

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA  
RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON  
CENIZA VOLCÁNICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL**

**ADRIANA SOLANGE HUERTAS HOLGUÍN**  
adriana.huertas@epn.edu.ec

**ERICK SANTIAGO MINIGUANO ALBUJA**  
erick.miniguano@epn.edu.ec

**DIRECTOR: ING. MARÍA BELÉN CORREA VALLEJO**  
maria.corream@epn.edu.ec

**CO-DIRECTOR: ING. EUGENIA DE LAS MERCEDES VILLACÍS TRONCOSO**  
mercedes.villacis@epn.edu.ec

**Quito, Enero 2022**

## **DECLARACIÓN**

Nosotros, Adriana Solange Huertas Holguín, Erick Santiago Miniguano Albuja, declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

**Adriana Solange  
Huertas Holguín**

---

**Erick Santiago  
Miniguano Albuja**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Adriana Solange Huertas Holguín y Erick Santiago Miniguano Albuja, bajo nuestra supervisión.

---

**Ing. María Belén Correa**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

**Ing. Mercedes Villacís**  
**CODIRECTOR DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme salud y sabiduría, por guiarme en cada paso de este camino y por permitirme culminar con este proyecto. Se que me ayudará a seguir avanzando.

A mi directora de tesis Ing. María Belén Correa y a mi codirectora Ing. Mercedes Villacís por darnos toda la ayuda necesaria para culminar con este trabajo de investigación y solventar nuestras dudas.

A mis padres Clever Huertas y Solange Holguín por siempre estar ahí para mi apoyándome en cada decisión tomada, cuidando de mi bienestar y brindándome todo su amor y protección desde el día que nací. No saben cuanto les agradezco que estén conmigo. A mis hermanos Ian, Clever, Carla, Pamela y Andrés por todo el cariño que me han dado.

A mi mejor amiga Grace Lagla por estar siempre ahí a pesar de la distancia, por todos los años de amistad y risas que hemos compartido, por escucharme y hacerme saber que siempre contaba contigo incluso en los malos momentos, sabes que te adoro.

A mis grandes amigas Jéssica Tituaña, Anita Molina, Vanessa Montesdeoca, Johana Pastuña, que a pesar de que nos fuimos por diferentes caminos aún siguen siendo una parte importante en mi vida.

A mi amigos y compañeros de universidad: María José Pallango, Fernando Llumigusín y Kevin Rodríguez por su apoyo, trabajo en equipo, amistad incondicional y por todas las anécdotas vividas, más que amigos se convirtieron en mi familia y espero que sigan siendo parte de mi vida por muchos años más. A Cristian Chancusig y Tatiana Ramos por brindarme su amistad todos estos años y a Marcelo Echeverría por apoyarme durante todo este tiempo. Gracias a todos.



Finalmente, agradezco a la Escuela Politécnica Nacional por abrirme las puertas y brindarme todo el conocimiento que tengo hasta ahora. A la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental y a todos sus maestros por formarme académica y profesionalmente.

*Adriana Solange Huertas Holguín*

## AGRADECIMIENTO

A Dios, estoy eternamente agradecido por darme fuerzas y salud, por siempre iluminar mi camino y darme fe. A mis queridos padres por brindarme su amor y cariño desde mi primer día de vida, quienes han hecho todo lo posible con sus esfuerzos para que mis hermanos y yo podamos cumplir nuestras metas. Sin duda, doy las gracias por todo lo que han hecho por mí, por darme ese apoyo incondicional, por darme esa libertad de escoger mis sueños y mis metas, por darme ese infinito amor y sobre todo por darme la vida.

A mi amiga y compañera de tesis la Srta. Adriana Solange Huertas Holguín, a quien le tengo mucho respeto, doy gracias por que fue una persona incondicional en este trabajo de titulación, sinceramente ella fue el motor e impulsadora de este trabajo. Y doy gracias por ser parte de mi vida. ¡Gracias por todo, Adri!

A mí querida amiga Ivett Janina Torres Morocho, gracias por compartir buenos momentos, por ayudarme y apoyarme en todo, por estar siempre a mi lado y sobre todo gracias por tu increíble amistad. ¡Gracias Ivett!

A mi amigo Ricardo Sandoval por ser una gran persona durante nuestra vida universitaria, siendo amigos desde el primer día de facultad. ¡Gracias mijo!

A mis amigos de facultad: Cynthia M., Cristian M., Gastón A., Marcos R., Gabriela N., Jefferson J. y María José P., quienes he compartido toda clase de aventuras que nunca las olvidare y las guardare dentro de mi corazón. Muchas gracias muchachos.

A la Escuela Politécnica Nacional por darme la oportunidad de seguir y culminar mis estudios universitarios, confío plenamente que fui preparado por ingenieros civiles de alto nivel y competitividad. Al personal del LEMSUR por ayudarnos y brindarnos las guías necesarias dentro de su laboratorio para poder desarrollar y avanzar nuestro trabajo de titulación.

A nuestra directora de tesis Ing. María Belén Correa y nuestra codirectora de tesis Ing. Mercedes Villacís por dar su guía y sobre todo sus conocimientos para completar este trabajo.

Al departamento de Infraestructura de la empresa SEDEMI por darme la oportunidad de experimentar y sentir lo que es ser un ingeniero civil.

Finalmente, quiero dar gracias a mi Ecuador del alma por permitir que yo pueda nacer en esta hermosa tierra, rica en paisajes y vida.

*Erick Santiago Miniguano Albuja*

## **DEDICATORIA**

A mis padres Clever Huertas y Solange Holguín, sin su amor y apoyo esto no habría sido posible; y a mis abuelitos Carlos Holguín y Aracely Ubilla por estar pendientes todo este tiempo a pesar de la distancia, los amo.

*Adriana Solange Huertas Holguín*

## DEDICATORIA

A mi madre Carmen Albuja y mi padre Franklin Miniguano quienes son parte de mi vida, quienes me forjaron con valores y me apoyaron con firmeza y determinación en cada instante de mi camino hasta este momento. Sin duda, mis padres son mi mayor motivación para seguir adelante, para seguir evolucionado, ser cada día mejor por el bien y para el bien.

A mis hermanos menores Mateo y David Miniguano quienes conviven y han compartido conmigo momentos inolvidables y divertidos, juntos hemos superado toda clase de obstáculo que la vida nos ha presentado. ¡Somos Miniguanos!

A mis familiares, a mis amigos y a mis antepasados, quienes de algún modo han contribuido con un granito de impulso para alcanzar este éxito.

A mi país, mi lindo Ecuador.

*Erick Santiago Miniguano Albuja*

## ÍNDICE

DECLARACIÓN.....	II
CERTIFICACIÓN.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
AGRADECIMIENTO.....	VI
DEDICATORIA.....	VIII
DEDICATORIA.....	IX
RESUMEN.....	XX
ABSTRACT.....	XXI
PRESENTACIÓN.....	XXII
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
1.3. ALCANCE.....	4
1.4. JUSTIFICACIÓN.....	4
1.4.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA.....	4
1.4.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA.....	5
1.4.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA.....	5
CAPÍTULO 2 FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE.....	6
2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	6
2.1.1. PUZOLANAS.....	6
2.1.1.1. Clasificación de las puzolanas.....	6
2.1.2. CENIZA VOLCÁNICA.....	6

2.1.2.1.	Definición.....	6
2.1.2.2.	Lugar de muestreo.....	7
2.1.3.	HORMIGÓN.....	7
2.1.3.1.	Definición.....	7
2.1.3.2.	Hormigón armado .....	7
2.1.3.3.	Componentes del hormigón .....	8
2.1.4.	FABRICACIÓN DEL CONCRETO .....	9
2.1.4.1.	Materiales a utilizar .....	9
2.1.4.2.	Ensayos.....	10
2.1.4.3.	Dosificación .....	11
2.1.4.4.	Moldeo y fabricación .....	17
2.1.4.5.	Curado del hormigón .....	19
2.1.5.	PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO .....	19
2.1.5.1.	Resistencia a la compresión .....	19
2.1.5.2.	Módulo de elasticidad.....	21
2.1.5.3.	Resistencia a flexión.....	23
2.1.5.4.	Módulo de ruptura.....	23
2.1.5.5.	Durabilidad .....	24
2.1.6.	VIGAS SOMETIDAS A FLEXIÓN .....	25
2.1.6.1.	Definiciones .....	25
2.1.6.2.	Etapas de una viga sometida a flexión.....	27
2.1.6.3.	Diseño a flexión de una viga armada .....	31
2.1.7.	NORMATIVA .....	35
2.1.7.1.	Caracterización de materiales.....	35
2.1.7.2.	Ensayos para agregados .....	35
2.1.7.3.	Ensayos para el cemento y la ceniza volcánica .....	36
2.1.7.4.	Dosificación de hormigón.....	36
2.1.7.5.	Elección de las dimensiones de las probetas.....	36
2.1.7.6.	Resistencia a compresión .....	36
2.1.7.7.	Módulo de elasticidad .....	37
2.1.7.8.	Resistencia a la flexión .....	37
2.1.7.9.	Permeabilidad del hormigón .....	37
2.2.	ESTADO DEL ARTE.....	38

2.2.1. ESTUDIOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA .....	38
Hossain (1999, 2003-2005) .....	38
Matawal (2005).....	39
Hossain y Lachemi (2007) .....	40
Hossain y Lachemi (2010) .....	40
Olawuyi y Olusola (2010).....	41
Kizilkanat, Tufekci y Oktay (2015) .....	41
Galeas y Guzmán (2020).....	42
2.2.2. ESTUDIO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE OTRAS PUZOLANAS NATURALES .....	43
Zunino (2012).....	43
2.2.3. ESTUDIOS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA .....	43
Al-Bahar, Chakkamalayath, José, Abdulsalam, Otaibi y Al- Aibani (2017) .....	43
Zeyad, Tayeh y Yusuf (2019) .....	44
2.2.4. ESTUDIOS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE OTRAS PUZOLANAS NATURALES .....	45
Akeke, Ephraim, Akobo y Ukpata (2013) .....	45
Sooraj V.M (2013) .....	46
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA.....	48
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN EL HORMIGÓN .....	48
3.1.1. ENSAYOS PARA LOS AGREGADOS.....	48
3.1.1.1. Granulometría de agregados .....	48
3.1.1.2. Densidad aparente, suelta y compactada de los agregados .....	53
3.1.1.3. Peso específico y absorción de los agregados .....	56
3.1.1.4. Abrasión .....	64



3.1.1.5.	Contenido orgánico de la arena .....	67
3.1.1.6.	Contenido de humedad de los agregados.....	69
3.1.2.	ENSAYOS PARA EL CEMENTO.....	71
3.1.2.1.	Densidad aparente del cemento .....	71
3.1.2.2.	Densidad real del cemento .....	73
3.2.	ENSAYOS PARA LA CENIZA VOLCÁNICA .....	74
3.2.1.	DENSIDAD APARENTE Y REAL DE LA CENIZA .....	74
3.2.2.	TRITURACIÓN DE LA CENIZA VOLCÁNICA.....	74
3.3.	DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN .....	75
3.3.1.	DISEÑO DE MEZCLA POR METRO CÚBICO.....	77
3.3.2.	DOSIFICACIÓN PARA PROBETAS CON CENIZA .....	78
3.4.	FABRICACIÓN DE CILINDROS Y VIGAS DE HORMIGÓN .....	80
3.4.1.	ENSAYO DE CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN.....	81
3.4.2.	MOLDEO DE ESPECÍMENES.....	82
3.4.3.	CURADO DE PROBETAS .....	83
3.5.	ENSAYOS DE PROBETAS EN EL LABORATORIO.....	84
3.5.1.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN .....	84
3.5.2.	MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	86
3.5.3.	RESISTENCIA A LA FLEXIÓN .....	87
3.5.3.1.	Vigas de hormigón simple.....	87
3.5.3.2.	Vigas de hormigón armado .....	89
3.5.4.	DURABILIDAD.....	94
3.5.4.1.	Permeabilidad.....	94
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		96
4.1.	ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN.....	96
4.1.1.	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROBETAS ESTÁNDAR Y PROBETAS CON CENIZA VOLCÁNICA .....	97
4.1.2.	CÁLCULO DEL PESO ESPECÍFICO DEL HORMIGÓN ENDURECIDO.....	101
4.2.	ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD .....	101

4.2.1. ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD OBTENIDO SEGÚN LA NORMATIVA NEC-15.....	103
4.3. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN.....	105
4.3.1. VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLE.....	105
4.3.2. VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO .....	107
4.3.2.1. Análisis del momento de agrietamiento en vigas armadas .....	110
4.3.2.2. Fallas presentadas en los ensayos de flexión de vigas armadas .....	113
4.4. ENSAYO DE PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN.....	114
4.5. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN .....	116
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	119
5.1. CONCLUSIONES .....	119
5.2. RECOMENDACIONES .....	123
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	124
ANEXOS.....	128
ANEXO 1 Informe de dosificación de hormigón de $f'_c=21$ MPa .....	129
ANEXO 2 Informe de las propiedades físicas de los materiales .....	131
ANEXO 3 Informe de granulometría de agregado fino.....	133
ANEXO 4 Informe de granulometría de agregado grueso.....	135
ANEXO 5 Informe de ensayo de abrasión .....	137
ANEXO 6 Informe de densidad aparente de la ceniza volcánica .....	139
ANEXO 7 Informe de densidad real de la ceniza volcánica .....	141
ANEXO 8 Valores del ensayo de asentamiento de cada mezcla.....	143
ANEXO 9 Informe del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón a los 28, 56 y 90 días.....	145

ANEXO 10 Informe del ensayo de módulo de elasticidad del hormigón a los 28 días .....	149
ANEXO 11 Informe del ensayo de módulo de elasticidad del hormigón a los 56 días .....	159
ANEXO 12 Informe del ensayo a flexión de vigas de hormigón simple a los 28 y 56 días .....	169
ANEXO 13 Cálculo de la carga máxima teórica que deberían soportar las vigas de hormigón armado sometidas a flexión.....	172
ANEXO 14 Informe del ensayo a flexión de las vigas de hormigón armado a los 28 y 56 días .....	175
ANEXO 15 Informe del ensayo de permeabilidad del hormigón .....	178
ANEXO 16 Fotografías de los ensayos realizados .....	180

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Asentamiento recomendado según el tipo de construcción .....	12
Tabla 2 Tamaño máximo de agregado según el tipo de obra .....	13
Tabla 3 Cantidad de agua, L/M <sup>3</sup> de hormigón, necesaria en función del tamaño máximo del agregado, según los diferentes asentamientos .....	14
Tabla 4 Relación agua cemento recomendada en función de la resistencia a compresión.....	15
Tabla 5 Volumen de agregado grueso por unidad volumétrica de hormigón.....	16
Tabla 6 Requerimiento de gradación para agregado fino .....	49
Tabla 7 Tamaño de muestra para granulometría de agregado grueso .....	51
Tabla 8 Requerimiento de gradación para agregado grueso .....	53
Tabla 9 Capacidad del molde.....	54
Tabla 10 Masa mínima requerida para calcular peso específico de agregado grueso .....	63
Tabla 11 Gradación de la muestra de prueba para abrasión .....	65
Tabla 12 Carga abrasiva.....	65
Tabla 13 Escala de Gardner .....	68
Tabla 14 Masa mínima para calcular el contenido de humedad del agregado grueso .....	70
Tabla 15 Resultados del ensayo de contenido de humedad de los agregados.....	71
Tabla 16 Cantidades iniciales considerando agregado en estado seco .....	75
Tabla 17 Corrección de humedad .....	76
Tabla 18 Corrección de las cantidades de agua y agregados .....	76
Tabla 19 Diseño de mezcla inicial .....	77
Tabla 20 Diseño de mezcla corregido .....	77
Tabla 21 Nomenclatura para identificar especímenes con distinta dosificación .....	78
Tabla 22 Cantidades en peso de los elementos que conforman 1 m <sup>3</sup> de hormigón.....	78

Tabla 23	Número de probetas y volumen requerido para cada una .....	79
Tabla 24	Cantidades en peso reales para el volumen real requerido de hormigón .....	79
Tabla 25	Datos iniciales necesarios para el diseño a flexión de una viga armada .....	90
Tabla 26	Resultados del cálculo de acero mínimo y máximo permisible .....	91
Tabla 27	Distribución de varillas de acero en la sección .....	91
Tabla 28	Resultado de la carga que debería soportar la sección de hormigón armado .....	92
Tabla 29	Resistencia a compresión promedio del HS, HCV10, HCV20 .....	97
Tabla 30	Variación en porcentaje de resistencia a compresión de probetas de hormigón .....	98
Tabla 31	Variación en porcentaje de las probetas de HS, HCV10 y HCV20 con respecto a la resistencia de diseño de 21 MPa .....	99
Tabla 32	Peso específico del hormigón estándar y con inclusión de ceniza volcánica.....	101
Tabla 33	Módulos de elasticidad a los 28 y 56 días .....	102
Tabla 34	Variación en porcentaje del módulo de elasticidad con respecto al hormigón estándar a los 28 y 56 días .....	103
Tabla 35	Módulo de elasticidad según la NEC-15 a los 28 y 56 días .....	104
Tabla 36	Variación en porcentaje de los valores de módulo de elasticidad calculados, según la NEC-15, con respecto a los obtenidos en el laboratorio .....	105
Tabla 37	Resistencia a la tensión promedio para HS, HCV10 y HCV20 .....	106
Tabla 38	Variación en porcentaje de la resistencia a tensión de probetas de hormigón .....	107
Tabla 39	Resultados obtenidos del ensayo a flexión de vigas armadas .....	108
Tabla 40	Variación en porcentaje de las cargas obtenidas en laboratorio con respecto a la carga teórica.....	109

Tabla 41 Variación en porcentaje de la carga soportada por vigas con ceniza volcánica (HCV10 y HCV20) con respecto a vigas con HS .....	109
Tabla 42 Dimensiones de la sección transversal de las vigas armadas .....	110
Tabla 43 Valores de momento de agrietamiento para una edad de 28 y 56 días en los diferentes porcentajes de reemplazo .....	110
Tabla 44 Momento máximo soportado por la viga hasta su colapso .....	111
Tabla 45 Porcentaje de momento de agrietamiento con respecto al momento máximo que soporta la viga.....	113
Tabla 46 Tipos de fallas presentadas en vigas de hormigón armado .....	113
Tabla 47 Penetración de agua en cilindros de hormigón a los 28 días .....	114
Tabla 48 Penetración de agua en cilindros de hormigón a los 56 días .....	115
Tabla 49 Costo de la materia prima para la elaboración de hormigón convencional para 1m <sup>3</sup> .....	116
Tabla 50 Costo de la materia prima para la elaboración de hormigón con 10% de reemplazo de ceniza volcánica para 1m <sup>3</sup> .....	117
Tabla 51 Costo de la materia prima para la elaboración de hormigón con 20% de reemplazo de ceniza volcánica para 1m <sup>3</sup> .....	117

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Figura 1 Depósito de ceniza volcánica, barrio San Felipe .....	10
Figura 2 Concretera de 12.5 Kg y 50 Kg de capacidad respectivamente .....	18
Figura 3 Tipos de falla de las probetas cilíndricas .....	21
Figura 4 Esquema del aparato de prueba de flexión para el método de carga de tercer punto. ....	23
Figura 5 Diagrama esfuerzo-deformación de materiales .....	27
Figura 6 Etapa del hormigón no agrietado .....	28
Figura 7 Etapa de esfuerzos elásticos. Hormigón agrietado .....	29
Figura 8 Etapa de resistencia última .....	30
Figura 9 Diagrama de cortante y momento para una viga simplemente apoyada con carga puntual en cada tercio de su longitud .....	32
Figura 10 Serie de tamices para la granulometría del agregado fino.....	49
Figura 11 Muestra de agregado grueso para granulometría.....	51
Figura 12 Selección de tamices y colocación de muestra para granulometría de agregado grueso .....	52
Figura 13 Material retenido en cada tamiz .....	52
Figura 14 Moldes para densidad aparente .....	54
Figura 15 Material pétreo previamente seco .....	55
Figura 16 Densidad aparente del agregado fino y grueso .....	56
Figura 17 Agregado fino en saturación .....	57
Figura 18 Molde y compactador para peso específico .....	58
Figura 19 Colocación y compactación del material fino en el molde para determinar la condición SSS .....	58
Figura 20 Material fino en condición SSS.....	59
Figura 21 Picnómetro con agregado .....	59
Figura 22 Extracción de aire en agregado fino .....	60
Figura 23 Toma de datos antes y después de secar el agregado fino.....	60
Figura 24 Agregado grueso en saturación .....	62
Figura 25 Condición SSS del agregado grueso.....	62
Figura 26 Toma de pesos de la canastilla y del agregado sumergido .....	63

Figura 27 Colocación de agregado y esferas dentro de la Máquina de los Ángeles .....	66
Figura 28 Pérdida durante el proceso de abrasión .....	66
Figura 29 Ensayo de contenido orgánico de arena .....	68
Figura 30 Comparador de color o Escala de Gardner .....	69
Figura 31 Ensayo de densidad aparente del cemento.....	72
Figura 32 Ensayo de densidad real del cemento.....	73
Figura 33 Encofrados para vigas y cilindros .....	80
Figura 34 Armado de vigas .....	80
Figura 35 Elaboración de una tanda de hormigón .....	81
Figura 36 Ensayo de consistencia del hormigón fresco.....	82
Figura 37 Moldeo de cilindros y vigas de hormigón simple .....	82
Figura 38 Moldeo de vigas de hormigón armado .....	83
Figura 39 Curado de probetas de hormigón.....	83
Figura 40 Toma de dimensiones de las probetas de hormigón .....	84
Figura 41 Refrentado de las caras de los cilindros .....	85
Figura 42 Ensayo a compresión de cilindros de hormigón .....	85
Figura 43 Colocación de extensómetros en el cilindro de hormigón.....	86
Figura 44 Inicio de ensayo para módulo de elasticidad .....	87
Figura 45 Preparación de la viga antes del ensayo .....	88
Figura 46 Configuración de la máquina de ensayo .....	88
Figura 47 Ensayo de la probeta y toma de medidas luego de la falla .....	89
Figura 48 Verificación de la posición donde ocurre la falla .....	89
Figura 49 Sección longitudinal y transversal de la viga armada .....	90
Figura 50 Máquina Universal .....	93
Figura 51 Ensayo a flexión de vigas armadas .....	93
Figura 52 Inicio de ensayo de permeabilidad y control de la presión del agua.....	94
Figura 53 División de la probeta cilíndrica por medio de tracción directa .....	95
Figura 54 Permeabilidad medida en cada probeta .....	95
Figura 55 Curvas de endurecimiento del HS, HCV10 y HCV20 .....	97



Figura 56 Variación de la resistencia a compresión del hormigón en diferentes edades y porcentajes de reemplazo .....	98
Figura 57 Resistencia a compresión respecto a la resistencia de diseño a los 28 días.....	99
Figura 58 Resistencia a compresión respecto a la resistencia de diseño a los 56 días.....	100
Figura 59 Resistencia a compresión respecto a la resistencia de diseño a los 90 días.....	100
Figura 60 Módulo de elasticidad a los 28 días.....	102
Figura 61 Módulo de elasticidad a los 56 días .....	103
Figura 62 Comparación entre los módulos de elasticidad obtenidos en el laboratorio y los módulos calculados según la NEC-15, a los 28 días. .....	104
Figura 63 Comparación entre los módulos de elasticidad obtenidos en el laboratorio y los módulos calculados según la NEC-15, a los 56 días. .....	105
Figura 64 Variación de la resistencia a tensión del hormigón en diferentes edades y porcentajes de reemplazo .....	106
Figura 65 Carga máxima soportada a flexión en vigas.....	108
Figura 66 Momento de agrietamiento de las vigas a los 28 y 56 días .....	111
Figura 67 Momento de agrietamiento vs Momento máximo soportado por las vigas de HS, HCV10 y HCV20 a los 28 días.....	112
Figura 68 Momento de agrietamiento vs Momento máximo soportado por las vigas de HS, HCV10 y HCV20 a los 56 días.....	112
Figura 69 Penetración de agua promedio a los 28 días .....	115
Figura 70 Penetración de agua promedio a los 56 días .....	116

## RESUMEN

Este trabajo experimental tiene como objetivo el estudio del comportamiento mecánico de vigas de hormigón, adicionando ceniza volcánica dentro de la dosificación como reemplazo del cemento en diferentes porcentajes, para una resistencia a compresión de 21 MPa; se busca comparar los resultados entre las probetas elaboradas con hormigón estándar (HS) y las de hormigón con 10% y 20% de ceniza volcánica (HCV10 y HCV20, respectivamente) tanto en ensayos de compresión simple, flexión, módulo de elasticidad y permeabilidad, cuyos procedimientos se encuentran detallados según la normativa vigente.

El interés de este estudio se da por que la utilización de materiales puzolánicos naturales dentro de la dosificación de hormigón está aumentando y se espera que esta tendencia continúe en los siguientes años conjuntamente con el avance tecnológico y el deseo de desarrollo sostenible.

Para la ejecución de la parte experimental, primero se obtuvo la dosificación en peso para cada una de las mezclas de hormigón (HS, HCV10 y HCV20), se procedió al moldeo y fabricación de probetas cilíndricas y prismáticas las cuales fueron curadas para la realización de los ensayos pertinentes. Se fabricaron 63 cilindros, 27 para ensayos a compresión, 18 para módulo de elasticidad y 18 para permeabilidad. Fueron fundidas 18 vigas de hormigón simple y 18 vigas de hormigón armado para los ensayos a flexión.

Para concluir, los resultados se basaron en una comparación de las propiedades que posee cada grupo de especímenes según el porcentaje de reemplazo y edades correspondientes, además de un análisis económico con respecto a los hormigones convencionales.

**Palabras clave:** Ceniza volcánica, Hormigón Estándar, Resistencia a la Compresión, Resistencia a la Flexión, Módulo de Elasticidad, Permeabilidad, Porcentaje de Reemplazo.

## ABSTRACT

This experimental work aims to study the mechanical behavior of concrete beams, adding volcanic ash within the dosage as a replacement for cement in different percentages, for a compressive strength of 21 MPa; It seeks to compare the results between the specimens made with standard concrete (HS) and those made of concrete with 10% and 20% volcanic ash (HCV10 and HCV20, respectively) both in simple compression, bending, modulus of elasticity and permeability tests, whose procedures are detailed according to current regulations.

This study is of interest because the use of natural pozzolanic materials within the concrete dosage is becoming increasingly popular and it is expected that this trend will continue in the following years, accompanied by technological progress and the desire for sustainable development.

For the execution of the experimental part, the weight dosage was first obtained for each of the concrete mixtures (HS, HCV10 and HCV20), followed by the molding and manufacturing of cylindrical and prismatic specimens which were cured for the realization of relevant tests. 63 cylinders were manufactured, 27 for compression tests, 18 for modulus of elasticity and 18 for permeability. 18 simple concrete beams and 18 reinforced concrete beams were cast for the flexural tests.

To conclude, the results were based on a comparison of the properties of each group of specimens according to the percentage of replacement and corresponding ages, in addition to an economic analysis with respect to conventional concretes.

**Keywords:** Volcanic Ash, Standard Concrete, Compressive Strength, Flexural Strength, Modulus of Elasticity, Permeability, Replacement Percentage.

## PRESENTACIÓN

El presente trabajo se compone de cinco capítulos, las respectivas referencias bibliográficas y anexos como apoyo de la información, cada capítulo se desarrolla de la siguiente forma:

Capítulo 1: Contiene las generalidades de la investigación: introducción, objetivos, alcance y justificación acerca del uso de ceniza volcánica para la evaluación del comportamiento mecánico de un elemento estructural (vigas).

Capítulo 2: Presenta toda la base teórica requerida para justificar este estudio; definiciones de puzolanas, ceniza volcánica y hormigón, fabricación y propiedades del concreto endurecido, vigas sometidas a flexión y normativa utilizada. Además, contiene el estado del arte donde se da a conocer otros estudios a nivel nacional e internacional referidos a este tema.

Capítulo 3: Se detalla la metodología utilizada para el desarrollo de la parte experimental de este estudio, como es: caracterización de materiales, ensayos de la ceniza volcánica, procedimiento de dosificación del hormigón, fabricación y moldeado de especímenes, proceso de ensayo para la determinación de la resistencia a compresión, flexión, módulo de elasticidad y permeabilidad de las muestras de hormigón (HS. HCV10 y HCV20).

Capítulo 4: Se analizan los resultados de los ensayos físicos realizados, obteniendo de esta manera una diferencia de las propiedades mecánicas del hormigón con ceniza volcánica respecto al convencional, mediante tablas de variación en porcentaje de las resistencias, curvas de endurecimiento y gráficos de barras. Además, se analiza el costo directo de los materiales utilizados para cada dosificación.

Capítulo 5: Se exponen todas las conclusiones acerca de los resultados analizados en el capítulo anterior y se plantean recomendaciones que pueden servir para futuros trabajos.

Se presentan, de manera complementaria, las referencias bibliográficas y anexos que fundamenten el trabajo realizado.

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1. INTRODUCCIÓN

A lo largo de la historia, se ha tratado de mejorar la calidad de vida de las personas con el uso de los recursos naturales disponibles. Estas mejoras se ven reflejadas en los procesos de construcción de diferentes obras de ingeniería que han sido la base para la creación de muchas civilizaciones alrededor de todo el mundo. Con la revolución industrial, se ha aumentado la producción de materiales, así como la implementación de nuevas tecnologías y sistemas para la construcción. Hoy en día, se intenta incluir en cualquier obra la idea de construcción sustentable (Zunino, 2012).

La construcción sustentable tiene como fin minimizar el impacto ambiental generado por los residuos que quedan de una obra. Esto se pretende lograr optimizando recursos, disminuyendo el uso de energía y con la reutilización de materiales; uno de los residuos que más contamina es el cemento, por ello, el reducir este material, ya sea en pequeños porcentajes, puede contribuir con el cuidado del medio ambiente (Gaggino, 2014).

Dentro de los elementos estructurales principales que conforman una edificación están: las vigas, columnas, losas y en ciertos casos los muros o diafragmas. Todos estos elementos pueden ser elaborados con hormigón o acero. A partir de los siglos XX y XXI se han propuesto diferentes formas de fabricar hormigón, sustituyendo el cemento por algún otro material para mermar el impacto que sufre el medio ambiente y economizar los procesos constructivos. Una de las propuestas, ya realizada hasta el momento, es el reemplazo del porcentaje en peso del cemento por ceniza volcánica para la fabricación de concreto (Galeas & Guzmán, 2020).

En Ecuador, la propuesta de la dosificación de hormigón con ceniza volcánica es factible gracias a que la región Sierra se encuentra atravesada por la cordillera de Los Andes y presenta una gran cantidad de volcanes, algunos de ellos con actividad constante como, por ejemplo: el volcán Tungurahua. En los últimos 20

años este volcán ha acumulado grandes cantidades de ceniza en sus faldas, formando depósitos a lo largo del tiempo (Bustillos et al., 2014).

Basándose en esta información, en una investigación anterior, ya se realizaron ensayos de resistencia a la compresión simple para 14 y 21 MPa con el 2.5%, 5%, 10% y 20% de reemplazo en peso de cemento por ceniza volcánica extraída de las faldas del volcán Tungurahua para conocer el porcentaje óptimo que debe usarse de este material dentro de una dosificación de hormigón. El resultado de la dosificación con un reemplazo del 10% y 20% de la fracción fina (material pasante del tamiz N°200) de ceniza, para 21MPa, presentó un incremento en su resistencia a compresión de aproximadamente 15.2% y 10.3%, respectivamente, a los 200 días de ensayo (Galeas & Guzmán, 2020).

Para continuar, un paso más adelante, para esta investigación se elaboraron probetas cilíndricas y prismáticas (vigas), para analizar el módulo de elasticidad, la resistencia a compresión y la resistencia a flexión del hormigón con un reemplazo del 10% y 20% de la fracción fina de ceniza volcánica extraída de un depósito en la ciudad de Latacunga; esta puzolana natural es originaria del volcán Cotopaxi.

Además, se tomará en cuenta la metodología del ACI 211.1 (2002) obteniendo así la proporción correcta de componentes para la mezcla con una resistencia específica a compresión de 21 MPa, siendo este el hormigón patrón, y consecutivamente el reemplazo en peso de cemento por ceniza volcánica para el nuevo hormigón (NEC, 2016).

Se fabricaron vigas simples y armadas con la dosificación propuesta para 21 MPa, con un reemplazo del 10% y 20% en peso de ceniza, y se las ensayó a flexión simple para determinar su comportamiento mecánico en comparación con vigas elaboradas de hormigón convencional. La altura escogida para vigas de hormigón simple y armado fue 15 cm y 25 cm, respectivamente; la longitud de cada una fue de 50 mm más tres veces la dimensión de la altura, por lo que las vigas tienen una sección transversal cuadrada de 15x15x60 y 25x25x80, dimensiones que se han obtenido según la norma ASTM C31.

Las probetas se analizaron en dos grupos: el primero fue: Vigas de Hormigón Simple vs. Vigas de Hormigón Simple con ceniza volcánica; el segundo grupo: Vigas de Hormigón Armado vs. Vigas de Hormigón Armado con ceniza volcánica. Para cada tipo de viga, se elaboraron 3 muestras para ensayarlas a una edad de 28 y 56 días; y, además, de esta manera se pudo desarrollar un estudio técnico-económico para conocer el rendimiento que tiene esta aplicación.

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el comportamiento mecánico de vigas de hormigón armado adicionando ceniza volcánica para una resistencia a compresión de 21 MPa (hormigón estructural) mediante la comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de flexión simple.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar la resistencia a flexión simple a la que serán sometidas las vigas de hormigón sin reforzamiento con dosificación estándar y con adición de ceniza volcánica.
- Determinar la resistencia a flexión simple a la que serán sometidas las vigas de hormigón con reforzamiento utilizando la dosificación estándar y con adición de ceniza volcánica.
- Comparar los resultados de resistencia obtenida en cada grupo de especímenes estableciendo los factores que aportan mayor resistencia a los elementos.
- Comparar los costos de fabricación de vigas elaboradas con los dos tipos de dosificación propuesta para evidenciar el impacto económico frente al comportamiento.

### **1.3. ALCANCE**

Esta investigación considera la variación en la dosificación del hormigón convencional y el comportamiento mecánico dentro de un elemento estructural, reemplazando un porcentaje de cemento por ceniza volcánica obtenida de un depósito formado a lo largo del tiempo por los procesos eruptivos del volcán Cotopaxi, utilizando materiales estándar como: agua, cemento, ripio y arena; se tomarán los criterios de dosificación de la norma ACI 211.1, se fabricarán vigas de hormigón armado y hormigón simple con un  $f'c$  de 21 MPa, para analizar la resistencia a flexión y el módulo de elasticidad en cada grupo de prueba, se busca obtener un aumento de la capacidad a flexión a lo largo del tiempo.

### **1.4. JUSTIFICACIÓN**

#### **1.4.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA**

Se sabe que la flexión es una medida de la falla por momento de un elemento estructural como: viga, losa, columna, etc. El uso de ceniza dentro de la dosificación de hormigón para un elemento estructural puede aportar a la capacidad de carga de dicho elemento (Masías, 2018). Cuando se ensaya un elemento a flexión, el hormigón comienza a agrietarse dependiendo de la carga que se aplique hasta llegar a su rotura (Ramírez & Samaniego, 2016). Al aumentar la capacidad del concreto hay una alta probabilidad de que la calidad y eficiencia del elemento aumente y el costo sea menor, por la disminución de cemento en la dosificación, tomando en cuenta que este es el componente más caro (Masías, 2018).

Por lo tanto, elaborar elementos estructurales a base de una dosificación que puede mejorar el comportamiento dentro de una estructura, representa una forma de complementar el conocimiento y a la vez una base para quienes se interesen en aplicar esta metodología en el futuro. Este estudio hará una comparación de la resistencia a flexión de una viga armada con dosificación estándar y otra en donde se introduzca ceniza volcánica.



#### **1.4.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA**

Existen normas en las que se encuentran recomendaciones, métodos y criterios a seguir, para la evaluación de puzolanas naturales en mezclas de concreto como son: la ACI 232 1R-12, la ASTM C311-18 o la ASTM C638, entre otras; adicionalmente, ya se ha realizado un estudio técnico experimental en el que se ha demostrado la eficiencia que genera el reemplazar un porcentaje en peso de cemento por ceniza para un  $f'c$  de 14 y 21 MPa (Galeas & Guzmán, 2020) y uno en el que se analiza los efectos sobre la resistencia a flexión del hormigón utilizando fibras de polipropileno (Ramírez & Samaniego, 2016).

#### **1.4.3. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA**

Como se tiene conocimiento, la ceniza volcánica es un material que se puede conseguir de manera natural y por lo tanto viene a ser más económica que el cemento hidráulico. De demostrarse que el comportamiento mecánico del elemento estructural usando la dosificación con reemplazo de ceniza volcánica, es mejor que el comportamiento de la viga con dosificación convencional, se podrá incentivar la producción local de este tipo de hormigón. La optimización de recursos genera una reducción de la huella ambiental, manteniendo los estándares de calidad y seguridad normadas.

## **CAPÍTULO 2**

### **FUNDAMENTO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE**

#### **2.1. FUNDAMENTO TEÓRICO**

##### **2.1.1. PUZOLANAS**

La definición de puzolana corresponde a un material constituido de sílice o sílice alúmina, sin propiedades hidráulicas, sin embargo, gracias a sus componentes y estando a una temperatura ordinaria, es capaz de fijar el hidróxido de cal obteniendo así compuestos con características hidráulicas (Salazar, 2005).

