en el presente proyecto se establece como alternativa el insertar los residuos de adoquín triturado como disyuntiva al agregado fino, en porcentajes definidos en base a experimentación en conjunción con agregados provenientes de la mina de “HOLCIM”.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El presente estudio se enfoca en la determinación del módulo de elasticidad para hormigones de 210kg/cm^2 , al incorporar en su mezcla agregados pétreos y material reciclado proveniente de la trituración de adoquín (rechazado o no utilizado), buscando determinar la alternativa más eficiente para la gestión de residuos de construcción.

Citando investigaciones como: (Cevallos, 2021), (Londoño & Wilson, 2019), (Valladares & Jiménez, 2019), se ha determinado que las ecuaciones empleadas para la determinación del módulo de elasticidad en el cálculo estructural, propuestas por normativas Americanas, no satisfacen las condiciones locales de las minas Ecuatorianas; siendo de vital importancia elaborar un análisis detallado de las propiedades de los agregados que permitan establecer formulaciones precisas acorde a las minas encontradas en la provincia de Pichincha, cantón Quito.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general:

Obtener un diseño de hormigón $f^c=210\text{kg/cm}^2$, utilizando material granular de la mina “Holcim” ubicada en el cantón Quito, provincia de Pichincha, cemento Selva Alegre y porcentajes diferentes de material reciclado de adoquín.

1.3.2. Objetivos específicos:

- Definir las propiedades mecánicas de los áridos naturales empleando métodos de ensayo estipulados por la normativa técnica ecuatoriana, para obtener la resistencia propuesta para el hormigón.

- Establecer la dosificación necesaria para la elaboración de probetas cilíndricas de hormigón, con una resistencia especificada de 210kg/cm^2 , incluyendo la integración del material reciclado de adoquín, previamente caracterizado.
- Determinar, conforme las directrices de la NTE-INEN, la ecuación que permita calcular el módulo de elasticidad del hormigón mediante ensayos experimentales.

1.4. Alcance

El presente estudio se limita única y exclusivamente a la región Sierra, catón Quito, provincia de Pichincha, con materiales pétreos provenientes de minas existentes en el sector y para hormigones de resistencia $f'c=210\text{kg/cm}^2$. Se elaborarán una cantidad determinada de cilindros de hormigón dosificados de acuerdo al método ACI 211, los cuales serán sometidos a ensayos de resistencia a la compresión a los 28 días, permitiendo definir la carga máxima a la cual podrá ser sometido el testigo y a partir de ahí establecer su módulo de elasticidad experimental.

Se ha considerado ejecutar un total de 39 cilindros, de los cuales 9 se utilizarán para determinar la resistencia máxima alcanzada por la probeta y los 30 restantes se emplearán para la determinación del módulo de elasticidad.

1.5. Marco Teórico

1.5.1. Parroquia Pifo

1.5.1.1. Geología

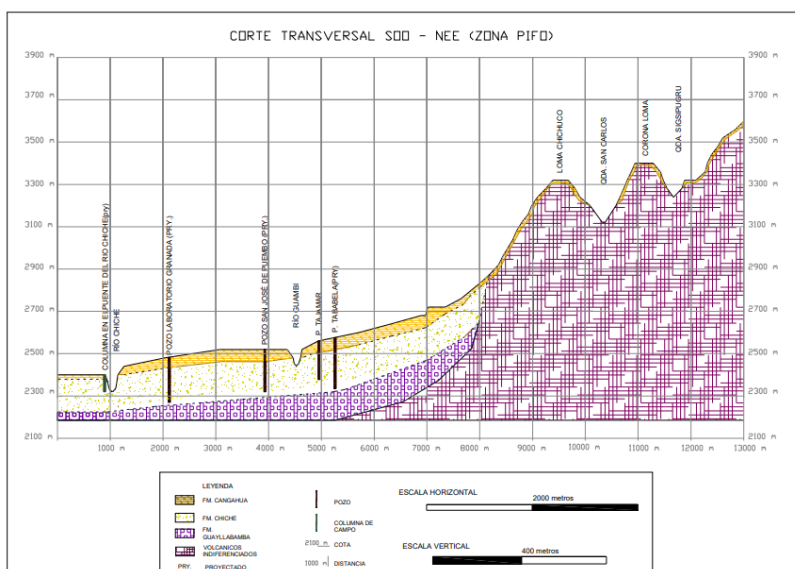
El material pétreo a utilizar, proviene de la mina de Holcim ubicada en el kilómetro 4.50 en la vía Pifo – Papallacta, ver figura 1:

Figura 1. Planta de agregados pétreos de la mina Holcim Pifo - Papallacta



Se encuentra conformada de forma predominante por las estratigrafías del Chiche, especialmente en la región media superficial y se caracteriza por poseer zonas similares a las que se encuentran en el valle interandino, tal es el caso de las formaciones de Cangahua y Guayllabamba. En el perfil que se muestra a continuación, ver figura 2, se halla ubicado a la altura de la parroquia de Pifo con dirección Sur-Oeste, en la cordillera Real, con mayor incidencia de la formación del Chiche para el cual se puede denotar aquellos materiales que mayor intervención tendrán en el presente estudio (Delgado, Hidrogeología y Modelación del Acuífero Pifo-El Quinche, 2008).

Figura 2. Estratigrafía y formaciones de las distintas zonas de Pifo



Tomado de: Hidrogeología y Modelación del Acuífero Pifo – El Quinche (página: 40) por Catalina Susana Delgado Checa, Escuela Politécnica Nacional (Delgado, Hidrogeología y Modelación del Acuífero Pifo - El Quinche, 2008).

La constitución del Chiche se reparte de cuatro miembros o componentes de ambientes volcánicos y fluvio-lacustres, siendo estos: Mb-Fluvio-Lacustre I, Mb. Lahar, Mb. Fluvio-Lacustre II y Mb. Chiche s.s. Las fuentes litológicas tipo I y II son similares, cuyas componentes van de arena fina a gruesa intercalándose con distintos niveles de ceniza volcánica. Los miembros de tipo lahar forman el 60% de la matriz; mientras que un 40% corresponden a clastos. El miembro Chiche S.S posee una composición variada entre conglomerados, tobas, arenas finas a medias y flujos piroclásticos (Delgado, Hidrogeología y Modelación del Acuífero Pifo - El Quinche, 2008).

1.6. Marco Conceptual

1.6.1. El hormigón simple

Es considerado como una piedra artificial, constituida en esencia por cemento, agregados finos, gruesos y agua; en ciertos proyectos se aplican aditivos sean acelerantes, retardantes, plastificantes, permitiendo que la mezcla consiga su resistencia máxima en edades tempranas, mejorando su trabajabilidad o ayudando a que tenga un mejor comportamiento frente agentes nocivos. Adicionalmente, debido a su reducida capacidad de resistir fuerzas de tracción, se ha implementado fibras plásticas (Romo, 2008).

Sus propiedades se ven afectadas por la calidad y composición en masa de sus componentes durante el proceso de elaboración, siendo necesario contar con una correcta caracterización del material a emplear para conseguir resultados óptimos. A lo largo de los años, este ha ganado cabida dentro del campo de la construcción por su gran capacidad de adaptación a distintos ambientes sumado a la variabilidad de moldes por su consistencia plástica en estado fresco. La estructura interna de la masa de concreto, caracterizada por que los agregados más finos ingresan en los intersticios de la mezcla (entre los agregados gruesos); mientras que, la pasta de cemento envuelve a los áridos en su totalidad, permitiendo que trabajen en conjunto una vez fraguada la mezcla y conformados los cristales cohesivos (Romo, 2008).

Las características fundamentales del hormigón simple y que dependen de una adecuada dosificación son:

- Resistencia: Depende exclusivamente de las fuerzas de atracción de Van Der Waals producto de los hidratos sulfo-aluminato cálcico y el hexagonal aluminato cálcico, como también la cantidad de poros generados al finalizar el proceso de fraguado, generalmente

una relación agua/cemento de 0.38 permite alcanzar niveles de porosidad mínimos (Garcia, 2004).

- Durabilidad: Caracterizada fundamentalmente por el grado de impermeabilidad del concreto, producto de una correcta selección de los agregados y la porosidad final de la mezcla que se encuentra condicionado por el grado de hidratación y el espacio capilar original (Garcia, 2004).

1.6.2. Pasta de cemento

De acuerdo a (Powers & Brownyard, 1946), la pasta de cemento al ser sometida a un proceso de hidratación, conforma un compuesto de cemento sin reaccionar, agua y poros capilares; su constitución da lugar a los denominados “productos hidratados” los cuales son considerados de manera conjunta. (Brunauer y otros, 1954), amplió este concepto a un gel cristalizado conformado por: porosidad inherente, amplia superficie específica y láminas. Siendo este modelo el acápite en cuanto al comportamiento del cemento y su bajo nivel de hidratación, para relaciones agua/cemento por debajo de 0.25, provocando que su trabajabilidad se deteriore y afecte directamente a la resistencia final.

1.6.2.1. Tipos de cemento

La Norma Técnica Ecuatoriana establece dos tipos de clasificaciones para el cemento. La (INEN & 490, Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 490:Cementos Hidraulicos Compuestos: Requisitos, 2011) los clasifica en base a los porcentajes de cemento portland y cemento de escoria existentes en su composición de acuerdo a la siguiente nomenclatura:

- Cemento portland conformado por escoria y a partir de altos hornos. (IS)
- Cemento portland puzolánico. (IP)

- Cemento compuesto ternario. (IT)

Por otro lado, la normativa (INEN & 2380, Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380:

Cemento Hidráulico. Requisitos de Desempeño para Cementos Hidráulicos, 2011), los clasifica de acuerdo al tipo de uso en el campo de la construcción y los agentes externos a los cuales se verá expuesta la obra:

- Construcción general. (GU)
- Requerimiento de alta resistencia inicial. (HE)
- Resistencia moderada a los sulfatos. (MS)
- Resistencia alta a los sulfatos. (HS)
- Calor de hidratación moderado. (MH)
- Calor de hidratación bajo. (LH)

El presente estudio se centra en la aplicación de los resultados en construcciones de uso general, para lo cual se empleará cemento Selva Alegre tipo IP que se caracteriza por poseer un fraguado inicial a los 140 minutos, expansión del 0.04% y contenido de aire de 4.50% (UNACEM Ecuador S.A, 2024).

1.6.3. Módulo de elasticidad

El alcance del presente trabajo de titulación, se encuentra enfocado al estudio del módulo de elasticidad estático del concreto, para lo cual la terminología de estudio se enfocará en dicha temática.

Este se determina a través de la prueba estándar de compresión simple establecida de acuerdo a los requerimientos de la normativa “ASTM C469”, con especímenes de 15cm de diámetro y 30cm de altura, sometidos a una carga axial incremental hasta conseguir un plano de ruptura. En

todo el proceso se determinan las deformaciones transversales y longitudinales. Este parámetro permite analizar la rigidez relativa de un material, de acuerdo a la pendiente de la región elástica de la curva esfuerzo/deformación (Serrano & Pérez, 2010).

(Duboeuf y otros, 2007) indica que, en un medio isotrópico sometido a una carga axial, el módulo de elasticidad guarda proporción entre las deformaciones producidas y los esfuerzos generados en el medio para lo cual se emplea la siguiente expresión en su cálculo:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{\Delta L}{L_0}} = \frac{FL_0}{A\Delta L}$$

Dónde:

- E: Módulo de elasticidad
- F: Fuerza axial aplicada
- A: Área de aplicación de la fuerza.
- ΔL : Variación de la longitud del elemento
- L_0 : Longitud inicial

El comportamiento que sufre cada testigo o elemento de concreto en general, va a depender de la compatibilidad de deformaciones que sufre la fase de transición entre agregados y los cristales que conforma la pasta de cemento; para lo cual, la influencia del agregado grueso es significativa, cuya sensibilidad provoca cambios importantes en las ecuaciones existentes en el medio para su determinación.

Conforme a (Huo y otros, 2001) en la Universidad de Minesota, Estados Unidos, los valores sugeridos para la determinación de este módulo de acuerdo al ACI318, sobre estiman la

capacidad de deformación del concreto con áridos locales. El mismo caso se presentó conforme a estudios propuestos por (Ruiz y otros, 2007) al tomar 1300 muestras analizadas en Bogotá concluyendo que las ecuaciones propuestas por el código Colombiano NSR exceden los valores máximos de concreto en la capital. En Bucaramanga al analizar un total de 70 testigos se pudo establecer una variación sub estimada al emplear materiales sedimentarios y sobreestimados con materiales metamórficos (Hernández, 2005).

1.6.3.1. Factores que afectan al módulo de elasticidad del concreto

La resistencia nominal final del concreto es inferior a la de los agregados y de la pasta endurecida; sin embargo, al actuar en conjunto, en términos de ductilidad, este exhibe un mejor comportamiento producto de las reacciones que se dan en el estado plástico y endurecimiento (Topcu & Ugurlu, 2007).

Uno de los factores de mayor incidencia es la porosidad, es así que materiales con una alta densidad producen módulo de elasticidad elevados; al igual que relaciones agua/cemento bajas (Serrano & Pérez, 2010). De acuerdo a (Balendran, 1995), estimar el módulo de elasticidad por medio de la resistencia de probetas a compresión, no debería ser empleada como una práctica generalizada, debido a la serie de factores que intervienen en la composición de la mezcla, incrementándose la complejidad del análisis al reemplazar los agregados naturales por artificiales o preparados.

1.6.3.2. Resistencia a la compresión simple

La normativa (ASTMC39/C39M, 2018), establece los parámetros para determinar la resistencia a la compresión simple de cilindros de concreto tanto moldeados como núcleos extraídos, limitando su peso unitario a 800kg/m^3 (50lb/ft^3). El método consiste en la aplicación de una carga axial progresiva a velocidad constante, hasta conseguir la falla del cilindro. Los especímenes deberán cumplir con:

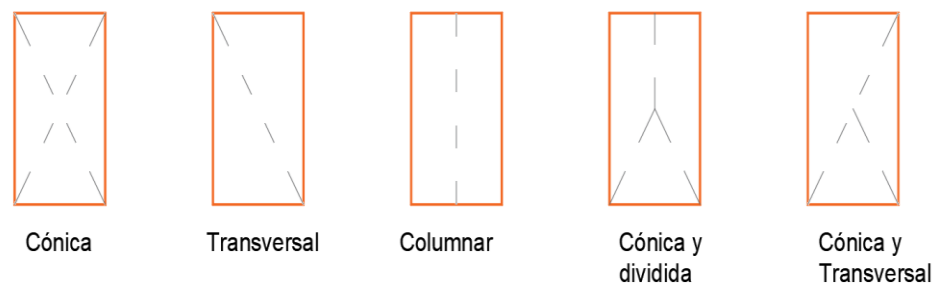
- No deberá existir una desviación del eje de ninguno de los extremos de los cilindros que sobrepase los 0.5° .
- Los extremos que no sean planos en más de 0.002 pulgadas, deberán alinearse para cumplir con las tolerancias.
- La densidad de los cilindros deberá ser determinada antes del refrentado, retirando cualquier tipo de humedad excedente previa al pesado y determinando el altura y diámetro del mismo a las 0.05 pulgadas más cercana.
- Estos deberán ser ensayados en condición húmeda.
- En caso de que la relación entre el altura y diámetro del espécimen sea inferior a 2 deberá emplearse un factor de corrección de acuerdo a lo que indica la normativa.

(Torres y otros, 2018) los tipos de fallas que se pueden presentar durante la prueba de resistencia son, ver figura3:

- Cónica: Es el tipo de falla propicia, que ocurre cuando se han cumplido los parámetros de mezclas, elaboración de la probeta y aplicación de carga de la forma más eficiente.
- Transversal: Ocurre cuando el límite de desviación de la carga se halla en torno a 0.5° .

- Columnar: Sucede cuando la superficie de carga del espécimen es convexa y existe deficiencia en el material refrentado.
- Cónica y dividida: Producida al presentarse rugosidades de la placa de refrentado.
- Cónica y transversal: El área de aplicación de la carga se encuentran fuera de las tolerancias admisibles, con relación al eje de carga de la máquina.

Figura 3. Tipos de fallas en probetas de concreto



Tomado de Módulo de Elasticidad y Resistencia a la Compresión del Concreto por Javier Torres, Matthews Guardo, Juan Moira, Oliver Merlano, Carlos Silgado, Universidad Tecnológica de Bolívar (Torres y otros, 2018).

El determinar la resistencia máxima de los cilindros de prueba, permitirá establecer la dosificación más adecuada; en la cual, una vez incluido el respectivo porcentaje de adoquín triturado, permita alcanzar la resistencia de 210kg/cm^2 .

1.6.3.3. Ensayo para determinar el módulo de elasticidad

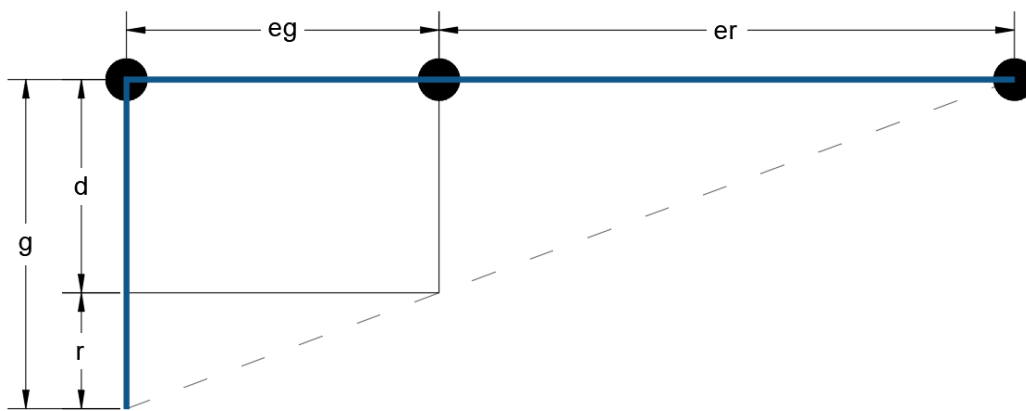
La normativa (ASTM C 469/C469M-22, 2022) indica el alcance y método para el ensayo de módulo de elasticidad y Poisson en cilindros de concreto bajo esfuerzos de compresión en el eje longitudinal, los cuales giran en torno al 40% de la carga última esperada del concreto, empleado

para el dimensionamiento de elementos, determinar la cantidad de refuerzo y los esfuerzos producidos por deformaciones unitarias determinadas.

Para ejecutar el ensayo, se empleará un deformímetro que mida la deformación promedio de las cargas opuestas en el eje axial, centrada cerca de la mitad de la altura de la probeta, ver figura 4.

La deformación del espécimen será calculada por medio de la siguiente expresión:

Figura 4. *Diagrama de desplazamientos*



Tomado de Método de Ensayo Estándar para determinar el Módulo de Elasticidad y Relación de Poisson del concreto a compresión ASTM C469 por ASTM International (Torres y otros, 2018).

$$d = \frac{g e_r}{(e_r + e_g)}$$

Dónde:

- d : Es la deformación a lo largo de la longitud de la base efectiva en micrómetros.
- g : Lectura del deformímetro en micrómetros.
- e_r : Es la distancia desde la barra pivote al plano vertical.

- e_g : Distancia perpendicular desde el deformímetro al plano vertical por el que pasa los puntos de soporte del anillo rotativo.

Las características que debe tener el cilindro de ensayo de acuerdo a (ASTM C 469/C469M-22, 2022), son las siguientes:

- Ensayarse una hora después de ser extraídos de la zona de curación.
- Extremos perpendiculares a su eje y planos, con tolerancias que varían entre +/-0. 5° y .0002” respectivamente.
- El diámetro de la probeta deberá tener la medida respectiva, con una aproximación de 0.25mm, entre el promedio general de los especímenes, con el cual se calculará el área de la sección transversal. La longitud total del cilindro deberá incluir el cabeceado con una aproximación de una pulgada.

El cálculo del módulo de elasticidad experimental, será determinado por medio de la siguiente expresión:

$$E = \frac{S2 - S1}{\epsilon2 - 0.000050}$$

Dónde:

- E: Módulo de elasticidad del concreto en psi.
- S2: Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última o de ruptura.
- S1: Esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal $\epsilon1$, correspondiente a 50 millonésimas.
- $\epsilon2$: Deformación longitudinal producida por el esfuerzo S2.

1.6.3.4. Fórmulas normativas para el cálculo del módulo de elasticidad

El Instituto Americano del Concreto ACI-318-19, en su capítulo 19 sección 19.2.2 establece dos expresiones para el cálculo del módulo de elasticidad:

- Para hormigones cuyo peso específico varía entre 1440 y 2560 kg/m³:

$$E_c = wc^{1.5} * 0.14 * \sqrt{f'c} (kg/cm^2)$$

- Para hormigones de peso normal:

$$E_c = 15100 * \sqrt{f'c} (kg/cm^2)$$

De acuerdo a (American Concrete Institute, 2019), estas ecuaciones estiman el módulo de elasticidad para fines de diseño, definiéndolo como la pendiente desde el esfuerzo nulo hasta un esfuerzo de compresión del 45% de la resistencia a la compresión, conforme a la curva esfuerzo-deformación.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC-SE-HM-2015, 2015), en su capítulo de Hormigón Armado, en unidades del Sistema Internacional, establece dos expresiones para determinar de manera analítica el módulo de elasticidad, las cuales son:

- Para estudios en los cuales se desee estimar las deflexiones ante cargas estáticas y por servicio, sea en hormigón armado o pretensado:

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

Dónde:

Ea: Módulo de elasticidad del agregado en GPa.