##### **2.1.1.1. Clasificación de las puzolanas**

Según su origen, las puzolanas se clasifican en: naturales y artificiales; las naturales son de dos tipos: puramente minerales, provenientes de erupciones explosivas, y de origen orgánico que corresponden a depósitos formados por la aglomeración de caparzones y huesos silíceos de animales y plantas (Salazar, 2005).

Las puzolanas artificiales, por otro lado, son aquellas que han pasado por algún tratamiento térmico. De estas se pueden diferenciar dos grupos: el primero son las puzolanas naturales que han pasado por procesos térmicos; también son llamadas mixtas o intermedias; y el segundo incluye subproductos de fabricación industrial, cenizas volantes y las cenizas de lignitos (Salazar, 2005).

##### **2.1.2. CENIZA VOLCÁNICA**

##### **2.1.2.1. Definición**

La ceniza volcánica, como se explicó en el punto anterior, corresponde al grupo de puzolanas naturales, que son producto de un proceso eruptivo y al meteorizarse en el suelo se forman canteras o depósitos puzolánicos (Castro, 2020).

Es un magma finamente fragmentado cuyo tamaño depende de que tan lejano se encuentre ubicado el cráter del volcán y se vacía en estado sólido o fundido. El estado más común de las cenizas es el vítrico. La ceniza es un material duro, no se

disuelve en agua, es extremadamente abrasivo, levemente corrosivo y puede conducir electricidad cuando está mojada (Olawuyi & Olusola, 2010).

#### **2.1.2.2. Lugar de muestreo**

La ceniza volcánica utilizada en este proyecto, proviene de un depósito ubicado en la parroquia Eloy Alfaro (Barrio San Felipe) de la ciudad de Latacunga, provincia de Cotopaxi. Esta zona está geográficamente ubicada sobre cangahuas, materiales de depósito como cenizas, materiales conglomerados recubiertos de estratos de piedra pómez y tobas vulcano-sedimentarias; formadas a lo largo del tiempo por actividades eruptivas del volcán Cotopaxi (la más reciente producida en 1877), las cuales rellenaron grandes áreas del valle de Latacunga (Gad Municipal de Latacunga, 2016).

El implementar aditivos puzolánicos dentro de la mezcla de hormigón, ayuda a mejorar las características del mismo, debido a los beneficios que presentan respecto al comportamiento que va a tener el concreto a largo plazo; algunas de estas ventajas son: mejora de la resistencia mecánica, mayor estabilidad, mejor durabilidad, mejor adherencia, entre otras (Salazar, 2005).

### **2.1.3. HORMIGÓN**

#### **2.1.3.1. Definición**

El concreto u hormigón, considerado también como una roca artificial, es fabricado a partir de la mezcla de agregados como: arena, ripio, grava; y otros elementos que son: el cemento y agua; ocasionalmente, se introducen a la mezcla ciertos aditivos que sirven para acelerar o retardar procesos de fraguado o suministrar propiedades específicas tales como: color, resistencia, impermeabilidad, entre otras. Esto se lo hace con el fin de obtener un concreto apto para cumplir con las necesidades de una estructura en específico (Páez, 1986).

#### **2.1.3.2. Hormigón armado**

El hormigón como tal es una roca que resiste de manera eficiente las cargas aplicadas a compresión, sin embargo, su limitación está en trabajar a tracción, la

cual se puede contrarrestar con el acero que se le incorpora teniendo como resultado lo que se conoce como hormigón armado (Luna, 2014).

El hormigón armado es un material que se obtiene al combinar el hormigón con el acero, el cual puede ser insertado en forma de armaduras pasivas como son: barras corrugadas, mallas electrosoldadas o armaduras básicas electrosoldadas en celosía, todo esto depende del elemento estructural que se vaya a armar (Páez, 1986).

Los anclajes, empalmes y dobleces de la armadura producen la aparición de tensiones locales en el hormigón que está rodeando el acero, es por eso que el concreto debe tener necesariamente una resistencia mínima para poder armarse y con esto se afirma que el cemento empleado dentro de la dosificación debe tener una resistencia mecánica alta (Páez, 1986).

### **2.1.3.3. Componentes del hormigón**

El hormigón es uno de los materiales, destinados para construcción, con mayor producción en muchos países alrededor del mundo, tanto es el impacto que tiene que se han elaborado normas con el fin de controlar y asegurar la calidad de dicho material; la metodología para la fabricación y por ende la dosificación está basada en una norma que ha sido expuesta por el Instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en inglés), específicamente en el apartado 211.1, el cual establece las cantidades específicas y las propiedades de cada uno de los componentes del hormigón, basándose en la normativa ASTM.

Principalmente, el hormigón está constituido por:

- Agregado fino y grueso
- Cemento
- Agua

Al combinar estos elementos se obtiene una mezcla compuesta por sólidos en los que se encuentran: los agregados (material de relleno) y la pasta que es la composición de cemento más agua (parte activa-cementante); y por poros llenos de agua libre y aire (Luna, 2014).

La resistencia mecánica y la trabajabilidad del concreto son las propiedades de diseño y de construcción, respectivamente, más importantes, estas dependen de la relación agua-cemento. El tener una relación agua-cemento baja que a su vez pueda mantener una consistencia adecuada en el hormigón fresco, conducirá a un producto endurecido de mayor resistencia y calidad (Luna, 2014).

Es necesario un buen análisis de cada uno de los componentes que constituyen el hormigón, así como de las características físicas, mecánicas y las cantidades dentro de la dosificación del mismo, para tener un buen resultado en el comportamiento del elemento que se va a fabricar.

#### **2.1.4. FABRICACIÓN DEL CONCRETO**

Para la elaboración de un buen hormigón es preciso realizar ensayos con los cuales se determinan las propiedades y las características de los agregados que se van a introducir, de esta manera, en base a esas características, se establece una relación agua-cemento (a/c) adecuada para lograr una resistencia a compresión específica; para este trabajo se utiliza un  $f'c$  de 210 kg/cm<sup>2</sup>. Los requisitos para la preparación de materiales, mezcla, fabricación y curado de probetas de hormigón se pueden realizar siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C192.

Se ha planteado la alternativa de adicionar un material como reemplazo de un componente principal, siendo en este caso la ceniza volcánica en sustitución de un porcentaje de cemento, variando las proporciones, para evaluar los beneficios a través de pruebas.

##### **2.1.4.1. Materiales a utilizar**

Los materiales granulados como: ripio y arena, provinieron de la mina HOLCIM-Pifo, la cual se encuentra ubicada en el Km 4 ½ en la vía Pifo-Papallacta, el cemento empleado es HOLCIM tipo GU y la ceniza volcánica fue tomada de un depósito ubicado en la parroquia Eloy Alfaro, barrio San Felipe, ciudad de Latacunga.



**Figura 1** Depósito de ceniza volcánica, barrio San Felipe

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

#### 2.1.4.2. Ensayos

Al ser una investigación de laboratorio, para verificar las propiedades de los agregados y el cemento, que son los materiales secos, se requiere una serie de ensayos mínimos establecidos por la normativa ACI 211.1, en donde, además de determinar las características físicas y mecánicas de los componentes permite también utilizarlos en cantidades correctas dentro de la dosificación del hormigón; la descripción del procedimiento, normativa e interpretación de resultados de dichos ensayos serán descritos a detalle en el capítulo de metodología.

- Agregados
  - Contenido de materia orgánica en arenas
  - Absorción y peso específico
  - Contenido de humedad
  - Abrasión (Máquina de los Ángeles)
  - Densidad aparente, suelta y compactada
  - Módulo de finura de los agregados
  - Granulometría

- Cemento
  - Densidad aparente, suelta y compactada
  - Densidad real
  
- Ceniza volcánica
  - Densidad aparente, suelta y compactada
  - Densidad real

### **2.1.4.3. Dosificación**

La etapa de dosificación del hormigón debe estar sustentada en una normativa que asegure la calidad del resultado final, la norma ACI 211.1 plantea el procedimiento para cumplir este objetivo.

Tomando en cuenta las propiedades de los componentes y siguiendo las recomendaciones de la normativa elegida, se debe tener presente el fin para el cual se utilizará el hormigón fabricado y de esta manera obtener los resultados esperados. El proceso para obtención de una dosificación se enlista y describe a continuación:

#### **1. Asentamiento**

El asentamiento o también llamado trabajabilidad del concreto se define como la facilidad de colocación, compactación, acabado en estado fresco y resistencia a la segregación o sangrado. El hormigón debe ser trabajable, sin embargo, se debe tomar muy en cuenta que los componentes no deben desintegrarse al manejarlo (Kosmatka et al., 2004).

Los hormigones con una textura rígida y seca dificultan la colocación y compactación además se puede producir la separación de las partículas de mayor tamaño. Por el contrario, si la mezcla tiene más humedad de la requerida ocurre segregación y se pueden originar poros que dan lugar a hormigones poco duraderos (Luna, 2014).

Según el tipo de elemento que se vaya a elaborar, los valores de asentamiento permitidos se definen en la Tabla 1, mostrada a continuación:

**Tabla 1**

*Asentamiento recomendado según el tipo de construcción*

TIPO DE CONSTRUCCIÓN	ASENTAMIENTO (cm)	
	MÍNIMO	MÁXIMO
MUROS Y ZAPATAS DE CIMENTACIÓN REFORZADAS	5.0	12.7
ZAPATAS SIMPLES, CAJONES HIDRÁULICOS Y MUROS DE SUBESTRUCTURAS	2.5	10.0
LOSAS, VIGAS, PAREDES REFORZADAS Y COLUMNAS DE EDIFICIOS	7.6	15.0
VEREDAS Y PAVIMENTOS	5.0	7.6
CONCRETO MASIVO	2.5	7.6

Fuente: (ACI 211.1, 2002)

## **2. Tamaño máximo nominal**

Por cuestiones de economía, lo más factible sería utilizar un agregado del mayor tamaño permitido para reducir la cantidad de cemento, sin embargo, esta decisión depende del tamaño del elemento que se vaya a fabricar o de los espacios entre las barras de refuerzo, es por eso que se muestra la Tabla 2, que describe lo siguiente:



**Tabla 2**

*Tamaño máximo de agregado según el tipo de obra*

DIMENSIÓN MÍNIMA DE LA SECCIÓN, cm (in)	TIPOS DE CONSTRUCCIÓN			
	PAREDES, VIGAS Y COLUMNAS	MUROS SIN REFORZAR	LOSAS FUERTEMENTE ARMADAS	LOSAS LIGERAMENTE ARMADAS O SIN REFUERZO
6.4 a 12.7 (2.5 a 5)	1.27 a 1.9 (1/2 a 3/4)	1.9 (3/4)	1.9 a 2.5 (3/4 a 1)	1.9 a 3.8 (3/4 a 1 1/2)
15.2 a 28.0 (6 a 11)	1.9 a 3.8 (3/4 a 1 1/2)	3.8 (1 1/2)	3.8 (1 1/2)	3.8 a 7.6 (1 1/2 a 3)
30.5 a 73.7 (12 a 29)	3.8 a 7.6 (1 1/2 a 3)	7.6 (3)	3.8 a 7.6 (1 1/2 a 3)	7.6 (3)
76.2 o más (30 o más)	3.8 a 7.6 (1 1/2 a 3)	15.2 (6)	3.8 a 7.6 (1 1/2 a 3)	7.6 a 15.2 (3 a 6)

Fuente: (Luna, 2014)

### 3. Contenido de aire

El aire incluido, dentro del hormigón, es beneficioso cuando este está expuesto a ciclos de congelación-deshielo o a su vez a productos descongelantes, ya que ayuda a mejorar la cohesión, manejabilidad y durabilidad, incluso donde no se requiera. El ACI 211.1 indica los valores de porcentajes aproximados de aire atrapado para una mezcla de concreto con o sin inclusión de aire, esto se muestra en la Tabla 3 (Kosmatka et al., 2004).

### 4. Cantidad de agua

El agua necesaria dentro de la dosificación, se calcula en función del tamaño de agregado grueso seleccionado y del asentamiento recomendado, se define a continuación en la Tabla 3:

**Tabla 3**

*Cantidad de agua, L/M<sup>3</sup> de hormigón, necesaria en función del tamaño máximo del agregado, según los diferentes asentamientos*

ASENTAMIENTO cm (in)	TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO GRUESO							
	0.95 (3/8)	1.27 (1/2)	1.90 (3/4)	2.54 (1)	3.81 (1 1/2)	5.08 (2)	7.62 (3)	15.24 (6)
<b>HORMIGÓN SIN INCORPORACIÓN DE AIRE</b>								
2.5 a 5.1 (1 a 2)	208	198	183	178	163	153	144	124
7.6 a 10.2 (3 a 4)	228	218	203	193	178	168	158	139
15.2 a 17.8 (6 a 7)	243	228	213	203	188	178	168	149
aproximado de aire atrapado	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3	0.2
<b>HORMIGÓN CON INCORPORACIÓN DE AIRE</b>								
2.5 a 5.1 (1 a 2)	183	178	163	153	144	134	124	109
7.6 a 10.2 (3 a 4)	203	193	178	168	158	149	139	119
15.2 a 17.8 (6 a 7)	213	203	188	178	168	158	149	129
aproximado de aire atrapado	8.0	7.0	6.0	5.0	4.5	4.0	3.5	3.0

Fuente: (ACI 211.1, 2002)

## 5. Relación agua/cemento

La relación agua-cemento es calculada en base a la resistencia a compresión que se quiere obtener del hormigón, en la tabla 6.3.4 (b) de la norma ACI 211.1 (2002) se establecen valores mínimos según la resistencia requerida, sin embargo, esta tabla no se considera debido a que el hormigón que se va a fabricar es de laboratorio, de todos modos, la Tabla 4, presentada a continuación tiene concordancia con la norma, pero está modificada para las condiciones de laboratorio.

**Tabla 4**

*Relación agua cemento recomendada en función de la resistencia a compresión.*

RELACIÓN AGUA CEMENTO (Litros/Kg cemento)	LITROS DE AGUA POR CADA SACO DE 50 Kg DE CEMENTO	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN PROBABLE A LA EDAD DE 28 DÍAS (Kg/cm <sup>2</sup> )	
		HORMIGÓN SIN INCORPORACIÓN DE AIRE	HORMIGÓN CON INCORPORACIÓN DE AIRE
0.353	17.5	425	325
0.445	22.5	350	280
0.530	26.5	280	210
0.623	31.0	210	180
0.705	35.5	180	140
0.800	40.0	140	110

Fuente: (Luna, 2014)

## 6. Cantidad de cemento

La cantidad de cemento requerida se calcula a partir de la relación agua-cemento y de la cantidad de agua determinadas en el punto 5. Corresponde a la razón entre el volumen de agua (L) y la relación agua-cemento (L/Kg cemento) (ACI 211.1, 2002).

$$Cantidad\ de\ cemento = \frac{Volumen\ de\ agua}{Relación\ agua - cemento} \quad (1)$$

## 7. Volumen de agregados

Para obtener una trabajabilidad satisfactoria se necesitan agregados del mismo tamaño nominal máximo y granulometría; el volumen de agregado por unidad de volumen de concreto, depende del tamaño máximo nominal de dicho componente y del módulo de finura del agregado fino (ACI 211.1, 2002). Los valores apropiados se dan en la Tabla 5:

**Tabla 5**

*Volumen de agregado grueso por unidad volumétrica de hormigón.*

TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL DE AGREGADO GRUESO		VOLUMEN (M <sup>3</sup> ) DE AGREGADO SECO Y COMPACTADO, POR M <sup>3</sup> DE HORMIGÓN							
		MÓDULO DE FINURA DEL AGREGADO FINO							
cm	in	2.30	2.40	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00
1.00	3/8	0.47	0.46	0.45	0.44	0.43	0.42	0.41	0.40
1.25	1/2	0.56	0.55	0.54	0.53	0.52	0.51	0.50	0.49
1.90	3/4	0.66	0.65	0.64	0.63	0.62	0.61	0.60	0.59
2.54	1	0.71	0.70	0.69	0.68	0.67	0.66	0.65	0.64
3.81	1 1/2	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.71	0.70
5.08	2	0.80	0.79	0.78	0.77	0.76	0.75	0.74	0.73
7.62	3	0.85	0.84	0.83	0.82	0.81	0.80	0.79	0.78
15.24	6	0.91	0.90	0.89	0.88	0.87	0.86	0.85	0.84

Fuente: (ACI 211.1, 2002)

Para el cálculo del volumen de agregado fino, utilizando los volúmenes de los materiales, la cantidad requerida es la diferencia entre el volumen total del concreto (1 m<sup>3</sup>) y los volúmenes de los otros elementos (agua, aire, cemento y agregado grueso) (ACI 211.1, 2002), quedando de la siguiente forma:

$$V_{agreg.fino} = 1 \text{ m}^3 - V_{agua} - V_{cemento} - V_{agreg. grueso} - V_{aire} \quad (2)$$

## 8. Ajuste por humedad

Se necesita correcciones para la humedad que se encuentra dentro y sobre los agregados. En la práctica, los agregados pueden tener mayor o menor humedad que la condición saturada con superficie seca (SSS), por lo tanto, se deben aumentar las masas secas de los agregados para reponer la humedad que se absorbe y retiene en cada partícula y entre ellas (Kosmatka et al., 2004).

La humedad de los agregados afecta directamente a la cantidad de agua que se coloca en la mezcla, por esta razón se debe reducir esta cantidad de agua por la cantidad de humedad libre aportada de los agregados, es decir el contenido de humedad total menos el porcentaje de absorción de los agregados (ACI 211.1, 2002).

## **9. Ajuste de la mezcla**

Una vez realizada la mezcla, se debe verificar, por medio de un cilindro de prueba y utilizando las proporciones de materiales calculadas anteriormente, que la trabajabilidad sea la adecuada, la ausencia de segregación y las propiedades de acabado, para poder realizar un ajuste por humedad utilizando el cono de Abrams (ACI 211.1, 2002). Este procedimiento de prueba se lo puede realizar siguiendo la norma ASTM C192.

## **10. Reemplazo de porcentaje de cemento por ceniza volcánica**

Los porcentajes de ceniza volcánica que serán incluidos en la mezcla de hormigón, ya han sido determinados inicialmente. El proceso consiste en reemplazar el 10% y 20% en peso de cemento por ceniza, manteniendo los valores de agua y agregados (fino y grueso) de la dosificación estándar.

En investigaciones anteriores se ha comprobado que este reemplazo muestra una variación de la resistencia a compresión, por lo tanto, se asume que puede beneficiar en la resistencia a flexión ensayando este hormigón dentro de un elemento estructural como son las vigas, simples y armadas.

### **2.1.4.4. Moldeo y fabricación**

Una vez definidas las cantidades a ser utilizadas de cada componente del hormigón, se debe preparar el espacio en donde se trabajará, los instrumentos y maquinaria necesaria.

### **Mezcla**

Para una mejor homogeneidad en la mezcla, es recomendable que esta se amase en una mezcladora estacionaria o llamada también concretera, en base al siguiente orden: fracción de agua – agregado grueso – cemento – agregado fino – resto de agua, esto para el hormigón patrón. Para el caso del hormigón con ceniza volcánica se deberá disolver la ceniza en la primera fracción de agua (Luna, 2014).

El tiempo de amasado será como mínimo 8 minutos, para procurar que el agregado grueso quede completamente cubierto de mortero y no se separe para lograr una mezcla completa (ASTM C192, 2018).

Las concreteteras disponibles para esta investigación tienen una capacidad de 12.5 Kg y 50 Kg; la primera consta de un motor eléctrico de 1/3 HP y a través de un sistema de engranajes con banda, rota el tambor a una velocidad uniforme entre 28 a 30 RPM; la segunda tiene un motor a gasolina de 13 HP con rendimiento de 2.5 a 3.5 m<sup>3</sup> de hormigón por hora. En el perímetro, dentro del tambor, se localizan 3 paletas que aportan para que la mezcla se integre de manera homogénea durante la rotación.



**Figura 2** Concretetera de 12.5 Kg y 50 Kg de capacidad respectivamente

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

## **Moldeo**

Una vez preparado el hormigón, se lo coloca en moldes cilíndricos y prismáticos previamente cubiertos por una capa delgada de aceite para evitar la adherencia de la mezcla y facilitar el desmoldado. Las caras de los moldes prismáticos deben ser planas y sus ángulos rectos con una variación que no sobrepase los  $\pm 0.5^\circ$  (Luna, 2014).

La extracción de aire se lo puede realizar por medio de vibración llenando todo el molde una sola vez o puede ser compactado por golpes de varilla en dos capas de igual espesor dando 1 golpe por cada 14 cm<sup>2</sup> de superficie de la viga, dando un total de 110 y 145 golpes por capa, como lo indica la norma, para vigas de 15x15x60 cm y 25x25x80, respectivamente. (ASTM C31, 2021).

Para el caso de las probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, la extracción de aire se realiza por medio de golpes efectuados por una varilla lisa y un mazo de goma. La mezcla se coloca en los moldes en dos capas con 25 varilladas y 12 a 15 golpes de mazo por cada capa (ASTM C192, 2018)

Las vigas y los cilindros deben desencofrarse después de las 24 horas y antes de las 48 horas, luego se las debe trasladar a un cuarto de curado.

#### **2.1.4.5. Curado del hormigón**

El curado del hormigón se refiere a la conservación del contenido de humedad y la temperatura necesarios para que desarrolle las propiedades requeridas. El curado comienza inmediatamente después del desencofrado, este proceso tiene una gran influencia sobre las características del hormigón endurecido pues resultará en una mayor durabilidad, resistencia, estabilidad dimensional e impermeabilidad (Kosmatka et al., 2004).

Dentro de los 30 minutos posteriores al desencofrado, las probetas se colocan en tanques de agua a una temperatura de  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  dentro de un cuarto de curado hasta su ensayo, al menos 20 horas antes de la prueba, las vigas deben almacenarse en agua saturada con hidróxido de calcio (ASTM C31, 2021).

Se debe evitar que las superficies de las vigas se sequen entre el tiempo de remoción del almacenamiento de agua hasta la finalización del ensayo. Antes de ensayar las probetas se deben tomar datos de sus dimensiones y peso para proceder al ensayo a flexión.

### **2.1.5. PROPIEDADES DEL CONCRETO ENDURECIDO**

#### **2.1.5.1. Resistencia a la compresión**

La resistencia a compresión es la propiedad mecánica principal para realizar el control de calidad de una dosificación de hormigón. La norma ASTM C39 muestra el procedimiento necesario para la ejecución de este ensayo; la norma es aplicable para cilindros moldeados y núcleos perforados de concreto de densidades

superiores a  $800 \text{ kg/m}^3$  y además respalda la preparación y curado de las muestras necesarias.

Los resultados de resistencia a compresión dependen de algunos factores como: muestreo de agregados, fabricación, humedad de la probeta, edad y temperatura, por esa razón, se deben analizar dichos factores para poder llegar a una resistencia específica requerida (ASTM C39, 2020).

El método de prueba, para determinar la resistencia a compresión, es destructivo, es decir, se ensaya la probeta hasta la ruptura. El resultado se obtiene dividiendo la carga máxima que soporta el espécimen sobre el área transversal del mismo. La ecuación de cálculo se define a continuación (ASTM C39, 2020):

$$f'_c = \frac{4000 * P_{m\acute{a}x}}{\pi * D^2} \quad (3)$$

Donde:

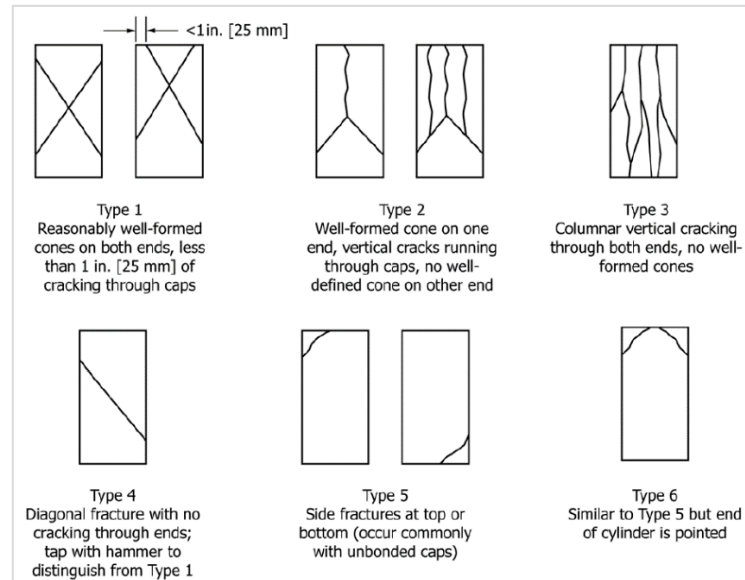
$f'_c$ = Resistencia a la compresión (MPa).

$P_{m\acute{a}x}$ = Carga máxima soportada (kN).

D= Diámetro de la probeta (mm).

Además de obtener el valor de resistencia a compresión, se puede determinar el tipo de falla que sufre el cilindro de acuerdo a la Figura 3, proporcionada por la normativa mencionada.





**Figura 3** Tipos de falla de las probetas cilíndricas

Fuente: (ASTM C39, 2020)

### 2.1.5.2. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad o también llamado módulo de Young es una de las propiedades mecánicas más importantes a considerar en el análisis de un elemento estructural, hace referencia a la deformabilidad de un material, es decir, que las deformaciones producidas no sean permanentes y vuelva a su estado original sin afectar su estructura. Esto se determina por el límite elástico, que define la frontera en la cual el material puede tener deformaciones reversibles, si se pasa este límite, las deformaciones se vuelven permanentes y se modifican las propiedades del material (ASTM C469, 2014).

El módulo de elasticidad se puede representar como una relación del esfuerzo a compresión vs la deformación unitaria del elemento, al graficar esta correspondencia se obtiene una curva esfuerzo-deformación con la que se puede verificar el rango lineal y determinar el valor del módulo.

En la norma ASTM C469 se puede encontrar un método estático para determinar el valor del módulo de elasticidad del hormigón. Es necesario calcular el 40% de la resistencia última del concreto y la deformación unitaria que se produce

bajo esta carga, para tener valores acertados se debe repetir este procedimiento con 3 especímenes (ASTM C469, 2014).

La fórmula utilizada para calcular el valor del módulo de elasticidad es la siguiente:

$$E = \frac{S_2 - S_1}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad (4)$$

Donde:

E= Módulo de Young (psi).

S<sub>2</sub>= corresponde al 40% de la resistencia última a compresión.

S<sub>1</sub>= esfuerzo a compresión correspondiente a la deformación de 0.000050.

ε<sub>2</sub>= deformación unitaria producto de S<sub>2</sub>.

La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) define ecuaciones que se pueden utilizar para calcular el módulo de elasticidad del hormigón en función de la resistencia a compresión (f'c), se presentan dos fórmulas:

La primera es utilizada para la estimación de deflexiones ante cargas estáticas de elementos de hormigón armado. Depende del módulo de elasticidad de los agregados (E<sub>a</sub>), los cuales tienen un valor diferente según su lugar de procedencia. Para este trabajo se utilizará agregado procedente de Pifo-Pichincha para el cual E<sub>a</sub>=27.2 GPa.

$$E = 1.15 * \sqrt[3]{E_a (GPa)} * \sqrt{f'c (MPa)} \quad [GPa] \quad (5)$$

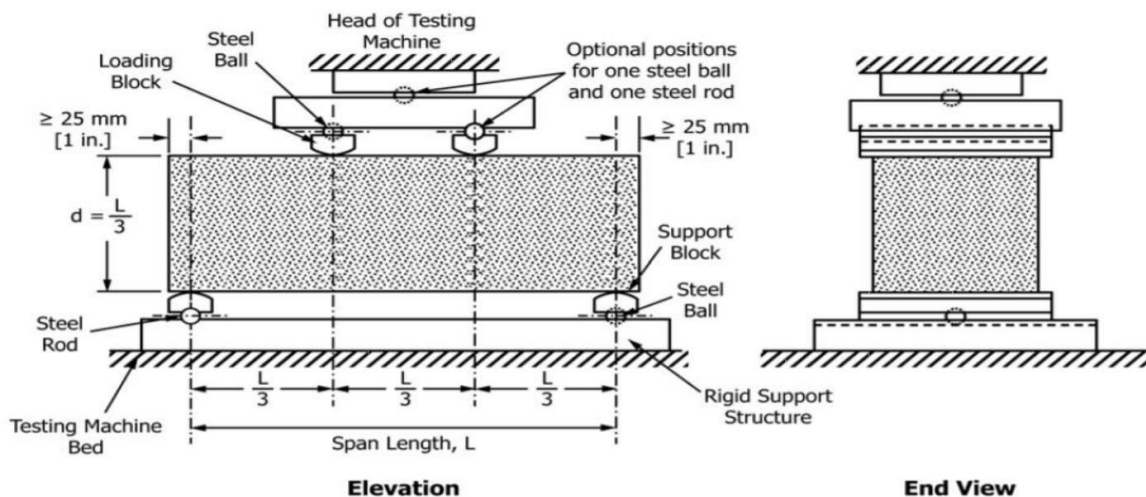
Para estructuras que se diseñan para soportar acciones sísmicas, el módulo de elasticidad se calculará con la siguiente ecuación, tomando en cuenta que el hormigón tendrá un peso normal:

$$E = 4700 * \sqrt{f'c (MPa)} \quad [MPa] \quad (6)$$

### 2.1.5.3. Resistencia a flexión

Se considera a la resistencia a flexión como el cálculo de la falla por momento producida en una viga o losa de hormigón. Es una de las propiedades más importantes utilizada para verificar la calidad del concreto de elementos que soportarán carga; los resultados de esta resistencia son calculados y reportados como módulo de ruptura (Masías, 2018).

En la norma ASTM C78 se encuentra el procedimiento para el ensayo de resistencia a flexión del concreto por el método de la viga simple cargada en el tercio de la luz.



**Figura 4** Esquema del aparato de prueba de flexión para el método de carga de tercer punto.

Fuente: (ASTM C78, 2018)

### 2.1.5.4. Módulo de ruptura

El módulo de ruptura se define como la tensión máxima que una muestra prismática (viga) puede soportar en un ensayo de flexión hasta el colapso. Es una medida de esfuerzo que se calcula en la cara donde se produce la tracción de un espécimen de viga, en el momento flector máximo, al asumir un comportamiento elástico-lineal durante un método de prueba estándar. Al llegar a este esfuerzo, la

viga comienza a agrietarse. El módulo de ruptura aumenta a medida que disminuye el tamaño de la probeta (ASTM C78, 2018).

Según donde se produzca la fractura de la viga, se utilizará la ecuación correspondiente para el cálculo del módulo de ruptura. Si la falla se inicia en la superficie de tensión dentro del tercio medio de la longitud del tramo, se calculará de la siguiente forma (ASTM C78, 2018):

$$f_r = \frac{PL}{bd^2} \quad (7)$$

Si la falla ocurre en la superficie de tensión fuera del tercio medio en no más del 5% de la longitud del tramo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$f_r = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (8)$$

Donde:

$f_r$ : módulo de ruptura (MPa).

P: carga máxima aplicada (N).

L: longitud del espécimen (mm).

a: distancia promedio entre la línea de fractura y el soporte más cercano medida en la superficie de tensión de la muestra (mm).

b: ancho promedio de la muestra en la fractura (mm).

d: profundidad promedio de la muestra en la fractura (mm).

#### **2.1.5.5. Durabilidad**

La durabilidad es una propiedad que tiene el concreto para resistir los efectos de intemperie, ataque químico, abrasión o cualquier otra condición de las estructuras que produzcan el deterioro del hormigón (Apaza, 2018).

La propiedad de durabilidad que se va a analizar en este trabajo de investigación es la permeabilidad, la cual corresponde al análisis del paso del agua a través del hormigón. Esta propiedad cobra importancia en los casos donde hay presencia de agentes agresivos que pueden afectar la armadura de acero y el concreto mismo (Apaza, 2018).

## 2.1.6. VIGAS SOMETIDAS A FLEXIÓN

### 2.1.6.1. Definiciones

#### Resistencia a compresión:

Abreviada como  $f'_c$ , corresponde a la carga máxima obtenida durante un ensayo a compresión, dividida para el área transversal de la probeta. El método de prueba consiste en aplicar una carga axial sobre un cilindro o núcleo de hormigón hasta que ocurre la falla del mismo (ASTM C39, 2020).

#### Momento de agrietamiento:

El esfuerzo máximo que resiste el hormigón a tensión es llamado también esfuerzo de agrietamiento, para relacionar este término con el momento se toma en cuenta la siguiente ecuación básica:

$$\sigma = \frac{M * y}{I} \quad (9)$$

Donde el esfuerzo es igual al momento por un brazo de palanca dividido para la inercia de la sección analizada. Tomando en cuenta que *sigma* ( $\sigma$ ) corresponde al esfuerzo de ruptura o agrietamiento del hormigón a tensión ( $f_r$ ), entonces el momento de agrietamiento viene a ser igual al módulo de ruptura multiplicado por la inercia de la sección transversal bruta y dividido para un brazo de palanca, que es la distancia desde la fibra más extrema a tensión del hormigón hasta el eje neutro. En definición, el momento al cual la viga comienza a fisurarse se le conoce como momento de agrietamiento (ACI 318, 2019).

$$M_{cr} = \frac{f_r * I_g}{Y_t} \quad (10)$$

Donde:

$M_{cr}$ : momento de agrietamiento o fisuración (Kg\*cm).

$f_r$ : esfuerzo de agrietamiento o módulo de ruptura (Kg/cm<sup>2</sup>).

$I_g$ : inercia agrietada (cm<sup>4</sup>).

$Y_t$ : distancia desde la fibra más extrema a tensión hasta el eje neutro (cm).

El valor del esfuerzo de agrietamiento o módulo de ruptura se puede obtener mediante ensayos de laboratorio o a su vez la norma ACI 318 recomienda ecuaciones por medio de las cuales se puede calcular dicho valor. Además se debe tener en cuenta que el momento de agrietamiento es menor que el momento producido por las cargas de servicio (Mc Cormac & Brown, 2011).

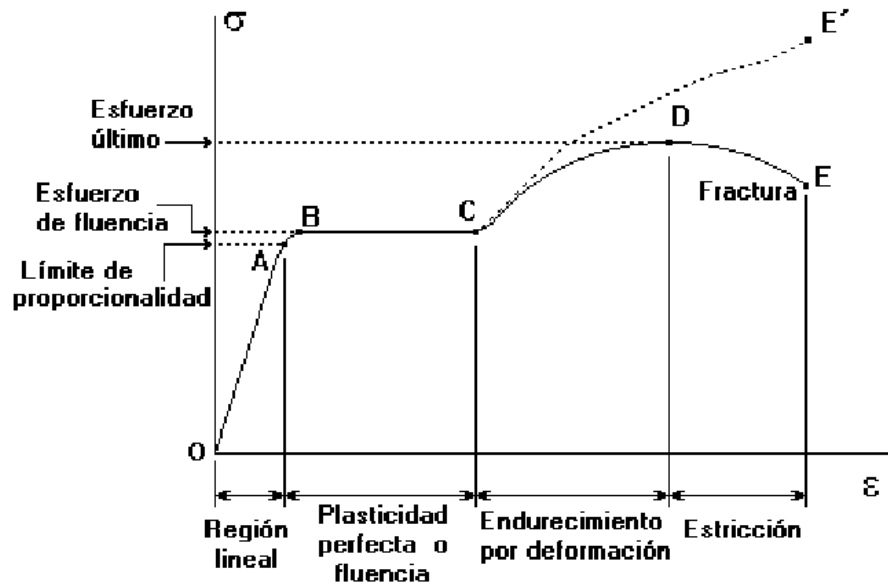
Las ecuaciones definidas por el ACI 318, para el cálculo del módulo de ruptura en unidades de MPa y kg/cm<sup>2</sup>, son las siguiente:

$$f_r = 0.62 * \lambda * \sqrt{f'_c} \text{ [MPa]} \quad (11)$$

$$f_r = 2 * \lambda * \sqrt{f'_c} \text{ [kg/cm}^2\text{]} \quad (12)$$

### **Límite elástico:**

Al aplicar una fuerza a un elemento, al inicio de este proceso la deformación es proporcional al esfuerzo, esto pasa hasta que el esfuerzo alcanza un valor denominado como límite de proporcionalidad, más allá de este límite, las deformaciones y los esfuerzos ya no son proporcionales, sin embargo, hasta el límite elástico, si se libera la fuerza aplicada, el elemento volverá a su forma inicial sin sufrir deformaciones permanentes. Por tanto, el límite elástico es el punto después del cual un material no se recupera y queda deformado permanentemente (González & Robles, 2005).



**Figura 5** Diagrama esfuerzo-deformación de materiales

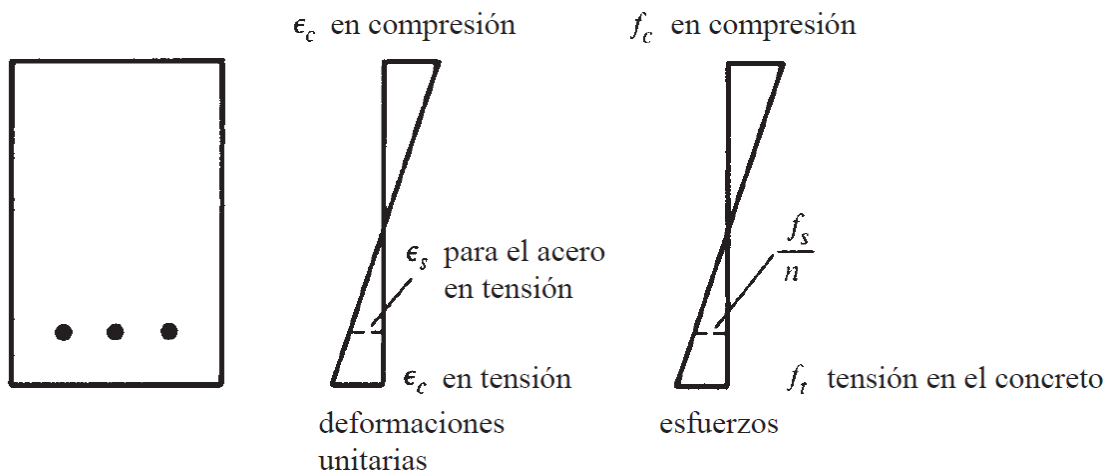
Fuente: (González & Robles, 2005)

### 2.1.6.2. Etapas de una viga sometida a flexión

Para conocer el comportamiento a flexión de una viga de concreto, ya sea esta con o sin armadura, se debe colocar una carga, la cual va incrementándose hasta la falla del elemento. Durante este proceso de ensayo hasta el colapso, la viga armada pasa por 3 etapas, las cuales son:

- Etapa 1: Hormigón no agrietado

Esta etapa es la inicial, cuando se tienen cargas pequeñas y los esfuerzos de tensión no llegan al valor del módulo de ruptura.



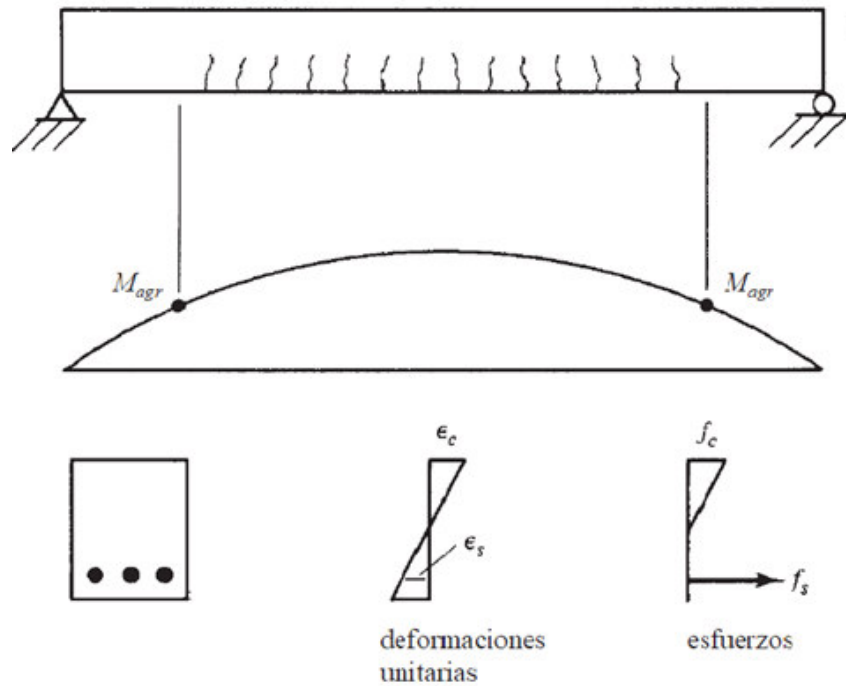
**Figura 6** Etapa del hormigón no agrietado

Fuente: (Mc Cormac & Brown, 2011)

- Etapa 2: Aparición de esfuerzos elásticos y hormigón agrietado

Se desarrollan grietas en la cara inferior de la viga, esto pasa cuando la tensión se ha igualado al módulo de ruptura dando como resultado al momento de agrietamiento. Estas grietas se van extendiendo provocando un desplazamiento del eje neutro, para esto el hormigón pasará el trabajo de resistir tensión al acero colocado, el cual seguirá soportando, siempre y cuando el esfuerzo en el acero sea menor a su límite elástico y la cara superior esté sometida a esfuerzos a compresión más bajos que la mitad de su resistencia a compresión ( $f'_c$ ).



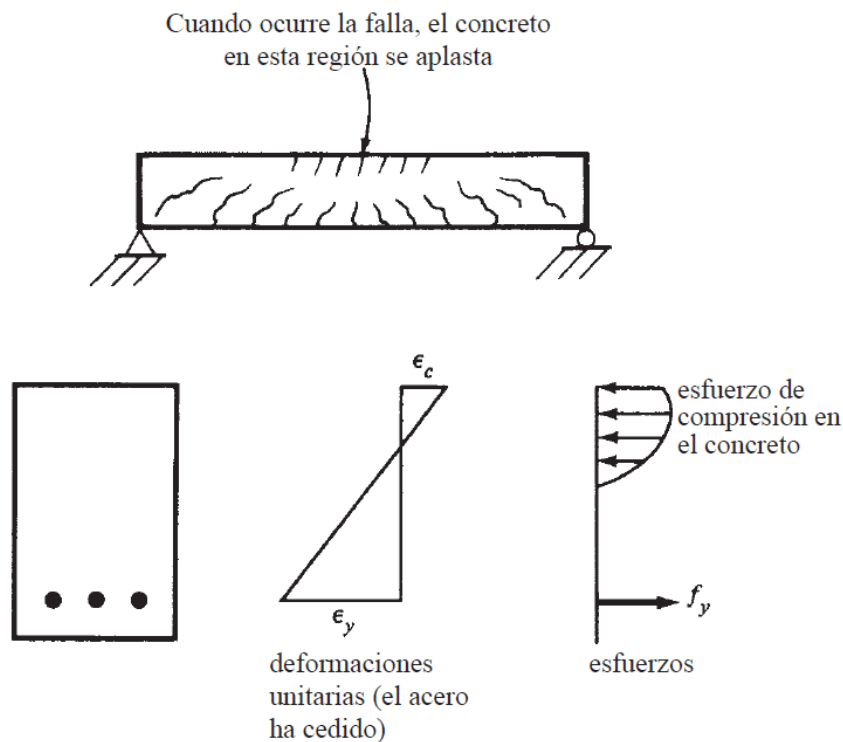


**Figura 7** Etapa de esfuerzos elásticos. Hormigón agrietado

Fuente: (Mc Cormac & Brown, 2011)

- Etapa 3: Resistencia última

Ocurre cuando los esfuerzos de compresión sobrepasan a la mitad del valor de  $f_c$ , provocando que el eje neutro se desplace más arriba y los esfuerzos a compresión ya no sean lineales, teniendo un aplastamiento en la parte central superior de la viga y finalmente la falla del elemento.



**Figura 8** Etapa de resistencia última

Fuente: (Mc Cormac & Brown, 2011)

### Nomenclatura

$\epsilon_c$ = Deformación unitaria del concreto.

$\epsilon_s$ = Deformación unitaria del acero.

$\epsilon_y$ = Deformación unitaria del acero en la fluencia.

$f'_c$ = Resistencia a la compresión del concreto.

$f_s$ = Esfuerzo en el refuerzo calculado para las cargas de servicio.

$f_t$ = Esfuerzo en la fibra extrema por tracción, calculado para las cargas de servicio usando las propiedades de la sección bruta de la probeta.

$f_y$ = Resistencia a la fluencia del refuerzo.

$n$ = razón modular, relación del módulo del acero con el módulo del concreto.

Para vigas de hormigón simple (sin armadura), ocurre el mismo proceso, sin embargo, al no tener un refuerzo para soportar tensión, la viga llega a la ruptura sin tener la aparición de esfuerzos elásticos, es decir tiene una falla frágil (Mc Cormac & Brown, 2011).

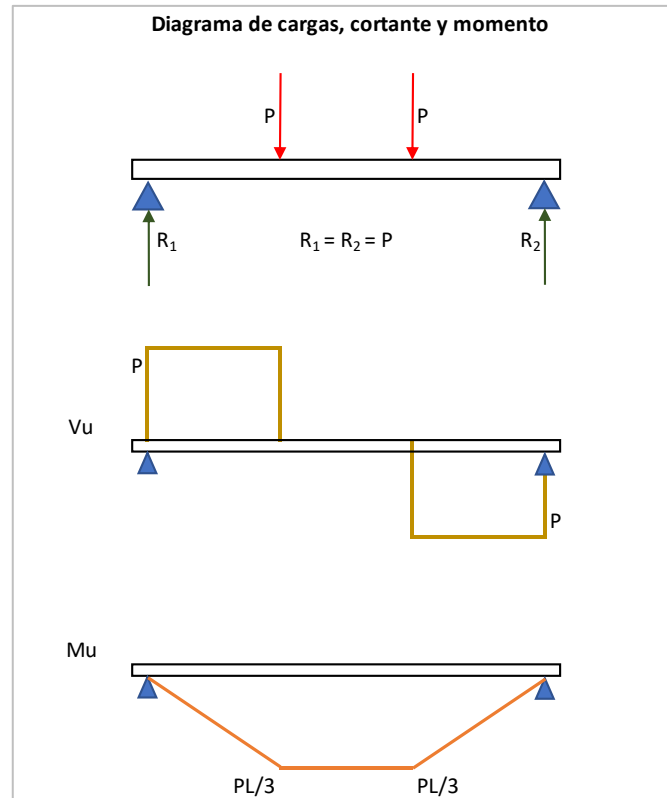
### **2.1.6.3. Diseño a flexión de una viga armada**

El diseñar a flexión una viga de hormigón armado, tiene como fin garantizar que la sección establecida para la viga y la armadura de acero colocada sean capaces de soportar las solicitaciones de momento producidas por la aplicación de cargas exteriores (Mc Cormac & Brown, 2011).

El código ACI 318 contiene ciertas recomendaciones y proporciona fórmulas para el diseño de vigas armadas según la zona en la que se vaya a construir, el tipo de uso de la estructura, la importancia, entre otros aspectos. El método de diseño que se recomienda, para los elementos estructurales, es el Diseño por Factores de Carga y Resistencia (LRFD), que consiste en mayorar las cargas de diseño y minorar las resistencias de diseño, esto se logra multiplicando por factores mayores y menores que 1, respectivamente (Mc Cormac & Brown, 2011).

#### **Análisis de cargas para vigas sometidas a flexión (diagramas de cortante y momento)**

Las cargas que actúan a lo largo de la longitud de una viga y que son perpendiculares al eje de la misma, solo causan flexión y corte. Los valores de cortante último ( $V_u$ ) y momento último ( $M_u$ ) se pueden tomar como el resultado de las combinaciones de carga muerta y carga viva (ACI 318, 2014) o, como los valores que resultan del diagrama de cortante y momento producido por cargas externas (Beer et al., 2010). Con esto,  $V_u$  y  $M_u$  se calcularán dependiendo de las condiciones y datos conocidos para el problema que se quiere resolver; para este trabajo de investigación se tomarán los valores que resultan de los diagramas de cortante y momento que se producen al aplicar una carga puntual en cada tercio de la longitud de una viga armada (Ver Figura 9), pudiendo relacionar así la carga aplicada con la solicitación de momento para la sección establecida de hormigón armado.



**Figura 9** Diagrama de cortante y momento para una viga simplemente apoyada con carga puntual en cada tercio de su longitud

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Una vez obtenida la sollicitación de momento  $M_u$  (necesario para el diseño a flexión), se puede continuar con el diseño necesario para una viga armada que en este caso tiene una sección establecida de  $25 \times 25 \times 80$ , las ecuaciones de diseño se muestran en el siguiente punto.

#### Diseño según el ACI 318-14

Las ecuaciones dadas por el ACI para el diseño a flexión de vigas armadas parten de datos iniciales conocidos de los materiales y las dimensiones; estas fórmulas son las siguientes:

- *Peralte efectivo:*

$$d = h - r \quad (13)$$

- *Cálculo de acero mínimo*, se escoge el mayor valor entre:

$$A_{s_{min}} = \frac{0.25 * \sqrt{f'c} * b * d}{f_y} \quad (14)$$

$$A_{s_{min}} = \frac{14 * b * d}{f_y} \quad (15)$$

- *Cálculo de acero máximo*, se escoge el menor valor entre:

$$A_{s_{max}} = 0.025 * b * d \quad (16)$$

$$A_{s_{max}} = 0.75 * \rho_b * b * d \quad (17)$$

Donde:

$$\rho_b = 0.85 * \beta_1 * \frac{f'c}{f_y} * \frac{6300}{6300 + f_y} \quad (18)$$

- *Cálculo de momento nominal*:

$$M_n = A_s * f_y * \left( d - \frac{A_s * f_y}{1.7 * f'c * b} \right) \quad (19)$$

Se debe cumplir la siguiente condición:

$$M_u \leq \phi M_n \quad (20)$$

Según los datos obtenidos del diagrama de corte y momento para una viga simplemente apoyada cargada en cada tercio de la luz libre (Figura 9), el momento último se definiría de la siguiente forma:

$$M_u = \frac{P * L}{3} \quad (21)$$

### Definición de términos

$A_{s_{min}}$ = Área mínima de refuerzo para flexión (cm<sup>2</sup>).

$A_{s_{max}}$ = Área máxima de refuerzo para flexión (cm<sup>2</sup>).

$A_s$ = Área de refuerzo colocada para flexión (cm<sup>2</sup>).

$b$ = Ancho de la sección transversal de la viga (cm).

$\beta_1$ = Factor que relaciona la profundidad del bloque rectangular de esfuerzos de compresión con la distancia del eje neutro (para hormigones de  $f'_c \leq 28$  MPa;  $\beta_1=0.85$ ).

$d$ = Peralte efectivo; distancia desde la fibra extrema en compresión hasta el centroide del refuerzo longitudinal en tensión (cm).

$f'_c$ = Resistencia a compresión del hormigón ( $\text{kg/cm}^2$ ).

$f_y$ = Resistencia a la fluencia del acero ( $\text{kg/cm}^2$ ).

$h$ = Altura de la sección transversal de la viga (cm).

$L$ = Longitud libre de la viga (cm).

$M_n$ = Resistencia nominal de la sección a flexión (T.m).

$M_u$ = Momento mayorado en la sección, sollicitación de momento (T.m).

$P$ = Carga puntual actuante en la viga (T).

$r$ = recubrimiento libre del refuerzo (cm).

$\phi$ = Factor de reducción de resistencia (para flexión  $\phi=0.9$ ).

$\rho_b$ = Cuantía balanceada.

$R_1$  y  $R_2$ = Reacciones en los apoyos producidas por las cargas externas (T).

$V_u$ = Cortante mayorado en la sección (T).

El procedimiento y resultados del diseño a flexión de vigas armadas, elaborado teóricamente, se muestran con detalle en la metodología del presente trabajo.

### **2.1.7. NORMATIVA**

Es indispensable que una investigación esté fundamentada por normativa, ya que estas definen procedimientos, requisitos y encaminan a la aceptabilidad del estudio. Por lo tanto, se definirá, a continuación, cada una de las normas a ser utilizadas para este trabajo experimental.

#### **2.1.7.1. Caracterización de materiales**

Agregados (fino y grueso) → Norma ASTM C33 “Especificación estándar para agregados de hormigón”.

Cemento hidráulico → Norma ASTM C1157 “Especificación de desempeño estándar para cemento hidráulico”.

Agua de mezcla → Norma ASTM C1602 “Especificación estándar para el agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento hidráulico”.

#### **2.1.7.2. Ensayos para agregados**

Peso específico del agregado grueso → Norma ASTM C127 “Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado grueso”.

Peso específico del agregado fino → Norma ASTM C128 “Método de prueba estándar para densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción de agregado fino”.

Abrasión → Norma ASTM C131 “Método de prueba estándar para resistencia a la degradación de agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de los ángeles”.

Densidad aparente, suelta y compactada (agregado fino y grueso) → Norma ASTM C29 “Método de prueba estándar para densidad aparente y vacíos en el agregado”.

Granulometría → Norma ASTM C136 “Método de prueba estándar para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos”.

Contenido de humedad → Norma ASTM C566 “Método de prueba estándar para determinar el contenido de humedad total evaporable de los áridos por secado”.

Contenido orgánico de arena → Norma ASTM C40 “Método de prueba estándar para impurezas orgánicas en el agregado fino del concreto”.

#### **2.1.7.3. Ensayos para el cemento y la ceniza volcánica**

Para el cálculo de densidad real del cemento y la ceniza se usa la norma ASTM C188 “Método de prueba estándar para la densidad del cemento hidráulico”.

#### **2.1.7.4. Dosificación de hormigón**

Para la dosificación se utilizará el apartado 211.1 de la norma ACI “Práctica estándar para seleccionar proporciones para concreto normal, pesado y masivo”. Aquí se especifican todos los requisitos necesarios para una buena dosificación que han sido detallados en el punto 2.1.4.

#### **2.1.7.5. Elección de las dimensiones de las probetas**

La norma ASTM C31 “Práctica estándar para fabricar y curar probetas de ensayo de hormigón en el campo” y la norma ASTM C42 “Método de prueba estándar para obtener y probar núcleos perforados y vigas aserradas de concreto” detallan las dimensiones mínimas de las vigas a ensayar.

De igual manera, la norma ASTM C31 especifica las dimensiones que deben tener los cilindros de hormigón para pruebas de compresión y módulo de elasticidad.

#### **2.1.7.6. Resistencia a compresión**

La norma ASTM C39 “Método de prueba estándar para resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de hormigón”, es la encargada de detallar el procedimiento de este ensayo.



**2.1.7.7. Módulo de elasticidad**

Se sigue el procedimiento descrito en la norma ASTM C469 “Método de prueba estándar para el módulo de elasticidad estático y la relación de Poisson del hormigón en compresión”.

**2.1.7.8. Resistencia a la flexión**

Para este ensayo, el procedimiento se basará en la norma ASTM C78 “Método de prueba estándar para la resistencia a la flexión del concreto (usando una viga simple con carga en el tercer punto)”.

**2.1.7.9. Permeabilidad del hormigón**

Este ensayo se basa en el procedimiento descrito en la norma española UNE-EN 12390-8 “Profundidad de penetración de agua bajo presión”.

## **2.2. ESTADO DEL ARTE**

Hace miles de años, las personas dedicadas a la construcción, hacían una mezcla de ceniza volcánica o toba pulverizada (como también se la llama) con cal, obteniendo como resultado el cemento hidráulico. Un análisis de las estructuras griegas y romanas evidencia la efectividad y durabilidad de este cemento, un ejemplo de esto es el revestimiento de una cisterna en Kamiros, Rodas (Grecia) que data del siglo VII a.C. y aún existe. El cemento natural puzolánico fue desde la antigüedad el único material disponible para revestir cisternas y acueductos; y unir el ladrillo y la piedra de edificios monumentales (Olawuyi & Olusola, 2010).

En la actualidad, debido al incremento de contaminación a nivel mundial, varios investigadores han evaluado distintas puzolanas naturales, con el fin de optimizar la huella de carbono reduciendo las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas por la elaboración del clínker para el cemento, de esta manera se pretende reducir el consumo de este material y bajar los costos de producción si se utilizan las puzolanas naturales en gran escala. Estos estudios tuvieron como meta mantener o mejorar las características y propiedades mecánicas del hormigón.

### **2.2.1. ESTUDIOS DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA**

#### **Hossain (1999, 2003-2005)**

Hossain ha realizado una investigación exhaustiva sobre el uso de la ceniza volcánica y la piedra pómez en la producción de cemento y hormigón. Estos estudios sugirieron la fabricación de cemento de ceniza volcánica Portland y cemento pómez volcánico Portland con un reemplazo de hasta el 20%.

Su objetivo fue preservar la durabilidad a lo largo de la vida útil de las estructuras como otros hormigones de cemento mezclados, hechos con humo de sílice, cenizas volantes y escorias de alto horno. Desde 1999 comenzó con el análisis de las propiedades de la ceniza volcánica y hormigón pómez; para 2003 ya publicó su investigación sobre los cementos mezclados con ceniza volcánica y piedra pómez; en 2004 dio a conocer las propiedades del cemento a base de piedra pómez

volcánica y hormigón ligero; para el 2005 dio a conocer el rendimiento que tenían los hormigones de cemento prefabricado y mezclado in situ a base de cenizas volcánicas en medio marino.

Los resultados de estas investigaciones permitieron concluir que el aumento del porcentaje de reemplazo, tanto de ceniza volcánica como de piedra pómez volcánica, de 0% a 25% incrementa el tiempo de fraguado de las mezclas de cemento. Este es un dato razonable debido a que, al añadir ceniza y restar cemento en la mezcla, disminuye el área superficial del cemento causando que la hidratación se ralentice, tenga una baja tasa de desarrollo de calor y el tiempo de fraguado aumente. Esto es de gran importancia en la fabricación de hormigón en masa.

En cuanto a la resistencia a compresión, esta disminuye con el aumento del contenido de ceniza y piedra pómez volcánica; sin embargo, se comprobó que la reducción de la compresión se reduce con el aumento de la edad, por lo tanto, estas puzolanas naturales contribuyen con la mejora de la resistencia y durabilidad del hormigón a largo plazo.

De acuerdo con las recomendaciones de estas investigaciones, se comenzaron a producir y utilizar cementos con ceniza y piedra pómez volcánica, más baratos y respetuosos con el ambiente, en los proyectos de rehabilitación de áreas volcánicas de Papúa Nueva Guinea.

### **Matawal (2005)**

La aplicación del uso de diversas cenizas como reemplazo del cemento en la producción de mortero y concreto ha llamado la atención de algunos investigadores por su potencial para reducir o eliminar totalmente la clasificación de cenizas como material de desecho contaminante y reducir la cantidad y costo de cemento aplicado a las obras de hormigón.

Matawal destacó que investigaciones realizadas en Nigeria y en otros países del extranjero han demostrado que las puzolanas pueden producir hormigón con características similares al concreto normal en edades superiores a 28 días. Por lo tanto, se han realizado diversos estudios experimentales sobre una variedad de cenizas residuales y materiales con potencial puzolánico como: cenizas de cáscara

de arroz, cenizas de aserrín, cenizas de polvo de trigo, cenizas de fibra de caña de azúcar, cenizas de combustible pulverizadas, cáscara de maní, relaves de minería y cenizas volcánicas (Hassan, 2006).

#### **Hossain y Lachemi (2007)**

El artículo publicado por Hossain y Lachemi presenta resultados producto de investigaciones para evaluar la idoneidad del uso de ceniza volcánica como material de reemplazo del cemento para producir concreto de alto desempeño. El rendimiento de las mezclas se valoró mediante una serie de pruebas completas sobre las propiedades frescas y endurecidas, así como la durabilidad.

Dentro de las propiedades frescas de la mezcla con ceniza volcánica, se obtuvo como resultado un hormigón con buena trabajabilidad, sin segregación excesiva. Por otro lado, la resistencia a compresión disminuyó con el aumento de ceniza volcánica y aumentó con la edad del concreto. La contracción por secado fue ligeramente mayor en comparación con el hormigón patrón y la permeabilidad fue baja.

Este estudio se realizó con porcentajes de reemplazo del 0% (hormigón patrón), al 20% y debido a los resultados satisfactorios, el autor recomienda realizar mezclas de hormigón con ceniza de diferentes fuentes comprobando de esta manera que pueden tener comportamientos similares.

#### **Hossain y Lachemi (2010)**

Otra investigación proporcionada por los autores se refiere a la elaboración de hormigón autocompactante con la introducción de ceniza volcánica como reemplazo del cemento hidráulico. Este tipo de hormigón es conocido por su excelente deformabilidad, alta resistencia a la segregación y uso en estructuras congestionadas caracterizadas por condiciones de colado complicadas sin aplicar vibración.

Los resultados de este estudio son alentadores y confirma la aceptabilidad de la producción de concreto autocompactante con ceniza volcánica. Las muestras de este hormigón con una resistencia mínima de 15 MPa (requisito para algunas

aplicaciones de concreto estructural) se pueden obtener con una sustitución en masa de hasta el 50% de cemento por ceniza volcánica, tienen propiedades aceptables y bajos costos.

#### **Olawuyi y Olusola (2010)**

Investigaron el efecto de reemplazar parcialmente el cemento con ceniza volcánica sobre la resistencia a compresión del hormigón laterizado. Sustituyeron, en un rango de 0% a 30%, el cemento por ceniza volcánica y la arena por laterita. La mezcla patrón que sirvió como punto de comparación tuvo una fuerza objetivo de 25 MPa a la edad de 28 días.

Como producto de este estudio se tuvo que la densidad y la resistencia a compresión de las probetas de hormigón disminuyeron en un 4.4% y 28%, respectivamente, con el aumento de ceniza volcánica sin laterita incorporada. La resistencia a compresión, con el aumento de contenido de laterita, también disminuyó; sin embargo, la resistencia del hormigón laterizado aumenta a medida que avanza la edad de curado.

Cabe aclarar que, la laterita es un suelo que se encuentra en regiones tropicales y subtropicales, se caracteriza por tener una baja cantidad de sílice y una elevada cantidad de hierro y alúmina (caracterizado por su color rojizo), se forma por la meteorización de la superficie del suelo (Espindola & Daniel, 2008).

#### **Kizilkanat, Tufekci y Oktay (2015)**

Hicieron un estudio sobre el uso del polvo de piedra pómez como material sustituto del cemento para mejorar las propiedades del hormigón (trabajabilidad, durabilidad, resistencia y ataque de sulfatos). Los autores llevaron a cabo esta investigación gracias a que el país donde residen (Turquía) es rico en puzolana natural, casi el 20% del país está cubierto por rocas volcánicas de edad terciaria y cuaternaria; y se puede encontrar piedra pómez en varias regiones.

Los porcentajes de reemplazo utilizados fueron del 10% y 20%, los resultados mostraron que la adición del polvo de piedra pómez disminuyó el valor del asentamiento del concreto, minimizó la resistencia a compresión a edades

tempranas, sin embargo, a las edades de 28, 90 y 180 días los valores de resistencia fueron similares al hormigón patrón. En cuanto a la durabilidad, las probetas con 10% y 20% de polvo de piedra pómez presentaron una resistencia al ataque de sulfatos superior al hormigón estándar después de 180 y 360 días. Las mezclas con 20% resultaron tener el mejor comportamiento contra en ataque de sulfatos.

### **Galeas y Guzmán (2020)**

En este estudio se planteó una propuesta de dosificación de hormigón con un porcentaje de reemplazo en peso de cemento, de 2.5%, 5%, 10% y 20%, por ceniza volcánica obtenida de las faldas del volcán Tungurahua, identificando la influencia de utilizar la fracción fina, gruesa y completa, utilizando la metodología recomendada por el ACI 211.1, con el fin de mejorar las propiedades mecánicas, reducir costos y minimizar el daño ambiental.

Se elaboraron probetas cilíndricas para ensayarlas a compresión a diferentes edades (7, 14, 28, 100 y 200 días), esperando obtener una resistencia de diseño de 14 MPa y 21 MPa. Para determinar la incidencia del reemplazo, se efectuó un análisis del módulo de elasticidad en muestras con aumento de la resistencia a compresión estable (200 días) y todos estos resultados se los comparó con una dosificación de hormigón estándar.

De la investigación se pudo comprobar un crecimiento en la resistencia a compresión del hormigón con ceniza volcánica en comparación con el hormigón estándar. Todos los porcentajes y las diferentes fracciones de ceniza analizadas lograron un aumento de esta propiedad mecánica, sin embargo, la fracción gruesa con sustitución del 5% obtuvo la mayor resistencia a compresión tanto para 14MPa como para 21MPa y los módulos de elasticidad en todas las probetas con ceniza, mostraron un incremento de 3% hasta un 37.2% llegando a los 200 días.

Además, según pruebas estadísticas se pudo evidenciar que a los 28 días de edad de las probetas no hubo una diferencia significativa entre las que tenían ceniza y las que no, por lo tanto, en el uso práctico del hormigón, la incorporación

de ceniza no afecta a la resistencia de diseño, no obstante, se obtiene un mejor resultado a largo plazo.

### **2.2.2. ESTUDIO DE RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE OTRAS PUZOLANAS NATURALES**

#### **Zunino (2012)**

Realizó una evaluación del hormigón de alto desempeño utilizando la ceniza de cascarilla de arroz como material cementicio suplementario. La ceniza se obtiene de un proceso de combustión de la cascarilla, sin embargo, el CO<sub>2</sub> que libera es recuperable por medio del ciclo de carbono de la biomasa, esta es una ventaja comparándolo a un combustible fósil. El porcentaje de sustitución de cemento por ceniza fue de 5%, 10% y 20%, con esto se realizaron probetas para una edad de 28 y 90 días, se analizó la caracterización de estos dos materiales (ceniza y cemento), resistencia a compresión y permeabilidad.

Como resultado de este experimento, se pudo comprobar que la resistencia a compresión no se veía afectada de manera significativa ya que, a los 90 días la resistencia fue estadísticamente equivalente con la mezcla patrón (hormigón sin sustitución) para todos los porcentajes de sustitución. Con respecto a la caracterización de la ceniza, el tamaño medio de las partículas comparado con el tamaño de los granos de cemento, fueron significativamente menores, lo que hizo que la permeabilidad del hormigón mejore y con esto ayude a resistir eficientemente las condiciones climáticas durante su vida útil.

### **2.2.3. ESTUDIOS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE CENIZA VOLCÁNICA**

#### **Al-Bahar, Chakkamalayath, José, Abdulsalam, Otaibi y Al-Aibani (2017)**

Estos autores realizaron un estudio sobre el efecto de la incorporación de ceniza volcánica sobre las propiedades mecánicas de la pasta de cemento hidráulico. Buscaban determinar el porcentaje de reemplazo óptimo de ceniza para obtener un máximo beneficio en la resistencia a compresión, tracción y flexión, además de las propiedades microestructurales de la mezcla. Los porcentajes analizados fueron

del 0% al 50% a una edad de 28 y 90 días y relaciones agua/cemento de 0.25, 0.35, 0.45 y 0.55.

Los resultados generales mostraron una disminución notable en la resistencia a compresión con un aumento del porcentaje de ceniza volcánica; este porcentaje de reducción fue del 3.7% a los 90 días, con contenidos de ceniza de 10% al 30% y una relación de 0.25 agua/cemento. Por lo tanto, esto implicó que, a edades posteriores, el desarrollo de la resistencia puede compararse con la mezcla de control.

En cuanto a la resistencia a tracción, se obtuvieron los mejores resultados con un reemplazo del 10% de ceniza por cemento para las relaciones agua/cemento de 0.25, 0.35 y 0.45. Para una relación de 0.55, la resistencia a la tracción máxima se obtuvo para un porcentaje de ceniza del 40%. Los valores máximos de esfuerzo a flexión se obtuvieron en las mezclas del 20% de reemplazo con una relación a/c de 0.35 y 0.55. Para las otras relaciones ningún porcentaje alcanzó al esfuerzo obtenido en el hormigón patrón.

Con todos esos análisis se concluyó finalmente, que un reemplazo del 10 al 30% de ceniza por cemento produce el máximo beneficio dentro de las propiedades mecánicas del concreto.

#### **Zeyad, Tayeh y Yusuf (2019)**

“Características de resistencia y transporte del hormigón de alta resistencia a base de polvo de piedra pómez volcánica (PPV)” es el título del estudio realizado por estos autores; dentro de este, se investigó la potencia del polvo de piedra pómez volcánica como material cementante suplementario, en niveles de 0%, 10%, 20% y 30%, por su reactividad puzolánica para mejorar la resistencia y durabilidad del concreto.

Se ejecutaron ensayos de resistencia indirecta a la tracción, flexión y compresión con especímenes cilíndricos de 100x200 mm de altura, prismáticos de 100x100x400 mm y cúbicos de 100 mm, respectivamente; a las edades de 7, 14, 28, 90 y 180 días. Se usaron 3 muestras para cada edad y prueba.



Los resultados de las pruebas de resistencia a compresión arrojaron que a la edad de 7 días los valores bajaron con el aumento de porcentaje de la piedra pómez y esto ocurrió porque la PPV no favorece el proceso de hidratación temprana, por el contrario, a una edad de 180 días el hormigón con PPV al 10% fue el único que alcanzó la resistencia en comparación con el hormigón de control a la misma edad.

Los resultados de los ensayos de tracción indirecta mostraron el mismo comportamiento que la resistencia a compresión; considerando el rango de edad de 7 a 180 días, la tasa de desarrollo de resistencia para un hormigón con 10% de PPV fue del 25.2% en comparación con el hormigón de referencia que fue del 16.2%.

Por último, se registró que el mayor valor de esfuerzo a flexión se consiguió con el concreto de 10% de reemplazo de PPV con un aumento significativo del 12.1% en comparación con la muestra de control. Concluyendo así que el porcentaje óptimo de sustitución de cemento por PPV es del 10%.

#### **2.2.4. ESTUDIOS DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE OTRAS PUZOLANAS NATURALES**

##### **Akeke, Ephraim, Akobo y Ukpata (2013)**

En Calabar (Nigeria), la ceniza de cascarilla de arroz ha sido clasificada como una super puzolana, ya que su contenido de sílice va del 85% al 90% por tanto, en presencia de humedad forma compuestos con propiedades de cementita, que bien podría usarse como sustituto del cemento ordinario. En 2013, los autores: Akeke, Ephraim, Akobo y Ukpata investigaron, de manera experimental, las propiedades del concreto con introducción de ceniza de cascarilla arroz como un reemplazo parcial del cemento Portland. El análisis se basó en comprobar la resistencia a compresión, tracción y flexión del concreto para demostrar la eficiencia de utilizar este hormigón dentro de elementos estructurales, usando un porcentaje adecuado de ceniza.

A partir del análisis de resultados en este trabajo de investigación, se estableció que el uso del hormigón con cascarilla de arroz en la construcción civil, además de

reducir los factores contaminantes ambientales, trajo varias mejoras a las características del concreto.

Las pruebas de resistencia a la compresión y trabajabilidad sugirieron que el cemento podría sustituirse hasta en un 25% en la producción de hormigón sin pérdida de trabajabilidad o resistencia, por otro lado, con base en los resultados de la prueba de tracción, es conveniente indicar que no hay un aumento sustancial. Sin embargo, los estudios de resistencia a la flexión mostraron que hubo una mejora marginal con niveles de reemplazo de ceniza del 10 al 25%, pero se definió que el porcentaje óptimo de reemplazo fue del 10%. De esta manera se concluyó que el hormigón con cascarilla de arroz posee una serie de buenas cualidades que lo convierten en un hormigón estructural duradero y bueno para consideraciones tanto a corto como a largo plazo.

#### **Sooraj V.M (2013)**

El artículo escrito y publicado por Sooraj, en 2013, muestra un estudio acerca de las propiedades mecánicas del hormigón afectadas por el uso de ceniza proveniente de la quema de cáscara de aceite de palma (material de reciclaje potencial en la industria del aceite de palma en Kerala-India), la cual ha sido identificada como un buen material puzolánico que por su composición silícea produce un concreto más fuerte y denso.

Las probetas de hormigón preparadas contenían 10%, 20%, 30% y 40% de ceniza de cáscara de aceite de palma y se estudió la resistencia a compresión, resistencia a flexión y resistencia a tracción dividida, comparándolas con las propiedades mecánicas de probetas elaboradas con hormigón ordinario. Los ensayos se realizaron a una edad de 7 y 28 días.

Dentro de los resultados obtenidos se pudo constatar que, para la resistencia a compresión, en comparación con la muestra de control, solo el reemplazo de 10% de ceniza por cemento da un resultado de resistencia mayor, a partir de ese porcentaje la resistencia a compresión decrece. Por otra parte, la resistencia a tracción dividida muestra que con un reemplazo del 10% la resistencia aumenta, con el 20% se mantiene constante y a partir de ahí, la resistencia a tracción

disminuye. Finalmente, el ensayo de flexión mostró que para una introducción del 10%, la resistencia se mantiene constante, para 20% se incrementa y desde ese punto la resistencia a flexión disminuye. Con esto se concluyó que el porcentaje óptimo de sustitución de ceniza por cemento es del 20% para alcanzar propiedades mejoradas del concreto estructural.

## **CAPÍTULO 3**

### **METODOLOGÍA**

#### **3.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES QUE COMPONEN EL HORMIGÓN**

Para elaborar mezclas de hormigón, es estrictamente necesario que los materiales que lo componen se encuentren dentro de una normativa, ya que las características tanto físicas como mecánicas de dichos compuestos van a afectar directamente a las propiedades de resistencia que se espera conseguir en el concreto endurecido. Razón por la cual, se debe realizar ensayos que respalden la calidad de los componentes que se están utilizando, de acuerdo a la normativa ASTM.

##### **3.1.1. ENSAYOS PARA LOS AGREGADOS**

###### **3.1.1.1. Granulometría de agregados**

El ensayo de granulometría tiene como fin determinar de manera cuantitativa la distribución de los tamaños de las partículas que conforman el agregado fino y grueso, esto se realiza por medio de una serie de mallas o tamices normalizados, progresivamente decrecientes, de tal forma que vayan reteniendo material en función del tamaño de apertura. También se determinará el módulo de finura como dato para el diseño de mezcla.

El ensayo de granulometría se lo realiza en base a la norma ASTM C136.

###### **Agregado fino**

Preparación y ensayo de la muestra:

1. Se debe secar en el horno una muestra no menor a 500 g, durante 24 horas, a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .
2. Una vez transcurrido el tiempo de secado, se saca la muestra del horno y se la deja enfriar a temperatura ambiente.

- Se selecciona una serie de tamices (Ver Tabla 6) y se los coloca en orden descendente para luego poner la muestra desde la parte superior. El juego de tamices debe constar de una tapa y una bandeja para evitar la pérdida de agregado.

**Tabla 6**

*Requerimiento de gradación para agregado fino*

Tamaño de tamiz	Porcentaje que pasa
9.5 mm (3/8 in)	100
4.75 mm (Nº 4)	95 a 100
2.36 mm (Nº 8)	80 a 100
1.18 mm (Nº 16)	50 a 85
600 µm (Nº 30)	25 a 60
300 µm (Nº 50)	5 a 30
150 µm (Nº 100)	0 a 10
75 µm (Nº 200)	0 a 3

Fuente: (ASTM C33, 2018)



**Figura 10** Serie de tamices para la granulometría del agregado fino

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

- Se procede a agitar los tamices (manualmente o con la tamizadora eléctrica) durante un tiempo de aproximadamente 10 minutos.