$f'c$: Resistencia a la compresión simple del hormigón en MPa.

E_c : Módulo de elasticidad del concreto en GPa.

- Cuando se busca la aplicación en modelos elásticos de estructuras diseñadas bajo acciones sísmicas y empleando hormigones de densidad normal:

$$E_c = 4.7 * \sqrt{f'c}$$

Dónde:

$f'c$: Resistencia a la compresión simple del hormigón en MPa.

E_c : Módulo de elasticidad del concreto en GPa.

CAPITULO II

Se procederá a estudiar el conjunto de ensayos ejecutados dentro del marco de los agregados finos y gruesos, como a su vez del reciclado de adoquín.

2.1. Ensayos de los agregados

2.1.1. Muestreo y cuarteo de agregados

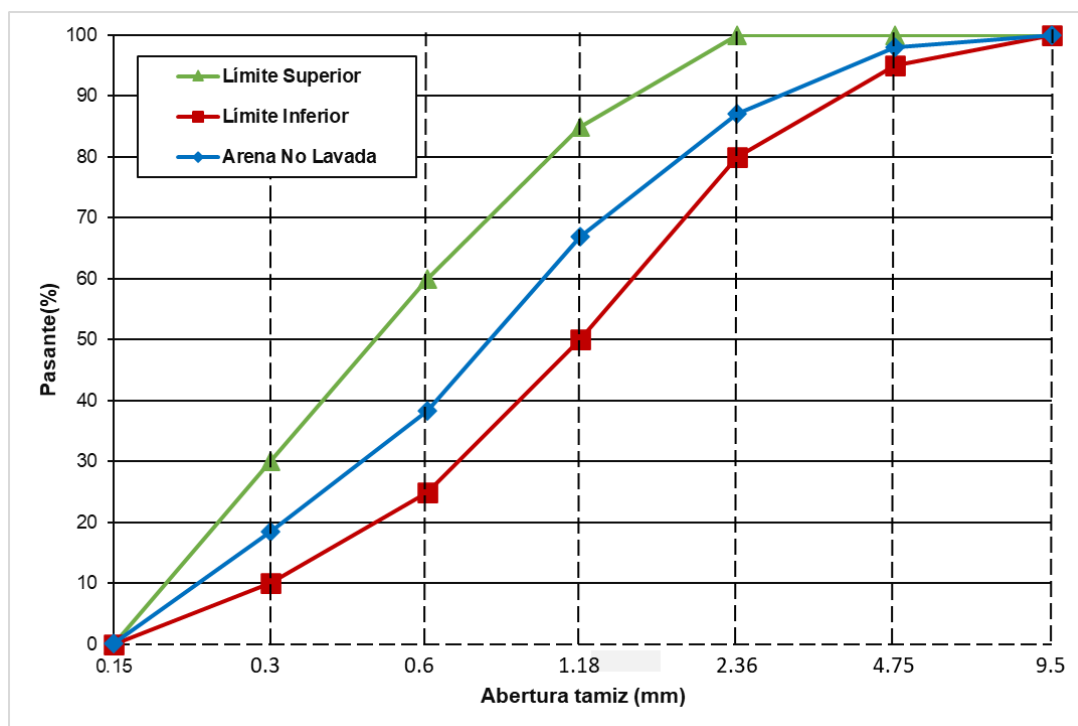
En base a la normativa (NTE INEN 695, 2011), se procedió al muestreo del agregado fino y grueso en base al tonelaje que ingresa en un volquete de 8m^3 (13.98ton), para árido fino y grueso. El contenido del volquete se dividió en dos grupos y se tomaron 8 costales de 25Kg (4 para árido grueso y 4 para árido fino), respetando los mínimos establecidos por la tabla 1. Tamaño de muestras de la normativa concerniente. Para el árido grueso se empleará piedra #67 (4.75mm-19mm); mientras que, para el agregado fino se empleará polvo de piedra azul pasante del tamiz de 3/8" y retenido en el tamiz n° 200. El cuarteo de las muestras en cada saco se lo obtuvo con la guía de la normativa (NTE INEN 2566, 2011), siguiendo los procedimientos establecidos en el método A, con un separador mecánico.

2.1.2. Granulometría de agregados

2.1.2.1. Granulometría de agregados finos

La normativa (NTE INEN 696, 2011) establece que el peso mínimo requerido para la granulometría del agregado fino sea de 300 gramos; sin embargo, se optó por emplear un peso de 500 gramos para obtener una mejor aproximación de la curva granulométrica, ver figura 5:

Figura 5. Curva granulométrica de agregados finos



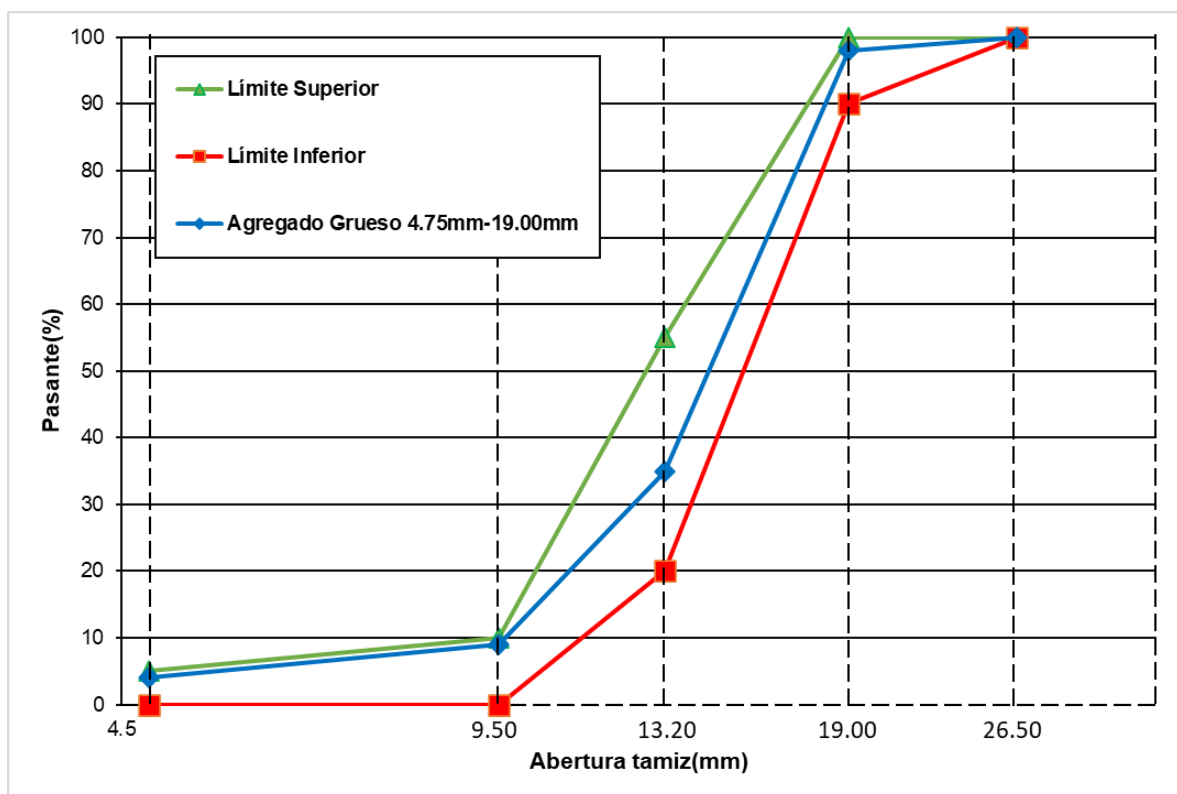
(Vivar, Leonardo, 2024)

Debido a que la curva granulométrica resultante de la arena no lavada se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa (NTE INEN 872, 2011), se concluye que estos presentarán un desempeño adecuado para la elaboración del hormigón.

2.1.2.2. Granulometría de agregados gruesos

De acuerdo a la normativa (NTE INEN 696, 2011), se tomaron 5kg de agregado grueso con una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ los cuales fueron sometidos a un proceso de tamizaje mecánico. El porcentaje máximo retenido en cada uno de los tamices, es analizado conforme a la tabla 3 de la normativa (NTE INEN 872, 2011), para lo cual la curva granulométrica resultante y sus límites fueron los siguientes, ver figura 6:

Figura 6. Curva granulométrica de agregados gruesos



(Vivar, Leonardo, 2024)

La curva granulométrica resultante del agregado de $\frac{3}{4}$ " se encuentra dentro de los límites establecidos por la normativa (NTE INEN 872, 2011).

2.1.3. Gravedad Específica y Porcentaje de Absorción

La gravedad específica es la relación existente entre la masa del agregado con respecto al volumen que ocupa en el espacio referente a un mismo volumen de agua y a una temperatura determinada. Por otro lado, el porcentaje de absorción de un árido se encuentra definido por el incremento del peso de dicho agregado debido a la saturación de sus poros, excluyendo el agua adherida superficialmente (ASTM C127, 1993).

Para el agregado fino, los ensayos fueron ejecutados conforme a los criterios establecidos por la normativa (NTE INEN 856, 2011) , aplicando el método gravimétrico se tomó una muestra de 500 gramos sometida a un proceso de absorción de 24 horas saturando todos sus poros. Después se procedió a eliminar el exceso de agua, dejándolo en un estado superficialmente seca lo cual permitió establecer la densidad relativa superficialmente seca, gravedad específica relativa y aparente y el porcentaje de absorción.

De acuerdo a los procedimientos establecidos por la normativa (NTE INEN 857, 2011), se tomaron 3 kilogramos de muestra de agregado grueso debido a que su tamaño máximo nominal es de 19mm, el cual fue sumergido en agua por un periodo de 24 horas y posteriormente se procedió a retirar la humedad higroscópica, consecuentemente se determinó su masa aparente por inmersión en agua a 23°C para finalmente calcular su gravedad específica y porcentajes de absorción respectivos, ver tabla 1.

Tabla 1. *Resultados de gravedad específica y absorción de agregado fino y grueso*

Gravedad Específica y Porcentaje de Absorción		
Agregado Fino	Gravedad Específica	2.76
	Gravedad Específica (SSS)	2.82
	Gravedad Específica Aparente	2.86
	Absorción (%)	3.82
Agregado Grueso	Gravedad Específica	2.81
	Gravedad Específica (SSS)	2.87
	Gravedad Específica Aparente	2.93
	Absorción (%)	1.12

(Vivar, Leonardo, 2024)

2.1.4. Peso Unitario Suelto y Compactado

Este procedimiento se llevó a cabo conforme a los requerimientos establecidos por (NTE INEN 858, 2011) con muestras de árido fino y grueso secas al horno a una temperatura de 110°C +/- 5°C. Su ejecución se la realizó en dos etapas:

- Masa Unitaria Suelta

Una vez pesado el molde se distribuye la muestra en tres capas por medio de paladas hasta conseguir que este rebose del borde 0.050m, dejándola al ras, se procede a determinar su peso.

- Masa Unitaria Compactada

La muestra es colocada en el molde en tres capas que son compactadas por 25 golpes mediante una varilla de 16mm de diámetro y 600mm de longitud, evitando que en la primera capa esta toque el fondo del recipiente, ver tabla 2.

Tabla 2. Resultados de pesos unitarios de agregado fino y grueso

Pesos Unitarios Sultos y Compactados			
Agregado Fino	Masa Unitaria Suelta	4.50	kg/m ³
	Peso Unitario Suelto	1607.50	kg/m ³
	Masa Unitaria Compactada	5.21	kg
	Peso Unitario Compactado	1858.93	kg/m ³
Agregado Grueso	Masa Unitaria Suelta	14.97	kg
	Peso Unitario Suelto	1497.00	kg/m ³
	Masa Unitaria Compactada	16.57	kg
	Peso Unitario Compactado	1657.00	kg/m ³

(Vivar, Leonardo, 2024)

2.1.5. Contenido de Humedad

Conforme a los procedimientos descritos en la normativa (NTE INEN 862, 2011). Para el árido grueso se tomó una muestra representativa de 3 kilogramos; mientras que para el árido fino se emplearon 1.50 kilos. Ambas muestras fueron sometidas a un proceso de secado en un horno, hasta conseguir un grado de aproximación de 0.1% a una temperatura constante de 110°C +/-5°C. Es importante destacar que esta variable se analizó nuevamente durante el proceso de fundición de los cilindros, con la finalidad de corregir la relación agua cemento en la mezcla, ver tabla 3.

Tabla 3. Resultados de contenido de humedad total de agregado fino y grueso

Contenido de Humedad				
	Tara	Nº1	Nº2	Promedio
Árido Fino	Tara(Kg)	0.50	0.50	
	Tara+Muestra Húmeda (Kg)	2.00	2.00	
	Tara+Muestra Seca(Kg)	1.97	1.94	
	%Humedad	0.02	0.04	3.10%
Árido Grueso	Tara(Kg)	2.00	2.00	
	Tara+Muestra Húmeda (Kg)	5.00	5.00	
	Tara+Muestra Seca(Kg)	4.90	4.88	
	%Humedad	0.03	0.04	3.81%

(Vivar, Leonardo, 2024)

2.1.6. Terrones de Arcilla

Entre los problemas que genera la arcilla dentro de las mezclas de concreto, se encuentra el incremento excesivo de la relación de agua/ cemento, con la finalidad de obtener una óptima trabajabilidad afectando de manera proporcional a la resistencia a la compresión y alta sensibilidad a los cambios de volumen por las respectivas variaciones de temperatura. (De la Rosa, 2014).

Para el árido fino, se empleó el material retenido en el tamiz No 16 con una masa mínima recomendada de 25 gramos; mientras que para el agregado grueso se siguió las recomendaciones del inciso 4.3.4 separando las partículas en 3 bandas (tamiz No 4 a 3/8"; tamiz 3/8" a 3/4"; tamiz 3/4" a 1 1/2") tomando muestras de 1Kg, 2Kg y 3 Kg respectivamente, conforme a la normativa (NTE INEN 698, 2011), ver tabla 4 y 5.

Tabla 4. Resultados de porcentaje de arcilla en árido fino

Terrones de Arcilla		
Árido Fino	Masa(g)	
	Masa Inicial	25.00
	Masa retenida en tamiz No 16	24.90
	Porcentaje de Arcilla	0.40%

(Vivar, Leonardo, 2024)

Tabla 5. Resultados de porcentaje de arcilla en árido grueso

Terrones de Arcilla		
Árido Grueso	Masa(g)	
	Masa Inicial (tamiz No 4 a 3/8")	1000.00
	Masa Inicial (tamiz 3/8" a 3/4")	2000.00
	Masa Inicial (tamiz 3/4" a 1 1/2")	3000.00
	Retenido en N°8	998.97
	Retenido en N°4	1998.99
	Retenido en N°4	2999.95
	Porcentaje Arcilla (tamiz No 4 a 3/8")	0.10
	Porcentaje Arcilla (tamiz 3/8" a 3/4")	0.05
	Porcentaje Arcilla (tamiz 3/4" a 1 1/2")	0.00
	Promedio	0.05%

(Vivar, Leonardo, 2024)

Conforme a las tablas 1,3 de la normativa (NTE INEN 872, 2011), los áridos cumplen con los requisitos establecidos para la elaboración de hormigones.

2.1.7. Desgaste por abrasión

Es una acción mecánica que afecta a los elementos de concreto producto del tránsito intenso, conducción de líquidos o aplicación de cargas cíclicas. Esto se encuentra condicionado exclusivamente por la resistencia de los agregados y en consecuencia la dosificación de la mezcla con su respectivo curado (Solís & Chan, 2020). Esta se encuentra evaluada generalmente de acuerdo al tipo de daño que se espera en la superficie, aunque las pruebas que se emplean dependen del desgaste alcanzado por las partículas producto del frotamiento de esferas, aplicación de cepillos, chorros de arena o el contacto de discos que giran (Neville, 2010).

Se ejecutó el análisis de desgaste por abrasión de acuerdo a los criterios de la normativa (NTE INEN 860, 2011), para lo cual se tomó una muestra de 5Kg, conforme a las condiciones establecidas en la tabla 2 de la presente normativa, y se procedió a colocar un total de 12 esferas de acuerdo a la gradación A de la tabla 1, obteniendo los siguientes resultados, ver tabla 6:

Tabla 6. Resultados del ensayo de abrasión en el agregado grueso

Desgaste por abrasión		
Agregado Grueso	Masa (Kg)	
	Masa Inicial	5.00
	Masa retenida en tamiz 1.70mm	4.15
	Porcentaje de abrasión	17.00%

(Vivar, Leonardo, 2024)

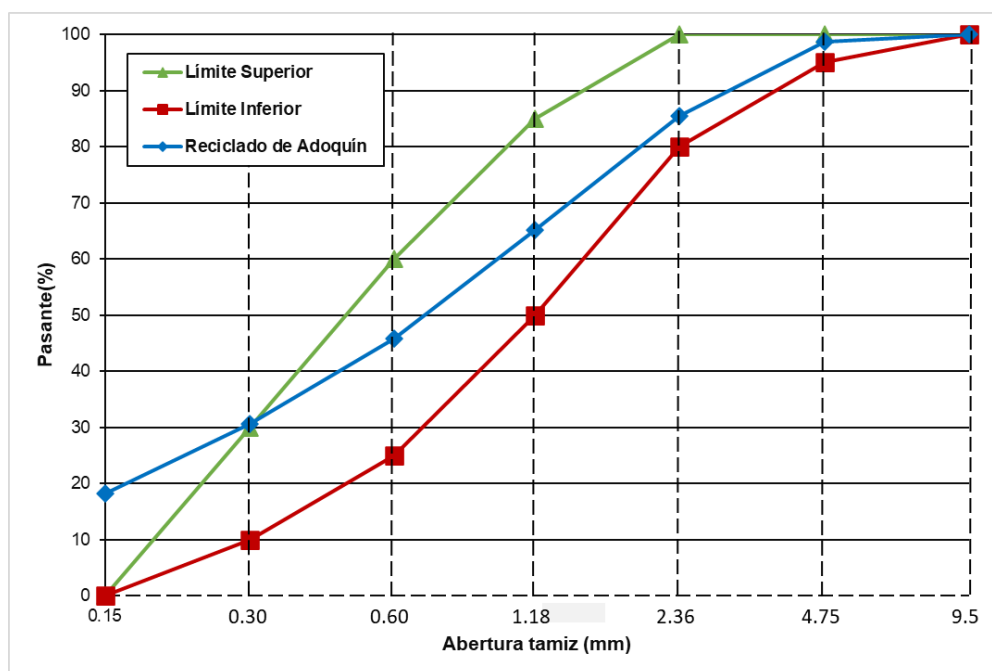
Conforme a los resultados obtenidos y observando que el porcentaje de degradación del árido es inferior al 50%, se puede concluir que la grava presenta condiciones óptimas (NTE INEN 872, 2011).

2.2. Ensayos del material reciclado para adoquín

2.2.1. Granulometría de agregados finos (Reciclado de Adoquín)

Se siguieron los procedimientos establecidos por la normativa optando por emplear un peso de 500 gramos para obtener una mejor aproximación de la curva granulométrica, ver figura 7:

Figura 7. Curva granulométrica de agregados finos (Reciclado de Adoquín)



(Vivar, Leonardo, 2024)

Se puede apreciar que existe una gran presencia de finos en la muestra de adoquín reciclado, provocando desde aberturas de tamiz de 0.15mm a 0.30mm exista una desviación importante en la curva superando el límite superior establecido por la normativa (NTE INEN 872, 2011).

Debido a que esta muestra es el producto de la trituración de adoquines de distinta índole sumado a la incertidumbre que se tiene en cuanto a la influencia del mismo como agregado fino, se ha considerado analizar el comportamiento del concreto en base a distintas proporciones, entre la

cuales se tomará: 2%, 3% y 5% del peso de la arena empleada para el diseño de la dosificación principal.

2.2.2. Gravedad Específica y Porcentaje de Absorción (Reciclado de Adoquín)

De acuerdo a los procedimientos de la norma (NTE INEN 856, 2011) , aplicando el método gravimétrico se tomó una muestra de 500 gramos la cual fue sometida a un proceso de absorción de 24 horas saturando todos sus poros. Después se procedió a eliminar el exceso de agua dejándolo en un estado superficialmente seca, permitiendo establecer la densidad relativa superficialmente seca, gravedad específica relativa, aparente y el porcentaje de absorción, ver tabla 7.

Tabla 7. Resultados de gravedad específica y absorción del reciclado de adoquín

Gravedad Específica y Porcentaje de Absorción		
Reciclado de Adoquín	Gravedad Específica	2.72
	Gravedad Específica (SSS)	2.79
	Gravedad Específica Aparente	2.82
	Absorción (%)	5.60

(Vivar, Leonardo, 2024)

2.2.3. Contenido de Humedad (Reciclado de Adoquín)

Siguiendo los parámetros de la normativa (NTE INEN 862, 2011). se emplearon 1.50 kilos, sometidos a un proceso de secado en un horno, hasta conseguir un grado de aproximación de 0.1% a una temperatura constante de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, ver tabla 8.