5. Se registran los pesos retenidos en cada tamiz y se verifica que no exista una pérdida mayor a 0.3% de la muestra inicial colocada.
6. Se calcula el porcentaje que pasa y que se retiene en cada tamiz con las siguientes fórmulas:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso retenido de cada tamiz}}{\text{Peso total}} * 100\% \quad (22)$$

$$\% \text{ Ret. Acum} = \% \text{ Ret. anterior acum} + \% \text{ Retenido} \quad (23)$$

$$\% \text{ Pasa} = 100\% - \% \text{ Ret. Acumulado} \quad (24)$$

7. Finalmente, se grafica la curva granulométrica y se calcula el módulo de finura del agregado (mf).

$$mf = \frac{\sum \% \text{ Ret. Acum tamices serie Tyler}}{100} \quad (25)$$

### **Agregado grueso**

Preparación y ensayo de la muestra:

1. Secar en el horno el agregado grueso, durante 24 horas, a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ . El tamaño de la muestra se selecciona en base al tamaño nominal máximo del agregado que se está usando (Ver Tabla 7).

**Tabla 7***Tamaño de muestra para granulometría de agregado grueso*

<b>Tamaño Nominal Máximo mm (in)</b>	<b>Peso mínimo de la muestra (Kg)</b>
9.5 (3/8)	1
12.5 (1/2)	2
19.0 (3/4)	5
25.0 (1)	10
37.5 (1 1/2)	15
50 (2)	20
63 (2 1/2)	35
75 (3)	60
90 (3 1/2)	100
100 (4)	150
125 (5)	300

Fuente: (ASTM C136, 2019)

**Figura 11** Muestra de agregado grueso para granulometría

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

2. Una vez transcurrido el tiempo de secado, se saca la muestra del horno y se la deja enfriar a temperatura ambiente.
3. Se selecciona los tamices y se los coloca en orden descendente (1 1/2", 1", 3/4", 1/2", 3/8" y N° 4), se coloca la muestra desde la parte superior y se agita durante 10 minutos aproximadamente.



**Figura 12** Selección de tamices y colocación de muestra para granulometría de agregado grueso

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

4. Se registran los pesos retenidos en cada tamiz y se calcula el porcentaje que pasa y que se retiene, empleando las mismas fórmulas descritas en la granulometría del agregado fino.



**Figura 13** Material retenido en cada tamiz

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



Tabla 8

## Requerimiento de gradación para agregado grueso

Size Number	Nominal Size (Sieves with Square Openings)	Amounts Finer than Each Laboratory Sieve (Square-Openings), Mass Percent													
		100 mm (4 in.)	90 mm (3½ in.)	75 mm (3 in.)	63 mm (2½ in.)	50 mm (2 in.)	37.5 mm (1½ in.)	25.0 mm (1 in.)	19.0 mm (¾ in.)	12.5 mm (½ in.)	9.5 mm (¾ in.)	4.75 mm (No. 4)	2.36 mm (No. 8)	1.18 mm (No. 16)	300 µm (No.50)
1	90 to 37.5 mm (3½ to 1½ in.)	100	90 to 100	...	25 to 60	...	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	
2	63 to 37.5 mm (2½ to 1½ in.)	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	...	
3	50 to 25.0 mm (2 to 1 in.)	...	...	...	100	90 to 100	35 to 70	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	...	
357	50 to 4.75 mm (2 in. to No. 4)	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	...	0 to 5	...	...	
4	37.5 to 19.0 mm (1½ to ¾ in.)	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	...	0 to 5	...	...	...	
467	37.5 to 4.75 mm (1½ in. to No. 4)	...	...	...	...	100	95 to 100	...	35 to 70	...	10 to 30	0 to 5	...	...	
5	25.0 to 12.5 mm (1 to ½ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	...	...	
56	25.0 to 9.5 mm (1 to ¾ in.)	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 85	10 to 40	0 to 15	0 to 5	...	...	
57	25.0 to 4.75 mm (1 in. to No. 4)	...	...	...	...	...	100	95 to 100	...	25 to 60	...	0 to 10	0 to 5	...	
6	19.0 to 9.5 mm (¾ to ¾ in.)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	0 to 15	0 to 5	...	...	
67	19.0 to 4.75 mm (¾ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	...	20 to 55	0 to 10	0 to 5	...	
7	12.5 to 4.75 mm (½ in. to No. 4)	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	40 to 70	0 to 15	0 to 5	...	
8	9.5 to 2.36 mm (¾ in. to No. 8)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 30	0 to 10	0 to 5	
89	9.5 to 1.18 mm (¾ in. to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	100	90 to 100	20 to 55	5 to 30	0 to 10	
9 <sup>A</sup>	4.75 to 1.18 mm (No. 4 to No. 16)	...	...	...	...	...	...	...	...	...	100	85 to 100	10 to 40	0 to 10	

<sup>A</sup> Size number 9 aggregate is defined in Terminology C125 as a fine aggregate. It is included as a coarse aggregate when it is combined with a size number 8 material to create a size number 89, which is a coarse aggregate as defined by Terminology C125.

Fuente: (ASTM C33, 2018)

- Finalmente, se grafica la curva granulométrica para el agregado grueso y se calcula el módulo de finura.

Estos resultados de granulometría se presentan en los Anexos 3 y 4 de la presente investigación.

### 3.1.1.2. Densidad aparente, suelta y compactada de los agregados

El ensayo para la densidad aparente de los agregados, tanto fino como grueso, se lo realiza en base a la norma ASTM C29.

Para obtener el valor de densidad aparente se debe contar con un recipiente de volumen conocido cuya capacidad está en función del tamaño máximo nominal de los agregados (Ver Tabla 9):

**Tabla 9***Capacidad del molde*

Tamaño máximo nominal del agregado mm (in)	Capacidad nominal del molde m <sup>3</sup> (L)
12.5 (1/2)	0.0028 (2.8)
25.0 (1)	0.0093 (9.3)
37.5 (1 1/2)	0.014 (14)
75 (3)	0.028 (28)
100 (4)	0.070 (70)
125 (5)	0.100 (100)

Fuente: (ASTM C29, 2017)

**Figura 14** Moldes para densidad aparente

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Tanto para la arena como para el ripio, el procedimiento de ensayo es el mismo, la única diferencia es la capacidad del recipiente que se utiliza para cada uno. El material debe estar previamente seco en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 15** Material pétreo previamente seco

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

### **Densidad suelta**

1. Se toma el peso del molde vacío y se lo coloca en una superficie plana.
2. Se llena el molde con el agregado haciéndolo caer a una altura no mayor a 5 cm para evitar la compactación hasta que el material rebose del borde del recipiente. Una vez lleno, se enraza con una varilla metálica.
3. Se toma el peso del molde con el agregado.
4. Finalmente, teniendo los datos, se determina la densidad aparente suelta de los agregados.

Se recomienda realizar este procedimiento dos veces para tener un resultado más aproximado.

### **Densidad compactada**

1. Se toma el peso del molde vacío y se lo coloca en una superficie plana.
2. Se llena 1/3 de la altura del molde con el agregado y se compacta con 25 golpes distribuidos sobre toda la capa colocada. Para la compactación se utiliza una varilla lisa de 16 mm de diámetro.
3. Se hace lo mismo con las otras dos capas hasta llenar el molde y luego se enraza.
4. Se toma el peso del molde con el agregado compactado.

5. Finalmente, teniendo los datos, se determina la densidad aparente compactada de los agregados.

Se recomienda realizar este procedimiento dos veces para tener un resultado más aproximado.

La fórmula para calcular las densidades aparentes, tanto suelta como compactada, es la siguiente:

$$DA = \frac{W2 - W1}{V} \quad (26)$$

Donde:

DA= Densidad aparente (g/cm<sup>3</sup>).

W1= Peso del recipiente (g).

W2= Peso del recipiente más agregado (g).

V= Capacidad del recipiente (cm<sup>3</sup>).



**Figura 16** Densidad aparente del agregado fino y grueso

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Los resultados de la densidad suelta y compactada de los agregados se presentan en el Anexo 2.

### 3.1.1.3. Peso específico y absorción de los agregados

El peso específico o gravedad específica del agregado grueso y fino, se calcula con las normas ASTM C127 y ASTM C128, respectivamente. El valor obtenido es

adimensional y es importante debido a que puede afectar a la relación agua/cemento en la dosificación del hormigón.

### **Agregado fino**

Preparación de la muestra:

1. Primero se necesita que la arena se encuentre libre de impurezas y partículas finas que pasen el tamiz N° 200, por tanto, se debe lavar una muestra representativa de agregado fino hasta que el agua salga cristalina.
2. Luego se debe dejar sumergida a la muestra por 24 h, para tener un material en condición saturada.



**Figura 17** Agregado fino en saturación

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Determinación de la condición SSS (superficie saturada seca)

1. Luego de las 24 horas de sumergida la muestra, se retira el exceso de agua.
2. En una bandeja no absorbente se extiende la muestra para secarla. Se puede utilizar el horno o a temperatura ambiente.
3. Con una espátula se debe mover la muestra constantemente para tener un secado uniforme hasta que las partículas de agregado no se adhieran entre si marcadamente por la tensión superficial del agua.

4. Para comprobar que se ha llegado a la condición SSS, se coloca un molde en forma de cono invertido sobre una superficie lisa y no absorbente.



**Figura 18** Molde y compactador para peso específico

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

5. Se llena completamente el molde con agregado y se apiña con 25 golpes del compactador dejándolo caer desde una altura de 0.5 cm sobre la superficie del agregado.
6. Se enraza el molde y se limpia el material que ha caído en la base.



**Figura 19** Colocación y compactación del material fino en el molde para determinar la condición SSS

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

7. Se levanta el molde verticalmente evitando producir vibración. Si el agregado se desploma levemente después de retirado el cono quiere decir que ha llegado a la condición SSS.





**Figura 20** Material fino en condición SSS

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

8. En caso de que el material conserve la forma del cono, una vez retirado este, quiere decir que necesita más tiempo de secado para que alcance la condición SSS. Si, por el contrario, se excede el tiempo de secado, se debe repetir el ensayo.

Determinación de densidades:

1. Se llena el picnómetro con agua hasta la marca de aforo y se anota su peso.
2. Se toma 300 g del agregado fino en condición SSS y se lo introduce en el picnómetro vacío, se adiciona agua hasta un 90% aproximadamente de su capacidad total.



**Figura 21** Picnómetro con agregado

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

3. Se conecta el picnómetro a una bomba de vacíos para eliminar las burbujas de aire por un aproximado de 10 minutos.



**Figura 22** Extracción de aire en agregado fino

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

4. Luego de eliminado el aire, se llena el agua hasta la marca de aforo evitando la introducción de aire y se toma el peso.
5. Se vierte el material en un recipiente de peso conocido y se pone a secar en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , durante 24 horas.
6. Finalmente, se registra el peso seco del agregado.



**Figura 23** Toma de datos antes y después de secar el agregado fino

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



Para calcular el peso específico y el porcentaje de absorción, se utilizan las siguientes fórmulas:

$$\text{Gravedad específica (SH)} = \frac{A}{B + S - C} \quad (27)$$

$$\text{Gravedad específica (SSS)} = \frac{S}{B + S - C} \quad (28)$$

$$\text{Gravedad específica aparente (SSS)} = \frac{A}{B + A - C} \quad (29)$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{S - A}{A} * 100\% \quad (30)$$

Donde:

A= Peso del agregado seco (g).

B= Peso del picnómetro más agua (g).

C= Peso del picnómetro más agua y más agregado (g).

S= Peso del material en condición SSS (g).

### **Agregado grueso**

Preparación de la muestra:

1. Primero se necesita que el agregado se encuentre libre de impurezas, polvo y partículas finas que pasen el tamiz N° 200, por tanto, se debe lavar una muestra representativa de ripio hasta que el agua salga cristalina.
2. Luego se debe dejar sumergida a la muestra por 24 h, para tener un material en condición saturada.



**Figura 24** Agregado grueso en saturación

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Determinación de la condición SSS (superficie saturada seca)

1. Luego de las 24 horas de sumergida la muestra, se elimina el exceso de agua.
2. Se coloca la muestra sobre una toalla absorbente y se frota hasta eliminar el agua visible del agregado, es decir hasta que el agregado pierda el brillo superficial y se vuelva opaco.



**Figura 25** Condición SSS del agregado grueso

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

3. Se toma una muestra mínima de agregado en condición SSS, que depende del tamaño nominal máximo del mismo (Ver Tabla 10):

**Tabla 10**

*Masa mínima requerida para calcular peso específico de agregado grueso*

Tamaño máximo nominal del agregado mm (in)	Masa mínima de la muestra de prueba (Kg)
12.5 (1/2) o menor	2
19.0 (3/4)	3
25.0 (1)	4
37.5 (1 1/2)	5
50 (2)	8
63 (2 1/2)	12
75 (3)	18
90 (3 1/2)	25
100 (4)	40
125 (5)	75

Fuente: (ASTM C127, 2015)

4. Se toma el peso de la canasta sumergida.
5. Se coloca el agregado en condición SSS en la canasta y se registra el peso sumergido de la canasta y el agregado.



**Figura 26** Toma de pesos de la canastilla y del agregado sumergido

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

6. Luego, se ubica la muestra en una bandeja y se seca en el horno a una temperatura de  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , durante 24 horas.
7. Finalmente, se el agregado seco resultante.

Para calcular el peso específico y el porcentaje de absorción, se utilizan las siguientes fórmulas:

$$\text{Gravedad específica (SH)} = \frac{A}{B - C} \quad (31)$$

$$\text{Gravedad específica (SSS)} = \frac{B}{B - C} \quad (32)$$

$$\text{Gravedad específica aparente (SSS)} = \frac{A}{A - C} \quad (33)$$

$$\text{Absorción (\%)} = \frac{B - A}{A} * 100\% \quad (34)$$

Donde:

A= Peso del agregado seco (g).

B= Peso de la muestra en SSS (g).

C= Peso de la muestra sumergida en agua (g).

Los resultados de peso específico y absorción se presentan en el Anexo 2 de la presente investigación.

#### 3.1.1.4. Abrasión

Este ensayo se lo realiza al agregado grueso y su objetivo es producir un desgaste en la superficie de cada partícula mediante una carga abrasiva dada por unas esferas de acero al introducir todo en una máquina de rotación denominada Máquina de los Ángeles. La normativa ASTM C131, es la que muestra el procedimiento de este ensayo.

1. Primero, se debe elegir la gradación de la muestra en base a la granulometría obtenida previamente. En la siguiente tabla, se muestra los tipos de gradación según el porcentaje retenido:

**Tabla 11***Gradación de la muestra de prueba para abrasión*

Tamices		Masa (g)			
Pasante mm (in)	Retenido mm (in)	Gradación			
		A	B	C	D
37.5 (1 1/2)	25.0 (1)	1250 ± 25	-	-	-
25.0 (1)	19.0 (3/4)	1250 ± 25	-	-	-
19.0 (3/4)	12.5 (1/2)	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-
12.5 (1/2)	9.5 (3/8)	1250 ± 10	2500 ± 10	-	-
9.5 (3/8)	6.3 (1/4)	-	-	2500 ± 10	-
6.3 (1/4)	4.75 (Nº 4)	-	-	2500 ± 10	-
4.75 (Nº 4)	2.36 (Nº 8)	-	-	-	5000 ± 10
<b>Total</b>		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

Fuente: (ASTM C131, 2020)

2. Según la gradación escogida, que para esta investigación ha sido el tipo B, se selecciona la carga abrasiva, en base a la siguiente tabla:

**Tabla 12***Carga abrasiva*

Gradación	Número de esferas	Masa de carga (g)
A	12	5000 ± 25
B	11	4580 ± 25
C	8	3330 ± 20
D	6	2500 ± 15

Fuente: (ASTM C131, 2020)

3. El número de esferas para la gradación tipo B es de 11. Con esto, se coloca la muestra junto con las esferas en la Máquina de los Ángeles y se la hace girar a una velocidad de 33 rpm.



**Figura 27** Colocación de agregado y esferas dentro de la Máquina de los Ángeles

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

4. Una vez completas las primeras 100 revoluciones, se retira la muestra de la máquina y se tamiza con la malla N° 12. Luego, se pesa el material retenido.
5. Se coloca nuevamente tanto el material retenido como el pasante, dentro de la máquina y se la hace girar otras 400 revoluciones para completar así las 500 vueltas que establece la norma.
6. Tamizar nuevamente el material con la malla N° 12 y pesar el material retenido.



**Figura 28** Pérdida durante el proceso de abrasión

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

7. Calcular el porcentaje de abrasión y el coeficiente de uniformidad mediante las siguientes ecuaciones:

$$\text{Abrasión (\%)} = \frac{A - B}{0.01 * A} * 100\% \quad (35)$$

$$C.U = \frac{\text{Porcentaje pérdida 100 rev (\%)}}{\text{Porcentaje pérdida 500 rev (\%)}} \quad (36)$$

Donde:

A= Peso inicial del material (g).

B= Peso retenido en la malla N° 12 (g).

C.U= Coeficiente de uniformidad.

Los resultados de este ensayo se encuentran en el Anexo 5 del presente trabajo.

### **3.1.1.5. Contenido orgánico de la arena**

Las impurezas orgánicas que se pueden encontrar en los agregados finos extraídos de depósitos naturales, pueden afectar a la hidratación del cemento y esto como consecuencia, puede producir un inadecuado desarrollo de la resistencia mecánica del concreto. Por esa razón, es importante determinar el contenido orgánico mediante un ensayo de colorimetría, siguiendo la norma ASTM C40.

1. Primero, se prepara una solución con hidróxido de sodio al 3%, esto quiere decir que, en 97 partes de agua, se disuelven 3 partes de hidróxido de sodio en masa.
2. Luego, en un recipiente de vidrio con volumen conocido, se agrega el agregado fino hasta la marca de 130 ml.
3. Una vez colocado el agregado, se vierte la solución de hidróxido de sodio hasta completar los 200 ml de volumen.



**Figura 29** Ensayo de contenido orgánico de arena

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

4. Tapar el recipiente y agitar, procurando que toda la arena entre en contacto con la solución. Dejar reposar durante 24 horas.
5. Utilizando la placa de Gardner, se compara el color resultante de la solución y se le asigna un número en función de la escala (Ver Tabla 13):

**Tabla 13**

*Escala de Gardner*

Color normalizado Escala de Gardner No.	Número de orden en el comparador	Observación
5	1	Permitido
8	2	Permitido
11	3	Normalizado de referencia
14	4	No permitido
16	5	No permitido

Fuente: (ASTM C40, 2020)





**Figura 30** Comparador de color o Escala de Gardner

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

### 3.1.1.6. Contenido de humedad de los agregados

Se debe determinar el contenido de humedad de los agregados para poder corregir el diseño de mezcla en caso de utilizar material pétreo en estado natural. Esto se lo realiza en base a la norma ASTM C566 y el procedimiento es el siguiente:

#### **Agregado fino**

1. Se pesa el recipiente en el que se va a colocar la muestra de arena.
2. Se toma una muestra mínima de 500 g (para este ensayo se pesó alrededor de 680 g).
3. Una vez registrados los datos del material húmedo, se lo lleva al horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C por 24 horas.
4. Pasado ese tiempo, se saca la muestra del horno, se deja enfriar y se registra el peso seco.

#### **Agregado grueso**

1. Se pesa el recipiente en el que se va a colocar el agregado.
2. Se toma una muestra mínima de 3 Kg de agregado grueso, este valor depende del tamaño máximo nominal, como se indica en la siguiente tabla:

**Tabla 14**

*Masa mínima para calcular el contenido de humedad del agregado grueso*

<b>Tamaño máximo nominal del agregado mm (in)</b>	<b>Masa mínima de la muestra de prueba (Kg)</b>
4.75 (Nº 4)	0.5
9.5 (3/8)	1.5
12.5 (1/2)	2
19.0 (3/4)	3
25.0 (1)	4
37.5 (1 1/2)	6
50 (2)	8
63 (2 1/2)	10
75 (3)	13
90 (3 1/2)	16
100 (4)	25
150 (6)	50

Fuente: (ASTM C566, 2004)

- Una vez registrados los datos del material húmedo, se lo lleva al horno a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C por 24 horas.
- Pasado ese tiempo, se saca la muestra del horno, se deja enfriar y se registra el peso seco.

Para calcular el contenido de humedad tanto del agregado fino como del grueso se utiliza la siguiente expresión:

$$\%W = \frac{W_n - W_s}{W_s} * 100\% \quad (37)$$

Donde:

%W= Porcentaje de humedad de los agregados.

W<sub>n</sub>= Peso del agregado húmedo.

W<sub>s</sub>= Peso del agregado seco.

Se recomienda realizar dos veces cada ensayo para poder sacar un promedio de los dos valores y constatar que el resultado es correcto. A continuación, se muestran los resultados del contenido de humedad:

**Tabla 15**

*Resultados del ensayo de contenido de humedad de los agregados*

AGREGADO FINO			AGREGADO GRUESO		
Nomenclatura	Muestra 1	Muestra 2	Nomenclatura	Muestra 1	Muestra 2
	Peso (g)	Peso (g)		Peso (g)	Peso (g)
PR	151.1	161	PR	1108	1668.8
Wn+PR	833.9	742.2	Wn+PR	5236.7	5866
Ws+PR	815.8	727.2	Ws+PR	5166.5	5792.5
%W=	2.72%	2.65%	%W=	1.73%	1.78%
%W prom=	2.69%		%W prom=	1.76%	

PR=Peso del recipiente

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

### 3.1.2. ENSAYOS PARA EL CEMENTO

Para esta investigación, se ha utilizado cemento de marca HOLCIM tipo GU, el cual cumple con las especificaciones de la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2380-Cementos hidráulicos por desempeño (equivalente a la norma ASTM C1157).

#### 3.1.2.1. Densidad aparente del cemento

A diferencia de los agregados, la ceniza, al tener una granulometría fina, facilita el uso de moldes más pequeños para el cálculo de la densidad aparente. Para este ensayo, se han empleado moldes de 5.5 cm de diámetro y 14.9 cm de altura, aproximadamente, como se muestra:

#### Densidad suelta

1. Se toma el peso del molde vacío y se lo coloca en una superficie plana.
2. Se llena el molde con el cemento haciéndolo caer a una altura no mayor a 5 cm para evitar la compactación hasta que el material rebose del borde del recipiente. Una vez lleno, se enraza.
3. Se toma el peso del molde con el cemento.
4. Finalmente, teniendo los datos, se determina la densidad aparente suelta.

### Densidad compactada

1. Se toma el peso del molde vacío y se lo coloca en una superficie plana.
2. Se llena 1/3 de la altura del molde con el cemento y se compacta tomando el molde y dejándolo caer verticalmente a la superficie de manera que el golpe de caída vaya compactando el cemento, esto se realiza 25 veces.
3. Se hace lo mismo con las otras dos capas hasta llenar el molde y luego se enraza.
4. Se toma el peso del molde con el agregado compactado.
5. Finalmente, teniendo los datos, se determina la densidad aparente compactada.

La densidad suelta y compactada del cemento se calcula con la siguiente fórmula:

$$DA_{\text{cemento}} = \frac{W2 - W1}{V} \quad (38)$$

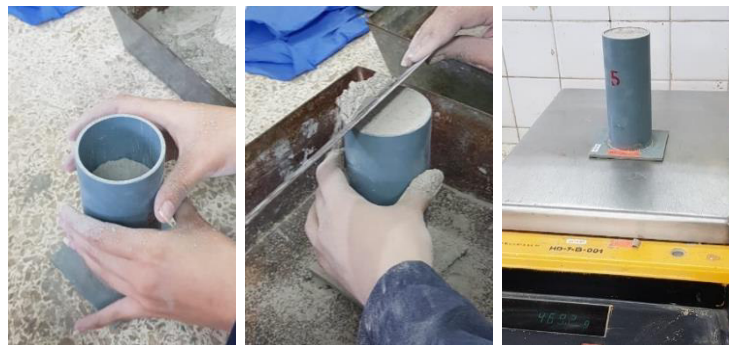
Donde:

$DA_{\text{cemento}}$ = Densidad aparente del cemento ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ).

$W1$ = Peso del recipiente (g).

$W2$ = Peso del recipiente más cemento (g).

$V$ = Volumen del recipiente ( $\text{cm}^3$ ).



**Figura 31** Ensayo de densidad aparente del cemento

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Se recomienda realizar el procedimiento, para cada ensayo, dos veces para tener un resultado más aproximado.

### 3.1.2.2. Densidad real del cemento

Para determinar la densidad del cemento, se toma como base el procedimiento establecido en la norma ASTM C188, como se describe a continuación:

1. Primero, se pesa una muestra de cemento de 64 g.
2. Luego, se llena el frasco de Le Chatelier con un reactivo (gasolina o keroseno libre de agua), hasta la primera marca (0 y 1 ml). Registrar la lectura ( $L_1$ ).
3. Tomar el frasco junto con el reactivo y registrar el peso ( $P_1$ ).
4. Se introduce la muestra de cemento, de a poco, con ayuda de un embudo, procurando que no se tape, hasta que el reactivo llegue a un nivel, en el cuello superior, entre 18 y 24 ml.
5. Se tapa el frasco y se lo rota sobre una franela para extraer el aire.
6. Se coloca el frasco con reactivo y cemento dentro de una bandeja con agua a una temperatura de  $23 \pm 2$  °C.
7. Tomar la segunda lectura ( $L_2$ ) y registrar el peso del frasco ( $P_2$ ).



**Figura 32** Ensayo de densidad real del cemento

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

La densidad real se calcula de la siguiente forma:

$$D_{real} = \frac{P_2 - P_1}{L_2 - L_1} \quad (39)$$

Donde los pesos están en gramos (g) y las lecturas de volumen en centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>).

Los resultados de los ensayos de densidad aparente y real del cemento se encuentran en el Anexo 2.

## **3.2. ENSAYOS PARA LA CENIZA VOLCÁNICA**

### **3.2.1. DENSIDAD APARENTE Y REAL DE LA CENIZA**

Los ensayos realizados para la ceniza volcánica, corresponden al cálculo de densidades. El procedimiento para la obtención de la densidad aparente (suelta y compactada) es igual al descrito anteriormente para el cemento en el punto 3.1.2.1.

De la misma forma para obtener la densidad real de la ceniza volcánica se sigue la metodología descrita en la norma ASTM C188, la cual se describe en el punto 3.1.2.2, con la única diferencia de que la muestra de ceniza es de 50 g.

Los resultados de los ensayos para la ceniza volcánica se encuentran en los Anexos 6 y 7 del presente trabajo.

### **3.2.2. TRITURACIÓN DE LA CENIZA VOLCÁNICA**

La muestra de ceniza que se obtuvo tenía una textura granulada con algunos fragmentos de gran tamaño, los cuales se tuvieron que someter a trituración con ayuda de la máquina de los ángeles. La fracción que se necesitaba dentro de la dosificación de hormigón, era la fina, por lo tanto, fue necesario el uso de una tamizadora para separar las partículas que pasaban el tamiz N° 200. Este procedimiento se realizó hasta obtener una cantidad de 50 Kg aproximadamente, de fracción fina de ceniza volcánica.

### 3.3. DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN

Para establecer las cantidades exactas de agregados (fino y grueso), cemento, agua y ceniza, se sigue la metodología descrita en la norma ACI 211.1 la cual se encuentra definida en el marco teórico de la presente investigación; una vez caracterizados los materiales se define la dosificación para un hormigón de 21 MPa. Se puede encontrar la dosificación elaborada bajo la supervisión del LEMSUR en el Anexo 1.

En la tabla siguiente se muestran los valores de la dosificación del concreto, considerando lo descrito teóricamente en la sección 2.1.4.3

**Tabla 16**

*Cantidades iniciales considerando agregado en estado seco*

<b>Mina:</b> HOLCIM - PIFO	<b>Resistencia (f'c):</b> 21 MPa
<b>Condiciones</b>	<b>Valor</b>
Elección del asentamiento	7.5 a 10 cm
Elección del tamaño máximo nominal	¾"
Estimación del contenido de aire	Sin inyección de aire ni aditivos
Cantidad de agua de mezclado	235.29 L/m <sup>3</sup> de hormigón
Relación agua/cemento	0.623
Cantidad de cemento	379.5 kg/m <sup>3</sup>
Cantidad de agregados	Arena: 853.88 kg/m <sup>3</sup>
	Ripio: 831.11 kg/m <sup>3</sup>

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Como la cantidad de agregados que se necesitaba para elaborar 18 vigas de concreto simple, 18 vigas de concreto armado y 63 cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, era elevada (2.5 T aproximadamente, entre arena y ripio) se optó por realizar corrección de humedad al diseño de mezcla inicial. Se necesitaron los datos obtenidos de contenido de humedad y porcentaje de absorción de los agregados, teniéndose la siguiente expresión:

$$\Delta W = W_m * \left( \frac{100 + \%Abs}{100 + \%W} - 1 \right) \quad (40)$$

Donde:

$\Delta W$ = Diferencia de agua (Kg).

$W_m$ = Peso del agregado (Kg).

%Abs= Porcentaje de absorción de los agregados.

%W= Porcentaje de humedad de los agregados.

**Tabla 17**

*Corrección de humedad*

<b>% ABSORCIÓN Y CONTENIDO DE HUMEDAD</b>		
<b>Agregados</b>	<b>Absorción</b>	<b>Humedad</b>
<b>Arena</b>	1.80%	2.69%
<b>Ripio</b>	1.80%	1.76%
<b>CORRECCIÓN DE HUMEDAD</b>		
<b>Peso arena/m<sup>3</sup></b>	853.88	Kg
<b>Peso ripio/m<sup>3</sup></b>	831.11	Kg
<b><math>\Delta W</math> arena</b>	-7.597	Kg
<b><math>\Delta W</math> ripio</b>	0.332	Kg

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Como los materiales no están sobresaturados, la corrección de humedad consistirá en sumar la diferencia de agua ( $\Delta W$ ) a la cantidad de agua de diseño y restar esta diferencia a los pesos iniciales de los agregados (Luna, 2014). Por lo tanto, las cantidades de los materiales que conforman el hormigón quedan modificadas como se muestra a continuación:

**Tabla 18**

*Corrección de las cantidades de agua y agregados*

<b>Mina:</b>	HOLCIM-PIFO	<b>Resistencia:</b>	21 MPa
<b>Componentes</b>	<b>Peso inicial (Kg)</b>	<b>Peso corregido (Kg)</b>	<b>Cantidad relativa en peso corregida</b>
<b>Agua</b>	235.29	228.03	0.60
<b>Arena</b>	853.88	861.48	2.27
<b>Ripio</b>	831.11	830.78	2.19
<b>Cemento</b>	379.5	379.5	1

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



### 3.3.1. DISEÑO DE MEZCLA POR METRO CÚBICO

**Tabla 19**

*Diseño de mezcla inicial*

DOSIFICACIÓN $f'c=$		21 Mpa	CEMENTO:	Saco de 50 Kg
CEMENTO (Sacos/m <sup>3</sup> )	DOSIS PESO	DOSIS VOLUMEN	ARENA (cajonetas)	RIPIO (cajonetas)
7.59	0.62 : 1 : 2.25 : 2.19	0.57 : 1 : 1.29 : 1.6	3 de 30 x 30 x 26	3 de 30 x 30 x 33

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Tabla 20**

*Diseño de mezcla corregido*

DOSIFICACIÓN $f'c=$		21 Mpa	CEMENTO:	Saco de 50 Kg
CEMENTO (Sacos/m <sup>3</sup> )	DOSIS PESO	DOSIS VOLUMEN	ARENA (cajonetas)	RIPIO (cajonetas)
7.59	0.60 : 1 : 2.27 : 2.19	0.55 : 1 : 1.30 : 1.6	3 de 30 x 30 x 26	3 de 30 x 30 x 33

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Con el diseño de mezcla corregido, se puede determinar la cantidad de ceniza que se requiere para sustituir el 10% y 20% del cemento. Teniendo el peso de cemento por cada metro cúbico de hormigón se resta a este el porcentaje de sustitución que correspondería a la ceniza que se debe adicionar. A continuación, se muestra una tabla con los valores y la nomenclatura utilizada para identificar cada dosificación:

**Tabla 21**

*Nomenclatura para identificar especímenes con distinta dosificación*

<b>Resistencia:</b>	21	MPa
<b>Cemento/m<sup>3</sup></b>	379.5	Kg
<b>Ceniza/m<sup>3</sup></b>		
<b>Nomenclatura</b>	<b>%</b>	<b>Peso (Kg)</b>
HS	0.00%	0
HCV10	10.00%	37.95
HCV20	20.00%	75.90
HS= Hormigón Estándar HCV10= Hormigón con ceniza volcánica 10% HCV20= Hormigón con ceniza volcánica 20%		

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

### 3.3.2. DOSIFICACIÓN PARA PROBETAS CON CENIZA

En la siguiente tabla de resumen se describe la dosificación para 1 m<sup>3</sup> de hormigón y la dosificación tomando en cuenta el volumen real que se necesita para elaborar las 36 vigas y 63 cilindros requeridos para los ensayos.

**Tabla 22**

*Cantidades en peso de los elementos que conforman 1 m<sup>3</sup> de hormigón*

<b># Sacos/m3 cemento</b>		7.59			
<b>Dosificación en peso para 1 m<sup>3</sup></b>					
	<b>Agua</b>	<b>Cemento</b>	<b>Ceniza</b>	<b>Arena</b>	<b>Ripio</b>
<b>Relación</b>	<b>0.6</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2.27</b>	<b>2.19</b>
<b>HS</b>	228.04	379.5	0	861.47	830.73
<b>HCV10</b>	228.04	341.55	37.95	861.47	830.73
<b>HCV20</b>	228.04	303.6	75.90	861.47	830.73

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Tabla 23**

*Número de probetas y volumen requerido para cada una*

**NÚMERO DE ESPECÍMENES****Ensayo a Flexión Simple**

Edad	Hormigón (15x15x60) cm		
	HS	HCV10	HCV20
28	3	3	3
56	3	3	3
<b>Total =</b>	6	6	6
		<b>Total Global =</b>	18

Edad	Hormigón Armado (25x25x80) cm		
	HAS	HACV10	HACV20
28	3	3	3
56	3	3	3
<b>Total =</b>	6	6	6
		<b>Total Global =</b>	18

**VOLUMEN DE HORMIGÓN**

Volumen real requerido (m <sup>3</sup> )	
<b>Vigas Hormigón (15x15x60 cm)</b>	
HS	0.081
HCV10	0.081
HCV20	0.081
<b>Vigas Hormigón Armado (25x25x80 cm)</b>	
HAS	0.300
HCV10	0.300
HCV20	0.300
<b>Cilindros ( D=10cm ,h=20cm )</b>	
HS	0.033
HCV10	0.033
HCV20	0.033

**Ensayo a Compresión y Durabilidad**

Edad	Hormigón (D=10cm, h=20cm)		
	HS	HCV10	HCV20
28	9	9	9
56	12	12	12
<b>Total =</b>	21	21	21
		<b>Total Global=</b>	63

Volumen de Hormigón (m <sup>3</sup> )	
Tipo	Total+5%desperdicio
<b>HS</b>	0.435
<b>HCV10</b>	0.435
<b>HCV20</b>	0.435

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Tabla 24**

*Cantidades en peso reales para el volumen real requerido de hormigón*

Dosificación real					
	Agua	Cemento	Ceniza	Arena	Ripio
<b>Relación</b>	<b>0.6</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>2.27</b>	<b>2.19</b>
<b>HS</b>	98.98	164.96	0.00	374.47	361.27
<b>HCV10</b>	98.98	148.47	16.50	374.47	361.27
<b>HCV20</b>	98.98	131.97	32.99	374.47	361.27
<b>Total (Kg) =</b>	296.93	445.40	49.49	1123.40	1083.81

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

### 3.4. FABRICACIÓN DE CILINDROS Y VIGAS DE HORMIGÓN

El proceso de fundición del hormigón se lo realizó durante seis días, por lo que se tuvo que dividir los especímenes (vigas y cilindros) en seis grupos. Se usó encofrado de madera para las vigas y moldes de metal para los cilindros, estos previamente cubiertos de aceite.



**Figura 33** Encofrados para vigas y cilindros

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Dentro de los especímenes, se tienen vigas armadas, esto requirió la elaboración de un armado antes de fundir dichas vigas. El acero requerido fue de 4 varillas de 8 mm para la parte superior y 4 de 12 mm para la parte inferior (se puede ver el diseño detalladamente en el apartado 3.5.3.2); no hubo diseño a corte por lo que únicamente se utilizaron 3 estribos para confinar las barras de acero.



**Figura 34** Armado de vigas

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

El hormigón se mezcló en una concreteira de  $\frac{1}{4}$  de saco de capacidad (12.5 Kg) para los primeros 3 días de fundición; para los últimos 3 días se empleó una concreteira de 1 saco de capacidad (50 Kg) debido a que el volumen requerido era mayor. Antes de comenzar a mezclar se humedecieron los instrumentos metálicos para evitar absorción o disminución del agua al diseño de mezcla.



**Figura 35** Elaboración de una tanda de hormigón

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

### 3.4.1. ENSAYO DE CONSISTENCIA DEL HORMIGÓN

Para comprobar que la mezcla de hormigón cumple con el asentamiento requerido para una resistencia de 21 MPa, se realizó el ensayo de consistencia, que se encuentra detallado en la norma ASTM C143. El procedimiento es el siguiente:

1. Primero se debe humedecer todos los instrumentos metálicos.
2. Luego, se coloca el cono de Abrams sobre una superficie horizontal no absorbente y sostener firmemente.
3. Con la ayuda de una pala, se vierte el hormigón dentro del cono hasta una tercera parte de su altura y se golpea 25 veces con una varilla lisa evitando tocar el fondo. Se realiza este procedimiento con las dos capas restantes y se enraza.
4. Luego, se debe levantar perpendicularmente el cono sin rotarlo o torsionarlo, colocarlo junto a la masa de hormigón e inmediatamente poner la varilla de manera horizontal sobre el cono y la masa para medir el asentamiento usando un flexómetro.