Tabla 8. Resultados de contenido de humedad total de agregado fino (Reciclado de Adoquín)

Contenido de Humedad				
Tara		N°1	N°2	Promedio
Árido Fino	Tara (Kg)	0.50	0.50	
	Tara+Muestra Húmeda (Kg)	2.00	2.00	
	Tara+Muestra Seca (Kg)	1.98	1.96	
	%Humedad	0.01	0.03	2.05%

(Vivar, Leonardo, 2024)

CAPITULO III

En el presente capítulo se mencionará el procedimiento para determinar la dosificación de diseño para obtener un hormigón de resistencia 210 kg/cm^2 y el estudio de los resultados de los ensayos en el hormigón fresco, una vez incluido el reciclado de adoquín.

Los criterios que se seguirán a continuación son dados en base a la normativa (ACI PRC-211.1-22, 2022), el cual es aplicable para hormigones conformados por agregados de densidad normal o alta con una trabajabilidad adecuada para una fundición en sitio, sin tomar en consideración en el diseño áridos ligeros o reciclados.

El método de volumen absoluto tiene como base que los pesos del agua, cemento y agregados se encuentran determinados por resultados de laboratorio, experiencias o tablas. Al conocer esta información, por medio de las gravedades específicas de los materiales se obtienen los volúmenes absolutos a los cuales se agrega el volumen de aire y se elimina el volumen unitario para obtener el volumen de agregado fino; siendo este último el parámetro inicial para obtener los pesos requeridos para el resto de componentes de la mezcla teniendo como base la unidad (1 yd^3 o m^3) (ACI PRC-211.1-22, 2022).

Las unidades en las cuales se encuentra desarrollada la normativa ACI PRC – 211.1-22, corresponden al Sistema Inglés, razón por la cual los cálculos presentarán datos de entrada con dicho sistema de medida y los resultados finales se transformarán a unidades consistentes.

3.1. Asentamiento esperado

El asentamiento esperado en una mezcla de concreto, determina su consistencia y trabajabilidad a ser obtenida en obra. Este se lo determina conforme al ensayo de asentamiento por medio del cono de Abrahams de acuerdo a la normativa ASTM C143/C143 M, cuya cantidad de agua a contener dependerá del tamaño máximo nominal del agregado empleado en la mezcla, forma de las partículas y su respectiva geometría (ACI PRC-211.1-22, 2022). La tabla 5.3.1 de la normativa citada previamente y que se muestra a continuación, ver tabla 9, establece los rangos comunes de asentamientos para obras en general, cabe recalcar que dicho valor es referencial y dependerá de las condiciones del proyecto para seleccionar la trabajabilidad óptima para su ejecución.

Tabla 9. *Asentamientos comunes en estructuras.*

Asentamientos típicos (pulgadas)/(cm)	Tipo de estructura
1 a 4/2.50 a 10.00	Estructuras sin concentración masiva de hierro
2 a 4/ 5.00 a 10.00	Elementos masivos de concreto
2 a 5/5.00 a 12.70	Pavimentos, losas, cimentaciones planas, caissons, sub estructuras de muros, reforzamientos de fundaciones y cimentaciones en general
3 a 5/ 7.50 a 12.70	Vigas, Muros estructurales, columnas

Tomado de: (ACI PRC-211.1-22, 2022)

3.2. Tamaño máximo nominal del agregado grueso

La dimensión del agregado de tamaño máximo a emplear, se la determina en conjunto con el asentamiento esperado de la mezcla, pues en general, cuando el área superficial del árido es mayor, la cantidad de agua requerida para su movilización es inferior, debido a la menor presencia de poros lo cual se halla relacionado directamente con el volumen de la mezcla cantidad de agua, aditivos y respectiva

dosificación que se reduce drásticamente, ver tabla 10. Este es determinado en base a la abertura del tamiz por la cual pasa el 100% de la muestra obtenida en el cuarteo (ACI PRC-211.1-22, 2022).

Tabla 10. Tamaños máximos nominales

Tamaños máximos nominales recomendados	
1/5"	De la dimensión más estrecha
1/3"	Espesor de la losa
3/4"	Espacio libre entre varillas

Tomado de: (ACI PRC-211.1-22, 2022)

3.3. Estimación del agua de mezclado e inclusión de aire

Como se mencionó previamente, el tamaño máximo nominal del árido grueso determina varios factores en la mezcla final, entre los cuales se tiene la intervención de la cantidad de agua por yarda cúbica de hormigón; sin depender de la cuantificación de materiales de cemento que intervengan en la dosificación.

Dentro de las recomendaciones propuestas por el ACI, se menciona que el ajuste de la relación agua/cemento se lo puede realizar por medio de la retención del 10% del agua y que esta se incluya de manera paulatina en la mezcla hasta alcanzar una consistencia adecuada, debido a la intervención de factores tales como la textura, forma y tipo de agregados como a su vez la temperatura y otros que se establecen de la tabla 5.3.3.1 y citada a continuación (ACI PRC-211.1-22, 2022) , ver tabla 11.

Tabla 11. Contenido de agua y aire en mezclas de concreto

Contenido de agua y aire para diferentes asentamientos del concreto sin reducción de agua y con el tamaño máximo nominal del agregado							
Asentamiento, pulgadas	3/8	1/2	3/4	1	1 1/2	2	3
Sin inclusión de aire							
1 a 2	350	335	315	300	275	260	220
3 a 4	385	365	340	325	300	285	245
5 a 6	400	375	350	330	305	290	255
6 a 7	410	385	360	340	315	300	270
>7	-	-	-	-	-	-	-
Porcentaje de aire atrapado en la mezcla	3.00	2.50	2.00	1.50	1.00	0.50	0.30
1 a 2	305	295	280	270	250	240	205

Contenido de agua y aire para diferentes asentamientos del concreto sin reducción de agua y con el tamaño máximo nominal del agregado							
Asentamiento, pulgadas	3/8	1/2	3/4	1	1 1/2	2	3
3 a 4	340	325	305	295	275	265	225
5 a 6	355	335	315	300	280	270	240
6 a 7	365	345	325	310	290	280	260
>7	-	-	-	-	-	-	-
Porcentaje de aire atrapado requerido							
Exposición clase F1	6.00	5.50	5.00	4.50	4.50	4.00	3.50
Exposición clase F2 y F3	7.50	7.00	6.00	6.00	5.50	5.00	4.50

Tomado de: (ACI PRC-211.1-22, 2022)

En cuanto al contenido de aire existen dos vías o alternativas que se deben considerar en las mezclas de concreto: cuando no se considera la presencia de burbujas de aire en el interior de la mezcla, la normativa establece un nivel mínimo que se queda atrapado producto del proceso de mezclado en base al tamaño máximo nominal del agregado. Por otro lado, cuando este es considerado como requisito de diseño, implica que la exposición final del elemento a fundir se encuentra en zonas cuyas temperaturas son extremadamente bajas, lo cual puede provocar agrietamientos y humedades excesivas, de tal manera que los espacios vacíos de la mezcla son conformados por burbujas de aire evitando que se produzca este fenómeno (ACI PRC-211.1-22, 2022).

3.4. Relación agua/cemento (A/C)

La durabilidad esperada en el producto final es un factor determinante dentro de la selección de la relación agua – cemento. Generalmente, esta nace de un proceso estadístico debido a la excesiva variabilidad entre los materiales cementantes y agregados que se encuentran en el mercado, que siendo del mismo origen provocan distintas resistencias de acuerdo a la relación acogida. En ausencia de esta información, la normativa establece una serie de valores tentativos y conservadores que se pueden aplicar para un cemento Portland Tipo I, que en general posee una tendencia a una reducción de la resistencia obtenida a un tamaño de agregado inferior, la

cual tendrá que ir acorde a los márgenes de resistencia que se indican a continuación (ACI PRC-211.1-22, 2022), ver tabla 12 y 13:

Tabla 12. Rangos admisibles de resistencia esperada

Resistencia a la compresión objetivo, psi / kg/cm ²	Resistencia promedio admisible
<3000/210.92	f'_c+1000
3000 a 5000/210.92 a 351.53	f'_c+1200
>5000/351.53	$1.1f'_c+700$

Tomado de: (ACI PRC-211.1-22, 2022)

Tabla 13. Valores promedio conservadores de relación agua/cemento

Resistencia a la compresión a los 28 días, psi/kg/cm ²	Relación Agua/Cemento	
	Sin Inclusión de Aire	Con Inclusión de Aire
7000/492.15	0.34	<0.331
6000/421.84	0.41	0.33
5000/351.53	0.48	0.4
4000/281.23	0.57	0.48
3000/210.92	0.68	0.59
2000/140.62	0.82	0.74

Tomado de: (ACI PRC-211.1-22, 2022)

La cantidad de material cementante requerido en la mezcla, es determinado en este paso una vez que se halla ajustado la relación en peso previamente mencionada.

3.5. Contenido de agregado grueso

De acuerdo a la normativa (ACI PRC-211.1-22, 2022) para realizar la dosificación de la mezcla de concreto, se busca que los áridos presenten una granulometría correlacionada a un tamaño máximo nominal conforme a un volumen particular secado al horno. La tabla 5.3.6 de la normativa ACI, establece un conjunto de valores aceptables para la determinación del volumen requerido de agregado grueso en pies cúbicos por yarda cúbica de concreto en función del

módulo de finura y tamaño máximo nominal, en base a la tabla 14 que se muestra a continuación:

Tabla 14. *Pies cúbicos de agregado grueso por yarda cúbica de hormigón*

Tamaño máximo nominal del agregado, en pulgadas	Volumen seco al horno de agregado grueso en ft ³ por yarda cúbica de concreto			
	2.4	2.6	2.8	3
3/8	0.5	0.48	0.46	0.44
1/2	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4	0.66	0.64	0.62	0.6
1	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2	0.75	0.73	0.71	0.69
2	0.78	0.76	0.74	0.72
3	0.82	0.8	0.78	0.76

Tomado de: (ACI PRC-211.1-22, 2022)

La densidad empleada para su determinación es el peso unitario compactado (varillado), por el cual se debe multiplicar este parámetro para obtener la cantidad en peso de grava. Por recomendaciones normativas, se deberá convertir la unidad de medida a su equivalente requerido en libras por yarda cúbica multiplicando dicho resultado por 27 (ACI PRC-211.1-22, 2022). Finalmente, el porcentaje de absorción del agregado permite obtener el peso en estado superficialmente seco a través de la siguiente expresión:

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{SSS} = \text{Peso Agregado Grueso}_{\text{varillado}} * (1 + \text{Abs}\%)$$

Dónde:

Abs: Absorción del agregado grueso en porcentaje.

3.6. Contenido de agregado fino

El contenido de agregado fino se lo obtiene una vez determinados las cantidades de volúmenes del resto de componentes de la mezcla, por medio de los cuales se establece que el volumen que ocupa cualquier agregado o ingrediente dentro de la mezcla de concreto será igual a su peso dividido por la densidad de dicho material, siendo este último el resultado de multiplicar la densidad del agua por la gravedad específica del agregado. Para lo cual, se halla el resultado restante para completar los 27 pies cúbicos de concreto y a este se lo afecta por su densidad superficialmente seca, obteniendo el peso de agregado fino por yarda cúbica de hormigón (ACI PRC-211.1-22, 2022).

Peso Agregado Fino_{SSS}

$$= (VH - \text{Volúmen de Agregado Grueso} - \text{Volúmen de Agua}) * \gamma_h$$

$$* \text{Densidad Agregado Fino}_{SSS}$$

Dónde:

γ_h : Peso específico del agua.

De acuerdo a la normativa, se deben realizar lotes de prueba, que permitan establecer si la dosificación establecida es la óptima y cumple los límites preestablecidos. Entre los ajustes requeridos incluye: cambios en el contenido de humedad, asentamiento objetivo y peso unitario de la mezcla de concreto.

3.7. Ajuste en el contenido de humedad por variaciones en los agregados.

En general la humedad natural de los agregados es superior a la condición saturada superficialmente seca, esto provoca un incremento considerable en la dosificación en peso, en otros casos este suele encontrarse tan seco siendo requerido reducir la cantidad y agregar una cantidad adicional de agua hasta conseguir el estado SSS. Para determinar el incremento o

reducción de agregado de acuerdo a su contenido de humedad, se empleará la siguiente expresión (ACI PRC-211.1-22, 2022):

$$W_{\text{agua adicional}} = \frac{1 + \%W}{1 + Abs\%}$$

Dónde:

$W_{\text{agua adicional}}$: Peso adicional del agregado

$\%W$: Contenido de humedad en porcentaje

$\%Abs$: Porcentaje de absorción.

A continuación, se obtiene la diferencia del agua adicional de la definida en la dosificación, ello permite obtener el agua libre, esta deberá restarse de la dosificada para obtener la cantidad corregida.

3.7.1. Ajuste en el contenido de humedad por asentamiento

En caso de que el asentamiento del lote analizado no sea el correcto, se deberá incrementar el contenido de agua en 10 libras por cada pulgada incrementada o reducida conforme al asentamiento estimado. Como una alternativa a utilizar agua, se pueden emplear aditivos reductores del contenido de esta (ACI PRC-211.1-22, 2022).

3.7.2. Ajuste en el contenido de humedad por inclusión de aire

En el caso de que el contenido de aire incluido en la dosificación, no se haya alcanzado, se deberá reestimar la dosificación del aditivo inclusor y se reducirá o incrementará el contenido de agua en la mezcla en 5 libras por cada porciento en que se haya afectado el contenido de aire en el lote analizado (ACI PRC-211.1-22, 2022).

3.7.3. Ajuste en el contenido de humedad por resistencia y relación agua cemento.

De acuerdo a (ACI PRC-211.1-22, 2022), en caso de que no se haya alcanzado la resistencia objetivo, se pueden elaborar curvas que relacionen el peso del agua y el cemento con respecto a la resistencia alcanzada en cada ensayo para conseguir un valor más ajustado.

Otro indicador significativo, es la eficiencia del cemento la cual se encuentra definida como la resistencia obtenida por cada yarda cúbica. Esta es calculada dividiendo la resistencia del lote de prueba por el peso del cemento por cada yarda cúbica, este factor permite obtener el peso requerido de material que se debe agregar por cada volumen de mezcla y en caso de ser necesario reducirlo.

3.8. Diseño de mezcla para hormigón de 210kg/cm²

Las mezclas fueron elaboradas con el agregado proveniente de la mina de Holcim y cemento Selva Alegre. A continuación, se procede a determinar la dosificación que se empleará para los testigos de acuerdo al método expuesto previamente.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE HORMIGONES

DISEÑO DE PRUEBAS DE HORMIGÓN

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: 210 (kg/cm²)

ORIGEN: HOLCIM

MÉTODO: ACI 211

- **PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS**

Tabla 15. Rangos admisibles de resistencia esperada

Material	Absorción	Contenido de Humedad	G _s (SSS)	Peso Unitario Compactado	TMN	Módulo de Finura
	%	%	u	kg/m ³	Pulgadas	u
Grava	1.12	3.81	2.87	1657.00	3/4"	2.54
Arena	3.82	3.10	2.82	1858.93	-	3.92

(Vivar, Leonardo, 2024)

- **PROCEDIMIENTO**

- **Requerimientos**

- $f'c = 210 \text{kg/cm}^2$
- **Asentamiento** = 8 cm.

Para la presente investigación, se ha seleccionado un hormigón cuyo asentamiento sea de 8cm +/- 2cm, pues se considera que su aplicación se hallará dirigida a la construcción de vigas, columnas y losas.

- **Resistencia a la compresión del hormigón (Esfuerzo $f'c$ de diseño)**

$$f'c_{diseño} = f'c_{requerido} \times \left(1 + \frac{\%Seguridad}{100} \right) \frac{kg}{cm^2}$$

$$f'c_{diseño} = 210 \frac{kg}{cm^2} \left(1 + \frac{12}{100} \right)$$

$$f'c_{diseño} = 235.20 \frac{kg}{cm^2}$$

Se ha considerado un factor de seguridad del 12% debido a la incertidumbre que pueda presentarse en la resistencia final de las probetas por correcciones adicionales de la relación agua/cemento y asentamiento.

- **Determinación de la cantidad de agua para la mezcla y su contenido de aire.**

Este dato es determinado en base a la tabla 11 considerando que estamos buscando diseñar un hormigón de 210kg/cm^2 , sin tomar en consideración la inclusión de aire. Al tratarse de un agregado con un tamaño máximo nominal de $\frac{3}{4}$ " o 19mm, sin aire incluido en la mezcla, debido a que se está diseñando un hormigón que no se verá expuesto a climas con temperaturas bajo cero grados, sin embargo, se estima que se tendrá un valor mínimo de 1%, se seleccionó 360lb/yard^3 y a este valor se le añadió un 10% de acuerdo a las recomendaciones del ACI, dando un total de 396lb/yard^3 siendo este igual a $234.94 \text{ litros/m}^3$.

- **Cantidad de agua neta** = $396 \text{lb/yard}^3 (234.94 \text{ lt/m}^3)$
- **Aire mínimo presente en la mezcla (Sin inclusión)** = $1\%/\text{m}^3$.

- **Relación agua/cemento (Estimación Inicial).**

Conforme a la tabla 13, proveniente de las recomendaciones del ACI, se definió a través de interpolación que para un hormigón con resistencia objetivo de

3345.33 psi (235.20kg/cm²) y sin inclusión de aire da como resultado una relación a/c igual a **0.642A/C**.

- **Cantidad en peso de Cemento.**

$$CM = \frac{w(\text{Cantidad de agua}) \text{ kg}}{A/C} \frac{kg}{m^3}$$

$$CM = \frac{234.94 \text{ kg}}{0.642 \text{ m}^3}$$

$$CM = 365.95 \frac{kg}{m^3}$$

- **Cantidad de grava y arena**

- **Peso unitario del hormigón (UH)**

$$UH = 10 * Gs * (100 - Abs) + CM * \left(1 - \frac{Gs}{Gc}\right) - w * (Gs - 1) \frac{kg}{m^3}$$

$$UH = 10 * 2.87 * (100 - 1.12) + 365.95 * \left(1 - \frac{2.87}{2.95}\right) - 234.94$$

$$* (2.87 - 1) \frac{kg}{m^3}$$

$$UH = 2408.44 \frac{kg}{m^3}$$

- **Cantidad de agregados en estado saturado superficialmente seco (SSS)**

En primera instancia, se realizará este procedimiento en función del peso de sus componentes para corregir los porcentajes de influencia posteriormente.

$$\text{Agregados(SSS)} = UH - w - CM$$

$$\text{Agregados(SSS)} = 2408.44 - 234.94 - 365.95 \frac{kg}{m^3}$$

$$\text{Agregados (SSS)} = 1807.55 \frac{kg}{m^3}$$

El valor presentado previamente, servirá como punto de comparación al determinar los pesos de cada agregado por separado en función de su volumen.

De acuerdo a la tabla 14 la cantidad de agregado grueso por yarda cúbica de mezcla es de $0.65 \text{ft}^3/\text{ft}^3$ el peso unitario compactado de la grava es de $1657.00 \text{kg}/\text{m}^3$, llevando cada uno de estos términos a unidades compatibles, el peso resultante es de $1077.05 \text{kg}/\text{m}^3$.

Finalmente, se convierte este valor a su peso en estado superficialmente seco por medio de la siguiente expresión:

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{SSS} = \text{Peso Agregado Grueso}_{\text{Varillado}} * (1 + \text{Abs}\%)$$

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{SSS} = 1077.05 * (1 + 0.0112) \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{SSS} = 1089.11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El peso del árido fino se determinará por medio de los volúmenes de cada componente teniendo como parámetro de partida el peso específico del agua ($1000 \text{kg}/\text{m}^3$):

$$\text{Volumen Agua} = \frac{234.94 \text{kg}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.235 \text{m}^3$$

$$\text{Volumen de Cemento} = \frac{365.95 \text{kg}}{3.15 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.116 \text{m}^3$$

$$\text{Volumen de Agregado Grueso} = \frac{1089.11 \text{kg}}{2.87 * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} = 0.379 \text{m}^3$$

$$\text{Volumen de Aire} = 1\% * 1.00 \text{m}^3 = 0.01 \text{m}^3$$

$$\text{Volumen Parcial} = 0.235 + 0.116 + 0.379 + 0.01 = 0.74 \text{m}^3$$

$$\text{Volumen de Agregado Fino} = 1.00 - 0.74 = 0.26\text{m}^3$$

Peso Agregado Fino_{SSS}

$$= (\text{Volumen de Agregado Fino}) * \gamma_h * \text{Densidad Agregado Fino}_{SSS}$$

$$\text{Peso Agregado Fino}_{SSS} = (0.26\text{m}^3) * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 2.82$$

$$\text{Peso Agregado Fino}_{SSS} = 733.20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Los agregados en estado superficialmente seco presentan el siguiente peso por metro cúbico:

$$\text{Agregados (SSS)} = 1089.11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} + 733.20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Agregados(SSS)} = 1822.31 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Este valor varía en 0.81% con relación a los 1807.55kg/m³ calculados previamente conforme a los pesos de cada componente; por lo cual, este se tomará en consideración para el resto de correcciones respectivas.