**Figura 36** Ensayo de consistencia del hormigón fresco

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

El ensayo debe durar menos de 2.5 minutos. Los valores de asentamiento de cada mezcla se detallan en el Anexo 8.

### 3.4.2. MOLDEO DE ESPECÍMENES

Se colocó la mezcla dentro de los moldes y se extrajo el aire según lo establecido en el apartado 2.1.4.4. Para una mejor extracción de aire en las vigas, se utilizó un vibrador, de esta manera solo se requirió colocar una capa de hormigón.



**Figura 37** Moldeo de cilindros y vigas de hormigón simple

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Para las vigas armadas, antes de llenar por completo el molde, se acomodó el armado con el recubrimiento establecido de 4 cm, para esto fue necesario colocar una capa inicial de mezcla que sirva de soporte de la armadura y una vez posicionada se llena completamente y se extrae el aire con vibrador.





**Figura 38** Moldeo de vigas de hormigón armado

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

### 3.4.3. CURADO DE PROBETAS

Una vez fabricados los especímenes, luego de pasadas 24 horas, se desencofran y se los lleva a un cuarto de curado según lo descrito en el apartado 2.1.4.5 del presente trabajo, hasta las edades de ensayo de 28 y 56 días.



**Figura 39** Curado de probetas de hormigón

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

### 3.5. ENSAYOS DE PROBETAS EN EL LABORATORIO

#### 3.5.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

El procedimiento para este ensayo se detalla de acuerdo con la norma ASTM C39.

1. Los cilindros de hormigón deben cumplir con la edad requerida de 28 y 56 días.
2. Se sacan las probetas del agua y se seca el agua superficial con un paño absorbente.
3. Se toman dos medidas de diámetro, verificando que la diferencia entre los diámetros no sea mayor al 2%; y tres medidas de altura de cada cilindro.



**Figura 40** Toma de dimensiones de las probetas de hormigón

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

4. Se pesan las muestras y se registran los datos.
5. Se verifica que las caras del cilindro sean completamente lisas para que toda la superficie esté en contacto con la máquina de compresión; si esto no se cumple es necesario un refrentado.





**Figura 41** Refrentado de las caras de los cilindros

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

6. La máquina de ensayo de compresión debe estar programada a una velocidad de 0.25 MPa/s.
7. El cilindro se coloca dentro de la máquina y se lo ensaya hasta la ruptura.



**Figura 42** Ensayo a compresión de cilindros de hormigón

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

8. Seguidamente, se registra la carga máxima y se define el tipo de falla (Ver Figura 3).
9. Finalmente, se calcula la resistencia a compresión de cada cilindro haciendo uso de la ecuación (3) definida en el apartado 2.1.5.1 del marco teórico.

El informe de los resultados obtenidos de este ensayo se muestra en el Anexo 9 del presente trabajo.

### 3.5.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD

Para obtener el valor de módulo de elasticidad del hormigón, se fabricaron tres probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura para cada dosificación (HS, HCV10, HCV20). Este resultado se calcula mediante el procesamiento de datos de deformaciones obtenidas por medio de extensómetros que son colocados en los cilindros de concreto; y se correlacionan, en ciclos de carga y descarga, con la resistencia lograda a dicha deformación. La norma encargada de detallar el procedimiento para este ensayo es la ASTM C469.

1. Primero se determina el 40% de la resistencia a compresión que alcanza la probeta.
2. Se configura a la máquina de ensayo con los ciclos de carga y descarga con los que llegará a una resistencia del 40% como máximo de la probeta original.
3. Se colocan dos extensómetros a cada lado de la pared del cilindro, se debe verificar que ambos extensómetros se encuentren a la misma altura.



**Figura 43** Colocación de extensómetros en el cilindro de hormigón

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

4. Se conectan los extensómetros a la máquina en los canales correspondientes y se inicia el ensayo.



**Figura 44** Inicio de ensayo para módulo de elasticidad

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

5. Una vez finalizado, se guardan los datos obtenidos y se procesan.
6. El módulo de elasticidad se calcula relacionando los esfuerzos para cada deformación unitaria haciendo uso de la ecuación (4) descrita en el apartado 2.1.5 del marco teórico.

El informe de este ensayo se muestra en los Anexos 10 y 11 del presente trabajo.

### **3.5.3. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**

#### **3.5.3.1. Vigas de hormigón simple**

El ensayo de resistencia a flexión para vigas de hormigón simple se lo realizó en base a la norma ASTM C78 que corresponde al ensayo de vigas cargadas en el tercio de su luz. El procedimiento se detalla a continuación:

1. Se sacan las vigas del tanque de curado y se seca con una toalla el exceso de agua en la superficie.
2. Se toman las dimensiones de la sección transversal y de la longitud libre de la viga.
3. Con un marcador, se señala la distancia de los apoyos y la posición en donde irán las cargas.



**Figura 45** Preparación de la viga antes del ensayo

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

4. Se configura la máquina de ensayo con la longitud del espécimen, la posición de las cargas y la velocidad de carga, esta velocidad debe ser constante y sin impacto que va desde 0.9 a 1.2 MPa/min.



**Figura 46** Configuración de la máquina de ensayo

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

5. Se ensaya la viga hasta la ruptura y una vez obtenida la falla se mide la sección transversal rota, tomándose tres medidas de ancho y tres de altura.



**Figura 47** Ensayo de la probeta y toma de medidas luego de la falla

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

6. Se verifica en qué tercio ocurrió la falla para según eso escoger la ecuación con la que se calculará el módulo de ruptura.



**Figura 48** Verificación de la posición donde ocurre la falla

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

7. Finalmente, se calcula el módulo de ruptura usando la ecuación (7) o (8), según sea el caso.

El informe de este ensayo se encuentra en el Anexo 12 de la presente investigación.

### 3.5.3.2. Vigas de hormigón armado

A diferencia de las probetas de hormigón simple, las vigas de hormigón armado no fallan de manera frágil, gracias a la armadura que lo soporta, es por eso que el ensayo realizado para estas muestras es diferente al descrito en el punto anterior.

Antes de llevar las vigas a ensayo, se realizó un diseño teórico de cuánto va a soportar la sección establecida de 25x25x80, para comparar esos resultados con los obtenidos realmente. El diseño se realizó en base a lo descrito en el apartado 2.1.6.3 del marco teórico del presente trabajo; se detalla a continuación:

### Diseño a flexión de la viga de hormigón armado

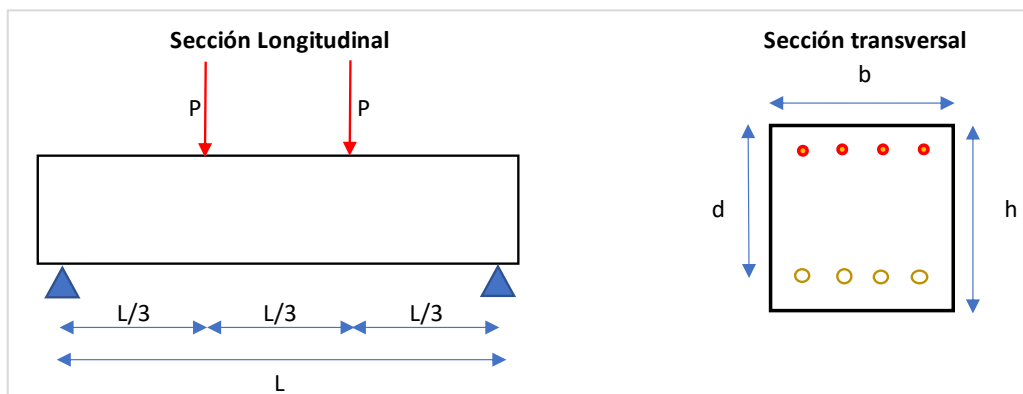
Teniendo los datos de las dimensiones de la sección transversal, el peralte efectivo (se calcula con la ecuación (13), mencionada en el marco teórico), la longitud y las propiedades de los materiales (Ver Tabla 25), se procede a diseñar la viga.

**Tabla 25**

*Datos iniciales necesarios para el diseño a flexión de una viga armada*

$f'_c=$	21	MPa	$b=$	25	cm
$f_y=$	420	MPa	$h=$	25	cm
$\beta_1=$	0.85		$r=$	4	cm
$\rho_b=$	0.021675		$d=$	21	cm
$\phi=$	0.9		$L=$	70	cm

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 49** Sección longitudinal y transversal de la viga armada

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

1. Se calcula el acero mínimo y máximo permitido para la sección establecida, esto se lo hace utilizando las ecuaciones (14), (15) y (16), (17), para el acero mínimo y máximo, respectivamente; obteniendo los siguientes resultados:



**Tabla 26***Resultados del cálculo de acero mínimo y máximo permisible*

<b>Asmín1=</b>	0.45	cm <sup>2</sup>	<b>Asmáx1=</b>	13.13	cm <sup>2</sup>
<b>Asmín2=</b>	1.75	cm <sup>2</sup>	<b>Asmáx2=</b>	8.54	cm <sup>2</sup>
<b>Asmín=</b>	1.75	cm <sup>2</sup>	<b>Asmáx=</b>	8.54	cm <sup>2</sup>

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Como el análisis de las vigas armadas parten de una propuesta inicial en la que ya se dan las dimensiones de la sección, entonces, se debe hacer lo mismo con la armadura de acero, siempre y cuando se cumplan las cantidades permisibles de acero para dicha sección.

- Para obtener el acero que se va a colocar en la viga armada, se toma un valor entre el acero mínimo y máximo calculado para el momento positivo (acero inferior); y para el momento negativo (acero superior) se coloca el acero mínimo. Se toma esta configuración debido a que la condición de apoyo de la viga (simplemente apoyada) hace que se produzcan momentos positivos al aplicar las cargas. El acero mínimo en la parte superior se lo coloca para poder confinar la sección y que esta trabaje como una unidad. El acero colocado y distribución de varillas queda de la siguiente forma:

**Tabla 27***Distribución de varillas de acero en la sección*

<b>ACERO INFERIOR</b>			<b>ACERO SUPERIOR</b>		
<b>Ascal(+)=</b>	4.50	cm <sup>2</sup>	<b>Ascal(-)=</b>	1.75	cm <sup>2</sup>
<b>Ascol(+)=</b>	4.524	cm <sup>2</sup>	<b>Ascol(-)=</b>	2.011	cm <sup>2</sup>
<b>Barras</b>	4φ12		<b>Barras</b>	4φ8	

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

3. Teniendo el área de acero real se puede calcular el momento nominal (ecuación (19)), momento último (ecuación (20)) y la carga que debería soportar la sección de hormigón armado (ecuación (21)). En la Figura 9, se muestra el diagrama de momento producido por las cargas externas aplicadas, quedando los siguientes resultados:

**Tabla 28**

*Resultado de la carga que debería soportar la sección de hormigón armado*

**MOMENTO POSITIVO**

<b>Mn(+)=</b>	3.59	T.m
<b>Mu=φMn=</b>	3.23	T.m
<b>P=</b>	13.84	T

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

El valor de la carga que teóricamente debería soportar la sección de hormigón armado es de 13.84 T. De este valor se partiría para las respectivas comparaciones entre el hormigón estándar y el hormigón con reemplazo de 10% y 20% de ceniza volcánica una vez realizados los ensayos en laboratorio. Este diseño se muestra en el Anexo 13.

**Ensayo a flexión**

A continuación, se muestran los pasos para la ejecución del ensayo a flexión de vigas armadas:

1. Para este ensayo se utilizó la Máquina Universal a la cual se le debe configurar de igual manera la velocidad de carga de 0.9 a 1.2 MPa/min, posición de los apoyos y la posición de las cargas.

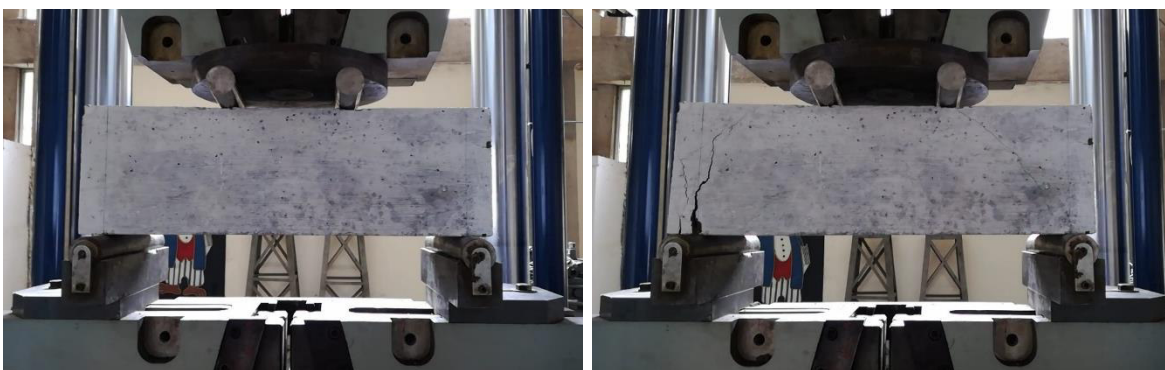




**Figura 50** Máquina Universal

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

2. Se marca, en el cuerpo de la viga, la posición en la que irán los apoyos y las cargas.
3. Debido a que la falla de la viga no es frágil, se optó por pintar las superficies de la probeta de color blanco para poder apreciar de mejor manera las fisuras que se producen durante el ensayo antes de llegar a la falla.
4. Se coloca la viga en la Máquina Universal y se la ensaya hasta la falla.
5. Se toma el valor de carga máxima y se registra.



**Figura 51** Ensayo a flexión de vigas armadas

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

El informe con los resultados de este ensayo se encuentra detalladamente en el Anexo 14.

### 3.5.4. DURABILIDAD

#### 3.5.4.1. Permeabilidad

El ensayo de permeabilidad sirve para obtener la profundidad máxima que el agua logra penetrar en el hormigón endurecido. Este ensayo se basa en las especificaciones dadas por la norma UNE-EN 12390-8. El procedimiento para la ejecución de este ensayo se detalla a continuación:

1. Primero, las probetas cilíndricas, al momento del ensayo, deben tener una edad mínima de 28 días.
2. Se debe raspar la superficie, con la ayuda de un cepillo metálico, en donde se va a colocar la presión de agua.
3. Se arman los aparatos, se conectan los manómetros y se colocan los cilindros para comenzar con el ensayo.
4. Se debe aplicar un flujo de agua con presión constante de  $500 \pm 50$  kPa sobre la cara del cilindro durante un tiempo de  $72 \pm 2$  horas, teniendo cuidado de que el sistema presente fugas o la presión indicada baje.



**Figura 52** Inicio de ensayo de permeabilidad y control de la presión del agua

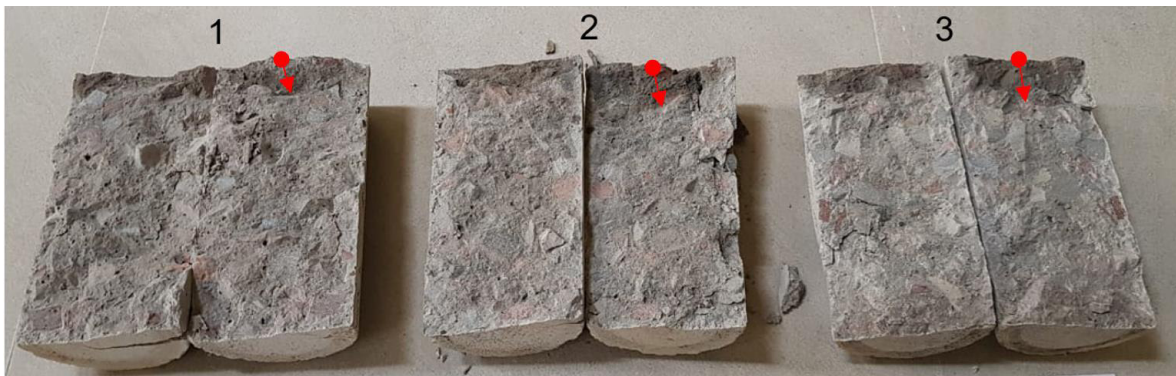
Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

5. Una vez transcurridas las 72 horas, se retira la probeta y se seca el exceso de agua de la superficie.
6. Se parte la probeta en dos, perpendicularmente a la cara en la que se aplicó la presión de agua, y se mide la profundidad máxima de penetración.



**Figura 53** División de la probeta cilíndrica por medio de tracción directa

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 54** Permeabilidad medida en cada probeta

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Este ensayo se realiza en caso de que las probetas hayan resultado porosas, se recomienda un mínimo de 3 probetas. El informe con los resultados se presenta en el Anexo 15.

## **CAPÍTULO 4**

### **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

Para validar la metodología aplicada, es necesario el análisis de los resultados obtenidos en los ensayos tanto para las probetas cilíndricas como para las vigas. La determinación de una relación coherente y óptima entre el porcentaje de ceniza, la resistencia a compresión y flexión, módulo de elasticidad y permeabilidad permitirán corroborar la veracidad de los resultados.

Para cada ensayo, tipo de dosificación y edad de las probetas, se realizó un análisis comparativo para demostrar la diferencia que se produce al reemplazar la ceniza volcánica por el cemento en el comportamiento mecánico del hormigón.

#### **4.1. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

Para obtener resultados de la resistencia a compresión, se elaboraron 3 cilindros para cada diseño de mezcla (HS, HCV10, HCV20). Se calcularon los promedios de las resistencias obtenidas a las edades de 28 y 56 días para compararlas mediante una curva de Edad vs Resistencia.

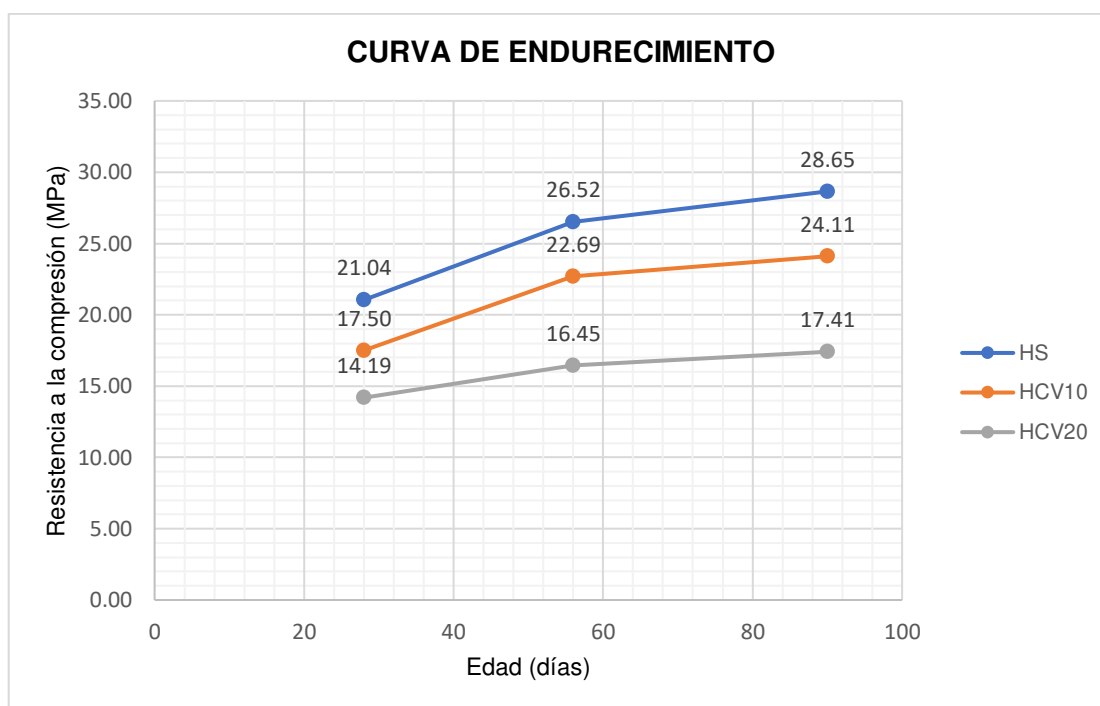
De manera adicional y gracias a un remanente de especímenes cilíndricos, se sometieron estas probetas a un ensayo a compresión a una edad de 90 días, para analizar la posible existencia de un cambio en cuanto a la resistencia del hormigón convencional en comparación con el hormigón que posee ceniza volcánica. Estos resultados, tanto para HS como para HCV10 y HCV20, se muestran en la Tabla 29, junto con la curva de endurecimiento (Figura 55):

**Tabla 29**

*Resistencia a compresión promedio del HS, HCV10, HCV20*

Resistencia de diseño		21 MPa	
Edad	Resistencia a la compresión		
	HS	HCV10	HCV20
Días	MPa	MPa	MPa
28	21.04	17.50	14.19
56	26.52	22.69	16.45
90	28.65	24.11	17.41

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 55** Curvas de endurecimiento del HS, HCV10 y HCV20

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

#### 4.1.1. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROBETAS ESTÁNDAR Y PROBETAS CON CENIZA VOLCÁNICA

Una vez evidenciado el comportamiento del hormigón (HS, HCV10, HCV20) en función del tiempo; para una mejor comprensión, ha sido necesario el cálculo del

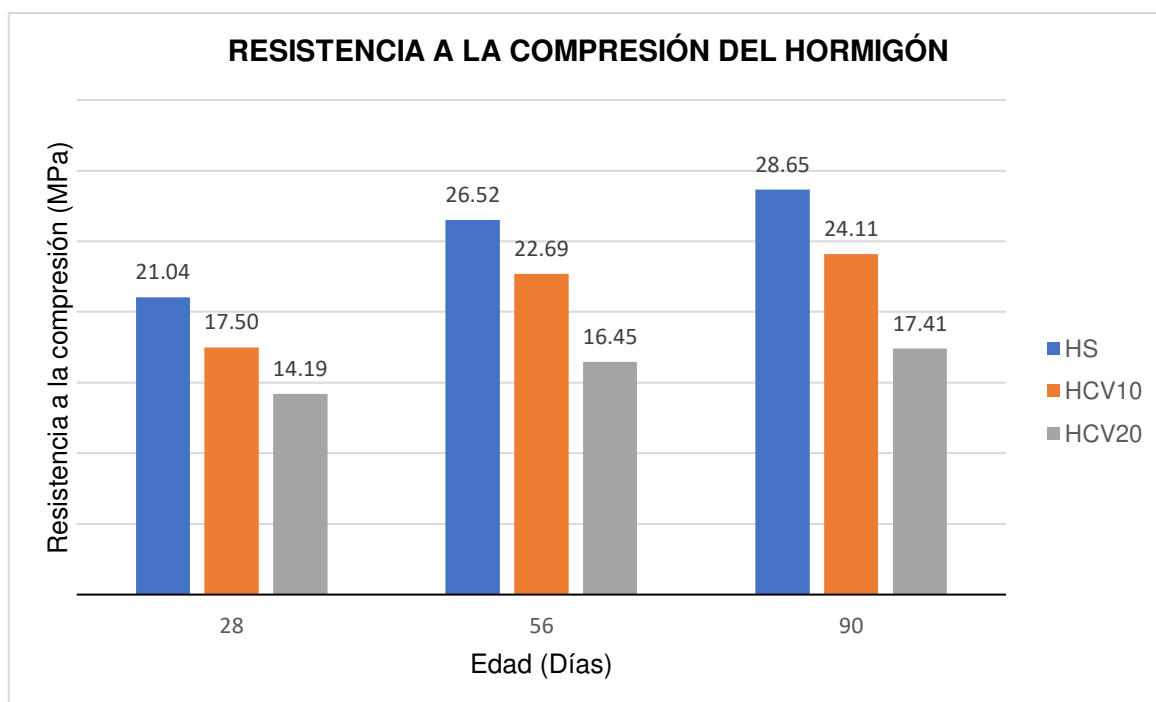
porcentaje de variación de la resistencia a compresión con respecto al hormigón patrón obtenido, teniendo los siguientes resultados:

**Tabla 30**

*Variación en porcentaje de resistencia a compresión de probetas de hormigón*

PORCENTAJE DE VARIACIÓN CON RESPECTO AL HORMIGÓN PATRÓN		
Edad	HCV10	HCV20
	Incremento respecto al HS	Incremento respecto al HS
Días	%	%
28	-16.82	-32.56
56	-14.46	-37.97
90	-15.87	-39.25

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 56** Variación de la resistencia a compresión del hormigón en diferentes edades y porcentajes de reemplazo

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

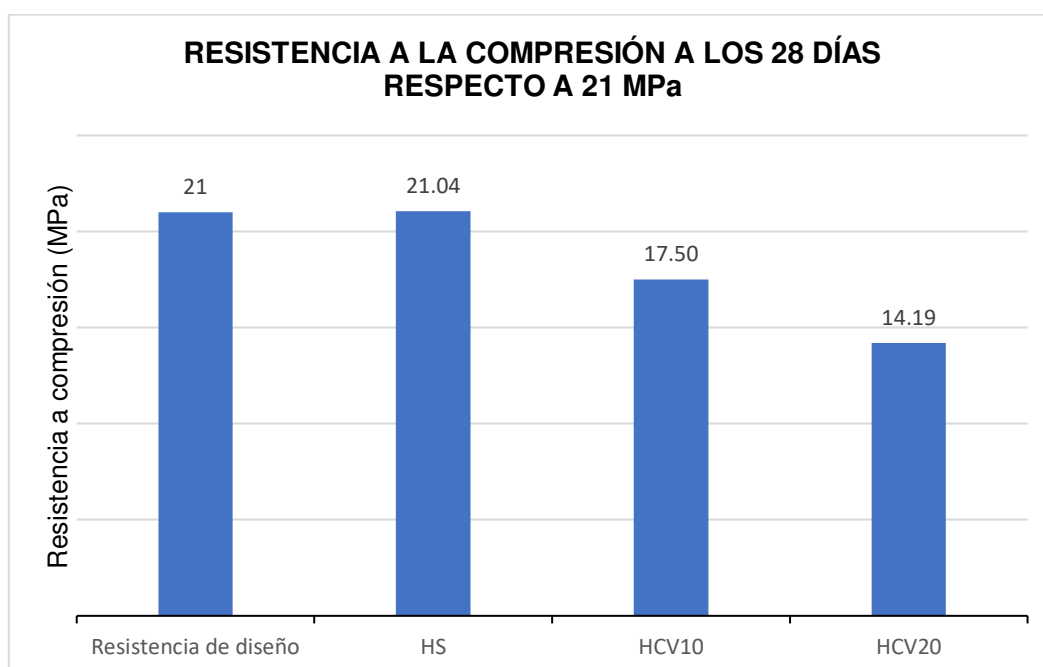
Ahora, tomando en cuenta otro punto de vista para este análisis, se calcula el porcentaje de variación de las probetas analizadas a compresión tanto de HS como de HCV10 y HCV20, con respecto a la resistencia de diseño de 21 MPa, a las edades de 28, 56 y 90 días, teniendo los siguientes resultados:

**Tabla 31**

*Variación en porcentaje de las probetas de HS, HCV10 y HCV20 con respecto a la resistencia de diseño de 21 MPa*

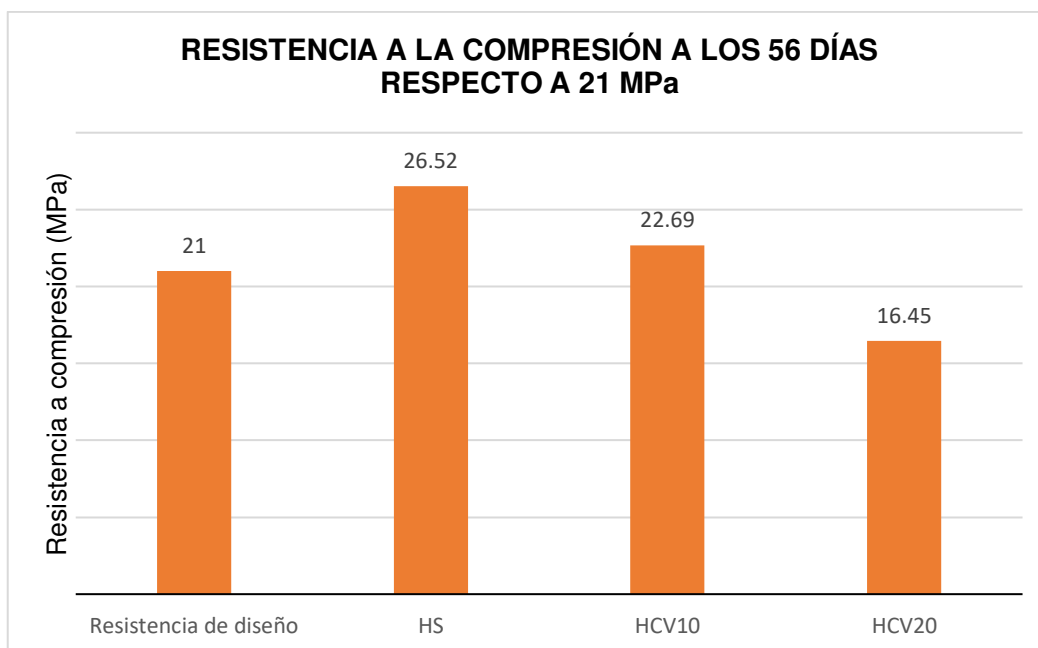
<b>PORCENTAJE DE VARIACIÓN CON RESPECTO A LA RESISTENCIA DE DISEÑO (21MPa)</b>			
<b>Edad</b>	<b>HS</b>	<b>HCV10</b>	<b>HCV20</b>
<b>Días</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
28	0.21	-16.65	-32.43
56	26.31	8.04	-21.65
90	36.45	14.79	-17.10

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



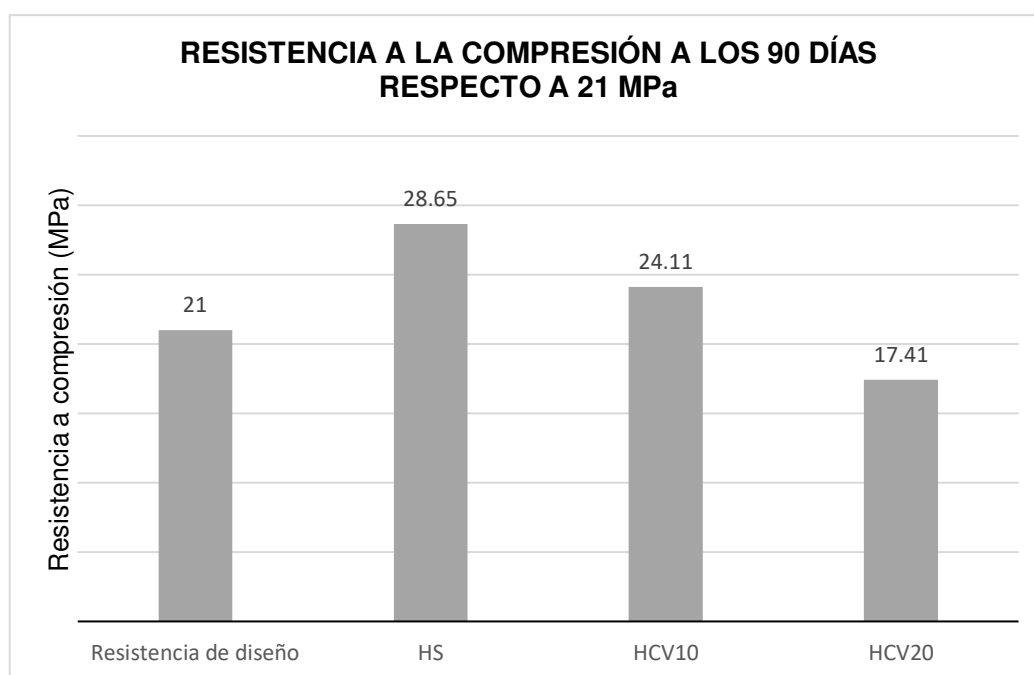
**Figura 57** Resistencia a compresión respecto a la resistencia de diseño a los 28 días

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 58** Resistencia a compresión respecto a la resistencia de diseño a los 56 días

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 59** Resistencia a compresión respecto a la resistencia de diseño a los 90 días

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



#### 4.1.2. CÁLCULO DEL PESO ESPECÍFICO DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

Dentro de la norma ASTM C39 que especifica la metodología para el ensayo a compresión de cilindros de hormigón, se encuentra el procedimiento para el cálculo del peso específico de las probetas. Los hormigones de peso normal tienen una densidad de  $2.4 \text{ T/m}^3$ , el peso específico de los especímenes elaborados se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla 32**

*Peso específico del hormigón estándar y con inclusión de ceniza volcánica*

<b>Peso específico del hormigón</b>	
<b>Probeta</b>	<b>T/m<sup>3</sup></b>
HS	2.3
HCV10	2.28
HCV20	2.24

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

#### 4.2. ENSAYO DE MÓDULO DE ELASTICIDAD

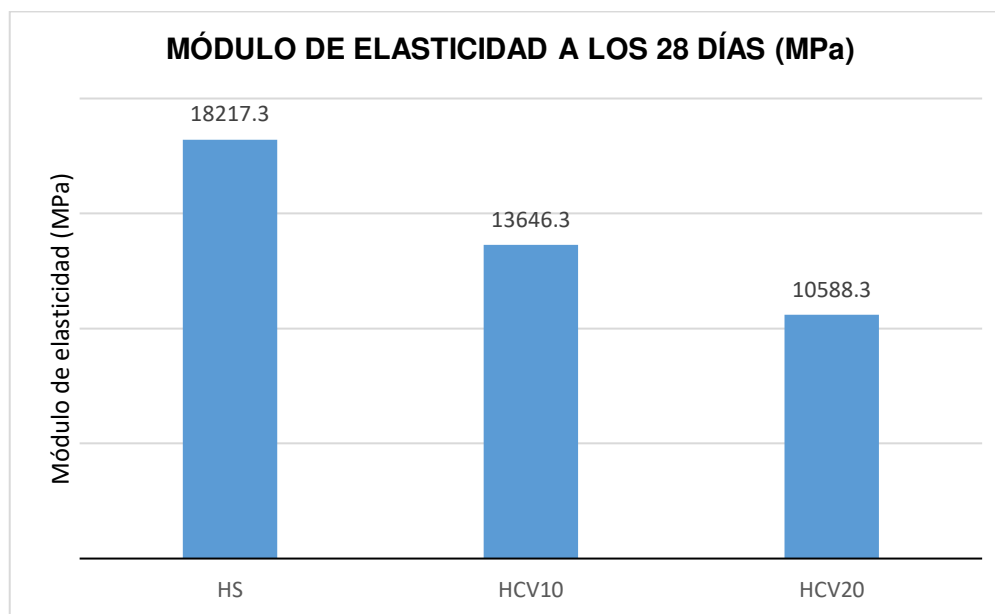
Para el análisis de los módulos de elasticidad, se compararon los valores obtenidos de las probetas de hormigón estándar con las de hormigón con ceniza volcánica, dando a conocer la variación de estos valores a una edad de 28 y 56 días.