○ **Ajuste por contenido de humedad natural de los agregados**

▪ **Agregado Grueso**

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{SSS}(\text{Corregido}) = 1089.11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1 + 3.81\%}{1 + 1.12\%}$$

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{SSS}(\text{Corregido}) = 1118.09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w1(adicional) = 1118.09 \frac{kg}{m^3} - 1089.11 \frac{kg}{m^3}$$

$$w1(grueso - adicional) = 28.98 \frac{kg}{m^3}$$

- **Agregado Fino**

$$\text{Peso Agregado Fino}_{SSS}(\text{Corregido}) = 733.20 \frac{kg}{m^3} * \frac{1 + 3.10\%}{1 + 3.82\%}$$

$$\text{Peso Agregado Fino}_{SSS}(\text{Corregido}) = 728.12 \frac{kg}{m^3}$$

$$w2(fino - adicional) = 728.12 \frac{kg}{m^3} - 733.20 \frac{kg}{m^3}$$

$$w2(fino - adicional) = -5.08 \frac{kg}{m^3}$$

$$w(\text{Agua libre}) = 28.98 \frac{kg}{m^3} - 5.08 \frac{kg}{m^3}$$

$$w(\text{Agua libre}) = 23.90 \frac{kg}{m^3}$$

- **Cantidad de agua neta (Corregida)** = $234.94 \text{ lt/m}^3 - 23.90 \text{ lt/m}^3 = 211.04 \text{ lt/m}^3$

- **Agregados en condición seca**

- **Agregado Grueso**

Peso Agregado Grueso_{Seco}

$$= \text{Peso Agregado Grueso}_{SSS} * \left(\frac{1}{1 + \frac{\%Abs}{100}} \right)$$

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{Seco} = 1089.11 \frac{kg}{m^3} * \left(\frac{1}{1 + \frac{1.12}{100}} \right)$$

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{\text{Estado Natural}} = 1077.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Agregado Fino**

$$\text{Peso Agregado Fino}_{\text{Seco}} = \text{Peso Agregado Fino}_{\text{Seco}} * \left(\frac{1}{1 + \frac{\%Abs}{100}} \right)$$

$$\text{Peso Agregado Fino}_{\text{Seco}} = 733.20 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(\frac{1}{1 + \frac{3.82}{100}} \right)$$

$$\text{Peso Agregado Fino}_{\text{Seco}} = 706.22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Agregados en condición natural**

- **Agregado Grueso**

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{\text{Natural}}$$

$$= \text{Peso Agregado Grueso}_{\text{Seco}} * \left(1 + \frac{\%w}{100} \right)$$

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{\text{Natural}} = 1077.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(1 + \frac{3.81}{100} \right)$$

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{\text{Natural}} = 1118.09 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Agregado Fino**

$$\text{Peso Agregado Fino}_{\text{Natural}} = \text{Peso Agregado Fino}_{\text{Seco}} * \left(1 + \frac{\%w}{100} \right)$$

$$\text{Peso Agregado Fino}_{\text{Natural}} = 706.22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(1 + \frac{3.10}{100} \right)$$

$$\text{Peso Agregado Fino}_{\text{Natural}} = 728.11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.9. Resumen diseño de mezcla para hormigón de 210kg/cm²

A continuación, ver tabla 16, se presenta el resumen de la dosificación requerida para el diseño de la mezcla de 210kg/cm², la cual servirá como punto de partida para la corrección de la dosificación previo a la inclusión del aditivo:

Tabla 16. *Resumen de material requerido para el diseño de la mezcla*

Resumen de material para resistencia de 210 (kg/cm ²)			
Material	kg/m ³	Peso en kg/m ³ para 39 especímenes	Unidad
Agua	211.04	43.634	lt
Cemento	365.95	75.662	kg
Árido Fino	733.2	151.594	kg
Árido Grueso	1089.11	225.180	kg

(Vivar, Leonardo, 2024)

3.10. Determinación de las propiedades del hormigón fresco y corrección de la dosificación

Previo a definir la dosificación que servirá como parámetro de partida, se procederá a realizar pruebas iniciales con 3 cilindros, para delimitar correcciones con relación al peso específico del concreto y su asentamiento.

3.10.1. Peso unitario y contenido de aire en una mezcla de hormigón fresco

La normativa (ASTM C138, 2024) establece los criterios para determinar el peso unitario y contenido de aire de una masa de concreto. El peso unitario es calculado por medio de la siguiente expresión:

$$P_{unitario} = \frac{Mt - Mr}{Vt}$$

Dónde:

M_t : Peso de la muestra más recipiente

M_r : Masa del recipiente

V_t : Volumen de la muestra más recipiente

Adicionalmente, es posible calcular el contenido de aire retenido en la mezcla en base a los vacíos que lo conforman, ello se lo determina a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Contenido}_{\text{Aire}} = \frac{D_{\text{Concreto}} - P_{\text{unitario}}}{D_{\text{Concreto}}} * 100\%$$

Dónde:

D_{Concreto} : Densidad del concreto incluyendo aire libre

P_{unitario} : Peso unitario del concreto

La densidad del concreto se la puede establecer en base a la masa que poseen todos los agregados, agua y elementos cementicios; mientras que, su volumen representa la misma masa, pero dividida entre su gravedad específica en la condición de diseño, que para el presente estudio se encuentra en estado superficialmente seco (Ingeniería Civil en el Salvador, 2024).

3.10.2. Asentamiento de la mezcla

Conforme a la normativa (ASTM C143, 2003) establece los procedimientos para la determinación del asentamiento en el concreto. Para este efecto se empleará un cono con altura de 30cm, base mayor de 20cm y base menor de 10cm. El nivel de precisión y de desviación de los resultados deberán hallarse entre los provistos en la siguiente tabla 17:

Tabla 17. Rangos de aceptación y desviación estándar para asentamientos

Asentamiento y tipo de medida	STD(1s)	Criterio de aceptación de dos resultados
Un solo operador		
30mm	6mm	17mm
85mm	9mm	25mm
160mm	10mm	28mm
Multi laboratorio		
30mm	7mm	20mm
85mm	10mm	28mm
160mm	13mm	37mm

Tomado de: (ASTM C143, 2003)

3.10.3. Modificaciones ejecutadas en la mezcla

Se elaboraron 3 cilindros para comprobar el comportamiento de la mezcla. Se emplearon las siguientes cantidades, ver tabla 18:

Tabla 18. Resumen de material requerido para calibración de la dosificación a emplear

Resumen de material para resistencia de 210 (kg/cm²)			
Material	kg/m ³	Peso en kg/m ³ para 3 especímenes	Unidad
Agua	211.04	4.475	lt
Cemento	365.95	7.760	kg
Árido Fino	733.2	15.548	kg
Árido Grueso	1089.11	23.095	kg

(Vivar, Leonardo, 2024)

Se procedió a determinar la resistencia adquirida por los especímenes y sus respectivas propiedades de asentamiento, contenido de aire, temperatura y peso unitario. Los resultados de la resistencia alcanzada se muestran en la tabla 19 a continuación:

Tabla 19. Resistencias obtenidas de probetas de prueba

Identificación	Resistencia Esperada	Diámetro 1	Diámetro 2	Altura 1	Altura 2	Masa	Carga Máxima	Tipo de falla	Resistencia
-	kg/cm ²	mm	mm	mm	mm	kg	kN		kg/cm ²
Pro-01	210	149.72	150.5	305	305	12.3	387.33	Cónica	218.863
Pro-02	210	150.63	151.1	306	305	12.35	413.7	Cónica	229.429
Pro-03	210	149.62	150.12	306	305	12.3	420.1	Cónica	232.141

(Vivar, Leonardo, 2024)

La resistencia promedio de los cilindros resultante fue de: 229.48kg/cm² la cual se encuentra dentro del rango esperado igual a 235.20kg/cm² con un 12% de factor de seguridad e inferior al máximo esperado dado por las recomendaciones del (ACI PRC-211.1-22, 2022) 294.37kg/cm², para análisis en los cuales no se dispone como mínimo de 15 probetas. El módulo de elasticidad de estos ensayos permitió encontrar la siguiente expresión para su cálculo: $E_c =$

$10154\sqrt{f'_c}(kg/cm^2)$, siendo coincidente con la expresión propuesta por (Londoño & Wilson, 2019) $E_c = 10173\sqrt{f'_c}(kg/cm^2)$.

Al realizar el estudio de asentamientos por medio del cono de Abrahams, el revenimiento obtenido fue de 9.00cm y 10.00cm de los dos ensayos ejecutados, los cuales se hayan dentro del rango admitido con los 8cm esperados con una desviación estándar de 2.0cm para muestras múltiples y con una temperatura de 26.4°C y 26.8°C.

El resultado del ensayo de peso unitario y contenido de aire en la mezcla de hormigón fresco otorgó como resultado, ver tabla 20:

Tabla 20. Resultados peso unitario y contenido de aire

Elemento	Cantidad	Unidad
Recipiente (Mr)	2.675	kg
Recipiente + Hormigón fresco (Mt)	4.929	kg
Volumen (Vt)	0.001	m ³
Peso Unitario (Punitario)	2254.00	kg/m ³
Contenido de aire	1.04%	%

(Vivar, Leonardo, 2024)

El peso unitario calculado es de 2408.44kg/m³ y el peso unitario experimental de 2254.00kg/m³ por lo que se aplicará un factor de corrección de 1.07 (94%) al componente de cemento y agua de la mezcla con la finalidad de ajustar la dosificación. Por otro lado, el contenido de aire es del 1.04% el cual representa un 4% de diferencia con relación al valor teórico.

A continuación, se presenta el rediseño de la mezcla con los resultados obtenidos previamente:

- **Cantidad de grava y arena**
 - **Peso unitario del hormigón (UH)**

$$UH = 10 * Gs * (100 - Abs) + CM * \left(1 - \frac{Gs}{Gc}\right) - w * (Gs - 1) \frac{kg}{m^3}$$

$$UH = 10 * 2.87 * (100 - 1.12) + 391.57 * \left(1 - \frac{2.87}{2.95}\right) - 251.39$$

$$* (2.87 - 1) \frac{kg}{m^3}$$

$$UH = 2378.38 \frac{kg}{m^3}$$

▪ **Cantidad de agregados en estado saturado superficialmente seco (SSS)**

En primera instancia, se realizará este procedimiento en función del peso de sus componentes para corregir los porcentajes de influencia posteriormente.

$$\mathbf{Agregados(SSS) = UH - w - CM}$$

$$Agregados(SSS) = 2378.38 - 251.39 - 391.57 \frac{kg}{m^3}$$

$$Agregados (SSS) = 1735.42 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mathbf{Peso Agregado Grueso_{SSS} = Peso Agregado Grueso_{Varillado} * (1 + Abs\%)}$$

$$Peso Agregado Grueso_{SSS} = 1077.05 * (1 + 0.0112) \frac{kg}{m^3}$$

$$Peso Agregado Grueso_{SSS} = 1089.11 \frac{kg}{m^3}$$

El peso del árido fino se determinará por medio de los volúmenes de cada componente teniendo como parámetro de partida el peso específico del agua (1000kg/m³):

$$Volumen Agua = \frac{251.39kg}{1000 \frac{kg}{m^3}} = 0.251m^3$$

$$Volumen de Cemento = \frac{391.57kg}{3.15 * 1000 \frac{kg}{m^3}} = 0.124m^3$$

$$Volumen de Agregado Grueso = \frac{1089.11kg}{2.87 * 1000 \frac{kg}{m^3}} = 0.379m^3$$

$$Volumen de Aire = 1\% * 1.00m^3 = 0.01m^3$$

$$\mathbf{Volumen\ Parcial = 0.251 + 0.124 + 0.379 + 0.01 = 0.764m^3}$$

$$Volumen\ de\ Agregado\ Fino = 1.00 - 0.76 = 0.236m^3$$

Peso Agregado Fino_{SSS}

$$= (Volumen\ de\ Agregado\ Fino) * \gamma_h * Densidad\ Agregado\ Fino_{SSS}$$

$$Peso\ Agregado\ Fino_{SSS} = (0.236m^3) * 1000 \frac{kg}{m^3} * 2.82$$

$$Peso\ Agregado\ Fino_{SSS} = 665.52 \frac{kg}{m^3}$$

Los agregados en estado superficialmente seco presentan el siguiente peso por metro cúbico:

$$Agregados\ (SSS) = 1089.11 \frac{kg}{m^3} + 665.52 \frac{kg}{m^3}$$

$$Agregados(SSS) = 1754.63 \frac{kg}{m^3}$$

○ **Ajuste por contenido de humedad natural de los agregados**

▪ **Agregado Grueso**

$$Peso\ Agregado\ Grueso_{SSS}(Corregido) = 1089.11 \frac{kg}{m^3} * \frac{1 + 3.81\%}{1 + 1.12\%}$$

$$Peso\ Agregado\ Grueso_{SSS}(Corregido) = 1118.09 \frac{kg}{m^3}$$

$$w1(adicional) = 1118.09 \frac{kg}{m^3} - 1089.11 \frac{kg}{m^3}$$

$$w1(grueso - adicional) = 28.98 \frac{kg}{m^3}$$

- **Agregado Fino**

$$\text{Peso Agregado Fino}_{\text{SSS}}(\text{Corregido}) = 665.52 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \frac{1 + 3.10\%}{1 + 3.82\%}$$

$$\text{Peso Agregado Fino}_{\text{SSS}}(\text{Corregido}) = 660.91 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w_2(\text{fino} - \text{adicional}) = 660.91 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 665.52 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w_2(\text{fino} - \text{adicional}) = -4.61 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w(\text{Agua libre}) = 28.98 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} - 4.61 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$w(\text{Agua libre}) = 24.37 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Cantidad de agua neta (Corregida)** = $251.39 \text{ lt/m}^3 - 24.37 \text{ lt/m}^3 = 227.02 \text{ lt/m}^3$

- **Agregados en condición seca**

- **Agregado Grueso**

Peso Agregado Grueso_{Seco}

$$= \text{Peso Agregado Grueso}_{\text{SSS}} * \left(\frac{1}{1 + \frac{\%Abs}{100}} \right)$$

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{\text{Seco}} = 1089.11 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * \left(\frac{1}{1 + \frac{1.12}{100}} \right)$$

$$\text{Peso Agregado Grueso}_{\text{Estado Natural}} = 1077.05 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- **Agregado Fino**

$$\mathbf{Peso\ Agregado\ Fino}_{Seco} = \mathbf{Peso\ Agregado\ Fino}_{Seco} * \left(\frac{1}{1 + \frac{\%Abs}{100}} \right)$$

$$\mathbf{Peso\ Agregado\ Fino}_{Seco} = 665.52 \frac{kg}{m^3} * \left(\frac{1}{1 + \frac{3.82}{100}} \right)$$

$$\mathbf{Peso\ Agregado\ Fino}_{Seco} = 641.04 \frac{kg}{m^3}$$

- **Agregados en condición natural**

- **Agregado Grueso**

$$\mathbf{Peso\ Agregado\ Grueso}_{Natural}$$

$$= \mathbf{Peso\ Agregado\ Grueso}_{Seco} * \left(1 + \frac{\%w}{100} \right)$$

$$\mathbf{Peso\ Agregado\ Grueso}_{Natural} = 1077.05 \frac{kg}{m^3} * \left(1 + \frac{3.81}{100} \right)$$

$$\mathbf{Peso\ Agregado\ Grueso}_{Natural} = 1118.09 \frac{kg}{m^3}$$

- **Agregado Fino**

$$\mathbf{Peso\ Agregado\ Fino}_{Natural} = \mathbf{Peso\ Agregado\ Fino}_{Seco} * \left(1 + \frac{\%w}{100} \right)$$

$$\mathbf{Peso\ Agregado\ Fino}_{Natural} = 665.52 \frac{kg}{m^3} * \left(1 + \frac{3.10}{100} \right)$$

$$\mathbf{Peso\ Agregado\ Fino}_{Natural} = 686.15 \frac{kg}{m^3}$$

Tabla 21. Resumen de material resultando de la mezcla corregida conforme a su peso unitario

Resumen de material para resistencia de 210 (kg/cm²)			
Material	kg/m³	Peso en kg/m³ para 39 especímenes	Unidad
Agua	227.02	46.938	lt
Cemento	391.57	80.959	kg
Árido Fino	665.52	137.601	kg
Árido Grueso	1089.11	225.180	kg

(Vivar, Leonardo, 2024)

Finalmente se procede a elaborar la mezcla y revisar el peso unitario resultante. El resumen de resultados se presenta en la tabla 22 a continuación:

Tabla 22. Resultados peso unitario y contenido de aire del ensayo número 2

Elemento	Cantidad	Unidad
Recipiente (Mr)	2.675	kg
Recipiente + Hormigón fresco (Mt)	5.049	kg
Volumen (Vt)	0.001	m ³
Peso Unitario (Punitario)	2374.00	kg/m ³
Contenido de aire	1.08%	%

(Vivar, Leonardo, 2024)

El contenido de aire de la mezcla recalculada se encuentra en un 8% sobre el establecido inicialmente, adicionalmente el peso unitario del ensayo es de 2374kg/m³ el cual representa un 99% con relación al estimado en el cálculo de 2378.38kg/m³. Por esta razón, se consideró realizar un nuevo rediseño.

3.11. Dosificación de la mezcla incluyendo el reciclado de adoquín.

Se ha considerado implementar 3 porcentajes en la dosificación final los cuales son: 2%, 3% y 5%, cuyos pesos de dosificación se indican en las tablas 23, 24 y 25. Es importantes destacar,

que estos porcentajes fueron seleccionados considerando la incertidumbre que se tiene del material, caracterizada en base a su granulometría, humedad y peso específico, sin tomar en consideración la variabilidad en su resistencia de acuerdo al tipo de uso destinado del adoquín; a más de ello se establecieron 3 franjas en las cuales se observó el comportamiento de las probetas en términos de resistencia para un 2%, 8% , 12% y 15% de inclusión, con 2 especímenes ensayados por porcentaje, cuyos resultados demostraron que entre el 2% y 8% se alcanzan resistencias 223.40kg/cm² a 200.12kg/cm²; pero, al reemplazar un 12% de la cantidad de arena con adoquín, la resistencia a la compresión del material se reduce a 136.30kg/cm². Finalmente, para el 15% la resistencia tiene una reducción estrepitosa alcanzando 84.22kg/cm², ver figura 8.

Figura 8. Curva resistencia característica vs Porcentaje de Inclusión de Adoquín

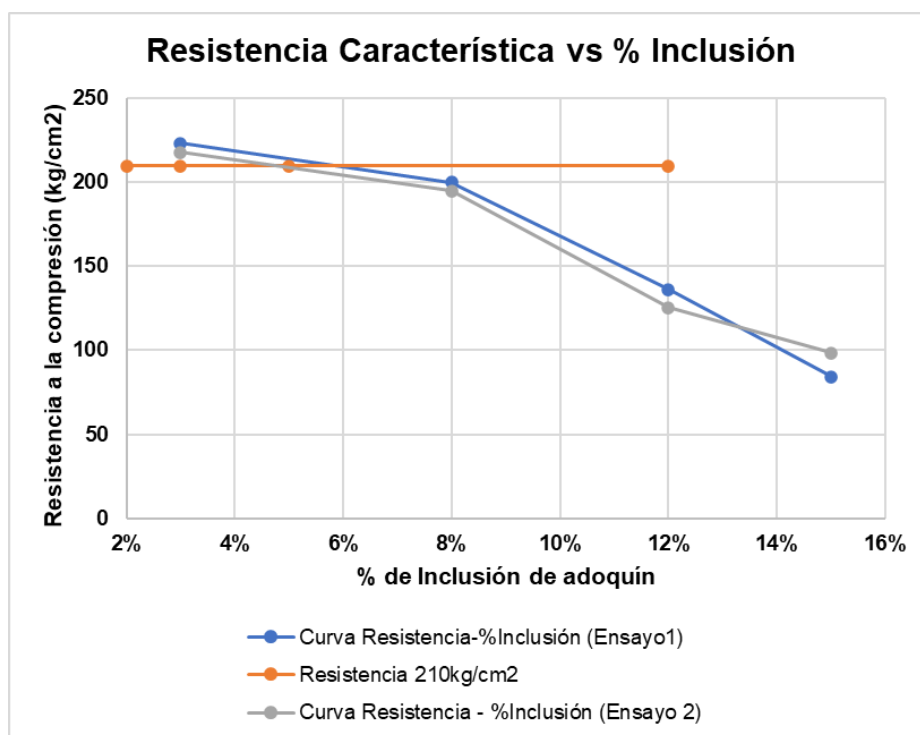


Tabla 23. Cantidad de material requerido para diseño de hormigón 210kg/cm² con 2% de adoquín reciclado

Resumen de material para resistencia de 210 (kg/cm²) – 2% de Reciclado de Adoquín			
Material	kg/m³	Peso en kg/m³ para 13 especímenes	Unidad
Agua	227.02	15.646	lt
Cemento	391.57	26.986	kg
Árido Fino	652.21	44.949	kg
Árido Grueso	1089.11	75.060	kg
Reciclado de Adoquín	13.31	0.917	kg

(Vivar, Leonardo, 2024)

Tabla 24. Cantidad de material requerido para diseño de hormigón 210kg/cm² con 3% de adoquín reciclado

Resumen de material para resistencia de 210 (kg/cm²) – 3% de Reciclado de Adoquín			
Material	kg/m³	Peso en kg/m³ para 13 especímenes	Unidad
Agua	227.02	15.646	lt
Cemento	391.57	26.986	kg
Árido Fino	645.55	44.491	kg
Árido Grueso	1089.11	75.060	kg
Reciclado de Adoquín	19.97	1.376	kg

(Vivar, Leonardo, 2024)

Tabla 25. Cantidad de material requerido para diseño de hormigón 210kg/cm² con 5% de adoquín reciclado

Resumen de material para resistencia de 210 (kg/cm²) – 5% de Reciclado de Adoquín			
Material	kg/m³	Peso en kg/m³ para 13 especímenes	Unidad
Agua	227.02	15.646	lt
Cemento	391.57	26.986	kg
Árido Fino	632.24	43.573	kg
Árido Grueso	1089.11	75.060	kg
Reciclado de Adoquín	33.28	2.293	kg

(Vivar, Leonardo, 2024)

3.12. Ensayos de hormigón fresco

Se procede a caracterizar el comportamiento del hormigón fresco en cada una de las mezclas, con la inclusión del adoquín reciclado.

3.12.1. Asentamiento

Conforme a la normativa (ASTM C143, 2003) se procedió a determinar el comportamiento de la mezcla de concreto cuando se incluyen las distintas adiciones de adoquín reciclado. Destacando que el asentamiento de diseño de la dosificación sin incluir los aditivos fue de 8 ± 2 cm, se obtuvieron los siguientes revenimientos, ver tabla 26:

Tabla 26. *Asentamientos obtenidos para diseño de hormigón 210kg/cm^2 con 2%,3%,5% de adoquín reciclado*

Toma	Adoquín Reciclado	Asentamiento Medido
	%	cm
1	2.00	8.00
2	2.00	8.50
1	3.00	7.00
2	3.00	7.30
1	5.00	5.60
2	5.00	6.00

(Vivar, Leonardo, 2024)

3.12.2. Contenido de Aire

La normativa (ASTM C138, 2024) establece el procedimiento para determinar el contenido de aire en la mezcla. En este ensayo se incluye el peso unitario de cada muestra, cuyos resultados se indican a continuación, ver tabla 27:

Tabla 27. *Peso unitario y contenido de aire para diseño de hormigón 210kg/cm² con 2%,3%,5% de adoquín reciclado*

Toma	Adoquín Reciclado	Peso Unitario	Contenido de Aire
	%	kg/m ³	%
1	2	2412.00	1.07
2	2	2398.00	1.08
1	3	2436.00	1.05
2	3	2410.00	1.04
1	5	2496.00	1.02
2	5	2428.00	1.05

(Vivar, Leonardo, 2024)

3.12.3. Temperatura del hormigón fresco

Este procedimiento se lo llevó a cabo por medio de la normativa (ASTM C1064, 2022). Se debe medir cuando la muestra se halle sobre un material no absorbente, cubriendo un total de 75mm del sensor del termómetro en cada una de sus direcciones y se lo deja reposar por un tiempo promedio de 2 minutos, hasta conseguir una temperatura constante con un tiempo máximo de 5 minutos para completar cada uno de los ensayos. Los resultados obtenidos se muestran a continuación, ver tabla 28:

Tabla 28. *Temperatura para diseño de hormigón 210kg/cm² con 2%,3%,5% de adoquín reciclado*

Toma	Adoquín Reciclado	Temperatura
	%	°C
1	2.00	26.45
2	2.00	26.52
1	3.00	26.32
2	3.00	26.41
1	5.00	26.68
2	5.00	26.72

(Vivar, Leonardo, 2024)

CAPITULO IV

En este capítulo se discutirá como se obtuvieron los resultados de los módulos de elasticidad característicos para cada una de las inclusiones de adoquín reciclado, partiendo de las resistencias máximas del ensayo de compresión simple y realizando un análisis minucioso de los módulos tanto a nivel teórico como experimental.

4.1. Determinación de la resistencia característica del concreto.

En primera instancia se procede a determinar la resistencia máxima de las probetas de concreto por medio de la normativa (ASTMC39/C39M, 2018) para cada uno de los porcentajes de adoquín reciclado y a los 28 días de fraguado, en dónde se espera que estos hayan alcanzado un 95% de su resistencia máxima. Las principales características de los especímenes que solicita este documento son:

- Altura.
- Diámetro.
- Peso.
- Altura.
- Tipo de Falla.
- Carga Máxima.
- Resistencia.

Los resultados de resistencia, características geométricas y tipo de falla, se indican en las tablas 29, 30 y 31, a continuación:

Tabla 29. Resistencia de probetas a los 28 días con 2% de adoquín reciclado

Resistencia de probetas con 2% de inclusión de adoquín reciclado								
Identificación	Resistencia Esperada kg/cm ²	Diámetro 1 mm	Diámetro 2 mm	Altura 1 mm	Altura 2 mm	Masa kg	Tipo de falla	Resistencia kg/cm ²
P01-R	210	149.80	149.8	305	305	12.80	Cónica	218.86
P02-R	210	150.50	150.5	306	305	12.50	Cónica	223.91
P03-R	210	150.10	150.12	306	305	12.20	Cónica	217.16
P01	210	150.02	149.99	300	298	12.70	Cónica	216.10
P02	210	150.02	149.99	300	298	12.90	Cónica	217.73
P03	210	150.02	149.99	300	298	12.60	Cónica	215.39
P04	210	150.02	149.99	300	298	12.63	Cónica	212.94
P05	210	150.02	149.99	300	298	12.58	Cónica	208.52
P06	210	150.02	149.99	300	298	12.53	Cónica	217.94
P07	210	150.02	149.99	300	298	12.48	Cónica	214.28
P08	210	150.02	149.99	300	298	12.43	Cónica	218.86
P09	210	150.02	149.99	300	298	12.38	Cónica	223.91
P10	210	150.02	149.99	300	298	12.33	Cónica	217.16

(Vivar, Leonardo, 2024)

Tabla 30. Resistencia de probetas a los 28 días con 3% de adoquín reciclado

Resistencia de probetas con 3% de inclusión de adoquín reciclado								
Identificación	Resistencia Esperada kg/cm ²	Diámetro 1 mm	Diámetro 2 mm	Altura 1 mm	Altura 2 mm	Masa kg	Tipo de falla	Resistencia kg/cm ²
P10-R	210	149.85	149.9	301	302	12.80	Cónica	210.95
P11-R	210	150.12	150.02	303	302	12.50	Cónica	217.20
P12-R	210	150.10	150.01	302	302	12.20	Cónica	218.98
P11	210	149.90	150.03	299	301	12.40	Cónica	217.62
P12	210	149.90	150.03	299	301	12.90	Cónica	213.69
P13	210	149.90	150.03	299	301	12.30	Cónica	215.43
P14	210	149.90	150.03	299	301	12.43	Cónica	214.67
P15	210	149.90	150.03	299	301	12.38	Cónica	210.95

Resistencia de probetas con 3% de inclusión de adoquín reciclado								
Identificación	Resistencia Esperada kg/cm ²	Diámetro 1 mm	Diámetro 2 mm	Altura 1 mm	Altura 2 mm	Masa kg	Tipo de falla	Resistencia kg/cm ²
-								
P16	210	149.90	150.03	299	301	12.33	Cónica	217.2
P17	210	149.90	150.03	299	301	12.28	Cónica	218.98
P18	210	149.90	150.03	299	301	12.23	Cónica	217.62
P19	210	149.90	150.03	299	301	12.18	Cónica	217.12
P20	210	149.90	150.03	299	301	12.13	Cónica	211.30

(Vivar, Leonardo, 2024)

Tabla 31. Resistencia de probetas a los 28 días con 5% de adoquín reciclado

Resistencia de probetas con 5% de inclusión de adoquín reciclado								
Identificación	Resistencia Esperada kg/cm ²	Diámetro 1 mm	Diámetro 2 mm	Altura 1 mm	Altura 2 mm	Masa kg	Tipo de falla	Resistencia kg/cm ²
-								
P20-R	210	150.00	149.8	305	305	12.8	Cónica	210.94
P21-R	210	150.02	149.95	306	305	12.5	Cónica	211.49
P22-R	210	150.10	149.99	306	305	12.2	Cónica	212.22
P21	210	150.02	149.99	300	298	12.5	Cónica	210.58
P22	210	150.02	149.99	300	298	12.1	Cónica	212.87
P23	210	150.02	149.99	300	298	12.6	Cónica	213.86
P24	210	150.02	149.99	300	298	12.5	Cónica	213.79
P25	210	149.90	150.03	300	298	12.55	Cónica	206.82
P26	210	149.90	150.03	300	298	12.6	Cónica	215.94
P27	210	149.90	150.03	300	298	12.65	Cónica	215.49
P28	210	149.90	150.03	300	298	12.7	Cónica	216.22
P29	210	150.02	149.99	300	298	12.75	Cónica	210.35
P30	210	149.90	150.03	300	298	12.8	Cónica	211.12

(Vivar, Leonardo, 2024)

Los resultados presentados en las tablas precedentes, a pesar de ser consistentes, poseen cierto nivel de variabilidad, siendo necesario hallar el grado de confiabilidad de los mismo por medio de la obtención de la resistencia característica del concreto. En base a la normativa (ACI214.4R-03, 2003).

4.1.1. Método del factor de aproximación

Este procedimiento nace del principio de que los ensayos con testigos tienden a sobre estimar la variabilidad de la resistencia del hormigón puesto en obra. Se emplea un factor K que analiza la incertidumbre de los resultados a través de la media y la desviación estándar, que se enfoca en calcular el décimo percentil de fuerza con un nivel de tolerancia inferior del 10% a través de la ecuación (ACI214.4R-03, 2003), que se presenta a continuación:

$$f_{0.10} = \bar{f}_c - K S_c$$

Dónde:

f_c : Es la resistencia promedio de todos los datos muestrales.

S_c : Desviación estándar.

K : Valor de incertidumbre y nivel de confianza, ver tabla 32.

Tabla 32. Nivel de confianza de la muestra analizada

n	Nivel de confianza		
	75%	90%	95%
3	2.50	4.26	6.16
4	2.13	3.19	4.16
5	1.96	2.74	3.41
6	1.86	2.49	3.01
8	1.74	2.22	2.58
10	1.67	2.06	2.36
12	1.62	1.97	2.21
15	1.58	1.87	2.07
18	1.54	1.80	1.97
21	1.52	1.75	1.90
24	1.50	1.71	1.85
27	1.49	1.68	1.81
30	1.48	1.66	1.78
35	1.46	1.62	1.73
40	1.44	1.60	1.70

Tomado de (ACI214.4R-03, 2003)

De acuerdo a (ACI214.4R-03, 2003), debido a que la ecuación de resistencia característica que toma en consideración el percentil del 10% no toma en consideración la incertidumbre inducida por los factores de corrección de fuerza y no se reduce a medida que el número de especímenes se incrementa se debe modificar por medio de un factor “Z” a través de una distribución normal estándar a través de la siguiente ecuación:

$$f'_{c_{eq}} = \bar{f}_c - \sqrt{(K S_c)^2 + (Z S_a)^2}$$

Dónde:

f_c : Es la resistencia promedio de todos los datos muestrales.

S_c : Desviación estándar.

K: Valor de incertidumbre y nivel de confianza.

$$S_a = \bar{f}_c \sqrt{(V_{l/d})^2 + (V_{dia})^2 + (V_{mc})^2 + (V_d)^2}$$

S_a: Desviación estándar asociada a los factores de corrección de fuerza, ver tabla 33 y 34.

Tabla 33. Nivel de confianza de la muestra analizada asociada a los factores de corrección de fuerza

Nivel de Confianza	Z
75	0.67
90	1.28
95	1.64

Tomado de (ACI214.4R-03, 2003)

Tabla 34. Precisión y magnitud de los factores de corrección de fuerzas equivalentes.

Factor	Valor medio	Coefficiente de variación V, %
F_{l/d}: Ratio		
Recibido	1-(0.130-afcore) (2-1/d) ^2	2.5(2-1/d) ^2
Humedad 48h	1-(0.117-afcore) (2-1/d) ^2	2.5(2-1/d) ^2
Secado al aire	1-(0.144-afcore) (2-1/d) ^2	2.5(2-1/d) ^2
F_{dia}: Diámetro del núcleo		
50mm	1.06	11.80
100mm	1.00	0.00
150mm	0.98	1.80
F_{mc}: Contenido de humedad de la probeta		
Recibido	1.00	2.50
Humedad 48h	1.09	2.50
Secado al aire	0.96	2.50
F_d: Daño por perforación	1.06	2.50

Tomado de (ACI214.4R-03, 2003)

4.1.2. Método de la aproximación alternativa

Este método se basa en que la variabilidad de la resistencia promedio que el hormigón vertido en sitio difiere en cuanto a la resistencia de los testigos obtenidos de diferentes zonas de los elementos estructurales, permitiendo que se pueda estimar la resistencia promedio en base a probetas obtenidas en el sitio más un límite inferior a este. Para este fin, la resistencia característica es posible estimarla en dos pasos: en primera instancia el límite inferior se determina en base al promedio de la resistencia de cada testigo y a partir de este punto se halla el percentil 10 de la probabilidad equivalente a la resistencia específica (ACI214.4R-03, 2003).

Para hallar el límite inferior se empleará la siguiente expresión:

$$\overline{f_{cCL}} = \overline{f_c} - \sqrt{\frac{(TSc)^2}{n} + (ZSa)^2}$$

Dónde:

$\overline{f_c}$: Es la resistencia promedio de todos los datos muestrales.

S_c : Desviación estándar.

T : Factor obtenido de una distribución t-student con n-1 grados de libertad.

Los niveles de confianza se pueden aproximar de manera conservadora por medio de la tabla 35 a continuación:

Tabla 35. Factores C

Estructura compuesta de	Un miembro	Varios Miembros
Un lote de concreto	0.91	0.89
Varios lotes de concreto		
Conformado en sitio	0.85	0.83
Prefabricado	0.88	0.87

Tomado de (ACI214.4R-03, 2003)

Sin embargo, al ser un factor muy sensible a la resistencia del concreto en sitio, este se tiene que corregir por medio de un factor a una resistencia equivalente a través de la siguiente expresión:

$$f'_{c_{eq}} = C \overline{f_c}$$

Dónde:

$\overline{f_{c_{eq}}}$: Resistencia equivalente

De acuerdo a (ACI214.4R-03, 2003), se está asumiendo una distribución normal, por lo que el factor C va a depender del número de lotes, número de miembros y tipo de construcción. Para llegar a un percentil del 13% se recomienda utilizar valores de 0.85 para hormigón fundido en sitio, siempre y cuando se posean construcción varios lotes de concreto y de 0.90 para construcciones prefabricadas o miembros con un solo lote de concreto.

4.1.3. Método de José Corral

A través de esta metodología lo que se busca es determinar las propiedades estadísticas de un universo muestral y a través de un coeficiente de variación establecer la resistencia característica. Para espacios muestrales inferiores a 30 unidades, se ingresará un coeficiente de corrección proveniente de una distribución t-student y a continuación se definirá que porcentaje de muestras tendrán una resistencia inferior a la media, en general se puede tomar el 16% como un valor aceptable; sin embargo, para el presente estudio se utilizará el 5% (Corral, 1999). La ecuación que se empleará es la siguiente:

$$f'_{cr} = \overline{f_m}(1 - \lambda\delta)$$

Dónde:

$\overline{f_m}$: Resistencia promedio.

λ : Factor que depende del número de muestras.

δ : Factor proveniente de la distribución t-student.

Los valores de lambda y delta se obtienen de las tablas 36, 37 a continuación:

Tabla 36. *Valores de lambda*

Tamaño de la muestra	10	15	20	25	30 o más
Lamda	1.08	1.07	1.06	1.05	1.00

Tomado de: (Corral, 1999)

Tabla 37. Factores omegas para distribución t-student

z	omega/2	z	omega/2
0.1	0.0398	1.6	0.4452
0.2	0.0793	1.7	0.4554
0.3	0.1179	1.8	0.4641
0.4	0.1554	1.9	0.4713
0.5	0.1915	2	0.4772
0.6	0.2257	2.1	0.4821
0.7	0.258	2.2	0.4861
0.8	0.2881	2.3	0.4893
0.9	0.3159	2.4	0.4918
1	0.3413	2.5	0.4938
1.1	0.3643	2.6	0.4953
1.2	0.3849	2.7	0.4965
1.3	0.4032	2.8	0.4974
1.4	0.4192	2.9	0.4981
1.5	0.4332	3	0.4987

Tomado de: (Corral, 1999)

Aplicando las metodologías precedentes a las mezclas conformadas por las 3 inclusiones de adoquín reciclado se obtiene:

4.1.4. Resistencia característica de concreto con 2% de adoquín reciclado

4.1.4.1. Método del factor de aproximación

$$\bar{f}_c = 217.14 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_a = \bar{f}_c \sqrt{(V_{l/d})^2 + (V_{dia})^2 + (V_{mc})^2 + (V_d)^2}$$

$$S_a = 217.14 \sqrt{(0.00)^2 + (1.80\%)^2 + (2.50\%)^2 + (2.50\%)^2} = 8.62 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_{c_{eq}} = \bar{f}_c - \sqrt{(KSc)^2 + (ZSa)^2}$$

$$f'_{ceq} = 217.14 - \sqrt{(1.67 * 4.11)^2 + (0.67 * 8.62)^2} = 208.17 \text{kg/cm}^2$$

4.1.4.2. Método de la aproximación alternativa

$$\bar{f}_{c_{CL}} = \bar{f}_c - \sqrt{\frac{(TSc)^2}{n} + (ZSa)^2}$$

$$\bar{f}_{c_{CL}} = 217.14 - \sqrt{\frac{(1.62 * 4.11)^2}{13} + (0.67 * 8.62)^2} = 211.08 \text{kg/cm}^2$$

4.1.5. Método de José Corral

Tabla 38. Estadística descriptiva

Estadística Descriptiva: Muestra con 2% de inclusión de adoquín reciclado	
Media	217.14
Error típico	1.14
Mediana	217.16
Moda	218.86
Desviación estándar	4.11
Varianza de la muestra	16.90
Curtosis	0.96
Coficiente de asimetría	-0.16
Rango	15.39
Mínimo	208.52
Máximo	223.91
Suma	2822.76
Cuenta	13.00
Nivel de confianza(95.0%)	2.48

(Vivar, Leonardo, 2024)

$$f'_{cr} = \bar{f}_m(1 - \lambda\delta)$$

$$V = \frac{Sc}{fm}$$

$$V = \frac{4.11}{217.14} = 0.019$$

$$f'_{cr} = 217.16(1 - 0.019) = 213.03 \text{ kg/cm}^2$$

En la tabla 39 a continuación, se presenta un resumen con los resultados de los tres métodos propuestos:

Tabla 39. Resistencia característica de concreto con 2% de inclusión de adoquín reciclado.