Se han realizado gráficas comparativas para constatar que en las muestras con reemplazo de ceniza volcánica se halla un módulo de elasticidad menor que en las elaboradas con hormigón convencional. Estas gráficas junto con las tablas de variación en porcentaje de este parámetro se muestran a continuación:

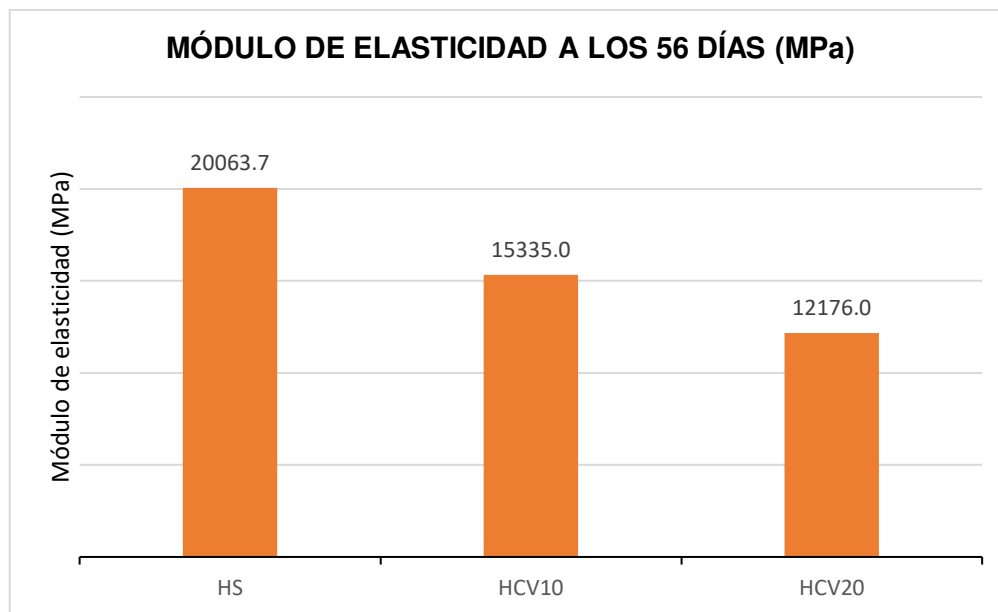
**Tabla 33***Módulos de elasticidad a los 28 y 56 días*

<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD (MPa)</b>			
<b>EDAD</b>	<b>HS</b>	<b>HCV10</b>	<b>HCV20</b>
28	18217.3	13646.3	10588.3
56	20063.7	15335.0	12176.0

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Figura 60** Módulo de elasticidad a los 28 días

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 61** Módulo de elasticidad a los 56 días

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Tabla 34**

*Variación en porcentaje del módulo de elasticidad con respecto al hormigón estándar a los 28 y 56 días*

VARIACIÓN EN % DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD CON RESPECTO AL HORMIGÓN ESTÁNDAR (HS)		
EDAD	HCV10	HCV20
	%	%
28	-25.1	-41.9
56	-23.6	-39.3

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

#### **4.2.1. ANÁLISIS DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD OBTENIDO SEGÚN LA NORMATIVA NEC-15.**

Teóricamente se puede obtener el módulo de elasticidad del hormigón en base a la resistencia a compresión del mismo con la ecuación (6) definida en el capítulo 2 del presente trabajo. Esta fórmula se toma en cuenta también en la norma ACI 318, la cual a sido establecida según los materiales de dicha región. Debido a los agregados en Ecuador no tienen un módulo de elasticidad tan grande se ha hecho

una reducción de los valores de modo que se tenga resultados más acercados a nuestras condiciones, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$E = 3915 * \sqrt{f'c} \quad [MPa] \quad (41)$$

$$E = 12500 * \sqrt{f'c} \quad [kg/cm^2] \quad (42)$$

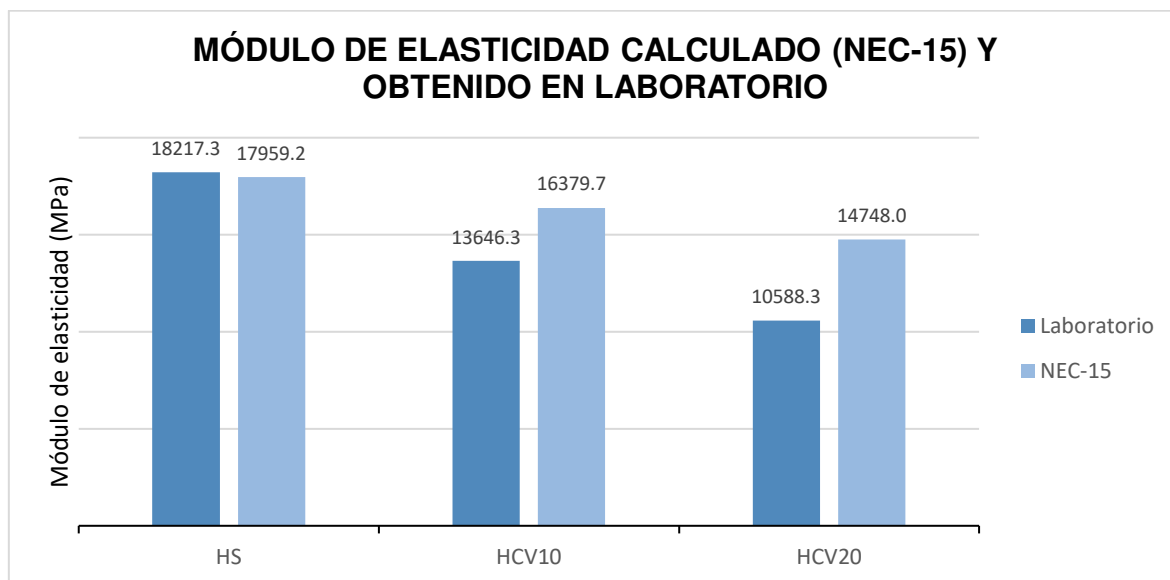
Con esto, se analizarán los valores de módulo de elasticidad calculados en comparación con los valores obtenidos en el ensayo de laboratorio a los 28 y 56 días, quedando de la siguiente manera:

**Tabla 35**

*Módulo de elasticidad según la NEC-15 a los 28 y 56 días*

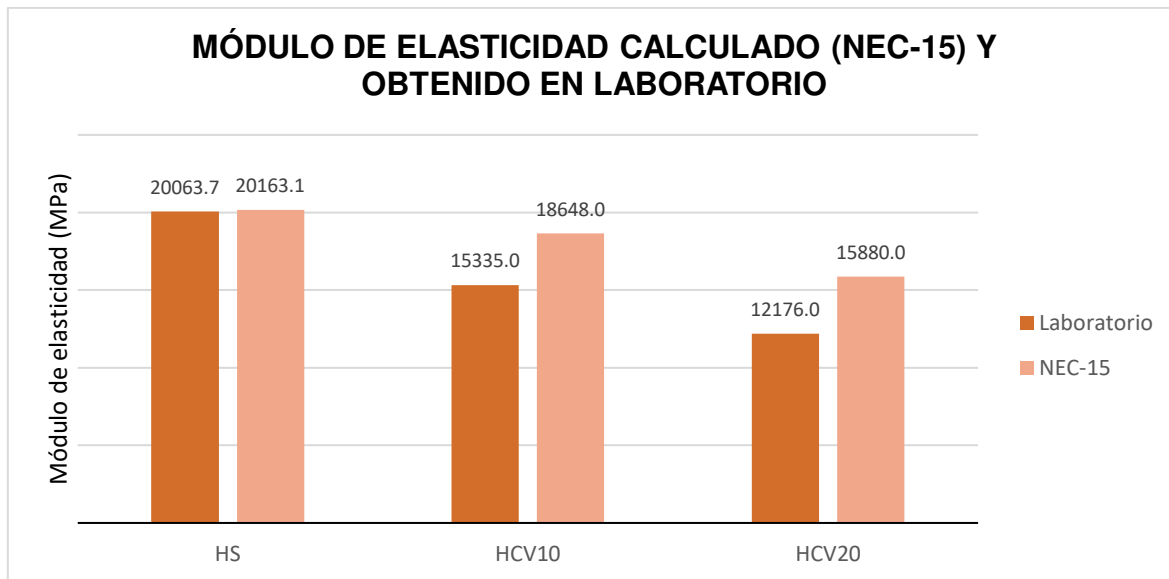
<b>MÓDULO DE ELASTICIDAD SEGÚN LAS ECUACIONES ESTABLECIDAS EN LA NEC 15 (MPa)</b>			
<b>EDAD</b>	<b>HS</b>	<b>HCV10</b>	<b>HCV20</b>
28	17959.2	16379.7	14748.0
56	20163.1	18648.0	15880.0

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 62** Comparación entre los módulos de elasticidad obtenidos en el laboratorio y los módulos calculados según la NEC-15, a los 28 días.

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 63** Comparación entre los módulos de elasticidad obtenidos en el laboratorio y los módulos calculados según la NEC-15, a los 56 días.

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Tabla 36**

*Variación en porcentaje de los valores de módulo de elasticidad calculados, según la NEC-15, con respecto a los obtenidos en el laboratorio*

<b>VARIACIÓN EN PORCENTAJE DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD CALCULADO CON RESPECTO AL OBTENIDO EN EL LABORATORIO</b>			
<b>EDAD</b>	<b>HS</b>	<b>HCV10</b>	<b>HCV20</b>
	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
28	-1.42	20.03	39.29
56	0.50	21.60	30.42

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

### **4.3. ENSAYO DE RESISTENCIA A LA FLEXIÓN**

#### **4.3.1. VIGAS DE HORMIGÓN SIMPLE**

La metodología con la que se obtuvieron los resultados de la resistencia a la flexión simple de vigas, se describió detalladamente en el apartado 3.5.3.1 del capítulo anterior. Se calculó un promedio de los valores de resistencia a tensión obtenidos para cada viga a una edad de 28 y 56 días, para cada diseño de mezcla

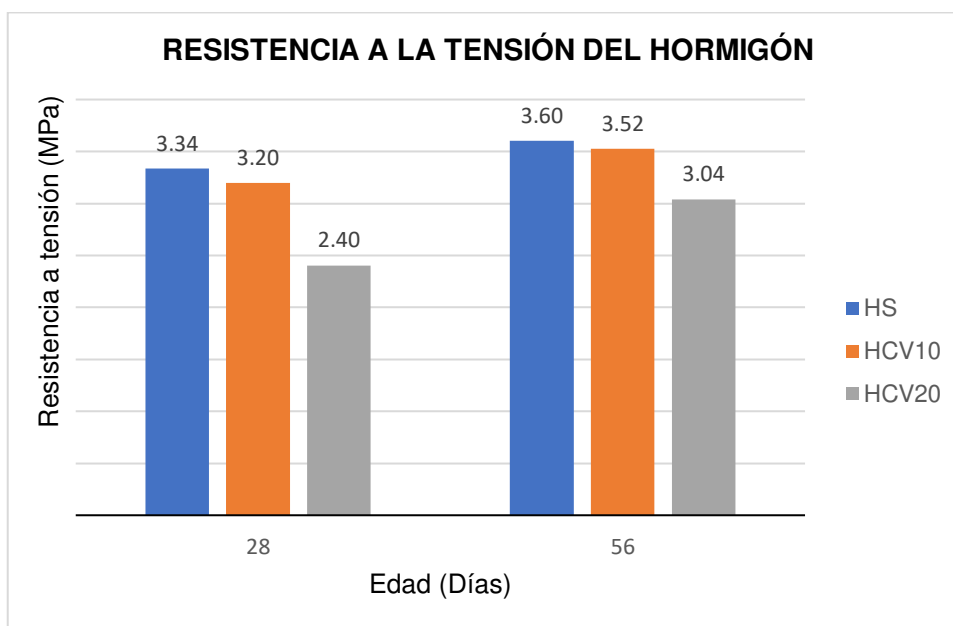
(HS, HCV10, HCV20), se ha resumido de igual manera estos valores dentro de una tabla y un gráfico de barras que muestran el comportamiento del hormigón dentro de este ensayo.

**Tabla 37**

*Resistencia a la tensión promedio para HS, HCV10 y HCV20*

RESUMEN			
Edad	Resistencia a la tensión		
	HS	HCV10	HCV20
Días	MPa	MPa	MPa
28	3.34	3.20	2.40
56	3.60	3.52	3.04

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 64** Variación de la resistencia a tensión del hormigón en diferentes edades y porcentajes de reemplazo

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Tabla 38**

*Variación en porcentaje de la resistencia a tensión de probetas de hormigón*

<b>VARIACIÓN EN PORCENTAJE CON RESPECTO AL HS</b>		
<b>Edad</b>	<b>Resistencia a la flexión</b>	
	<b>HCV10</b>	<b>HCV20</b>
<b>Días</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
28	-4.14	-27.96
56	-2.19	-15.68

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

A diferencia de los resultados obtenidos en la resistencia a compresión, los porcentajes de variación para tensión con respecto al hormigón convencional, son menores y se puede observar que el hormigón con 10% de ceniza volcánica (HCV10) tiene un valor de resistencia muy cercano al hormigón estándar (HS) especialmente a la edad de 56 días.

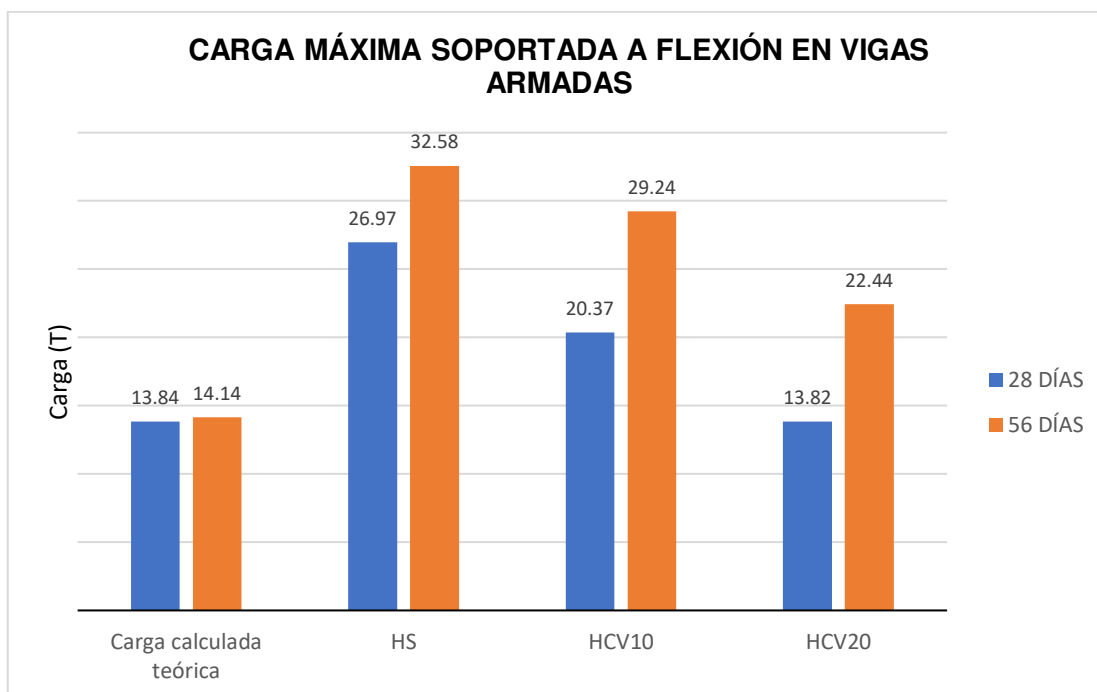
#### **4.3.2. VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO**

Para el caso de flexión en vigas armadas, no se obtuvo un módulo de ruptura como tal, debido a que el comportamiento de estas probetas es diferente por la inclusión de las varillas de refuerzo. La falla de estas vigas es dúctil, por lo cual, para el análisis comparativo se ha realizado un diseño teórico para determinar la carga máxima que debería soportar la sección una vez ensayada. La metodología de diseño se detalla en el apartado 3.5.3.2 en el cual se muestra un ejemplo de cálculo de una viga armada con hormigón de 21 MPa, sin embargo, los resultados reales de la resistencia a compresión del hormigón estándar a las edades de 28 y 56 días se encuentran en la Tabla 29 y con estos se calcula la carga máxima que soporta realmente.

**Tabla 39***Resultados obtenidos del ensayo a flexión de vigas armadas*

Ensayo a flexión de vigas armadas				
Edad	Carga calculada teórica	Carga máxima obtenida en laboratorio		
		HS	HCV10	HCV20
Días	T	T	T	T
28	13.84	26.97	20.37	13.82
56	14.14	32.58	29.24	22.44

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Figura 65** Carga máxima soportada a flexión en vigas

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Tabla 40**

*Variación en porcentaje de las cargas obtenidas en laboratorio con respecto a la carga teórica*

<b>VARIACIÓN EN PORCENTAJE CON RESPECTO A LA CARGA CALCULADA TEÓRICA</b>			
<b>Edad</b>	<b>Resistencia a la flexión</b>		
	<b>HS</b>	<b>HCV10</b>	<b>HCV20</b>
<b>Días</b>	<b>%</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
28	94.86	47.18	-0.14
56	130.38	106.79	58.67

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

El porcentaje de variación con respecto a la carga teórica calculada tiene un incremento de casi el doble, esto se debe a que las ecuaciones de diseño tienen factores de reducción de resistencia que toman en cuenta todos los inconvenientes que se pueden tener con los materiales o el procedimiento al momento de fabricar el elemento estructural.

Por otro lado, teniendo los datos reales de la carga máxima que soportan las vigas armadas de hormigón estándar (HS), se calcula la variación en porcentaje que presentan las probetas elaboradas con ceniza volcánica respecto al HS.

**Tabla 41**

*Variación en porcentaje de la carga soportada por vigas con ceniza volcánica (HCV10 y HCV20) con respecto a vigas con HS*

<b>VARIACIÓN EN % DE LA CARGA SOPORTADA POR VIGAS CON HCV10 Y HCV20 RESPECTO A HS</b>		
<b>Edad</b>	<b>Resistencia a la flexión</b>	
	<b>HCV10</b>	<b>HCV20</b>
<b>Días</b>	<b>%</b>	<b>%</b>
28	-24.47	-48.75
56	-10.24	-31.12

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

#### 4.3.2.1. Análisis del momento de agrietamiento en vigas armadas

Con la ecuación (10), descrita en el capítulo 2 apartado 2.6.2.1, se calcula el momento de agrietamiento en los especímenes de vigas elaborados con hormigón armado. Estos valores se analizan para una edad de 28 y 56 días según los diferentes porcentajes de reemplazo de ceniza volcánica. Se muestra una tabla resumen con los resultados y su respectivo gráfico comparativo.

Todas las vigas analizadas tienen la misma sección transversal y la misma configuración de armado. Para el esfuerzo máximo de tensión o módulo de ruptura ( $f_r$ ) del hormigón se utilizan los datos ya obtenidos, mostrados en la Tabla 37 del presente capítulo.

**Tabla 42**

*Dimensiones de la sección transversal de las vigas armadas*

Propiedades geométricas		
<b>b</b>	250	mm
<b>h</b>	250	mm
<b>I<sub>g</sub></b>	325520833	mm <sup>4</sup>
<b>Y<sub>t</sub></b>	125	mm

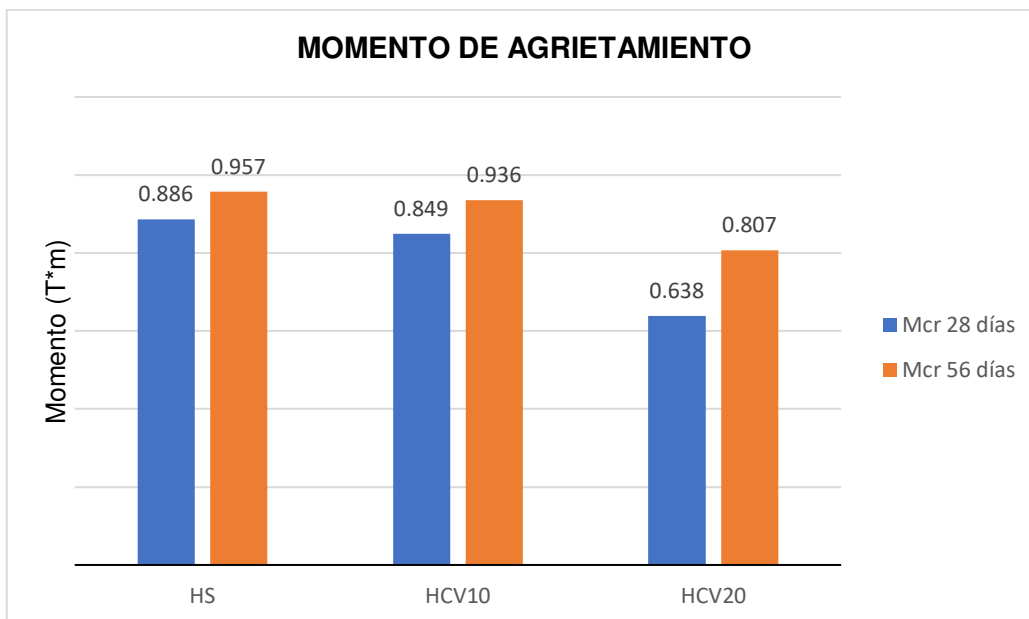
Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Tabla 43**

*Valores de momento de agrietamiento para una edad de 28 y 56 días en los diferentes porcentajes de reemplazo*

Edad	Momento de agrietamiento (Mcr)		
	HS	HCV10	HCV20
Días	T*m	T*m	T*m
28	0.886	0.849	0.638
56	0.957	0.936	0.807

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 66** Momento de agrietamiento de las vigas a los 28 y 56 días

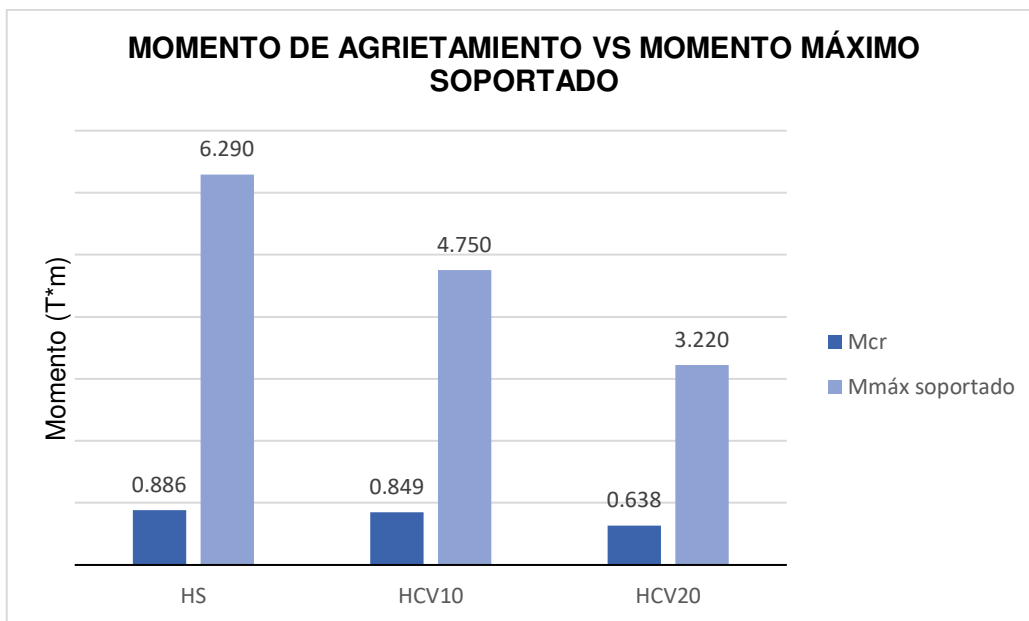
Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Tabla 44**

*Momento máximo soportado por la viga hasta su colapso*

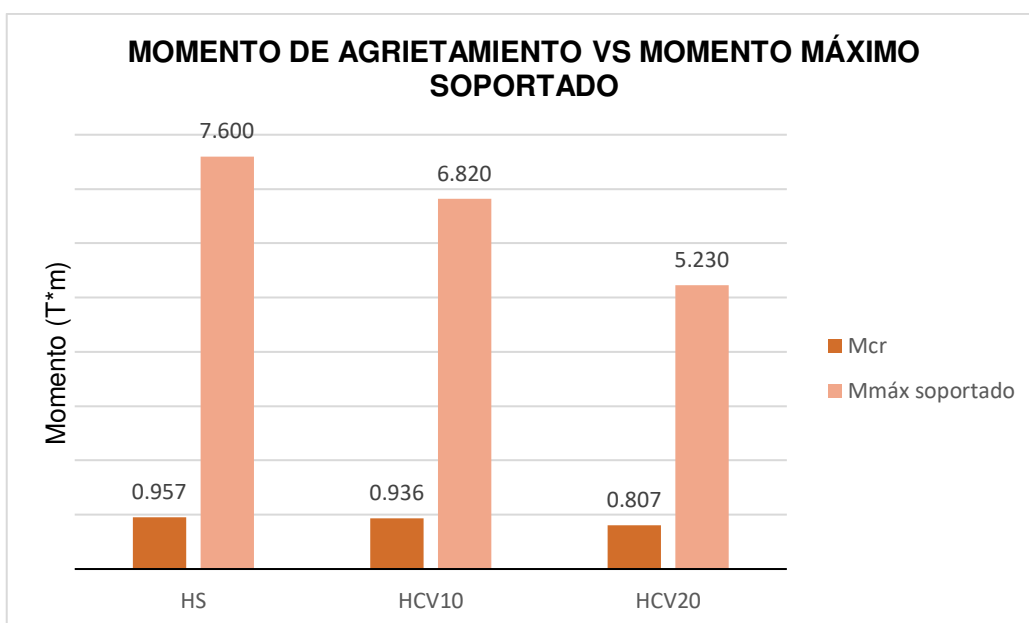
Edad	Momento calculado con la carga máxima resistida por la viga		
	HS	HCV10	HCV20
Días	T*m	T*m	T*m
28	6.290	4.750	3.220
56	7.600	6.820	5.230

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 67** Momento de agrietamiento vs Momento máximo soportado por las vigas de HS, HCV10 y HCV20 a los 28 días

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 68** Momento de agrietamiento vs Momento máximo soportado por las vigas de HS, HCV10 y HCV20 a los 56 días

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Tabla 45**

*Porcentaje de momento de agrietamiento con respecto al momento máximo que soporta la viga*

<b>Edad</b>	<b>%Mcr con respecto al momento máximo que soporta la viga</b>		
<b>Días</b>	<b>HS</b>	<b>HCV10</b>	<b>HCV20</b>
28	14.1%	17.9%	19.8%
56	12.6%	13.7%	15.4%

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

En la Tabla 45 se calculó el porcentaje de momento de agrietamiento con respecto al momento máximo que soporta la viga y se puede observar que a los 28 y 56 días este momento máximo es mayor al momento de agrietamiento en un 80% aproximadamente, tanto para el HS como para el HCV10 y HCV20.

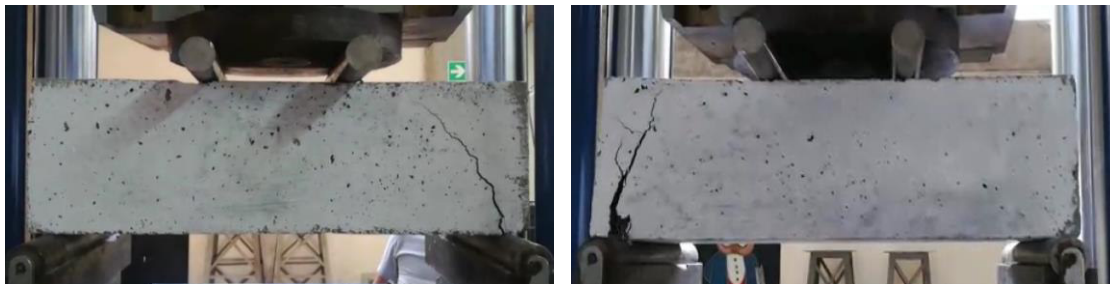
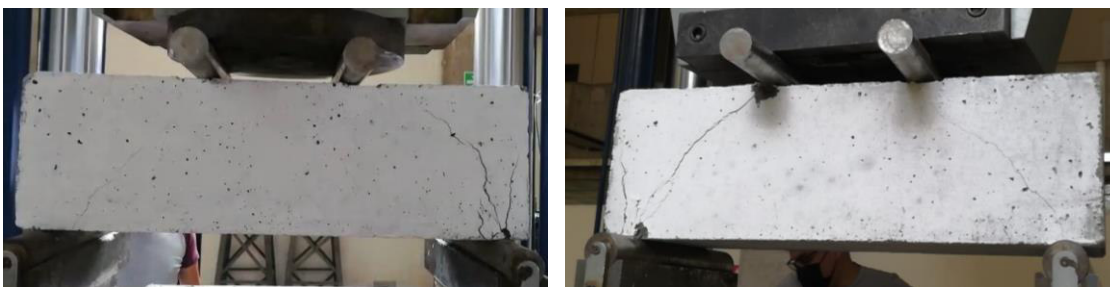
#### **4.3.2.2. Fallas presentadas en los ensayos de flexión de vigas armadas**

En la siguiente tabla se muestran las fallas que presentaron las vigas de hormigón armado al ser sometidas a flexión; se puede comprobar que para todos los tipos de especímenes (HS, HCV10 y HCV20) las fallas al momento del colapso son similares.

**Tabla 46**

*Tipos de fallas presentadas en vigas de hormigón armado*



**FALLAS PRESENTADAS EN LAS VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO (HCV10)**

**FALLAS PRESENTADAS EN LAS VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO (HCV20)**


Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

#### 4.4. ENSAYO DE PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN

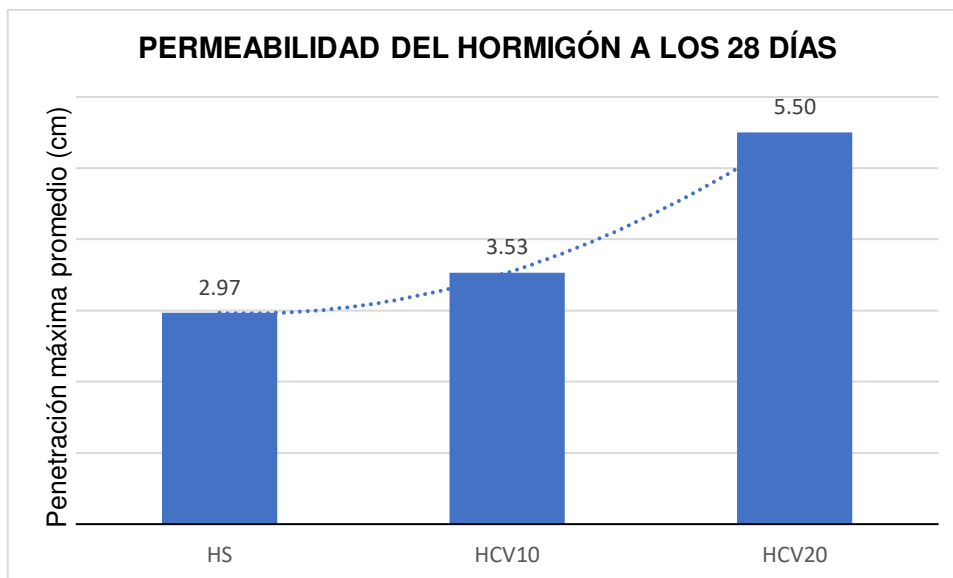
La permeabilidad toma importancia en este estudio debido a que se observó la presencia de poros en las probetas con inclusión de ceniza volcánica y esto puede hacer que el hormigón sea susceptible a la penetración del agua. Los resultados muestran que, a mayor porcentaje de ceniza, mayor es la penetración del agua y que los cilindros de hormigón convencional presentaron menor permeabilidad.

**Tabla 47**

*Penetración de agua en cilindros de hormigón a los 28 días*

PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN A LOS 28 DÍAS				
PROBETAS	PENETRACIÓN MÁXIMA DE AGUA (cm)			PROMEDIO (cm)
	HS	2.4	3.3	
HCV10	3.6	3.5	3.5	3.53
HCV20	6.2	4.5	5.8	5.50

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 69** Penetración de agua promedio a los 28 días

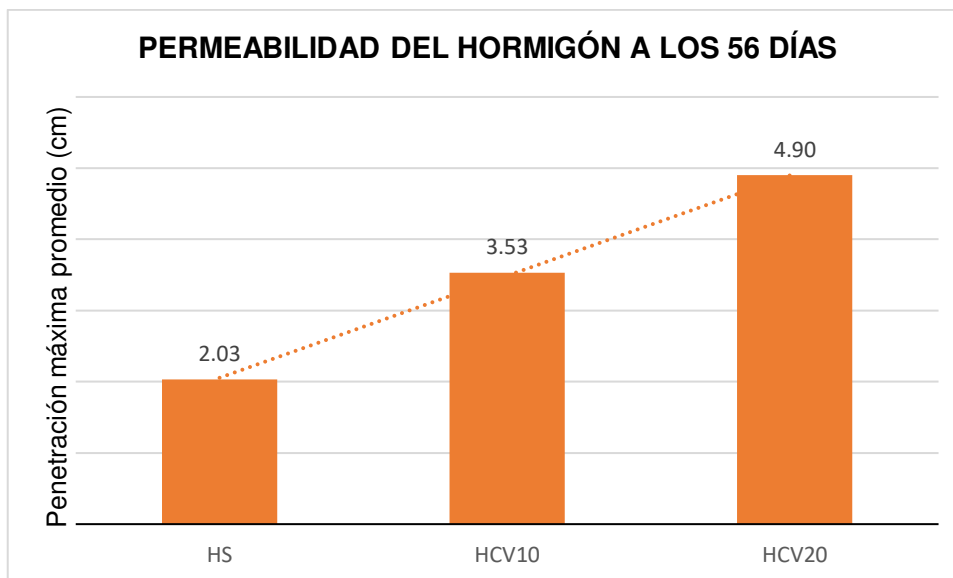
Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Tabla 48**

*Penetración de agua en cilindros de hormigón a los 56 días*

<b>PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN A LOS 56 DÍAS</b>				
<b>PROBETAS</b>	<b>PENETRACIÓN MÁXIMA DE AGUA (cm)</b>			<b>PROMEDIO (cm)</b>
HS	2.1	1.9	2.1	2.03
HCV10	4.0	3.3	3.3	3.53
HCV20	4.6	5.1	5.0	4.90

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Figura 70** Penetración de agua promedio a los 56 días

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

#### 4.5. ANÁLISIS ECONÓMICO DE LAS MEZCLAS DE HORMIGÓN

Para obtener el costo de la materia prima para la elaboración de hormigón, se tomaron los precios del mercado actual; estos valores pueden variar dependiendo del volumen que se vaya a fabricar, ya que existe un descuento cuando se trata de la adquisición de los componentes en grandes cantidades, para obras mayores.

**Tabla 49**

*Costo de la materia prima para la elaboración de hormigón convencional para 1m<sup>3</sup>*

<b>PRESUPUESTO HORMIGÓN ESTÁNDAR (1 m<sup>3</sup>)</b>				
<b>Componentes</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
Cemento	379.5	Kg	0.16	61.86
Agua	0.228	m <sup>3</sup>	0.74	0.17
Arena	861.48	Kg	0.03	22.18
Ripio	830.78	Kg	0.02	18.07
<b>TOTAL</b>				<b>102.28</b>

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)



**Tabla 50**

*Costo de la materia prima para la elaboración de hormigón con 10% de reemplazo de ceniza volcánica para 1m<sup>3</sup>*

<b>PRESUPUESTO HORMIGÓN CON CENIZA VOLCÁNICA 10%</b> (1 m <sup>3</sup> )				
<b>Componentes</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
Cemento	341.55	Kg	0.16	55.67
Agua	0.228	m <sup>3</sup>	0.74	0.17
Arena	861.48	Kg	0.03	22.18
Ripio	830.78	Kg	0.02	18.07
<b>TOTAL</b>				<b>96.09</b>

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

**Tabla 51**

*Costo de la materia prima para la elaboración de hormigón con 20% de reemplazo de ceniza volcánica para 1m<sup>3</sup>*

<b>PRESUPUESTO HORMIGÓN CON CENIZA VOLCÁNICA 20%</b> (1 m <sup>3</sup> )				
<b>Componentes</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio Unitario</b>	<b>Precio Total</b>
Cemento	303.6	Kg	0.16	49.49
Agua	0.228	m <sup>3</sup>	0.74	0.17
Arena	861.48	Kg	0.03	22.18
Ripio	830.78	Kg	0.02	18.07
<b>TOTAL</b>				<b>89.91</b>

Elaborado por: (Huertas y Miniguano, 2021)

Estos precios no toman en cuenta la mano de obra necesaria para la extracción y procesamiento de la ceniza, además del transporte; por eso esta idea de reemplazo sería factible para zonas aledañas a las principales acumulaciones de ceniza.

Económicamente el hormigón con ceniza extraída del volcán Cotopaxi (depósito San Felipe) es viable, sin embargo, se debe tomar en cuenta que estas mezclas de hormigón alcanzan la resistencia de diseño en un tiempo prolongado. La dosificación con el 10% de sustitución de ceniza volcánica alcanza la resistencia de

diseño a una edad de 56 días; por otra parte, el reemplazo del 20% de cemento por ceniza hace que el hormigón tenga una resistencia menor a los 21 MPa incluso a los 90 días de análisis.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. CONCLUSIONES

- Aplicando la metodología de la norma ACI 211.1, para el diseño de mezcla del hormigón estándar, se logró la resistencia de 21 MPa a la edad de 28 días como se establece en dicha normativa, considerando esta edad como punto de inicio para este estudio.
- Dentro del ensayo de consistencia del hormigón fresco se puede concluir que el hormigón con ceniza absorbe mayor cantidad de agua que el hormigón convencional, esto produce que haya un menor asentamiento de la mezcla de hormigón teniendo: 10 cm para HS, 7.5 cm para HCV10 y 6.5 cm para HCV20.
- De los ensayos a compresión simple, se identificó que las probetas de hormigón con reemplazo de ceniza volcánica (HCV10 y HCV20) tienen una curva de endurecimiento que se encuentra por debajo de las probetas de hormigón estándar (HS) analizadas a los 28, 56 y 90 días. Con esto se concluye que la resistencia a compresión del hormigón disminuye a medida que se aumenta el porcentaje de reemplazo de la ceniza volcánica proveniente del volcán Cotopaxi (sector San Felipe).
- Tomando como referencia la resistencia de diseño ( $f'_c=21$  MPa), se evidencia que a la edad de 28 días únicamente las probetas de HS llegan a dicho valor, sin embargo, los cilindros con HCV10 llegan e incluso sobrepasan en un 8.04% a la resistencia diseño a los 56 días; y a los 90 días sobrepasa la resistencia en un 14.79%.
- Por otro lado, las muestras elaboradas con HCV20 no llegan a la resistencia de diseño a ninguna edad analizada (28, 56 y 90 días). Por lo tanto, no es muy viable utilizar este porcentaje de reemplazo dentro del hormigón utilizado para elementos estructurales.
- Al ser el módulo de elasticidad un factor que depende de la resistencia a compresión del hormigón, los valores resultantes de la ejecución de este ensayo, para hormigones con ceniza volcánica HCV10 y HCV20 son

menores en comparación con el HS. Por tanto, se cumple que a menor resistencia a compresión menor va a ser el módulo de elasticidad del hormigón.