Método	Resistencia característica(kg/cm2)
Factor de aproximación	208.17
Aproximación alternativa	211.08
José Corral	213.03
Promedio	210.76

(Vivar, Leonardo, 2024)

4.1.6. Resistencia característica de concreto con 3% de adoquín reciclado

4.1.6.1. Método del factor de aproximación

$$\bar{f}_c = 215.52 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_a = \bar{f}_c \sqrt{(V_{l/d})^2 + (V_{dia})^2 + (V_{mc})^2 + (V_d)^2}$$

$$S_a = 215.52 \sqrt{(0.00)^2 + (1.80\%)^2 + (2.50\%)^2 + (2.50\%)^2} = 8.55 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_{c_{eq}} = \bar{f}_c - \sqrt{(KSc)^2 + (ZSa)^2}$$

$$f'_{c_{eq}} = 215.52 - \sqrt{(1.67 * 2.95)^2 + (0.67 * 8.62)^2} = 207.93 \text{ kg/cm}^2$$

4.1.6.2. Método de la aproximación alternativa

$$\bar{f}_{c_{CL}} = \bar{f}_c - \sqrt{\frac{(TSc)^2}{n} + (ZSa)^2}$$

$$\bar{f}_{c_{CL}} = 215.52 - \sqrt{\frac{(1.62 * 2.95)^2}{13} + (0.67 * 8.55)^2} = 209.64 \text{kg/cm}^2$$

4.1.7. Método de José Corral

Tabla 40. Estadística descriptiva

Estadística Descriptiva: Muestra con 3% de inclusión de adoquín reciclado	
Media	215.52
Error típico	0.82
Mediana	217.12
Moda	210.95
Desviación estándar	2.95
Varianza de la muestra	8.72
Curtosis	-1.12
Coefficiente de asimetría	-0.60
Rango	8.03
Mínimo	210.95
Máximo	218.98
Suma	2801.71
Cuenta	13.00
Nivel de confianza(95.0%)	1.78

(Vivar, Leonardo, 2024)

$$f'_{cr} = \bar{f}_m(1 - \lambda\delta)$$

$$V = \frac{Sc}{fm}$$

$$V = \frac{2.95}{215.52} = 0.014$$

$$f'_{cr} = 215.52(1 - 0.014) = 212.50 \text{ kg/cm}^2$$

A continuación, ver tabla 41, se presenta un resumen con los resultados de los tres métodos propuestos:

Tabla 41. Resistencia característica de concreto con 3% de inclusión de adoquín reciclado

Método	Resistencia característica(kg/cm2)
Factor de aproximación	207.93
Aproximación alternativa	209.64
José Corral	212.50
Promedio	210.02

(Vivar, Leonardo, 2024)

4.1.8. Resistencia característica de concreto con 5% de adoquín reciclado

4.1.8.1. Método del factor de aproximación

$$\bar{f}_c = 212.44 \text{ kg/cm}^2$$

$$S_a = \bar{f}_c \sqrt{(V_{l/d})^2 + (V_{dia})^2 + (V_{mc})^2 + (V_d)^2}$$

$$S_a = 212.44 \sqrt{(0.00)^2 + (1.80\%)^2 + (2.50\%)^2 + (2.50\%)^2} = 8.42 \text{ kg/cm}^2$$

$$f'_{ceq} = \bar{f}_c - \sqrt{(KSc)^2 + (ZSa)^2}$$

$$f'_{ceq} = 212.44 - \sqrt{(1.67 * 2.65)^2 + (0.67 * 8.42)^2} = 205.27 \text{ kg/cm}^2$$

4.1.8.2. Método de la aproximación alternativa

$$\bar{f}_{c_{CL}} = \bar{f}_c - \sqrt{\frac{(TSc)^2}{n} + (ZSa)^2}$$

$$\bar{f}_{c_{CL}} = 212.44 - \sqrt{\frac{(1.62 * 2.65)^2}{13} + (0.67 * 8.42)^2} = 206.68 \text{kg/cm}^2$$

4.1.9. Método de José Corral

Tabla 42. Estadística descriptiva

Estadística Descriptiva: Muestra con 5% de inclusión de adoquín reciclado	
Media	212.44
Error típico	0.73
Mediana	212.22
Moda	-
Desviación estándar	2.65
Varianza de la muestra	7.02
Curtosis	0.23
Coficiente de asimetría	-0.36
Rango	9.40
Mínimo	206.82
Máximo	216.22
Suma	2761.69
Cuenta	13.00
Nivel de confianza(95.0%)	1.60

(Vivar, Leonardo, 2024)

$$f'_{cr} = \bar{f}_m(1 - \lambda\delta)$$

$$V = \frac{Sc}{\bar{f}_m}$$

$$V = \frac{2.65}{212.44} = 0.012$$

$$f'_{cr} = 212.44(1 - 0.012) = 209.89 \text{ kg/cm}^2$$

En la tabla 43, se presenta un resumen con los resultados de los tres métodos propuestos:

Tabla 43. Estadística descriptiva

Método	Resistencia característica(kg/cm ²)
Factor de aproximación	205.27
Aproximación alternativa	206.68
José Corral	209.89
Promedio	207.28

(Vivar, Leonardo, 2024)

4.2. Determinación del módulo de elasticidad del hormigón con inclusión de adoquín reciclado.

4.2.1. Determinación experimental por medio de la normativa (ASTM C 469/C469M-22, 2022)

El método experimental es elaborado por medio de un deformímetro y un compres metro, estos permiten determinar las cargas asimiladas por las probetas y la deformación adquirida. A continuación, se procede a determinar la resistencia máxima alcanzada a su 40% de capacidad y el esfuerzo que cubre una deformación de 0.000050.

Se presenta los resultados del ensayo de módulo de elasticidad y el cálculo del factor (F) que relaciona la raíz cuadrada de la resistencia característica del concreto alcanzada en los ensayos

más significativos, tablas 44, 45, 46, 47, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 56, 57 y finalmente se muestra una tabla resumen con todas las muestras.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE HORMIGONES

DISEÑO DE PRUEBAS DE HORMIGÓN

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: 210 (kg/cm²)

ADOQUÍN RECICLADO: 2%

ORIGEN: HOLCIM

MÉTODO: (ASTM C 469/C469M-22, 2022)

Tabla 44. Características de la probeta P08

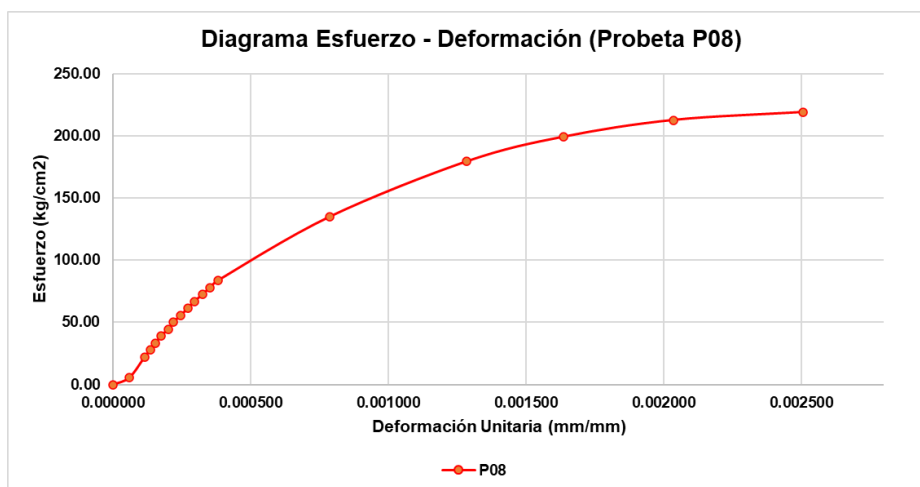
Probeta	P08	
Adoquín Reciclado =	2.00	%
f'c requerida =	210.00	kg/cm2
f'c diseño =	235.20	kg/cm2
Área	179.08	cm2
f'c max =	218.86	kg/cm2
Carga Máxima =	39193.93	kg

Tabla 45. Tabulación Curva esfuerzo – deformación probeta 08

N.º	Carga kg	Deformación mm	Esfuerzo kg/cm2	Deformación unitaria mm/mm
1	0.00	0.00000	0.00	0.000000
2	1000.00	0.00727	5.58	0.000058
3	4000.00	0.02431	22.34	0.000114
4	5000.00	0.03031	27.92	0.000134
5	6000.00	0.03631	33.50	0.000154
6	7000.00	0.04231	39.09	0.000173
7	8000.00	0.05031	44.67	0.000200
8	9000.00	0.05631	50.26	0.000219
9	10000.00	0.06431	55.84	0.000246
10	11000.00	0.07183	61.43	0.000271
11	12000.00	0.07935	67.01	0.000295
12	13000.00	0.08839	72.59	0.000325
13	14000.00	0.09639	78.18	0.000351
14	15000.00	0.10543	83.76	0.000381
15	24126.00	0.22823	134.72	0.000785
16	32109.00	0.38023	179.30	0.001285
17	35637.00	0.48663	199.00	0.001635
18	38050.00	0.60823	212.48	0.002035
19	39193.93	0.80823	218.86	0.002507

(Vivar, Leonardo, 2024)

Figura 9. Curva Esfuerzo-Deformación Probeta P08



(Vivar, Leonardo, 2024)

$$E_c = \frac{0.40\sigma - \sigma_{0.00005}}{\varepsilon_{0.4\sigma} - 0.00005}$$

$$E_c = \frac{87.55 - 4.82}{0.0005313 - 0.00005} = 171892.41 \text{ kg/cm}^2$$

$$F = \frac{E_c}{\sqrt{\sigma_{max}}}$$

$$F = \frac{171892.41 \text{ kg/cm}^2}{\sqrt{218.86 \text{ kg/cm}^2}} = 11619.012$$

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE HORMIGONES

DISEÑO DE PRUEBAS DE HORMIGÓN

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: 210 (kg/cm²)

ADOQUÍN RECICLADO: 2%

ORIGEN: HOLCIM

MÉTODO: (ASTM C 469/C469M-22, 2022)

Tabla 46. Características de la probeta P09

Probeta	P09	
Adoquín Reciclado =	2.00	%
f'c requerida =	210.00	kg/cm2
f'c diseño =	235.20	kg/cm2
Área	174.37	cm2

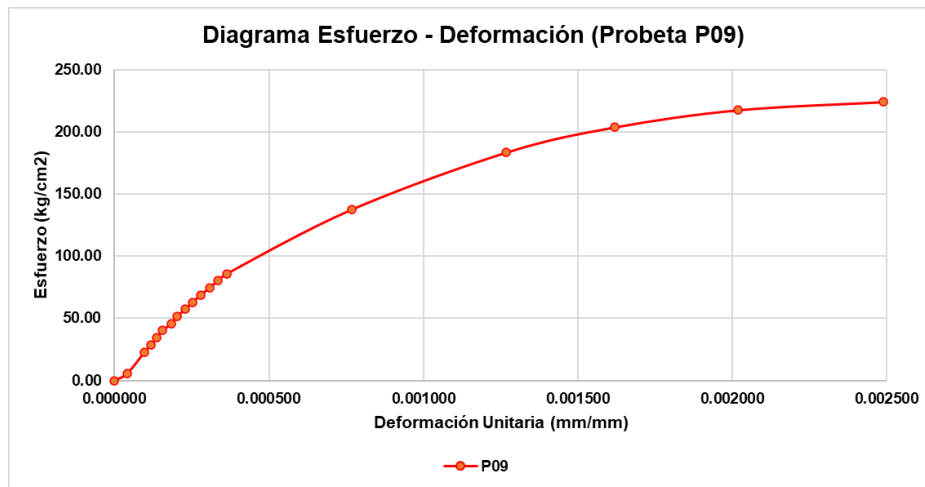
Probeta		P09
f'c max =	223.91	kg/cm ²
Carga Máxima =	39042.93	kg

Tabla 47. Tabulación Curva esfuerzo – deformación probeta 09

N.º	Carga kg	Deformación mm	Esfuerzo kg/cm ²	Deformación unitaria mm/mm
1	0.00	0.00000	0.00	0.000000
2	1000.00	0.00692	5.74	0.000041
3	4000.00	0.02396	22.94	0.000097
4	5000.00	0.02996	28.68	0.000117
5	6000.00	0.03596	34.41	0.000137
6	7000.00	0.04196	40.15	0.000156
7	8000.00	0.04996	45.88	0.000183
8	9000.00	0.05596	51.62	0.000202
9	10000.00	0.06396	57.35	0.000229
10	11000.00	0.07148	63.09	0.000254
11	12000.00	0.07900	68.82	0.000278
12	13000.00	0.08804	74.56	0.000308
13	14000.00	0.09604	80.29	0.000334
14	15000.00	0.10508	86.03	0.000364
15	23975.00	0.22788	137.50	0.000768
16	31958.00	0.37988	183.28	0.001268
17	35486.00	0.48628	203.51	0.001618
18	37899.00	0.60788	217.35	0.002018
19	39042.93	0.80788	223.91	0.002490

(Vivar, Leonardo, 2024)

Figura 10. Curva Esfuerzo-Deformación Probeta P09



(Vivar, Leonardo, 2024)

$$E_c = \frac{0.40\sigma - \sigma_{0.00005}}{\varepsilon_{0.4\sigma} - 0.00005}$$

$$E_c = \frac{89.56 - 6.99}{0.000521 - 0.00005} = 175310.74 \text{ kg/cm}^2$$

$$F = \frac{E_c}{\sqrt{\sigma_{max}}}$$

$$F = \frac{175310.74 \text{ kg/cm}^2}{\sqrt{223.91 \text{ kg/cm}^2}} = 11715.708$$

En la tabla 48 a continuación, se presentan los módulos de elasticidad de cada una de las probetas ensayadas con 2% de inclusión de adoquín reciclado con su respectivo factor.

Tabla 48. *Módulo de elasticidad experimental de probetas a los 28 días con 2% de adoquín reciclado*

Módulo de Elasticidad de hormigón con resistencia 210 kg/cm² con 2% de inclusión de reciclado de adoquín				
Cilindro	Resistencia	Esfuerzo (40%)	Módulo de Elasticidad	Factor
-	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²	(F)
P01	216.10	86.44	183606.212	12489.97
P02	217.73	87.09	185281.6369	12556.77
P03	215.39	86.16	200441.801	13657.71
P04	212.94	85.17	181034.5534	12406.18
P05	208.52	83.41	178814.4341	12383.09
P06	217.94	87.18	167066.137	11316.63
P07	214.28	85.71	164248.6943	11220.47
P08	218.86	87.55	171892.4147	11619.01
P09	223.91	89.57	175310.7425	11715.71
P10	217.16	86.87	178168.4237	12090.31

(Vivar, Leonardo, 2024)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR**INGENIERÍA CIVIL****LABORATORIO DE HORMIGONES****DISEÑO DE PRUEBAS DE HORMIGÓN****RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN:** 210 (kg/cm²)**ADOQUÍN RECICLADO:** 3%**ORIGEN:** HOLCIM**MÉTODO:** (ASTM C 469/C469M-22, 2022)

Tabla 49. Características de la probeta P16

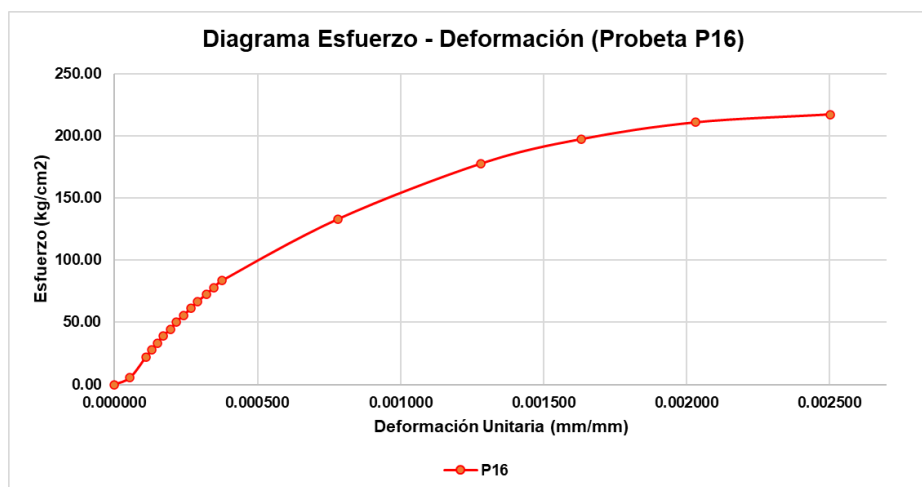
Probeta		P16	
Adoquín Reciclado =	3.00		%
f'c requerida =	210.00		kg/cm2
f'c diseño =	235.20		kg/cm2
Área	179.08		cm2
f'c max =	217.20		kg/cm2
Carga Máxima =	38895.93		kg

Tabla 50. Tabulación Curva esfuerzo – deformación probeta 16

N.º	Carga kg	Deformación mm	Esfuerzo kg/cm2	Deformación unitaria mm/mm
1	0.00	0.00000	0.00	0.000000
2	1000.00	0.00723	5.58	0.000054
3	4000.00	0.02427	22.34	0.000110
4	5000.00	0.03027	27.92	0.000130
5	6000.00	0.03627	33.50	0.000150
6	7000.00	0.04227	39.09	0.000169
7	8000.00	0.05027	44.67	0.000196
8	9000.00	0.05627	50.26	0.000215
9	10000.00	0.06427	55.84	0.000242
10	11000.00	0.07179	61.43	0.000267
11	12000.00	0.07931	67.01	0.000291
12	13000.00	0.08835	72.59	0.000321
13	14000.00	0.09635	78.18	0.000347
14	15000.00	0.10539	83.76	0.000377
15	23828.00	0.22819	133.06	0.000781
16	31811.00	0.38019	177.64	0.001281
17	35339.00	0.48659	197.34	0.001631
18	37752.00	0.60819	210.81	0.002031
19	38895.93	0.80819	217.20	0.002503

(Vivar, Leonardo, 2024)

Figura 11. Curva Esfuerzo-Deformación Probeta P16



(Vivar, Leonardo, 2024)

$$E_c = \frac{0.40\sigma - \sigma_{0.00005}}{\varepsilon_{0.4\sigma} - 0.00005}$$

$$E_c = \frac{86.88 - 5.17}{0.0005318 - 0.00005} = 169592.37 \text{ kg/cm}^2$$

$$F = \frac{E_c}{\sqrt{\sigma_{max}}}$$

$$F = \frac{169592.37 \text{ kg/cm}^2}{\sqrt{217.20 \text{ kg/cm}^2}} = 11507.372$$

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE HORMIGONES

DISEÑO DE PRUEBAS DE HORMIGÓN

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: 210 (kg/cm²)

ADOQUÍN RECICLADO: 3%

ORIGEN: HOLCIM

MÉTODO: (ASTM C 469/C469M-22, 2022)

Tabla 51. Características de la probeta P17

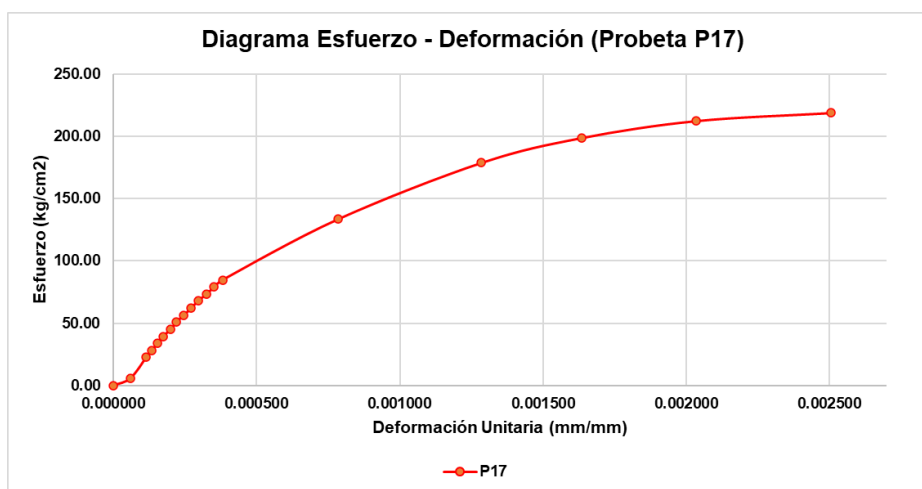
Probeta	P17	
Adoquín Reciclado	3.00	%
=		
f'c requerida =	210.00	kg/cm2
f'c diseño =	235.20	kg/cm2
Área	176.71	cm2
f'c max =	218.98	kg/cm2
Carga Máxima =	38696.93	kg

Tabla 52. Tabulación Curva esfuerzo – deformación probeta 17

N.º	Carga kg	Deformación mm	Esfuerzo kg/cm2	Deformación unitaria mm/mm
1	0.00	0.00000	0.00	0.000000
2	1000.00	0.00735	5.66	0.000058
3	4000.00	0.02439	22.64	0.000114
4	5000.00	0.03039	28.29	0.000134
5	6000.00	0.03639	33.95	0.000154
6	7000.00	0.04239	39.61	0.000173
7	8000.00	0.05039	45.27	0.000200
8	9000.00	0.05639	50.93	0.000219
9	10000.00	0.06439	56.59	0.000246
10	11000.00	0.07191	62.25	0.000271
11	12000.00	0.07943	67.91	0.000295
12	13000.00	0.08847	73.56	0.000325
13	14000.00	0.09647	79.22	0.000351

N.º	Carga kg	Deformación mm	Esfuerzo kg/cm ²	Deformación unitaria mm/mm
14	15000.00	0.10551	84.88	0.000381
15	23629.00	0.22831	133.71	0.000785
16	31612.00	0.38031	178.89	0.001285
17	35140.00	0.48671	198.85	0.001635
18	37553.00	0.60831	212.51	0.002035
19	38696.93	0.80831	218.98	0.002507

Figura 12. Curva Esfuerzo-Deformación Probeta P17



$$E_c = \frac{0.40\sigma - \sigma_{0.00005}}{\varepsilon_{0.4\sigma} - 0.00005}$$

$$E_c = \frac{87.59 - 4.88}{0.0005411 - 0.00005} = 168425.19 \text{ kg/cm}^2$$

$$F = \frac{E_c}{\sqrt{\sigma_{max}}}$$

$$F = \frac{168425.19 \text{ kg/cm}^2}{\sqrt{218.98 \text{ kg/cm}^2}} = 11381.644$$

En la tabla 53, se presentan los módulos de elasticidad de cada una de las probetas ensayadas con 3% de inclusión de adoquín reciclado con su respectivo factor:

Tabla 53. *Módulo de elasticidad experimental de probetas a los 28 días con 3% de adoquín reciclado*

Módulo de Elasticidad de hormigón con resistencia 210 kg/cm² con 3% de inclusión de reciclado de adoquín				
Cilindro	Resistencia	Esfuerzo (40%)	Módulo de Elasticidad	Factor
-	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²	(F)
P11	217.62	87.05	164857.3099	11175.31
P12	213.69	85.48	159731.3629	10926.92
P13	215.43	86.17	167332.814	11400.70
P14	214.67	85.87	167733.4633	11448.23
P15	210.95	84.38	165909.0445	11423.11
P16	217.20	86.88	169592.3696	11507.37
P17	218.98	87.59	168425.1868	11381.64
P18	217.62	87.05	164176.4784	11129.16
P19	217.12	86.85	166412.2094	11293.77
P20	211.30	84.52	161014.2323	11076.72

(Vivar, Leonardo, 2024)

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE HORMIGONES

DISEÑO DE PRUEBAS DE HORMIGÓN

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: 210 (kg/cm²)

ADOQUÍN RECICLADO: 5%

ORIGEN: HOLCIM

MÉTODO: (ASTM C 469/C469M-22, 2022)

Tabla 54. Características de la probeta P21

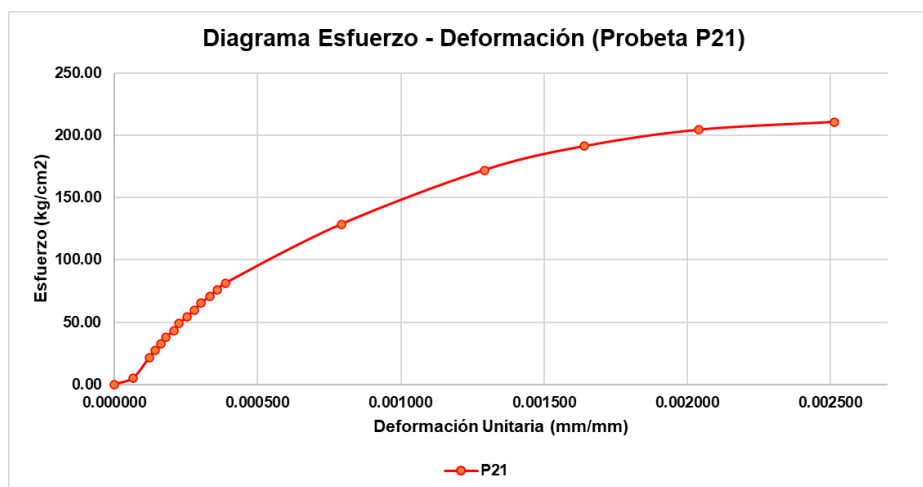
Probeta	P21	
Adoquín Reciclado =	5.00	%
f'c requerida =	210.00	kg/cm ²
f'c diseño =	235.20	kg/cm ²
Área	183.85	cm ²
f'c max =	210.58	kg/cm ²
Carga Máxima =	38715.93	kg

Tabla 55. Tabulación Curva esfuerzo – deformación probeta 21

Nº	Carga kg	Deformación mm	Esfuerzo kg/cm ²	Deformación unitaria mm/mm
1	0.00	0.00000	0.00	0.000000
2	1000.00	0.00740	5.44	0.000065
3	4000.00	0.02444	21.76	0.000121
4	5000.00	0.03044	27.20	0.000141
5	6000.00	0.03644	32.63	0.000161
6	7000.00	0.04244	38.07	0.000180
7	8000.00	0.05044	43.51	0.000207
8	9000.00	0.05644	48.95	0.000226
9	10000.00	0.06444	54.39	0.000253
10	11000.00	0.07196	59.83	0.000278
11	12000.00	0.07948	65.27	0.000302
12	13000.00	0.08852	70.71	0.000332
13	14000.00	0.09652	76.15	0.000358
14	15000.00	0.10556	81.59	0.000388
15	23648.00	0.22836	128.62	0.000792
16	31631.00	0.38036	172.04	0.001292
17	35159.00	0.48676	191.23	0.001642
18	37572.00	0.60836	204.36	0.002042
19	38715.93	0.80836	210.58	0.002514

(Vivar, Leonardo, 2024)

Figura 13. Curva Esfuerzo-Deformación Probeta P21



(Vivar, Leonardo, 2024)

$$E_c = \frac{0.40\sigma - \sigma_{0.00005}}{\varepsilon_{0.4\sigma} - 0.00005}$$

$$E_c = \frac{84.23 - 4.18}{0.0005701 - 0.00005} = 153908.92 \text{ kg/cm}^2$$

$$F = \frac{E_c}{\sqrt{\sigma_{max}}}$$

$$F = \frac{153908.92 \text{ kg/cm}^2}{\sqrt{210.58 \text{ kg/cm}^2}} = 10606.09$$

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

INGENIERÍA CIVIL

LABORATORIO DE HORMIGONES

DISEÑO DE PRUEBAS DE HORMIGÓN

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN: 210 (kg/cm²)

ADOQUÍN RECICLADO: 5%

ORIGEN: HOLCIM

MÉTODO: (ASTM C 469/C469M-22, 2022)

Tabla 56. Características de la probeta P22

Probeta	P22	
Adoquín Reciclado =	5.00	%
f'c requerida =	210.00	kg/cm2
f'c diseño =	235.20	kg/cm2
Área	181.46	cm2
f'c max =	212.87	kg/cm2
Carga Máxima =	38627.93	kg

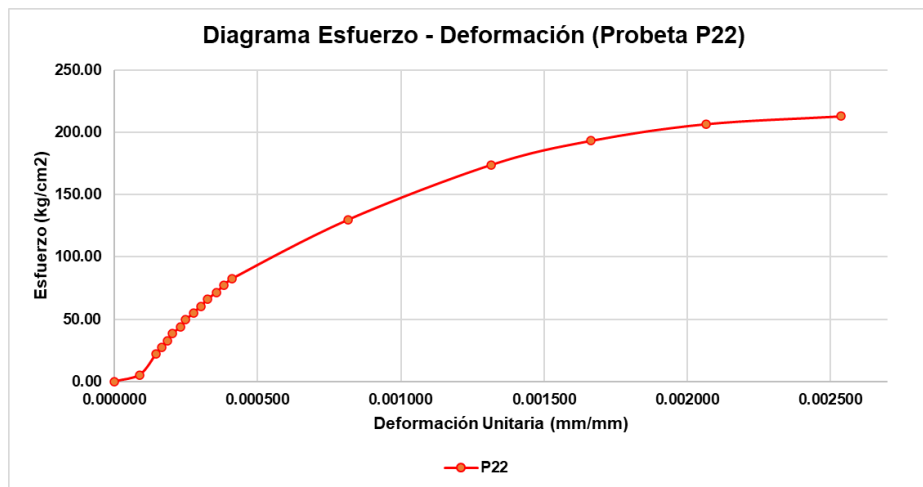
Tabla 57. Tabulación Curva esfuerzo – deformación probeta 22

N.º	Carga kg	Deformación mm	Esfuerzo kg/cm2	Deformación unitaria mm/mm
1	0.00	0.00000	0.00	0.000000
2	1000.00	0.00750	5.51	0.000088
3	4000.00	0.02454	22.04	0.000144
4	5000.00	0.03054	27.55	0.000164
5	6000.00	0.03654	33.07	0.000184
6	7000.00	0.04254	38.58	0.000203
7	8000.00	0.05054	44.09	0.000230
8	9000.00	0.05654	49.60	0.000249
9	10000.00	0.06454	55.11	0.000276
10	11000.00	0.07206	60.62	0.000301
11	12000.00	0.07958	66.13	0.000325
12	13000.00	0.08862	71.64	0.000355
13	14000.00	0.09662	77.15	0.000381
14	15000.00	0.10566	82.66	0.000411
15	23560.00	0.22846	129.84	0.000815

N.º	Carga kg	Deformación mm	Esfuerzo kg/cm ²	Deformación unitaria mm/mm
16	31543.00	0.38046	173.83	0.001315
17	35071.00	0.48686	193.27	0.001665
18	37484.00	0.60846	206.57	0.002065
19	38627.93	0.80846	212.87	0.002537

(Vivar, Leonardo, 2024)

Figura 14. Curva Esfuerzo-Deformación Probeta P22



(Vivar, Leonardo, 2024)

$$E_c = \frac{0.40\sigma - \sigma_{0.00005}}{\varepsilon_{0.4\sigma} - 0.00005}$$

$$E_c = \frac{85.15 - 3.13}{0.0005801 - 0.00005} = 154723.14 \text{ kg/cm}^2$$

$$F = \frac{E_c}{\sqrt{\sigma_{max}}}$$

$$F = \frac{154723.14 \text{ kg/cm}^2}{\sqrt{212.87 \text{ kg/cm}^2}} = 10604.571$$

En la tabla 58, se presentan los módulos de elasticidad de cada una de las probetas ensayadas con 5% de inclusión de adoquín reciclado con su respectivo factor:

Tabla 58. *Módulo de elasticidad experimental de probetas a los 28 días con 5% de adoquín reciclado*

Módulo de Elasticidad de hormigón con resistencia 210 kg/cm2 con 5% de inclusión de reciclado de adoquín				
Cilindro	Resistencia	Esfuerzo (40%)	Módulo de Elasticidad	Factor
-	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	(F)
P21	210.58	84.23	153908.9264	10606.09
P22	212.87	85.15	154723.1442	10604.57
P23	213.86	85.54	158708.5865	10852.75
P24	213.79	85.52	158072.9813	10810.96
P25	206.82	82.73	147858.6898	10281.40
P26	215.94	86.38	154152.8173	10490.27
P27	215.49	86.19	154658.2297	10535.70
P28	216.22	86.49	155129.5058	10549.92
P29	210.35	84.14	156390.6919	10783.10
P30	211.12	84.45	149891.5082	10316.03

(Vivar, Leonardo, 2024)

4.2.2. Determinación teórica del módulo de elasticidad del concreto con inclusión de adoquín reciclado

La Norma Ecuatoriana de la Construcción en su inciso 3.3.3 establece dos expresiones que permiten determinar el módulo de elasticidad del concreto de acuerdo al tipo de aplicación deseada (NEC-SE-HM-15, 2015). La expresión a continuación es aplicada para condiciones de servicio:

$$E_c = 1.15^3 \sqrt{E_a} \sqrt{f'c}$$

Dónde:

E_a : Módulo de elasticidad del agregado (GPa).

f'_c : Resistencia del concreto a compresión (MPa).

Por otro lado, para determinar la resistencia última de los elementos en modelos elásticos, se aplicará la siguiente expresión:

$$E_c = 4.70\sqrt{f'_c}$$

Dónde:

E_c : Módulo de elasticidad del concreto (GPa).

f'_c : Resistencia del concreto a compresión (MPa).

El Instituto Americano del Concreto (ACI) en su sección 19.2.2 aporta una ecuación adicional para calcular este módulo la cual es la siguiente:

$$E_c = w^{1.50}0.14\sqrt{f'_c}$$

Dónde:

w : Módulo de elasticidad del concreto (kg/cm^2).

f'_c : Resistencia del concreto a compresión (kg/cm^2).

Esta expresión difiere del método experimental para la determinación del módulo de elasticidad, pues considera la resistencia adquirida por el concreto en un 45% de su capacidad y establece pesos unitarios del mismo entre $1440\text{kg}/\text{m}^3$ y $2560\text{kg}/\text{m}^3$ (ACI318-19, 2019).

Con las expresiones previas, se procede a determinar los módulos de elasticidad por medio de las resistencias obtenidas de manera experimental como la resistencia característica, ver tablas 59, 60, 61 y 62.

Tabla 59. *Módulo de elasticidad teórico de probetas a los 28 días con 2% de adoquín reciclado*

Módulo de Elasticidad de hormigón con resistencia 210 kg/cm2 con 2% de inclusión de reciclado de adoquín				
Cilindro	Resistencia	Ec1-Nec15	Ec2-Nec15	Ec3-ACI318
-	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2
P01-R	218.86	161797.0774	219877.6342	245344.987
P02-R	223.91	163653.0938	222399.9078	248159.403
P03-R	217.16	161167.4711	219022.0172	244390.268
P01	216.10	160773.1678	218486.1702	243792.356
P02	217.73	161377.0567	219306.838	244708.078
P03	215.39	160508.4997	218126.4937	243391.02
P04	212.94	159591.967	216880.9517	242001.213
P05	208.52	157928.681	214620.5933	239479.049
P06	217.94	161457.7459	219416.4923	244830.433
P07	214.28	160095.2378	217564.8825	242764.36
P08	218.86	161798.6781	219879.8094	245347.414
P09	223.91	163654.3082	222401.5581	248161.244
P10	217.16	161168.7015	219023.6892	244392.134

(Vivar, Leonardo, 2024)

Tabla 60. *Módulo de elasticidad teórico de probetas a los 28 días con 3% de adoquín reciclado*

Módulo de Elasticidad de hormigón con resistencia 210 kg/cm2 con 3% de inclusión de reciclado de adoquín				
Cilindro	Resistencia	Ec1-Nec15	Ec2-Nec15	Ec3-ACI318
-	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2
P10-R	210.95	158846.35	215867.6794	244474.59
P11-R	217.2	161182.3137	219042.1877	248069.786
P12-R	218.98	161841.4276	219937.9049	249084.204
P11	217.62	161337.732	219253.3968	248308.985
P12	213.69	159874.807	217265.3232	246057.45
P13	215.43	160522.8727	218146.0262	247054.865

Módulo de Elasticidad de hormigón con resistencia 210 kg/cm² con 3% de inclusión de reciclado de adoquín				
Cilindro	Resistencia	Ec1-Nec15	Ec2-Nec15	Ec3-ACI318
-	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²
P14	214.67	160239.2808	217760.6328	246618.399
P15	210.95	158844.8516	215865.6432	244472.284
P16	217.20	161182.409	219042.3173	248069.933
P17	218.98	161841.3553	219937.8065	249084.093
P18	217.62	161337.732	219253.3968	248308.985
P19	217.12	161151.3265	219000.077	248022.095
P20	211.30	158979.3526	216048.4261	244679.289

(Vivar, Leonardo, 2024)

Tabla 61. *Módulo de elasticidad teórico de probetas a los 28 días con 5% de adoquín reciclado*

Módulo de Elasticidad de hormigón con resistencia 210 kg/cm² con 5% de inclusión de reciclado de adoquín				
Cilindro	Resistencia	Ec1-Nec15	Ec2-Nec15	Ec3-ACI318
-	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²	kg/cm²
P20-R	210.94	158842.5849	215862.5628	243265.505
P21-R	211.49	159049.5313	216143.797	243582.441
P22-R	212.22	159323.7905	216516.5075	244002.465
P21	210.58	158706.9432	215678.2295	243057.771
P22	212.87	159569.4101	216850.2976	244378.629
P23	213.86	159936.6407	217349.3535	244941.038
P24	213.79	159911.91	217315.7453	244903.163
P25	206.82	157283.0825	213743.2433	240877.146
P26	215.94	160713.4615	218405.031	246130.73
P27	215.49	160545.054	218176.1699	245872.816
P28	216.22	160817.3288	218546.1836	246289.801
P29	210.35	158618.7844	215558.4243	242922.757
P30	211.12	158910.219	215954.4756	243369.086

(Vivar, Leonardo, 2024)

Tabla 62. *Módulo de elasticidad teórico con resistencia característica de concreto con 2%,3% y 5% de adoquín reciclado*

Método	Resistencia característica(kg/cm2)	Ec1- Nec15(kg/cm2)	Ec2- Nec15(kg/cm2)	Ec3- ACI318(kg/cm2)
Factor de aproximación	205.27	156693.2239	212941.6422	239973.7844
Aproximación alternativa	206.68	157230.466	213671.7389	240796.5641
José Corral	209.89	158446.7548	215324.6409	242659.2959
Promedio	207.28	157458.5236	213981.6628	241145.8316

(Vivar, Leonardo, 2024)

4.3. Determinación de la ecuación del módulo de elasticidad

Debido a la amplia variedad de resultados de módulos de elasticidad y su respectivo factor “F”, que permite relacionarlo con la raíz cuadrada de la resistencia máxima a la compresión simple, se procederá a realizar una distribución normal que permita descartar aquellos resultados que no responden a un rango de aceptación determinado y que queden fuera de la desviación estándar permitida.

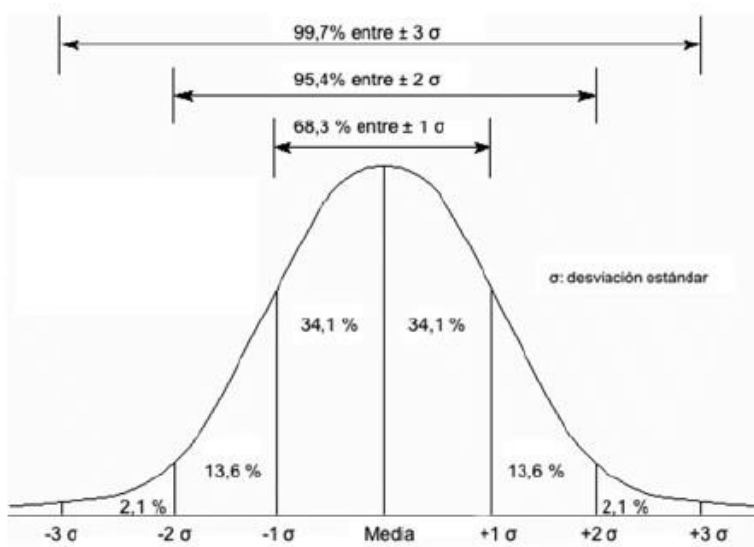
4.3.1. Distribución t-student y Distribución Normal

La distribución normal se caracteriza por tener un histograma correspondiente a una función de densidad, conformando una campana de Gauss, ver figura 15, cuyo valor característico es la media, a partir de la cual se distribuyen el resto de valores a cada uno de sus sesgos a través de una desviación típica. Para que esta curva permita establecer cuan dispersos se encuentran los resultados encontrados, se emplea la varianza y se caracteriza por presentar un coeficiente de asimetría nulo con valores de curtosis de cero (Martinez & Mari, 2010).

Para los procesos de control estadístico, existen tres propiedades importantes que conforman a este tipo de distribución los cuales son:

- La media más una desviación estándar presenta el 68% del espacio muestral.
- La media más dos desviaciones estándar posee un 95.5% de espacio muestral.
- La media más tres desviaciones estándar agrupa el 99.70% de la distribución.

Figura 15. *Distribución normal*



Tomado de: (Romero y otros, 2013)

- Nivel de confianza e Intervalo de Confianza

Este se encarga de describir la variabilidad entre el promedio de resultados y la población, representando un rango de valores que responden a una distribución normal y que en general se estima una alta probabilidad de existencia de un resultado específico aquel que se encuentra en un intervalo del 95% (2 desviaciones estándar) (Candia & Caiozzi, 2005).

- Variable Z

En la población analizada, al existir una serie de resultados dispersos; pero, consistentes a una media se puede definir por medio de una variable “Z” el número de desviaciones estándar en la cual se encuentren los resultados más probables a los cuales tiende nuestro universo (Holmes y otros, 2022). La ecuación que define este parámetro es la siguiente:

$$z = \frac{x - \mu}{\sigma}$$

Dónde:

x: Variable aleatoria

μ : Media muestral

σ : Desviación típica

- Error Estándar

Está definido como una estimación en que una variable puede variar, determinando el grado de incertidumbre del valor de prueba. Es calculado como el cociente entre la desviación estándar y la variable de prueba (IBM, 2024).

$$std. Error = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

- Distribución t-student

Permite hallar distancias estándar entre la media muestral y un límite inferior y superior que dependen de un intervalo de confianza específico, aplicado cuando la muestra estudiada es inferior a 30 o en el caso de que la población general sea desconocida. Para su efecto, es necesario definir el número de grados de libertad con el cual se plantea trabajar y el grado de confiabilidad esperado (Ortega, 2024).

Se determinaron los parámetros estadísticos, tabla 63, para cada uno de los módulos de elasticidad obtenidos, en base a sus distintos porcentajes de adoquín incluido.

Adicionalmente, empleando la distribución t-student, considerando un 95% de nivel de confianza y en base a 9 grados de libertad por muestra poblacional se estableció un valor crítico (cuantil) de 2.26.