- Los porcentajes de variación del HCV10 y HCV20 respecto al HS de la resistencia a compresión son de -16.82% y -32.56% a la edad de 28 días; -14.46% y -37.97% a la edad de 56 días, respectivamente. Por otro lado, los porcentajes de variación del módulo de elasticidad corresponden a -25.1% y -41.9% a la edad de 28 días; -23.6% y -39.3% a la edad de 56 días, respectivamente. Los porcentajes tanto para compresión como para módulo de elasticidad se pueden considerar similares, verificando de esta manera lo descrito en el punto anterior.
- Para el análisis del módulo de elasticidad obtenido en los ensayos de laboratorio con respecto al calculado con las fórmulas establecidas en la NEC-15; se puede concluir que para el HS los valores de estos módulos de elasticidad son muy similares, teniendo una variación en porcentaje de menos del 1.5%. Sin embargo, para el HCV10 y HCV20, el valor de módulo de elasticidad calculado es mayor al obtenido dentro del laboratorio lo que significa que la ceniza volcánica reduce el módulo de elasticidad del hormigón. A mayor porcentaje de reemplazo de ceniza, mayor es la reducción del valor de módulo de elasticidad.
- Los resultados del ensayo a flexión de vigas de hormigón sin armado, reflejaron que las muestras elaboradas de HS obtuvieron un mayor valor de módulo de ruptura que las vigas de HCV10 y HCV20. Sin embargo, para un porcentaje del 10% de reemplazo de ceniza por cemento se puede notar que la variación con respecto al HS no es muy grande y disminuye aún más a la edad de 56 días.
- Los porcentajes de variación del HCV10 y HCV20 respecto al HS de la resistencia a tensión de vigas sin armado son de -4.14% y -27.96% a los 28 días; -2.19% y -15.68% a los 56 días, respectivamente. Con esto se logra evidenciar que para la flexión el comportamiento de las vigas con HCV10 es mejor y no difiere en gran porcentaje con el HS.
- Para el caso de la flexión en vigas armadas se obtuvieron dos casos: el primero corresponde a la comparación de la carga máxima calculada

teóricamente con los resultados reales de laboratorio. La carga máxima teórica es de 13.84T y 14.14T para 28 y 56 días, respectivamente. Los porcentajes de variación, con respecto a esta carga, para HS, HCV10 y HCV20 son de 94.86%, 47.18% y -0.14% para 28 días, respectivamente; 130.38%, 106.79% y 58.67% para 56 días, respectivamente. Se concluye que para todos los casos la carga máxima soportada es mayor a la carga teórica calculada, recalcado que el HS tiene el mayor porcentaje de incremento.

- Para el segundo caso se hizo la comparación entre la carga soportada por las vigas elaboradas con HCV10 y HCV20 respecto a las de HS, teniendo como resultado que las vigas armadas elaboradas de hormigón convencional resisten más carga a flexión que las que tienen inclusión de ceniza volcánica.
- Con respecto al momento de agrietamiento de los especímenes de vigas armadas, se pudo observar que tanto para HS como para HCV10 los valores de momento resultante son prácticamente iguales estando entre 0.88 y 0.95 T\*m a los 28 y 56 días, respectivamente. Para el HCV20 el momento de agrietamiento baja a 0.63 y 0.81 T\*m a los 28 y 56 días, respectivamente.
- Se concluye que el momento de agrietamiento del HCV10 con respecto al HS no se ve afectado de manera significativa, sin embargo, para el HCV20 el momento de agrietamiento es menor, tanto para 28 como 56 días. A mayor reemplazo de cemento menor es el momento de agrietamiento y el momento máximo que soporta la viga.
- Referente a las fallas dadas en las vigas armadas, se pudo ver que todas fallaron a corte, produciéndose una grieta que iba desde el apoyo hasta el punto de aplicación de la carga aproximadamente, esto ocurrió debido a que no se colocó un refuerzo para cortante.
- En cuanto al análisis de la permeabilidad del hormigón se concluye que las probetas de HS tienen menor tendencia a ser penetradas por el agua en comparación con las de HCV10 y HCV20. A mayor porcentaje de reemplazo de ceniza volcánica mayor es la longitud de penetración de agua.
- Se puede relacionar también la permeabilidad del hormigón con su resistencia a compresión ya que, comparando la penetración del hormigón a

los 28 y 56 días, se evidencia que a mayor edad se tiene menor longitud de penetración debido a que la resistencia a compresión aumenta con la edad. Se tendría una relación inversamente proporcional, a mayor resistencia menor permeabilidad del hormigón.

- En los trabajos de investigación descritos en el estado del arte del capítulo 2 se menciona a la permeabilidad; y algunos autores señalan que mientras el tamaño del grano de ceniza sea más pequeño en comparación con el cemento, entonces menor va a ser la permeabilidad del hormigón. Según los resultados obtenidos en este estudio y a pesar de haberse utilizado una fracción fina de ceniza (pasa el Tamiz N°200), las probetas que tuvieron una menor penetración de agua fueron las elaboradas con hormigón convencional (HS).
- El peso específico de las muestras de hormigón con ceniza volcánica se encuentra en un rango de 2.24 T/m<sup>3</sup> a 2.30 T/m<sup>3</sup>; por lo tanto, se concluye que la ceniza no influye en la densidad del hormigón, lo cual permite categorizarlas como hormigones de peso normal.
- Dentro del análisis económico realizado, se puede ver que el hormigón con ceniza volcánica es más barato que el hormigón convencional y al ser una puzolana natural no necesita de procesos industriales costosos para su procesamiento, teniendo de esta manera una reducción de los costos de materia prima para la fabricación de concreto.
- Si se desea implementar el uso de esta ceniza volcánica dentro del hormigón, el porcentaje de reemplazo recomendado es el de 10%, ya que esta mezcla fue la que tuvo un mejor comportamiento mecánico en todos los ensayos realizados.
- Se podría utilizar el HCV10 para la construcción de elementos estructurales (losas, cadenas, zapatas, y vigas) de viviendas pequeñas de hasta 2 pisos. Teniendo en cuenta, por la permeabilidad presentada en este hormigón que, para elementos expuestos a la intemperie o humedad excesiva, el recubrimiento debe ser mayor a 4 cm (dependiendo del elemento estructural que se vaya a elaborar), para evitar que el agua entre en contacto con el acero y se produzca la corrosión del mismo.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Se debe realizar la caracterización de materiales, dosificación, curado y ensayo de probetas según las normas establecidas para obtener resultados válidos y fiables.
- Al tener diferentes tipos de dosificaciones, se debe procurar que antes de cada mezcla, la concretera se encuentre completamente limpia y humedecida para evitar la alteración de cada dosificación y la pérdida de agua por absorción, respectivamente.
- Se recomienda realizar ensayos químicos como por ejemplo difracción por rayos X, a la ceniza utilizada para saber de manera más profunda los componentes que posee y en qué porcentaje, confirmando así, si la ceniza puede o no contribuir con el desarrollo y mejoramiento de la resistencia del hormigón.
- Se recomienda realizar este estudio utilizando una ceniza volcánica y fracción de partícula diferentes, para verificar si esos cambios producen un mejor comportamiento en las propiedades mecánicas, para el uso en elementos estructurales.
- Se sugiere ensayar la resistencia mecánica del hormigón con ceniza volcánica al cabo de más tiempo, se propone 200 días, teniendo en cuenta que la ceniza trabaja a largo plazo; esto puede ayudar a obtener mejores resultados.
- Se aconseja amplificar esta investigación incluyendo el diseño a corte, ya que como se sabe, dentro de la construcción sismorresistente, el corte es una de las fallas más importantes y peligrosas que pueden ocurrir en una estructura al momento de un evento sísmico.
- Además de vigas, se debería analizar el comportamiento del hormigón con ceniza volcánica dentro de otros elementos estructurales o a su vez en un sistema estructural como serían los pórticos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACI 211.1. (2002). Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete Reported by ACI Committee, 1-38.*
- ACI 318. (2019). Requisitos de Reglamento para Hormigón Estructural. Farmington Hills: American Concrete Institute.*
- Apaza, D. (2018). DURABILIDAD DEL CONCRETO ELABORADO EN BASE A LA CENIZA DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZUCAR (CBCA) CON CEMENTO PORTLAND, ANTE AGENTES AGRESIVOS. Perú: Universidad Nacional Federico Villareal.*
- ASTM C127. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. Pennsylvania: ASTM International.*
- ASTM C128. (2015). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. Pennsylvania: ASTM International.*
- ASTM C131. (2020). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. Pennsylvania: ASTM International.*
- ASTM C136. (2019). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. Pennsylvania: ASTM International.*
- ASTM C188. (2014). Standart Test Method For Density Of Hydraulic Cement. Pennsylvania: ASTM International.*
- ASTM C192. (2018). Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory. Pennsylvania: ASTM International.*
- ASTM C29. (2017). Standard Test Method for Bulk Density ("Unit Weight") and Voids in Aggregate. Pennsylvania: ASTM International.*
- ASTM C31. (2021). Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field. Pennsylvania: ASTM International.*



- ASTM C33. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. Pennsylvania: ASTM International.
- ASTM C39. (2020). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. Pennsylvania: ASTM International.
- ASTM C40. (2020). *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*. Pennsylvania: ASTM International.
- ASTM C469. (2014). *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*. Pennsylvania: ASTM International.
- ASTM C566. (2004). *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*. Pennsylvania: ASTM International.
- ASTM C78. (2018). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. Pennsylvania: ASTM International.  
<https://es.scribd.com/document/426461328/ASTM-C78-Flexural-Strength-of-Concrete>
- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (2010). *MECÁNICA DE MATERIALES (McGRAW-HILL & INTERAMERICANA EDITORES (eds.); Quinta Edición)*.
- Bustillos, J., Le-Pennec, J., Samaniego, P., Eychenne, J., Troncoso, L., Ordóñez, J., & Gonza, T. (2014). *Estudio de los depósitos de ceniza del volcán Tungurahua-2010: Transición del estilo eruptivo*. *Revista EPN*, 33(2), 19.  
[https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista\\_politecnica2/articloe/view/106/pdf](https://revistapolitecnica.epn.edu.ec/ojs2/index.php/revista_politecnica2/articloe/view/106/pdf)
- Castro, E. (2020). *ESTUDIO DE LA SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO DE ALTA RESISTENCIA INICIAL POR PUZOLANA DE CENIZA VOLCÁNICA EN EL DISEÑO DE HORMIGÓN*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.  
[https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20998/1/CD\\_10525.pdf](https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20998/1/CD_10525.pdf)

- Espindola, C. R., & Daniel, L. A. (2008). *LATERITA E SOLOS LATERÍTICOS NO BRASIL*. <http://bt.fatecsp.br/system/articles/724/original/004.pdf>
- Gad Municipal de Latacunga. (2016). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial*. [http://latacunga.gob.ec/images/pdf/PDyOT/PDyOT\\_Latacunga\\_2016-2028.pdf](http://latacunga.gob.ec/images/pdf/PDyOT/PDyOT_Latacunga_2016-2028.pdf)
- Gaggino, R. (2014). *Salubridad, sustentabilidad ecológica y costo de tecnologías constructivas para la vivienda de interés social*. *Dialnet*, 17(17), 117. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5960418>
- Galeas, E. D., & Guzmán, F. A. (2020). *Propuesta de dosificación de hormigón reemplazando el cemento en diferentes porcentajes de peso, con ceniza volcánica del Tungurahua; identificando la influencia de utilizar la fracción fina, gruesa y completa*. Quito: Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20728>
- González, Ó. M., & Robles, F. (2005). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado* (Grupo NORIEGA (ed.); Cuarta, Vol. 1). LIMUSA S.A. <https://marodyc.files.wordpress.com/2014/06/aspectos-fundamentales-concreto-reforzado-gonzalez-cuevas.pdf>
- Hassan, I. O. (2006). *Strength Properties of Concrete obtained Using Volcanic Ash Pozzolan as Partial Replacement of Cement*. University of Jos.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto* (Primera). PCA. [www.cement.org](http://www.cement.org)
- Luna, G. V. (2014). *Estudio del Hormigón: Guía didáctica para el diseño*. Quito: Edicumbre.
- Masías, K. A. (2018). *Resistencia a la flexión y tracción en el concreto usando ladrillo triturado como agregado grueso*. Universidad de Piura. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/3484>
- Mc Cormac, J. C., & Brown, R. H. (2011). *Diseño de Concreto Reforzado*. México CD: Alfaomega.

- NEC. (2016). *NORMA ECUATORIANA DE LA CONSTRUCCIÓN. Guía práctica para el diseño de estructuras de hormigón armado*, 12-13.
- Olawuyi, B. J., & Olusola, K. O. (2010). *Compressive Strength of Volcanic Ash/Ordinary Portland Cement Laterized Concrete*. *Civil Engineering Dimension*, 12(1), 23–28. <https://doi.org/10.9744/ced.12.1.23-28>
- Páez, A. (1986). *HORMIGÓN ARMADO (1st ed.)*. REVERTÉ EDITORIAL S.A. [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=5wfVaiKduB8C&oi=fnd&pg=PA25&dq=hormigón&ots=dh0dnd8sbn&sig=UqB7y57oiuAjjDrU5SP9BmRDZPM&redir\\_esc=y#v=onepage&q=hormigón&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=5wfVaiKduB8C&oi=fnd&pg=PA25&dq=hormigón&ots=dh0dnd8sbn&sig=UqB7y57oiuAjjDrU5SP9BmRDZPM&redir_esc=y#v=onepage&q=hormigón&f=false)
- Ramírez, F., & Samaniego, J. (2016). *Estudio comparativo de los efectos sobre la resistencia a la flexión del hormigón reforzado con fibras (HRF) usando microfibras de acero DRAMIX RC-6535-BN y de polipropileno/polietileno TUF-STRAND SF*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Salazar, A. (2005). *EXPERIENCIA DE RECICLAJE EN LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN*. *Sophia*, 1, 31–51. <https://www.redalyc.org/pdf/4137/413740777004.pdf>
- UNE-EN 12390-8. (2004). *Profundidad de penetración de agua bajo presión en hormigón endurecido*.
- Zunino, F. (2012). *Evaluación del desempeño de hormigones con ceniza de cascarilla de arroz como material cementicio suplementario*. *INGENIERIA Y DESARROLLO*, 2, 62–65. <https://www.ing.uc.cl/wp-content/uploads/2014/06/journal-2012-baja.pdf#page=64>

## **ANEXOS**

## **ANEXO 1**

**Informe de dosificación de hormigón de  $f'_c=21$  MPa**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



**DOSIFICACIÓN DE HORMIGONES**

INF. No. 21 - 0081 - I  
Hoja 01 de 04

Quito, 2 de julio de 2021

**DATOS DEL CLIENTE**

**Razón Social:** ERICK SANTIAGO MINIGUANO; ADRIANA SOLANGE HUERTAS  
**Dirección:** LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
**Teléfono:** 0979009219; 0992824575

**DATOS DEL PROYECTO**

**Proyecto:** ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA  
**Contratante:** \*\*\*  
**Contratista:** \*\*\*  
**Fiscalizador:** \*\*\*  
**MINA:** HOLCIM  
**NORMAS:** ACI 211

**CONDICIONES DE DOSIFICACIÓN  $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$**

- Condición de exposición normal
- Tamaño máximo nominal del ripio 19 mm - 3/4"
- Sin inyección de aire ni aditivos
- Asentamiento 7,5-10 cm
- Se consideran los materiales en estado seco

**RESUMEN DE RESULTADOS**

CEMENTO (Sacos/m <sup>3</sup> )	DOSIS PESO	DOSIS VOLÚMEN	CEMENTO: 1 saco de 50 Kg	
			ARENA (cajonetas)	RIPIO (cajonetas)
7.59	0.62 : 1 : 2.25 : 2.19	0.57 : 1 : 1.29 : 1.6	3 de 30 x 30 x 26	3 de 30 x 30 x 33

OBSERVACIONES: Los datos de procedencia son responsabilidad del cliente.

ING. PAUL ZÚNIGA M.  
JEFE DEL LABORATORIO (E)



## **ANEXO 2**

### **Informe de las propiedades físicas de los materiales**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



**PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES**

INF. No. 21 - 0081 - I  
Hoja 02 de 04

Quito, 2 de julio de 2021

**DATOS DEL CLIENTE**

Razón Social: ERICK SANTIAGO MINIGUANO; ADRIANA SOLANGE HUERTAS  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0979009219; 0992824575

**DATOS DEL PROYECTO**

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

MINA: HOLCIM

FECHA DE ENSAYO: 2021-06-30

**a. ARENA**

DENSIDADES APARENTES	NORMA: ASTM C29	
DENSIDAD SUELTA:	1.61	g/cm <sup>3</sup>
DENSIDAD COMPACTADA:	1.79	g/cm <sup>3</sup>

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN	NORMA: ASTM C128, INEN 856	
PESO ESPECÍFICO:	2.59	g/cm <sup>3</sup>
PESO ESPECÍFICO SSS:	2.64	g/cm <sup>3</sup>
ABSORCIÓN DE AGUA:	1.80	%

ENSAYO CONTENIDO ORGÁNICO	NORMA: ASTM C40	
ESCALA DE GARDNER	0	

MÓDULO DE FINURA	3.06	
------------------	------	--

**b. RIPIO**

DENSIDADES APARENTES	NORMA: ASTM C29	
DENSIDAD SUELTA:	1.28	g/cm <sup>3</sup>
DENSIDAD COMPACTADA:	1.40	g/cm <sup>3</sup>

PESO ESPECÍFICO Y ABSORCIÓN	NORMA: ASTM C128, INEN 856	
PESO ESPECÍFICO:	2.59	g/cm <sup>3</sup>
PESO ESPECÍFICO SSS:	2.64	g/cm <sup>3</sup>
ABSORCIÓN DE AGUA:	1.80	%

MÓDULO DE FINURA	7.06	
------------------	------	--

**c. CEMENTO GU**

DENSIDAD SUELTA	0.92	g/cm <sup>3</sup>
DENSIDAD COMPACTADA	1.16	g/cm <sup>3</sup>
DENSIDAD REAL	2.78	g/cm <sup>3</sup>

OBSERVACIONES: Los datos de procedencia son responsabilidad del cliente.

ING. PAÚL JUSIGA M.  
JEFE DEL LABORATORIO (E)





## **ANEXO 3**

### **Informe de granulometría de agregado fino**



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO FINO

INF. No. 21 - 0081 - I  
Hoja 03 de 04

Quito, 2 de julio de 2021

#### DATOS DEL CLIENTE

Razón Social: ERICK SANTIAGO MINIGUANO, ADRIANA SOLANGE HUERTAS  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0979009219; 0992824575

#### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

MINA:

HOLCIM

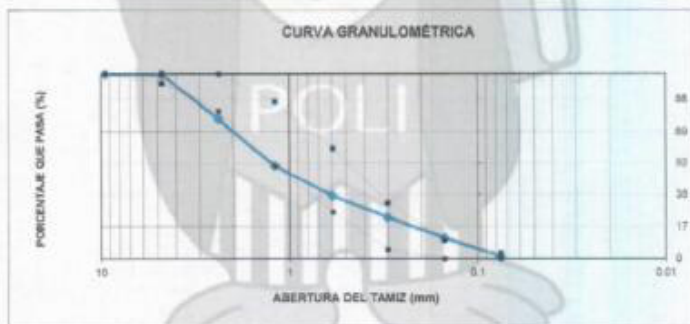
FECHA DE ENSAYO:

2021-06-24

NORMAS:

ASTM C136, ASTM C33

TAMIZ No.	TAMANO ABERTURA	PESO RETENIDO	PORCENTAJE RETENIDO	PORCENTAJE ACUMULADO	PORCENTAJE QUE PASA
3/8"	9.5	0.0	0.0	0.0	100.0
4	4.75	1.3	0.1	0.1	99.9
8	2.38	238.7	23.9	24.0	76.0
16	1.19	255.3	25.5	49.5	50.4
30	0.59	163.6	16.4	66.0	34.0
50	0.3	116.7	11.7	77.6	22.4
100	0.15	108.0	10.8	88.5	11.5
200	0.075	98.8	9.9	98.3	1.7
BANDEJA		16.8	1.7	100.0	0.0
TOTAL		999.3	FINURA	3.08	



OBSERVACIONES: Los datos de procedencia son responsabilidad del cliente.

ING. PAUL ZÚÑIGA M.  
JEFE DEL LABORATORIO (E)



## **ANEXO 4**

### **Informe de granulometría de agregado grueso**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



**ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO GRUESO**

INF. No. 21 - 0081 - I  
Hoja 04 de 04

Quito, 2 de julio de 2021

**DATOS DEL CLIENTE**

Razón Social: ERICK SANTIAGO MINIGUANO; ADRIANA SOLANGE HUERTAS  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0979009219; 0992824575

**DATOS DEL PROYECTO**

PROYECTO: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

CONTRATANTE: \*\*\*

CONTRATISTA: \*\*\*

FISCALIZADOR: \*\*\*

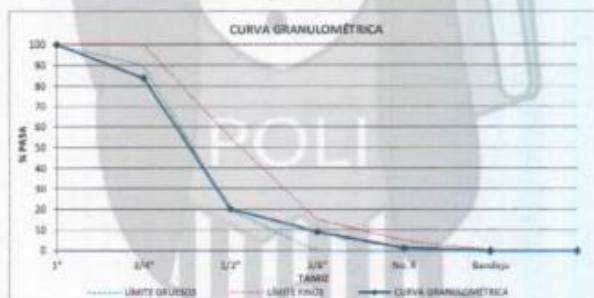
TIPO DE MUESTRA: \*\*\*

MINA: HOLCIM

FECHA DE ENSAYO: 24/06/2021

NORMA: ASTM C 136, ASTM C33

TAMIZ No.	TAMAÑO ABERTURA (mm)	PESO RETENIDO (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Ret. Acumulado (%)	Porcentaje que Pasa (%)
1"	25.00	0.0	0.0	0.0	100.0
3/4"	19.00	2407.4	16.0	16.0	84.0
1/2"	12.50	9973.7	63.8	79.8	20.4
3/8"	9.50	1889.0	11.2	90.8	9.2
No. 4	4.75	1192.6	7.9	98.7	1.3
Bandeja	-	160.7	1.3	100.0	0.0
<b>TOTAL</b>		<b>15053.40</b>	<b>M. FINURA</b>	<b>7.96</b>	



OBSERVACIONES: Los datos de procedencia son responsabilidad del cliente.

ING. PAUL ZÚÑIGA M.  
JEFE DEL LABORATORIO (E)



## **ANEXO 5**

### **Informe de ensayo de abrasión**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### ENSAYO DE ABRASIÓN

INF. No. 21-0087-I  
Hoja 01 de 01

Quito, 28 de julio de 2021

#### DATOS DEL CLIENTE

**Razón social:** ERICK SANTIAGO MINIGUANO; ADRIANA SOLANGE HUERTAS  
**Dirección:** LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
**Teléfono:** 0979009219; 0992824575

#### DATOS DEL PROYECTO

**Proyecto:** ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON GENIZA VOLCÁNICA

**Contratante:** \*\*\*

**Contratista:** \*\*\*

**Fiscalizador:** \*\*\*

**TIPO DE MUESTRA:** AGREGADO GRUESO

**PROCEDENCIA:** HOLCIM

**FECHA DE ENSAYO:** 2021-06-30

**NORMA:** ASTM C131

#### RESULTADOS DEL ENSAYO

MUESTRA:	RIPIO
GRADACIÓN:	B
NUMERO DE ESFERAS:	11
PESO INICIAL (g):	5000.0
PESO RETENIDO EN EL TAMIZ #12 LUEGO DE 100 REVOLUCIONES (g):	4809.10
PESO RETENIDO EN EL TAMIZ #12 LUEGO DE 500 REVOLUCIONES (g):	4042.00
PORCENTAJE DE PÉRDIDA 100 rev.(%):	3.82
PORCENTAJE DE PÉRDIDA 500 rev.(%):	19.16
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD:	0.20

ING. PAÚL ZÚNIGA M.  
JEFE DE LABORATORIO (E)



## **ANEXO 6**

**Informe de densidad aparente de la ceniza volcánica**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### DENSIDAD APARENTE DE CEMENTO

INF. No. 21 - 0097 - I  
Hoja 01 de 01

Quito, 23 de agosto de 2021

#### DATOS DEL CLIENTE

**Razón Social:** ERICK SANTIAGO MINIGUANO; ADRIANA SOLANGE HUERTAS  
**Dirección:** LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
**Teléfono:** 0979009219; 0992824575

#### DATOS DEL PROYECTO

**Proyecto:** ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA  
**Contratante:** \*\*\*  
**Contratista:** \*\*\*  
**Fiscalizador:** \*\*\*  
**PROCEDENCIA:** \*\*\*  
**TIPO DE CEMENTO:** \*\*\*  
**FECHA DE ENSAYO:** 2021-08-06  
**NORMA:** \*\*\*

DENSIDAD APARENTE DE CEMENTO			
IDENTIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	DENSIDAD SUELTA g/cm <sup>3</sup>	DENSIDAD COMPACTADA g/cm <sup>3</sup>
21-008-I-1	CENIZA VOLCÁNICA	0.631	0.888

**OBSERVACIÓN:** La procedencia de los ítems de ensayo es proporcionada por el cliente, lo que involucra su total responsabilidad.

ING. PAUL ZUÑIGA M.  
JEFE DE LABORATORIO (E)





## **ANEXO 7**

**Informe de densidad real de la ceniza volcánica**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



**DENSIDAD REAL DEL CEMENTO**

INF. No. 21 - 0096 - I  
Hoja 01 de 01

Quito, 18 de agosto de 2021

**DATOS DEL CLIENTE**

**Razón social:**

ERICK SANTIAGO MINIGUANO; ADRIANA SOLANGE HUERTAS

**Dirección:**

LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA

**Teléfono:**

0979009219; 0992824575

**DATOS DEL PROYECTO**

**Proyecto:**

ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

**Contratante:**

\*\*\*

**Contratista:**

\*\*\*

**Fiscalizador:**

\*\*\*

**FECHA DE ENSAYO:**

2021-08-06

**NORMA:**

ASTM C188

CARACTERÍSTICAS DE LA MUESTRA		
MARCA	TIPO DE CEMENTO	FECHA DE FABRICACIÓN
***	Ceniza volcánica	***

DENSIDAD REAL DEL CEMENTO						
MUESTRA	Volúmen inicial (cm <sup>3</sup> )	Peso Inicial (g)	Volúmen final (cm <sup>3</sup> )	Peso final (g)	Δ Temperatura (°C)	Densidad Real (g/cm <sup>3</sup> )
1	0.8	328.4	23.0	375.4	0	2.12
PROMEDIO						2.12

OBSERVACIONES: El muestreo y las características de la muestra, son responsabilidad del cliente.

ING. PAUL ZUNIGAM  
JEFE DE LABORATORIO ( E )



## **ANEXO 8**

**Valores del ensayo de asentamiento de cada mezcla**

<b>Asentamiento para un <math>f'c=21</math> MPa</b>	7.5 a 10 cm
<p data-bbox="268 427 738 517"><b>Asentamiento obtenido para el HS:</b></p> <p data-bbox="459 622 547 656">10 cm</p>	
<p data-bbox="268 949 738 1039"><b>Asentamiento obtenido para el HCV10:</b></p> <p data-bbox="459 1144 547 1178">7.5 cm</p>	
<p data-bbox="268 1473 738 1563"><b>Asentamiento obtenido para el HCV20:</b></p> <p data-bbox="459 1668 547 1702">6.5 cm</p>	

## **ANEXO 9**

**Informe del ensayo de resistencia a la compresión del hormigón a los 28, 56  
y 90 días**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



**COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN**

INF. No. 21 - 117-1  
Hoja 01 de 01

Quito, 7 de octubre de 2021

**DATOS DEL CLIENTE**

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS HOLGUÍN- ERICK SANTIAGO MINIGUANO ALBUJA  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0992824675; 0979009219

**DATOS DEL PROYECTO**

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

NORMA: ASTM C39

No.	IDENTIFICACIÓN	FECHA FABRICACIÓN	FECHA ROTURA	EDAD (días)	DIÁMETRO (mm)	ÁREA (mm <sup>2</sup> )	PESO ESPECÍFICO (kg/m <sup>3</sup> )	CARGA MÁX. (kN)	RESISTENCIA		TIPO DE FALLA*	DEFECTOS*
									(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )		
1	THM RC1	2021-09-31	2021-09-28	28	100.70	7972	2300	172.7	21.8	220	TIPO 1	A
2	THM RC2	2021-09-31	2021-09-28	28	100.00	8171	2270	164.0	20.0	204	TIPO 2	A
3	THM RC3	2021-09-31	2021-09-28	28	101.75	8131	2280	174.7	21.5	219	TIPO 1	A
4	THM RC CV10.1	2021-09-01	2021-09-29	28	103.50	8453	2270	161.8	19.0	164	TIPO 1	A
5	THM RC CV10.2	2021-09-01	2021-09-29	28	101.75	8151	2260	130.5	16.9	171	TIPO 2	C
6	THM RC CV10.3	2021-09-01	2021-09-29	28	101.75	8131	2290	142.9	17.7	181	TIPO 1	A
7	THM RC V20.1	2021-09-02	2021-09-30	28	101.50	8091	2280	118.9	14.7	150	TIPO 2	A
8	THM RC V20.2	2021-09-02	2021-09-30	28	101.50	8091	2290	111.8	13.8	141	TIPO 1	A
9	THM RC V20.3	2021-09-02	2021-09-30	28	102.00	8171	2280	115.1	14.1	145	TIPO 2	A



DESCRIPCIÓN DE DEFECTOS: A = NINGUNO; B = SEGREGADO; C = POROSIDAD; D = FISURAS PREEXISTENTES; E = OTRA

OBSERVACIONES: Todos los datos del ítem de ensayo (fecha de fabricación, elemento, identificación) son proporcionados por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados.

La información marcada con asterisco (\*) corresponde a lo especificado en la norma ASTM C39.

El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni utilizarse sin la autorización del LEMSUR.

ING. PAUL ZÚNIGA M.  
JEFE DE LABORATORIO (E)







ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0123 - I  
Hoja 01 de 01

Quito, 16 de noviembre de 2021

**DATOS DEL CLIENTE**

**Razón social:** ADRIANA SOLANGE HUERTAS HOLGUÍN, BRICK SANTIAGO MINIGUANO ALBUJA  
**Dirección:** LADRÓN DE GUEVARA E11-263 Y ANDALUCÍA  
**Teléfono:** 0992824575; 0979009219

**DATOS DEL PROYECTO**

**Proyecto:** ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA.  
**Contratante:** \*\*\*  
**Contratista:** \*\*\*  
**Fiscalizador:** \*\*\*  
**ELEMENTO:** VIGA  
**NORMA:** ASTM C39

No.	IDENTIFICACIÓN	FECHA FABRICACIÓN	FECHA ROTURA	EDAD (días)	DIÁMETRO (mm)	ÁREA (mm <sup>2</sup> )	PESO ESPECÍFICO (kg/m <sup>3</sup> )	CARGA MAX. (kN)	RESISTENCIA		TIPO DE FALLA*	DEFECTOS*
									(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )		
1	THM RC1	2021-08-31	2021-10-28	58	102.25	8211	2300	221.9	28.9	274	TIPO 2	A
2	THM RC2	2021-08-31	2021-10-28	58	101.75	8131	2280	207.8	25.6	261	TIPO 2	A
3	THM RC3	2021-08-31	2021-10-28	58	100.75	7972	2350	215.6	27.1	276	TIPO 2	A
4	THM RC CV10-1	2021-09-01	2021-10-27	56	101.00	8012	2290	178.8	22.3	228	TIPO 2	A
5	THM RC CV10-2	2021-09-01	2021-10-27	56	102.50	8262	2270	185.6	22.5	250	TIPO 1	A
6	THM RC CV10-3	2021-09-01	2021-10-27	56	101.00	8012	2280	185.8	23.2	237	TIPO 1	A
7	THM RC CV20-1	2021-09-02	2021-10-28	56	102.00	8171	2270	127.7	15.8	158	TIPO 2	A
8	THM RC CV20-2	2021-09-02	2021-10-28	56	101.25	8062	2220	140.0	17.4	177	TIPO 1	A
9	THM RC CV20-3	2021-09-02	2021-10-28	56	101.50	8091	2240	131.6	16.3	167	TIPO 2	A

TIPO DE FALLA					
Conos en ambos extremos (rotura por compresión) o en un extremo y otro de los extremos (rotura por compresión). Sección de 25 mm.	Cono en un extremo y otro de los extremos (rotura por compresión). Sección de 25 mm.	Fisura vertical (rotura por tracción) a través de ambos extremos, con o sin fisuras delgadas.	Fisura diagonal (rotura por tracción) a través de los lados, (rotura por tracción) con un ángulo para distinguirlo de Tipo 1.	Fisuras en los lados en el extremo superior o en el fondo (rotura por tracción) cuando se ensaya con compresión.	Fisura en el extremo superior (rotura por tracción) cuando se ensaya con compresión.

**DESCRIPCIÓN DE DEFECTOS:** A = NINGUNO; B = SESEGADO; C = POROSIDAD; D = FISURAS PREEXISTENTES; E = OTRA

**OBSERVACIONES:** Todos los datos del ítem de ensayo (fecha de fabricación, elemento, identificación) son proporcionados por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.  
Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados.  
La información marcada con asterisco (\*) corresponde a lo especificado en la norma ASTM C39.  
El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

ING. MERCEDES VILLAGIS  
JEFE DE LABORATORIO





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



COMPRESIÓN DE CILINDROS DE HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0139-1  
Hoja 01 de 01

Quito, 8 de diciembre de 2021

**DATOS DEL CLIENTE**

**Razón social:** ADRIANA SOLANGE HUERTAS HOLGUÍN, ERICK SANTIAGO MINIGUANO ALBUJA  
**Dirección:** LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
**Teléfono:** 0992824575; 0979009219

**DATOS DEL PROYECTO**

**Proyecto:** ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA  
**Contratante:** \*\*\*  
**Contratista:** \*\*\*  
**Fiscalizador:** \*\*\*  
**ELEMENTO:** VIGA  
**NORMA:** ASTM C39

No.	IDENTIFICACIÓN	FECHA FABRICACIÓN	FECHA ROTURA	EDAD (días)	DIÁMETRO (mm)	ÁREA (mm <sup>2</sup> )	PESO ESPECÍFICO (kg/m <sup>3</sup> )	CARGA MÁX. (kN)	RESISTENCIA		TIPO DE FALLA*	DEFECTOS*
									(MPa)	(kg/cm <sup>2</sup> )		
1	THM-RC1	2021-08-31	2021-11-29	90	102.25	8211	2260	236.5	26.8	293	TIPO 2	A
2	THM-RC2	2021-08-31	2021-11-29	90	102.50	8252	2240	235.7	26.5	291	TIPO 2	A
3	THM-RC3	2021-09-03	2021-12-02	90	101.75	8131	2230	283.9	34.9	356	TIPO 1	A
4	THM-RC4	2021-09-03	2021-12-02	90	101.75	8131	2270	282.8	34.7	354	TIPO 2	A
5	THM-RC CV10-1	2021-09-01	2021-11-30	90	102.25	8211	2250	197.5	24.1	245	TIPO 2	A
6	THM-RC CV10-2	2021-09-01	2021-11-30	90	102.00	8171	2280	214.8	26.3	268	TIPO 2	C
7	THM-RC CV10-3	2021-09-01	2021-11-30	90	100.75	7972	2290	178.0	22.0	224	TIPO 2	A
8	THM-RCV20-1	2021-09-02	2021-12-01	90	102.00	8171	2280	153.5	18.8	162	TIPO 2	A
9	THM-RCV20-2	2021-09-02	2021-12-01	90	102.50	8252	2240	128.6	15.6	159	TIPO 2	A
10	THM-RCV20-3	2021-09-02	2021-12-01	90	102.25	8211	2230	146.6	17.9	162	TIPO 2	A



**DESCRIPCIÓN DE DEFECTOS:** A = NINGUNO, B = SEGREGADO, C = POROSIDAD, D = FISURAS PREEXISTENTES, E = OTRA

**OBSERVACIONES:** Todos los datos del ítem de ensayo (fecha de fabricación, elemento, identificación) son proporcionadas por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados.

La información marcada con asterisco (\*) corresponde a lo especificado en la norma ASTM C39.

El contenido del presente informe no podrá reproducirse ni parcial ni totalmente sin la autorización del LEMSUR.