Tabla 63. *Medidas de tendencia central y de variabilidad para módulos de elasticidad con 2% de adoquín reciclado*

Medidas de tendencia central y de variabilidad para Módulos de Elasticidad con inclusión de 2% de adoquín	
Media	178586.50
Error típico	3245.05
Mediana	178491.43
Moda	-
Desviación estándar	10261.74
Varianza de la muestra	105303228.57
Curtosis	1.42
Coefficiente de asimetría	0.78
Rango	36193.11
Mínimo	164248.69
Máximo	200441.80
Suma	1785865.05
Cuenta	10.00
t(9,95%)	2.26
Límite Superior	185831.72
Límite Inferior	171151.1351

(Vivar, Leonardo, 2024)

Tabla 64. *Módulo de elasticidad teórico de probetas a los 28 días con 2% de adoquín reciclado, con intervalo de confianza del 95%*

Módulo de Elasticidad de hormigón con resistencia 210 kg/cm2 con 2% de inclusión de reciclado de adoquín				
Cilindro	Resistencia	Esfuerzo (40%)	Módulo de Elasticidad	Factor
-	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	(F)
P01	216.10	86.44	183606.212	12489.97
P02	217.73	87.09	185281.6369	12556.77
P03	215.39	86.16	200441.801	13657.71
P04	212.94	85.17	181034.5534	12406.18
P05	208.52	83.41	178814.4341	12383.09
P06	217.94	87.18	167066.137	11316.63
P07	214.28	85.71	164248.6943	11220.47
P08	218.86	87.55	171892.4147	11619.01
P09	223.91	89.57	175310.7425	11715.71
P10	217.16	86.87	178168.4237	12090.31

(Vivar, Leonardo, 2024)

Los valores resaltados en color amarillo, ver tabla 64, representan los datos que se hallan en el 95% de resultados más probables dentro de la determinación de módulo de elasticidad en base a las condiciones establecidas en el presente trabajo de investigación. Se procedió a determinar la media de los factores que les corresponden para finalizar con una expresión que permita determinar el módulo de elasticidad para un 2% de inclusión de adoquín triturado. Este proceso se llevó a cabo para cada uno de los porcentajes, ver tablas 65, 66, 67, 68.

$$E_c(2\%) = 12180.15\sqrt{f'_c}(\text{kg/cm}^2)$$

$$E_c(2\%) = 3.814\sqrt{f'_c}(\text{GPa})$$

Tabla 65. *Medidas de tendencia central y de variabilidad para módulos de elasticidad con 3% de adoquín reciclado*

Medidas de tendencia central y de variabilidad para Módulos de Elasticidad con inclusión de 3% de adoquín	
Media	165518.45
Error típico	1001.18
Mediana	166160.63
Moda	-
Desviación estándar	3166.00
Varianza de la muestra	10023539.83
Curtosis	-0.17
Coefficiente de asimetría	-0.78
Rango	9861.01
Mínimo	159731.36
Máximo	169592.37
Suma	1655184.47
Cuenta	10.00
t(9,95%)	2.26
Límite Superior	168425.29
Límite Inferior	163895.97

(Vivar, Leonardo, 2024)

Tabla 66. *Módulo de elasticidad teórico de probetas a los 28 días con 3% de adoquín reciclado, con intervalo de confianza del 95%*

Módulo de Elasticidad de hormigón con resistencia 210 kg/cm2 con 3% de inclusión de reciclado de adoquín				
Cilindro	Resistencia	Esfuerzo (40%)	Módulo de Elasticidad	Factor
-	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	(F)
P11	217.62	87.05	164857.3099	11175.31
P12	213.69	85.48	159731.3629	10926.92
P13	215.43	86.17	167332.814	11400.70
P14	214.67	85.87	167733.4633	11448.23
P15	210.95	84.38	165909.0445	11423.11
P16	217.20	86.88	169592.3696	11507.37
P17	218.98	87.59	168425.1868	11381.64
P18	217.62	87.05	164176.4784	11129.16
P19	217.12	86.85	166412.2094	11293.77
P20	211.30	84.52	161014.2323	11076.72

(Vivar, Leonardo, 2024)

$$E_c(3\%) = 11250.62\sqrt{f'_c}(kg/cm^2)$$

$$E_c(3\%) = 3.523\sqrt{f'_c}(GPa)$$

Tabla 67. *Medidas de tendencia central y de variabilidad para módulos de elasticidad con 5% de adoquín reciclado*

Medidas de tendencia central y de variabilidad para Módulos de Elasticidad con inclusión de 5% de adoquín	
Media	154349.51
Error típico	1054.69
Mediana	154690.69
Moda	-

Medidas de tendencia central y de variabilidad para Módulos de Elasticidad con inclusión de 5% de adoquín	
Desviación estándar	3335.21
Varianza de la muestra	11123649.25
Curtosis	0.50
Coefficiente de asimetría	-0.82
Rango	10849.90
Mínimo	147858.69
Máximo	158708.59
Suma	1543495.08
Cuenta	10.00
t(9,95%)	2.26
Límite Superior	157076.39
Límite Inferior	152304.9847

(Vivar, Leonardo, 2024)

Tabla 68. *Módulo de elasticidad teórico de probetas a los 28 días con 5% de adoquín reciclado, con intervalo de confianza del 95%*

Módulo de Elasticidad de hormigón con resistencia 210 kg/cm2 con 5% de inclusión de reciclado de adoquín				
Cilindro	Resistencia	Esfuerzo (40%)	Módulo de Elasticidad	Factor
-	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	(F)
P21	210.58	84.23	153908.9264	10606.09
P22	212.87	85.15	154723.1442	10604.57
P23	213.86	85.54	158708.5865	10852.75
P24	213.79	85.52	158072.9813	10810.96
P25	206.82	82.73	147858.6898	10281.40
P26	215.94	86.38	154152.8173	10490.27
P27	215.49	86.19	154658.2297	10535.70
P28	216.22	86.49	155129.5058	10549.92
P29	210.35	84.14	156390.6919	10783.10
P30	211.12	84.45	149891.5082	10316.03

(Vivar, Leonardo, 2024)

$$E_c(5\%) = 10520.89\sqrt{f'_c} \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$E_c(5\%) = 3.295\sqrt{f'_c} \text{ (GPa)}$$

CAPITULO V

1.1. CONCLUSIONES

- ✓ El porcentaje de absorción del adoquín triturado reciclado, resulto superior en un 1.78% al agregado fino, lo que representa un mayor porcentaje de finos. Este resultado, implicó en una reducción del asentamiento final de la mezcla a un intervalo entre 8cm a 5.60cm para los porcentajes de inclusión del 2%, 3% y 5%; a diferencia de los 9.5cm de promedio de la mezcla sin aditivo.
- ✓ El árido fino, grueso y el adoquín reciclado, cumple con los criterios de calidad establecidos por la Normativa INEN, con un módulo de finura de 3.92, contenido de humedad de 5.81% para el árido fino y 2.54, 5.31% de módulo de finura y contenido de humedad, respectivamente, para el árido grueso. El adoquín presenta un contenido de humedad de 2.05%, una absorción de 5.60% y una curva granulométrica que refleja un alto contenido de finos.
- ✓ Se obtuvieron 3 ecuaciones de módulo de elasticidad para los distintos porcentajes de inclusión propuestos, las cuales son: $E_c(2\%) = 3.814\sqrt{f'c}(GPa)$, $E_c(3\%) = 3.523\sqrt{f'c}(GPa)$ y $E_c(5\%) = 3.295\sqrt{f'c}(GPa)$, cuyos resultados al ser comparados con la ecuación propuesta por el ACI y NEC15 $E_c = 4.7\sqrt{f'c}(GPa)$, difieren en 4.06GPa, 5.40GPa y 6.44GPa, respectivamente. Este resultado refleja que la calidad y características de los agregados difieren completamente de los expuestos por el código americano, siendo necesario recurrir a ensayos experimentales como el

presentado en el presente trabajo de titulación para los respectivos proyectos de ingeniería civil.

- ✓ Al reemplazar el árido fino con un 2%, 3% y 5% se obtuvo un incremento de 1.22GPa, 1.12GPa y 1.05GPa, respectivamente, comparado con la ecuación de la muestra base.
- ✓ La inclusión de adoquín en el diseño de los hormigones propuestos reflejó que se pueden implementar porcentajes en el orden del 2%, 3% y 5% alcanzando resultados aceptables de resistencia en las probetas finales en el orden de 217.14kg/cm², 215.52kg/cm², y 212.44kg/cm², respectivamente; permitiendo que los pavimentos articulados que hayan sido desechados producto del incumplimiento del control de calidad o por fallas durante el proceso constructivo, puedan reutilizarse en nuevos proyectos reduciendo el impacto ambiental.

1.2. RECOMENDACIONES

- ✓ El presente trabajo de investigación da pie a considerar que parámetros son los más influyentes para determinar los porcentajes de inclusión de adoquín reciclado en la dosificación final del concreto, entre los cuales tendríamos: porcentajes de absorción, granulometrías, módulos de finura o el origen o utilidad del adoquín para calificar si la resistencia objetivo del mismo, permitiría alcanzar porcentajes superiores, de tal manera que se puedan proponer métodos de clasificación de los materiales de desecho en las fábricas o proyectos en general.
- ✓ Se recomienda incrementar el número de probetas ensayadas, y así ajustar el porcentaje de contenido de humedad en la dosificación final, debido a que los porcentajes de absorción del adoquín triturado, conforme al presente proyecto de titulación, superan a

los obtenidos en el agregado fino, provocando que se modifique la relación agua cemento, y por ende el módulo de elasticidad.

- ✓ La gestión de residuos de los distintos implicados en un proyecto de construcción, deberá ser tomado en consideración dentro de un flujograma de gestión propuesto por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas, en conjunto con un código rector como es la Norma Ecuatoriana de la Construcción, que ayude a que los escombros resultantes se clasifiquen conforme a su resistencia y grado de reutilización para proyectos futuros.

6. Referencias Bibliográficas

- ACI PRC-211.1-22. (2022). *American Concrete Institute. ACI PRC-211.1. Selecting Proportions for Normal - Density and High Density - Concrete - Guide*. ACI.
https://doi.org/https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211122&Language=English&Units=US_Units
- ACI214.4R-03. (2003). *Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results*. American Concrete Institute. https://doi.org/http://dl.mycivil.ir/dozanani/ACI/ACI%20214.4R-03%20Guide%20for%20Obtaining%20Cores%20and%20Interpreting%20Compressive%20Strength%20Results_MyCivil.ir.pdf
- ACI318-19. (2019). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural(ACI318-19)*. American Concrete Institute. https://doi.org/https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/318-19_preview.pdf
- American Concrete Institute. (2019). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318-19)*. ACI Ecuador Chapter.
https://doi.org/https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/318-19_preview.pdf

ASTM C 469/C469M-22. (2022). *Método de Ensayo Estándar para determinar el Módulo de elasticidad Estático y Relación de Poisson del concreto a compresión*. ASTM International.

https://doi.org/https://www.astm.org/c0469_c0469m-22.html

ASTM C1064. (2022). *Metodo de Ensayo Normalizado para determinar la temperatura del hormigón fresco con Cemento Portland*. ASTM.

<https://doi.org/https://es.scribd.com/document/358667300/ASTM-C-1064-01-pdf>

ASTM C127. (1993). *Standard Test Method for Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate*. American Society for Testing and Materials .

https://doi.org/https://www.academia.edu/36570885/Standard_Test_Method_for_Specific_Gravity

ASTM C138. (2024). *Metodo de ensayo estándar para: Densidad, Volumen, Contenido de Aire en una Mezcla de Concreto*. ASTM. <https://doi.org/https://ingenieriasalva.blogspot.com/2009/04/astm-designacion-c-138-01-aashto-no-t.html>

ASTM C143. (2003). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. En A. C143, *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete* (págs. 1-4). ASTM International.

ASTMC39/C39M. (2018). *Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto*. ASTM International.

<https://doi.org/https://la.astm.org/es/standards/>

Balendran, R. (1995). Estimating the elastic modulus of concrete made with artificially manufactured lightweight aggregates. *Structural Survey*, 13(1), 16-20.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1108/02630809510094526>

- Brunauer, S., Hayes, J., & Hass, W. (1954). The Heats of Hydration of Tricalcium Silicate and β -Dicalcium Silicate. *The Journal of Physical Chemistry*, 3(58), 279-285.
<https://doi.org/https://pubs.acs.org/doi/10.1021/j150513a023>
- Candia, R., & Caiozzi, G. (2005). Intervalos de confianza(Confidence intervals) . *Revista Médica de Chile*, 133(9), 1111-1115. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0034-98872005000900017>
- Cevallos, D. (2021). *Estudio comparativo entre hormigón convencional y hormigón fabricado con el reemplazo en peso del 5%,10%,15% y 20% del árido fino*. ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL. <https://doi.org/http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21706>
- Corral, J. (1999). La Resistencia Característica del Hormigón. Fundamentos Estadísticos y Determinación Práctica. *Ciencia y Sociedad*, XXIV(1), 88-117. <https://doi.org/10.22206/cys.1999.v24i1.pp88-117>
- De la Rosa, C. (2014). *Innovaciones para el tratamiento de agregados contaminados con arcilla*. ICA Ingeniería. Tecnología.
<https://doi.org/https://www.imcyc.com/revistacyt/pdf/septiembre2014/tecnologia.pdf>
- Delgado, C. (2008). Hidrogeología y Modelación del Acuífero Pifo - El Quinche. En C. Delfado, *Hidrogeología y Modelación del Acuífero Pifo - El Quinche* (págs. 40-45). Escuela Politécnica Nacional.
- Delgado, C. (2008). *Hidrogeología y Modelación del Acuífero Pifo-El Quinche*. Escuela Politécnica Nacional. <https://doi.org/http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/4872>
- Duboeuf, F., Liebgott, H., Basarab, A., Brusseau, E. D., & Vray, D. (2007). Static mechanical assessment of elastic Young's modulus of tissue mimicking materials used for medical imaging. *Conference proceedings: ... Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and*

- Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 3, 3450-3453.
<https://doi.org/10.1109/IEMBS.2007.4353073>
- García, J. (2004). Diseño de hormigones: Dirigido a la Aplicación. En J. García, *Sentido Físico de la Dosificación* (págs. 27-71). Universidad Politécnica de Cataluña.
<https://doi.org/https://upcommons.upc.edu/>
- Hernández, A. (2005). *Determinación de los módulos de elasticidad del concreto producido con los diferentes materiales existentes en Bucaramanga y su área metropolitana(Doctoral dissertation)*. Universidad Pontificia Bolivariana: Tesis de Ingeniería Civil.
- Holmes, A., Illowsky, B., & Susan, D. (14 de 02 de 2022). *OpenStax*. OpenStax:
<https://openstax.org/books/introducción-estadística-empresarial/pages/6-1-la-distribucion-normal-estandar>
- Huo, X., Al-Omaishi, N., & Tadros, M. (2001). Creep, Shrinkage, and Modulus of Elasticity of High-Performance Concrete. *ACI materials journal*, 98(6), 440-449. <https://doi.org/ISSN 0889-325X>
- IBM. (29 de 02 de 2024). *Error estándar*. Error estándar: <https://www.ibm.com/docs/es/cognos-analytics/11.1.0?topic=terms-standard-error>
- INEN, & 2380. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380: Cemento Hidráulico. Requisitos de Desempeño para Cementos Hidráulicos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
<https://doi.org/https://archive.org/details/ec.nte.2380.2011>
- INEN, & 490. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 490: Cementos Hidráulicos Compuestos: Requisitos*. INEN.
- Ingeniería Civil en el Salvador. (13 de 04 de 2024). *ASTM Designación: C138*. ASTM Designación: C138: <https://ingenieriasalva.blogspot.com/2009/04/astm-designacion-c-138-01-aashto-no-t.html>

Londoño, D., & Wilson, T. (2019). *Determinación de la ecuación del módulo de elasticidad del hormigón en la provincia de Pichincha elaborado con materiales de la mina de Holcim, ubicada en la parroquia Pifo y cemento Holcim*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

<https://doi.org/https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/26120>

Martinez, M., & Mari, M. (2010). *La distribución Normal*. Universidad Politecnica de Valencia.

<https://doi.org/https://m.riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/7939/La%20distribucion%20Normal.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

NEC-SE-HM-15. (2015). *Estructuras de Hormigón Armado*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.

<https://doi.org/https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/8.-NEC-SE-HM-Hormigon-Armado.pdf>

NEC-SE-HM-2015. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción: Estructuras de Hormigón Armado*.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.

<https://doi.org/https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/8.-NEC-SE-HM-Hormigon-Armado.pdf>

Neville, A. (2010). *Concrete technology. Segunda Edición*. Prentice-Hall.

<https://doi.org/https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2420055>

NTE INEN 2566. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana: Áridos. Reducción de muestras a tamaño de ensayo*. INEN.

<https://doi.org/https://es.scribd.com/document/177808958/NORMA-2566-H>

NTE INEN 695. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 695: Áridos Muestreo*. INEN.

<https://doi.org/https://ia802909.us.archive.org/25/items/ec.nte.0696.2011/ec.nte.0696.2011.pdf>

NTE INEN 696. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 696: Áridos. Análisis Granulométrico en los áridos, fino y grueso*. INEN.

<https://doi.org/https://ia802909.us.archive.org/25/items/ec.nte.0696.2011/ec.nte.0696.2011.pdf>

- NTE INEN 698. (2011). *Norma Técnica Ecuatorina NTE INEN 698. Áridos Para Hormigón. Determinación del Contenido de Terrones de Arcilla y Partículas Desmenuzables*. INEN.
<https://doi.org/https://es.scribd.com/document/396865753/nte-inen-698-1-ARIDOS-PARA-EL-HORMIGON-DETERMINACION-CONTENIDO-DE-ARCILLA-pdf>
- NTE INEN 856. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana. Áridos. Determinación de la Densidad, Densidad Relativa (Gravedad Específica) y Absorción en Árido Fino*. INEN.
<https://doi.org/https://archive.org/details/ec.nte.0856.2010/page/n1/mode/1up>
- NTE INEN 857. (2011). *Norma Técnica Ecuatorina NTE INEN 587: Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa y absorción del árido grueso*. INEN.
<https://doi.org/https://ia902907.us.archive.org/27/items/ec.nte.0857.2010/ec.nte.0857.2010.pdf>
- NTE INEN 858. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 858. Áridos. Determinación de la Masa Unitaria (Peso Volumétrico) y Porcentaje de Vacíos*. INEN.
https://doi.org/https://www.academia.edu/16107439/NTE_INEN_0858_Áridos_Determinación_de_la_masa_unitaria_peso_volumétrico_y_el_porcentaje_de_vacíos
- NTE INEN 860. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 861. Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37.50mm mediante el uso de la máquina de los ángeles*. INEN. <https://doi.org/https://www.studocu.com/ec/document/universidad-central-del-ecuador/ensayo-de-materiales/861-normas-nte-inen-861-para-los-ensayos-respectivos-de-los-agregados-gruesos-y/31180408>
- NTE INEN 862. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 862. Áridos para hormigón. Determinación del contenido total de humedad*. INEN.
<https://doi.org/https://archive.org/details/ec.nte.0862.2011/mode/1up>
- NTE INEN 872. (2011). *Norma Técnica Ecuatoriana. NTE INEN 872. Áridos Para Hormigón*. INEN.
<https://doi.org/https://studylib.es/doc/4495341/nte-inen-0872--áridos-para-hormigón.-requisitos>

- Ortega, C. (06 de 25 de 2024). *Question Pro*. Prueba t: Que es, ventajas y pasos para realizarla:
<https://www.questionpro.com/blog/es/prueba-t-de-student/>
- Polaridad.es. (03 de 11 de 2024). *Polaridad.es*. Polaridad.es: <https://polaridad.es/modulo-de-elasticidad-formula/>
- Powers, T., & Brownyard, T. (1946). *Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste*. Journal Proceedings. <https://doi.org/10.14359/15301>
- Romero, P., Lázaro, C., & González, J. (2013). Estadística Descriptiva e Inferencial. En P. Romero, C. Lázaro, & J. González, *Estadística Descriptiva e Inferencial* (págs. 165-176). Inbook.
- Romo, M. (2008). *Temas de Concreto Armado*. Escuela Politécnica del Ejército.
- Ruiz, D., Vacca, H., & Neira, M. (2007). Propuesta de modificación de la ecuación para la estimación del módulo de elasticidad del concreto en función de la resistencia a la compresión para Bogotá. *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*(67), 7-15.
- Serrano, M., & Pérez, D. (2010). Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto. *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo*, 2(1), 1-2.
https://doi.org/https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-30112010000100002&script=sci_arttext
- Solís, R., & Chan, G. (2020). Desgaste por abrasión del concreto con agregado calizo de alta absorción. *Ciencia UANL*, 3(103). [https://doi.org/ https://doi.org/10.29105/cienciauanl23.103-3](https://doi.org/https://doi.org/10.29105/cienciauanl23.103-3)
- Topcu, I., & Ugurlu, A. (2007). Elasticity theory of concrete and prediction of Static E-modulus for dam Concrete using composite models. *Digest*, 1(26), 1115-1127.
<https://doi.org/https://eskisakarya.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/14443.pdf>
- Torres, J., Guardo, M., Moira, J., Merlano, O., & Silgado, C. (2018). *Módulo de elasticidad. Resistencia a la compresión del concreto*. Universidad Tecnológica de Bolívar.

UNACEM Ecuador S.A. (2024). *Ficha Técnica Selvalegre*. Ministerio del Ambiente Ecuador.

Valladares, A., & Jiménez, H. (2019). *Determinación de la ecuación del módulo de elasticidad representativo para la Provincia de Pichincha, en muestras de cilindros de hormigón con materiales de la mina de San Antonio de Pichincha*. PUCE-Quito.

<https://doi.org/https://repositorio.puce.edu.ec/handle/123456789/26330>

Vivar, Leonardo. (2024). *Determinación de la ecuación del módulo de elasticidad para hormigón de resistencia $f'c=210\text{kg/cm}^2$, elaborado con material granular de la mina de Holcim ubicado en el canton Quito, material reciclado de adoquín y cemento Selva Alegre*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.