ING. MERCEDES VILLACIS  
 JEFE DE LABORATORIO





## **ANEXO 10**

**Informe del ensayo de módulo de elasticidad del hormigón a los 28 días**

## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0118 - I  
Hoja 01 de 09

Quito, 19 de octubre de 2021

## DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: \*\*\*

## DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM ME 1

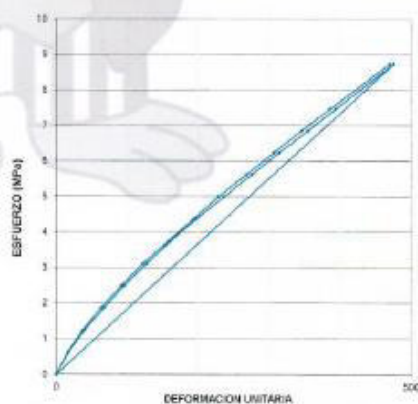
FECHA DE ENSAYO: 2021-09-28

NORMA: ASTM C469 - 14

CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0.0	0	0.00
5.0	17	0.62
10.0	40	1.25
15.0	66	1.87
20.0	95	2.50
25.0	128	3.12
30.0	161	3.74
35.0	197	4.37
40.0	237	4.99
45.0	275	5.62
50.0	314	6.24
55.0	355	6.86
60.0	394	7.49
70.0	475	8.74
0.0	0	0.00
5.0	16	0.62
10.0	37	1.25
15.0	83	1.87
20.0	92	2.50
25.0	122	3.12
30.0	158	3.74
35.0	194	4.37
40.0	229	4.99
45.0	268	5.62
50.0	307	6.24
55.0	346	6.86
60.0	386	7.49
70.0	470	8.74

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (mm)	101.00
ALTURA (L) (mm)	202
PESO (g)	3981.2
PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	2.26

RESUMEN DE RESULTADOS	
AREA (mm <sup>2</sup> )	8011.85
RELACIÓN L/D	2.00
Carga máxima (KN)	***
Módulo de Elasticidad (MPa)	18492
Resistencia a la compresión (MPa)	***
40 % de Resistencia a la compresión (MPa)	8.74



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

  
ING. PAUL ZUNIGA M.  
JEFE DEL LABORATORIO (E)



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0118 - I  
Hoja 02 de 09

Quito, 19 de octubre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: \*\*\*

### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM ME 2

FECHA DE ENSAYO: 2021-09-28

NORMA: ASTM C489 - 14

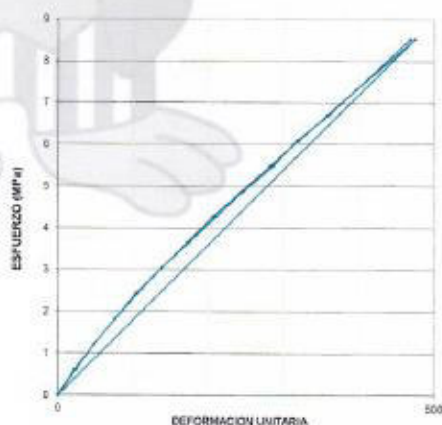
CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0,0	0	0,00
5,0	24	0,81
10,0	48	1,22
15,0	76	1,83
20,0	104	2,44
25,0	138	3,05
30,0	174	3,66
35,0	210	4,27
40,0	246	4,88
45,0	286	5,49
50,0	318	6,10
55,0	360	6,70
60,0	396	7,31
70,0	474	8,53
0,0	0	0,00
5,0	22	0,81
10,0	48	1,22
15,0	78	1,83
20,0	106	2,44
25,0	138	3,05
30,0	172	3,66
35,0	206	4,27
40,0	244	4,88
45,0	282	5,49
50,0	320	6,10
55,0	358	6,70
60,0	396	7,31
70,0	488	8,53

### CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA

DIAMETRO (D) (mm) : 102,20  
ALTURA (L) (mm) : 202  
PESO (g) : 3746,1  
PESO UNITARIO (g/cm<sup>3</sup>) : 2,26

### RESUMEN DE RESULTADOS

AREA(mm<sup>2</sup>) : 8203,36  
RELACION L/D : 1,98  
Carga máxima (KN) : \*\*\*  
Módulo de Elasticidad (MPa) : 18118  
Resistencia a la compresión (MPa) : \*\*\*  
40 % de Resistencia a la compresión (MPa) : 8,53



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

ING. PAÚL ZUÑIGA M.  
JEFE DEL LABORATORIO (E)



Tel.: 2976300  
Ext.: 1609



## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0118 - I  
Hoja 04 de 09

Quito, 19 de octubre de 2021

## DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: \*\*\*

## DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM ME 1 CV10

FECHA DE ENSAYO: 2021-09-29

NORMA: ASTM C469 - 14

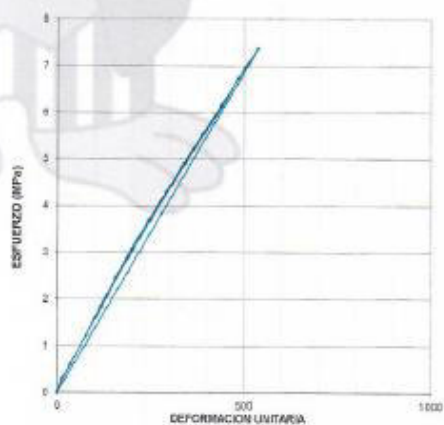
CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0.0	0	0.00
2.5	13	0.31
5.0	35	0.81
10.0	77	1.23
15.0	115	1.84
20.0	158	2.46
25.0	197	3.07
30.0	244	3.69
35.0	291	4.30
40.0	338	4.91
45.0	388	5.53
50.0	437	6.14
55.0	485	6.76
60.0	536	7.37
0.0	0	0.00
2.5	14	0.31
5.0	36	0.81
10.0	77	1.23
15.0	119	1.84
20.0	158	2.46
25.0	203	3.07
30.0	248	3.69
35.0	293	4.30
40.0	343	4.91
45.0	392	5.53
50.0	441	6.14
55.0	484	6.76
60.0	536	7.37

## CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA

DIAMETRO (D) (mm) : 101.80  
ALTURA (L) (mm) : 202  
PESO (g) : 3713.8  
PESO UNITARIO (g/cm<sup>3</sup>) : 2.26

## RESUMEN DE RESULTADOS

AREA (mm<sup>2</sup>) : 8139.27  
RELACIÓN L/D : 1.98  
Carga máxima (KN) : \*\*\*  
Módulo de Elasticidad (MPa) : 13743  
Resistencia a la compresión (MPa) : \*\*\*  
40 % de Resistencia a la compresión (MPa) : 7.37



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

ING. PAÚL ZUÑIGA M.  
JEFE DEL LABORATORIO (E)



Tel.: 2976300  
Ext.: 1609



## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0118 - I  
Hoja 05 de 09

Quito, 19 de octubre de 2021

## DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS, ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: \*\*\*

## DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM ME 2 CV10

FECHA DE ENSAYO: 2021-09-29

NORMA: ASTM C469 - 14

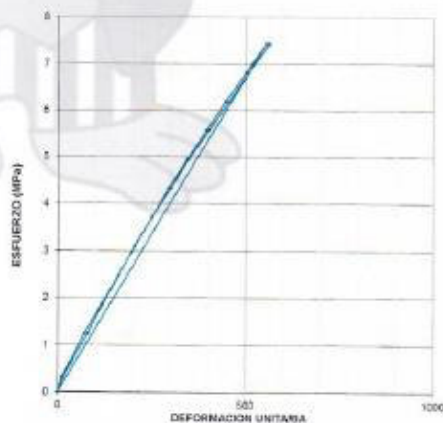
CARGA (KN)	DEF. AXIAL ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	ESFUERZO (MPa)
0.0	0	0.00
2.5	10	0.31
5.0	32	0.62
10.0	71	1.24
15.0	116	1.86
20.0	161	2.48
25.0	205	3.10
30.0	252	3.71
35.0	295	4.33
40.0	345	4.95
45.0	395	5.57
50.0	446	6.19
55.0	500	6.81
60.0	564	7.43
0.0	0	0.00
2.5	15	0.31
5.0	35	0.62
10.0	80	1.24
15.0	119	1.86
20.0	162	2.48
25.0	203	3.10
30.0	251	3.71
35.0	301	4.33
40.0	348	4.95
45.0	402	5.57
50.0	455	6.19
55.0	507	6.81
60.0	563	7.43

## CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA

DIAMETRO (D) (mm) : 101.40  
ALTURA (L) (mm) : 202  
PESO (g) : 3729.3  
PESO UNITARIO ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ) : 2.29

## RESUMEN DE RESULTADOS

ÁREA ( $\text{mm}^2$ ) : 8075.43  
RELACIÓN L/D : 1.99  
Carga máxima (KN) : \*\*\*  
Módulo de Elasticidad (MPa) : 13304  
Resistencia a la compresión (MPa) : \*\*\*  
40 % de Resistencia a la compresión (MPa) : 7.43



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

ING. PAUL ZUÑIGA M.  
EFE DEL LABORATORIO (E)



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0118 - I  
Hoja 06 de 09

Quito, 19 de octubre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: \*\*\*

### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM ME 3 CV10

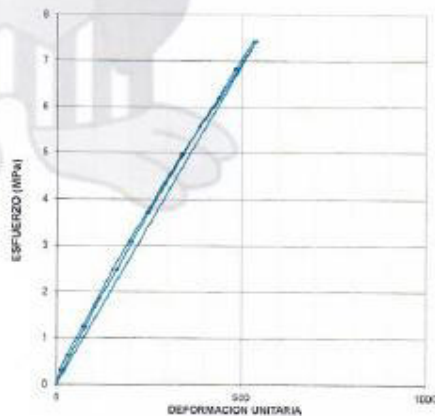
FECHA DE ENSAYO: 2021-09-29

NORMA: ASTM C469 - 14

CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0.0	0	0.00
2.5	10	0.31
5.0	28	0.62
10.0	70	1.24
15.0	110	1.86
20.0	151	2.48
25.0	195	3.10
30.0	243	3.71
35.0	299	4.33
40.0	338	4.95
45.0	388	5.57
50.0	441	6.19
55.0	489	6.81
60.0	538	7.43
0.0	0	0.00
2.5	18	0.31
5.0	37	0.62
10.0	78	1.24
15.0	116	1.86
20.0	162	2.48
25.0	204	3.10
30.0	249	3.71
35.0	295	4.33
40.0	342	4.95
45.0	386	5.57
50.0	435	6.19
55.0	482	6.81
60.0	531	7.43

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (mm)	101.40
ALTURA (L) (mm)	200
PESO (g)	3667.6
PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	2.26

RESUMEN DE RESULTADOS	
ÁREA (mm <sup>2</sup> )	8075.43
RELACIÓN L/D	1.97
Carga máxima (KN)	***
Módulo de Elasticidad (MPa)	13852
Resistencia a la compresión (MPa)	***
40 % de Resistencia a la compresión (MPa)	7.43



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

ING. PAÚL ZUNIGA M.  
JEFE DEL LABORATORIO (E)



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0118 - I  
Hoja 07 de 09

Quito, 19 de octubre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS, ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: \*\*\*

### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM ME CV20 1

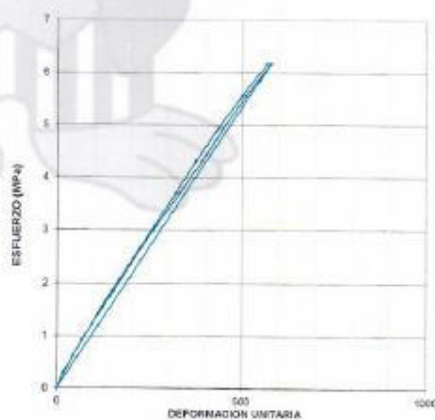
FECHA DE ENSAYO: 2021-09-30

NORMA: ASTM C469 - 14

CARGA (KN)	DEF. AXIAL ( $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ )	ESFUERZO (MPa)
0,0	0	0,00
2,5	20	0,31
5,0	44	0,62
7,5	69	0,93
10,0	96	1,23
12,5	124	1,54
15,0	193	1,85
20,0	209	2,47
25,0	270	3,08
30,0	332	3,70
35,0	394	4,32
40,0	449	4,93
45,0	510	5,55
50,0	579	6,17
0,0	0	0,00
2,5	19	0,31
5,0	44	0,62
7,5	68	0,93
10,0	97	1,23
12,5	120	1,54
15,0	149	1,85
20,0	206	2,47
25,0	265	3,08
30,0	321	3,70
35,0	377	4,32
40,0	436	4,93
45,0	500	5,55
50,0	568	6,17

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (mm)	101,80
ALTURA (L) (mm)	204
PESO (g)	3746,8
PESO UNITARIO ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	2,27

RESUMEN DE RESULTADOS	
AREA ( $\text{mm}^2$ )	8107,32
RELACIÓN L/D	2,01
Carga máxima (KN)	***
Módulo de Elasticidad (MPa)	10768
Resistencia a la compresión (MPa)	***
40 % de Resistencia a la compresión (MPa)	6,17



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

ING. PAUL ZÚÑIGA M.  
JEFE DEL LABORATORIO (E)



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609



## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0118 - I  
Hoja 08 de 09

Quito, 19 de octubre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS, ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: \*\*\*

### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM ME CV20 2

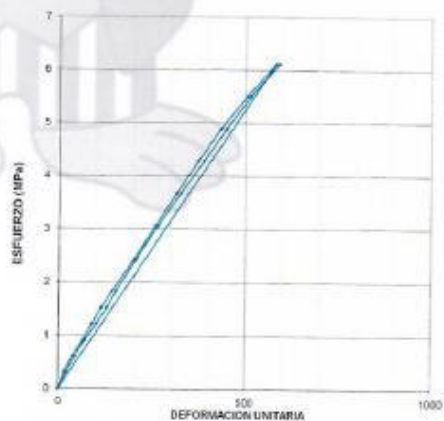
FECHA DE ENSAYO: 2021-09-30

NORMA: ASTM C469 - 14

CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0,0	0	0,00
2,5	15	0,31
5,0	38	0,61
7,5	66	0,92
10,0	90	1,22
12,5	115	1,53
15,0	143	1,84
20,0	200	2,45
25,0	258	3,06
30,0	316	3,67
35,0	374	4,28
40,0	434	4,90
45,0	505	5,51
50,0	582	6,12
0,0	0	0,00
2,5	21	0,31
5,0	44	0,61
7,5	71	0,92
10,0	102	1,22
12,5	130	1,53
15,0	154	1,84
20,0	209	2,45
25,0	266	3,06
30,0	328	3,67
35,0	388	4,28
40,0	448	4,90
45,0	515	5,51
50,0	591	6,12

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (mm)	102,00
ALTURA (L) (mm)	202
PESO (g)	3705,2
PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	2,24

RESUMEN DE RESULTADOS	
ÁREA (mm <sup>2</sup> )	8171,28
RELACIÓN L/D	1,98
Carga máxima (KN)	***
Módulo de Elasticidad (MPa)	10429
Resistencia a la compresión (MPa)	***
49 % de Resistencia a la compresión (MPa)	5,12



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

  
ING. PAÚL ZUÑIGA M.  
JEFE DEL LABORATORIO (E)



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0118 - I  
Hoja 09 de 09

Quito, 19 de octubre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS, ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: \*\*\*

### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM ME CV20 3

FECHA DE ENSAYO: 2021-09-30

NORMA: ASTM C469 - 14

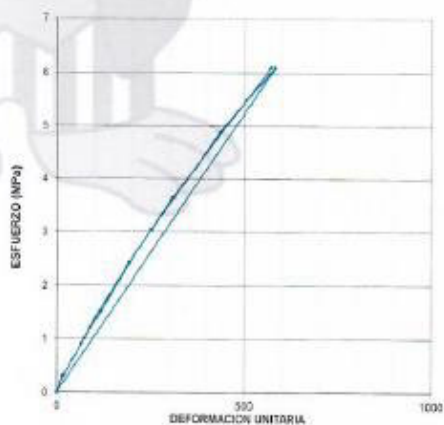
CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0,0	0	0,00
2,5	18	0,30
5,0	42	0,61
7,5	66	0,91
10,0	90	1,22
12,5	119	1,52
15,0	143	1,83
20,0	184	2,44
25,0	251	3,05
30,0	310	3,66
35,0	376	4,27
40,0	433	4,88
45,0	507	5,49
50,0	582	6,10
0,0	0	0,00
2,5	18	0,30
5,0	42	0,61
7,5	65	0,91
10,0	87	1,22
12,5	113	1,52
15,0	140	1,83
20,0	193	2,44
25,0	253	3,05
30,0	313	3,66
35,0	377	4,27
40,0	438	4,88
45,0	506	5,49
50,0	571	6,10

### CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA

DIAMETRO (D) (mm) : 102,20  
ALTURA (L) (mm) : 202  
PESO (g) : 3666,4  
PESO UNITARIO (g/cm<sup>3</sup>) : 2,21

### RESUMEN DE RESULTADOS

ÁREA (mm<sup>2</sup>) : 8203,36  
RELACIÓN L/D : 1,98  
Carga máxima (KN) : \*\*\*  
Módulo de Elasticidad (MPa) : 10560  
Resistencia a la compresión (MPa) : \*\*\*  
40 % de Resistencia a la compresión (MPa) : 0,10



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

ING. PAUL ZUÑIGA M.  
JEFE DEL LABORATORIO (E)



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

## **ANEXO 11**

**Informe del ensayo de módulo de elasticidad del hormigón a los 56 días**

## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0124 - 1  
Hoja 01 de 09

Quito, 18 de noviembre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS, ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0992824575; 0979009219

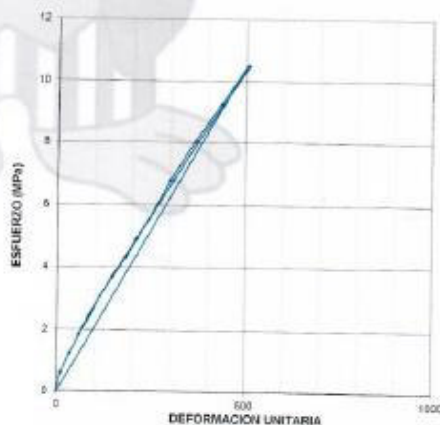
### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA  
Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
ELEMENTO: VIGA  
MUESTRA: THM-ME-HS-1  
FECHA DE ENSAYO: 2021-10-28  
NORMA: ASTM C469 - 14

GARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0,0	0	0,00
5,0	10	0,82
10,0	35	1,23
15,0	59	1,85
20,0	96	2,47
25,0	114	3,08
30,0	145	3,70
35,0	180	4,32
40,0	209	4,93
45,0	243	5,55
50,0	289	6,78
55,0	364	8,02
75,0	435	9,25
85,0	503	10,48
0,0	0	0,00
5,0	11	0,82
10,0	34	1,23
15,0	59	1,85
20,0	84	2,47
25,0	114	3,08
30,0	146	3,70
35,0	183	4,32
40,0	212	4,93
45,0	244	5,55
50,0	308	6,78
55,0	374	8,02
75,0	442	9,25
85,0	509	10,48

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (mm)	101,60
ALTURA (L) (mm)	202
PESO (g)	3745,8
PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	2,29

RESUMEN DE RESULTADOS	
ÁREA (mm <sup>2</sup> )	8107,32
RELACION L/D	1,99
Carga máxima (KN)	***
Módulo de Elasticidad (MPa)	20735
Resistencia a la compresión (MPa)	***
40 % de Resistencia a la compresión (MPa)	10,48



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

  
ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DEL LABORATORIO



Tel.: 2976300  
Ext.: 1609

## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0124 - I  
Hoja 02 de 09

Quito, 18 de noviembre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0992824575; 0979009219

### DATOS DEL PROYECTO

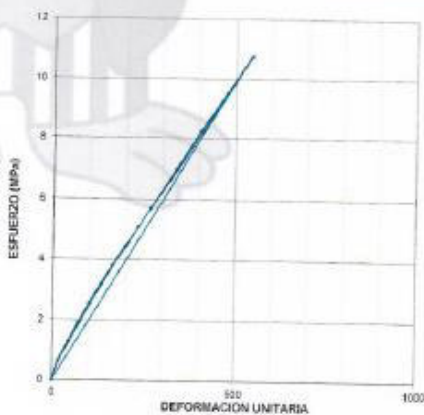
Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
ELEMENTO: VIGA  
MUESTRA: THM-ME-HS-2  
FECHA DE ENSAYO: 2021-10-26  
NORMA: ASTM C469 - 14

CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0.0	0	0.00
5.0	17	0.83
10.0	48	1.27
15.0	74	1.90
20.0	103	2.54
25.0	136	3.17
30.0	165	3.80
35.0	201	4.44
40.0	234	5.07
45.0	266	5.71
55.0	337	6.97
65.0	405	8.24
75.0	475	9.51
85.0	545	10.78
0.0	0	0.00
5.0	15	0.83
10.0	42	1.27
15.0	70	1.90
20.0	99	2.54
25.0	131	3.17
30.0	163	3.80
35.0	198	4.44
40.0	234	5.07
45.0	269	5.71
55.0	342	6.97
65.0	411	8.24
75.0	476	9.51
85.0	547	10.78

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (mm)	100.20
ALTURA (L) (mm)	202
PESO (g)	3654.9
PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	2.25

RESUMEN DE RESULTADOS	
ÁREA (mm <sup>2</sup> )	7885.43
RELACIÓN L/D	2.02
Carga máxima (KN)	***
Módulo de Elasticidad (MPa)	19743
Resistencia a la compresión (MPa)	***
40 % de Resistencia a la compresión (MPa)	10.78



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

  
ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DEL LABORATORIO



Tel.: 2976300  
Ext.: 1609



## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0124 - I  
Hoja 03 de 09

Quito, 18 de noviembre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0992824575; 0979006219

### DATOS DEL PROYECTO

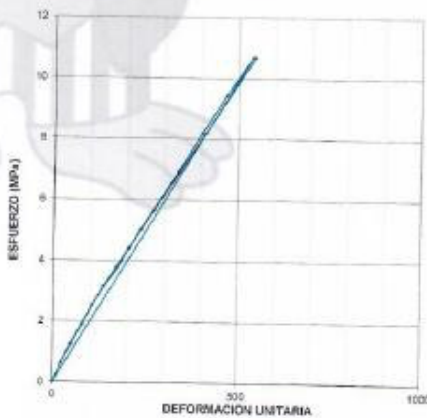
Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
ELEMENTO: VIGA  
MUESTRA: THM-ME-HS-3  
FECHA DE ENSAYO: 2021-10-28  
NORMA: ASTM C489 - 14

CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0,0	0	0,00
5,0	22	0,83
10,0	47	1,26
15,0	78	1,89
20,0	106	2,52
25,0	136	3,15
30,0	170	3,77
35,0	204	4,40
40,0	230	5,03
45,0	271	5,66
50,0	338	6,92
65,0	402	8,18
75,0	488	9,44
85,0	539	10,89
0,0	0	0,00
5,0	22	0,83
10,0	40	1,26
15,0	79	1,88
20,0	106	2,52
25,0	137	3,15
30,0	175	3,77
35,0	205	4,40
40,0	238	5,03
45,0	273	5,66
55,0	342	6,92
65,0	412	8,18
75,0	479	9,44
85,0	546	10,89

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (mm)	100,80
ALTURA (L) (mm)	202
PESO (g)	3094,1
PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	2,30

RESUMEN DE RESULTADOS	
AREA (mm <sup>2</sup> )	7948,51
RELACION L/D	2,01
Carga máxima (KN)	***
Módulo de Elasticidad (MPa)	19713
Resistencia a la compresión (MPa)	***
49 % de Resistencia a la compresión (MPa)	10,89



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

  
ING. MERCEDES VILLACIS  
JEFE DEL LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0124 - I  
Hoja 04 de 09

Quito, 16 de noviembre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0992824575; 0979009219

### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM-ME-CV10-1

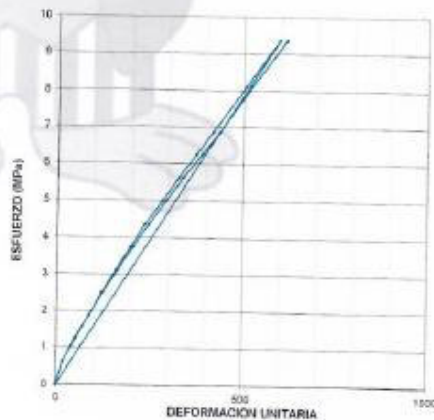
FECHA DE ENSAYO: 2021-10-27

NORMA: ASTM C469 - 14

CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0.0	0	0.00
5.0	18	0.62
10.0	49	1.26
15.0	86	1.87
20.0	121	2.50
25.0	159	3.12
30.0	198	3.74
35.0	237	4.37
40.0	283	4.99
45.0	327	5.62
50.0	374	6.24
55.0	419	6.86
65.0	507	8.11
75.0	596	9.36
0.0	0	0.00
5.0	17	0.62
10.0	52	1.26
15.0	88	1.87
20.0	123	2.50
25.0	164	3.12
30.0	204	3.74
35.0	247	4.37
40.0	293	4.99
45.0	339	5.62
50.0	389	6.24
55.0	437	6.86
65.0	523	8.11
75.0	616	9.36

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (mm)	101.00
ALTURA (L) (mm)	202
PESO (g)	3684.6
PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	2.28

RESUMEN DE RESULTADOS	
ÁREA (mm <sup>2</sup> )	8011.85
RELACIÓN L/D	2.00
Carga máxima (KN)	***
Módulo de Elasticidad (MPa)	15452
Resistencia a la compresión (MPa)	***
40 % de Resistencia a la compresión (MPa)	9.36



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DEL LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0124 - I  
Hoja 05 de 09

Quito, 18 de noviembre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS, ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0992824575, 0979009219

### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM-ME-CV10-2

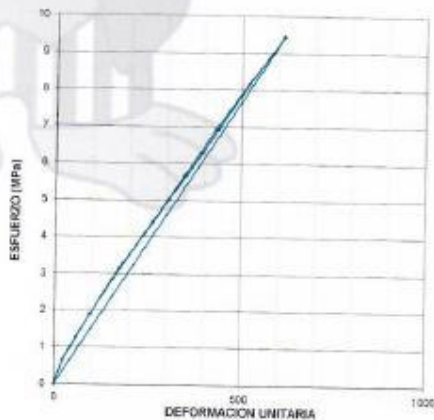
FECHA DE ENSAYO: 2021-10-27

NORMA: ASTM C469 - 14

CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0.0	0	0.00
5.0	22	0.83
10.0	59	1.26
15.0	95	1.89
20.0	134	2.52
25.0	176	3.15
30.0	218	3.77
35.0	261	4.40
40.0	304	5.03
45.0	346	5.66
50.0	389	6.29
55.0	430	6.92
65.0	519	8.18
75.0	615	9.44
0.0	0	0.00
5.0	21	0.83
10.0	57	1.26
15.0	95	1.89
20.0	133	2.52
25.0	172	3.15
30.0	218	3.77
35.0	264	4.40
40.0	306	5.03
45.0	352	5.66
50.0	390	6.29
55.0	437	6.92
65.0	522	8.18
75.0	615	9.44

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (mm)	: 100.80
ALTURA (L) (mm)	: 202
PESO (g)	: 3643.9
PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	: 2.27

RESUMEN DE RESULTADOS	
ÁREA (mm <sup>2</sup> )	: 7948.51
RELACIÓN L/D	: 2.01
Carga máxima (KN)	: ***
Módulo de Elasticidad (MPa)	: 15350
Resistencia a la compresión (MPa)	: ***
40 % de Resistencia a la compresión (MPa)	: 9.44



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DEL LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609



## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0124 - I  
Hoja 06 de 09

Quito, 18 de noviembre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRON DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0992824575; 0979009219

### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM-ME-CV10-3

FECHA DE ENSAYO: 2021-10-27

NORMA: ASTM C469 - 14

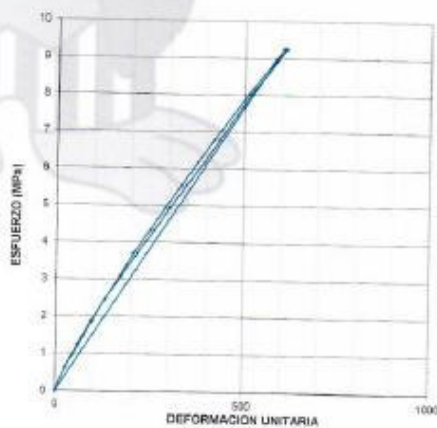
CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0,0	0	0,00
5,0	25	0,62
10,0	58	1,23
15,0	83	1,85
20,0	131	2,47
25,0	171	3,08
30,0	206	3,70
35,0	250	4,32
40,0	290	4,93
45,0	333	5,55
50,0	377	6,17
55,0	420	6,78
60,0	510	8,02
65,0	605	9,26
70,0	612	9,25
0,0	0	0,00
5,0	26	0,62
10,0	62	1,23
15,0	95	1,85
20,0	131	2,47
25,0	174	3,08
30,0	216	3,70
35,0	261	4,32
40,0	303	4,93
45,0	347	5,55
50,0	393	6,17
55,0	435	6,78
60,0	518	8,02
65,0	612	9,26

### CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA

DIÁMETRO (D) (mm) : 101,60  
ALTURA (L) (mm) : 200  
PESO (g) : 3702,1  
PESO UNITARIO (g/cm<sup>3</sup>) : 2,28

### RESUMEN DE RESULTADOS

ÁREA (mm<sup>2</sup>) : 8107,32  
RELACIÓN L/D : 1,97  
Carga máxima (KN) : \*\*\*  
Módulo de Elasticidad (MPa) : 15203  
Resistencia a la compresión (MPa) : \*\*\*  
40 % de Resistencia a la compresión (MPa) : 9,26



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DEL LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0124 - I  
Hoja 07 de 09

Quito, 18 de noviembre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0992824575; 0979009219

### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCANICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM-ME-CV20-1

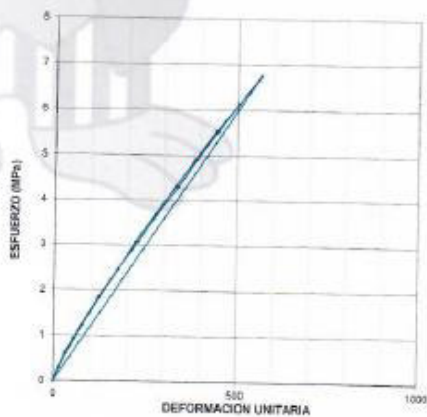
FECHA DE ENSAYO: 2021-10-28

NORMA: ASTM C469 - 14

CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0.0	0	0.00
2.5	14	0.31
5.0	31	0.61
7.5	53	0.92
10.0	76	1.23
15.0	121	1.84
20.0	174	2.46
25.0	228	3.07
30.0	291	3.69
35.0	338	4.30
40.0	390	4.91
45.0	446	5.53
50.0	505	6.14
55.0	565	6.76
0.0	0	0.00
2.5	16	0.31
5.0	35	0.61
7.5	56	0.92
10.0	78	1.23
15.0	124	1.84
20.0	175	2.46
25.0	222	3.07
30.0	276	3.69
35.0	330	4.30
40.0	385	4.91
45.0	442	5.53
50.0	505	6.14
55.0	564	6.76

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (mm)	: 101.80
ALTURA (L) (mm)	: 202
PESO (g)	: 3077.5
PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	: 2.24

RESUMEN DE RESULTADOS	
AREA (mm <sup>2</sup> )	: 5139.27
RELACIÓN L/D	: 1.98
Carga máxima (KN)	: ***
Módulo de Elasticidad (MPa)	: 11969
Resistencia a la compresión (MPa)	: ***
40 % de Resistencia a la compresión (MPa)	: 6.76



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

ING. MERCEDES VILLACIS  
JEFE DEL LABORATORIO



Tel.: 2976300  
Ext.: 1609

## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0124 - I  
Hoja 08 de 09

Quito, 18 de noviembre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS, ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0992824575; 0979009219

### DATOS DEL PROYECTO

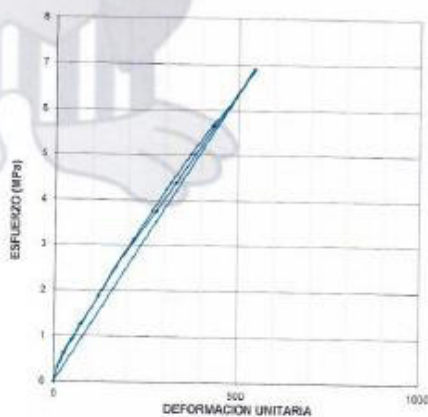
Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*  
Contratista: \*\*\*  
Fiscalizador: \*\*\*  
ELEMENTO: VIGA  
MUESTRA: THM-ME-CV20-2  
FECHA DE ENSAYO: 2021-10-28  
NORMA: ASTM C469 - 14

CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0,0	0	0,00
2,5	11	0,31
5,0	29	0,63
7,5	51	0,94
10,0	74	1,25
15,0	120	1,88
20,0	165	2,51
25,0	216	3,13
30,0	266	3,76
35,0	316	4,39
40,0	370	5,01
45,0	426	5,64
50,0	490	6,27
55,0	541	6,89
0,0	0	0,00
2,5	10	0,31
5,0	24	0,63
7,5	48	0,94
10,0	70	1,25
15,0	121	1,88
20,0	167	2,51
25,0	220	3,13
30,0	277	3,76
35,0	330	4,39
40,0	383	5,01
45,0	436	5,64
50,0	493	6,27
55,0	545	6,89

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (mm)	100,80
ALTURA (L) (mm)	202
PESO (g)	3630,8
PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	2,26

RESUMEN DE RESULTADOS	
AREA (mm <sup>2</sup> )	7960,16
RELACIÓN L/D	2,00
Carga máxima (KN)	***
Módulo de Elasticidad (MPa)	12696
Resistencia a la compresión (MPa)	***
40 % de Resistencia a la compresión (MPa)	6,89



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

  
ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DEL LABORATORIO



Tel.: 2976300  
Ext.: 1609

## MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0124 - I  
Hoja 09 de 09

Quito, 18 de noviembre de 2021

### DATOS DEL CLIENTE

Razón social: ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
Dirección: LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
Teléfono: 0992824575; 0979009219

### DATOS DEL PROYECTO

Proyecto: ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA

Contratante: \*\*\*

Contratista: \*\*\*

Fiscalizador: \*\*\*

ELEMENTO: VIGA

MUESTRA: THM-ME-CV20-3

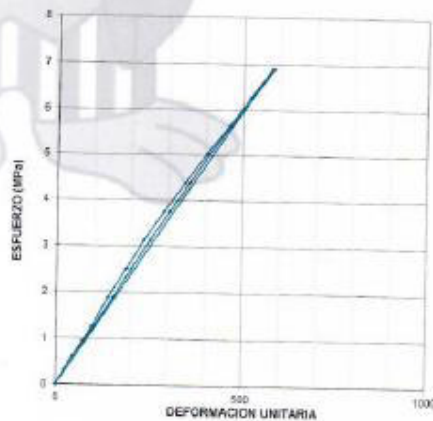
FECHA DE ENSAYO: 2021-10-28

NORMA: ASTM C469 - 14

CARGA (KN)	DEF. AXIAL (µm/µm)	ESFUERZO (MPa)
0,0	0	0,00
2,5	20	0,31
5,0	44	0,63
7,5	71	0,94
10,0	95	1,25
15,0	138	1,88
20,0	187	2,51
25,0	235	3,13
30,0	289	3,76
35,0	345	4,39
40,0	401	5,01
45,0	462	5,64
50,0	519	6,27
55,0	578	6,89
0,0	0	0,00
2,5	20	0,31
5,0	46	0,63
7,5	75	0,94
10,0	100	1,25
15,0	151	1,88
20,0	201	2,51
25,0	252	3,13
30,0	304	3,76
35,0	357	4,39
40,0	410	5,01
45,0	468	5,64
50,0	525	6,27
55,0	583	6,89

CARACTERÍSTICAS DE LA PROBETA	
DIAMETRO (D) (mm)	: 100,80
ALTURA (L) (mm)	: 202
PESO (g)	: 3630,8
PESO UNITARIO (g/cm <sup>3</sup> )	: 2,25

RESUMEN DE RESULTADOS	
ÁREA (mm <sup>2</sup> )	: 7990,15
RELACIÓN L/D	: 2,00
Carga máxima (KN)	: ***
Módulo de Elasticidad (MPa)	: 11872
Resistencia a la compresión (MPa)	: ***
40 % de Resistencia a la compresión (MPa)	: 6,89



OBSERVACIONES: Las probetas no se ensayaron hasta su rotura, solo hasta el 40% de su resistencia estimada.

ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DEL LABORATORIO



Telf.: 2976300  
Ext.: 1609

## **ANEXO 12**

**Informe del ensayo a flexión de vigas de hormigón simple a los 28 y 56 días**





**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### FLEXIÓN EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0125 - I

Quito, 23 de noviembre de 2021

Hoja 01 de 04

#### DATOS DEL CLIENTE

**Razón social:** ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
**Dirección:** LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
**Teléfono:** 0992824575; 0979009219

#### DATOS DEL PROYECTO

**Proyecto:** ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA.  
**Contratante:** \*\*\*  
**Contratista:** \*\*\*  
**Fiscalizador:** \*\*\*  
**ELEMENTO:** VIGA HORMIGÓN SIMPLE  
**NORMA:** NTE INEN 2554:2011

No.	FECHA	DESCRIPCIÓN	FECHA	EDAD	ALTO	ANCHO	LUZ LIBRE	CARGA	MÓDULO DE ROTURA
	FÁBRICA		ROTURA	(días)	(mm)	(mm)	(mm)	(N)	(MPa)
1	2021-08-31	THM HS - 1	2021-09-28	28	154	152	447	28090	3,50
2	2021-08-31	THM HS - 2	2021-09-28	28	162	166	447	27689	3,45
3	2021-08-31	THM HS - 3	2021-09-28	28	163	153	449	24880	3,10
4	2021-09-01	THM HCV 10 - 1	2021-09-29	28	154	155	449	25579	3,10
5	2021-09-01	THM HCV 10 - 2	2021-09-29	28	154	154	450	25517	3,15
6	2021-09-01	THM HCV 10 - 3	2021-09-29	28	155	151	448	26953	3,36
7	2021-09-02	THM HCV 20 - 1	2021-09-30	28	153	156	451	19621	2,40
8	2021-09-02	THM HCV 20 - 2	2021-09-30	28	156	158	450	20471	2,40
9	2021-09-02	THM HCV 20 - 3	2021-09-30	28	152	153	450	18809	2,40

**OBSERVACIONES:** Todos los datos del ítem de ensayo fueron proporcionados por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DE LABORATORIO





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### FLEXIÓN EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0125 - I

Quito, 23 de noviembre de 2021

Hoja 02 de 04

#### DATOS DEL CLIENTE

**Razón social:** ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
**Dirección:** LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
**Teléfono:** 0992824575; 0979009219

#### DATOS DEL PROYECTO

**Proyecto:** ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA.  
**Contratante:** \*\*\*  
**Contratista:** \*\*\*  
**Fiscalizador:** \*\*\*  
**ELEMENTO:** VIGA HORMIGÓN SIMPLE  
**NORMA:** NTE INEN 2554:2011

No.	FECHA	DESCRIPCIÓN	FECHA	EDAD	ALTO	ANCHO	LUZ LIBRE	CARGA	MÓDULO DE ROTURA
	FÁBRICA		ROTURA	(días)	(mm)	(mm)	(mm)	(N)	(MPa)
1	2021-08-31	THM HS - 1	2021-10-26	58	154	154	450	31040	3,80
2	2021-08-31	THM HS - 2	2021-10-26	58	153	151	451	29158	3,70
3	2021-08-31	THM HS - 3	2021-10-26	58	153	154	450	26176	3,25
4	2021-09-01	THM HCV 10 - 1	2021-10-27	58	152	157	450	29219	3,60
5	2021-09-01	THM HCV 10 - 2	2021-10-27	58	156	154	449	26575	3,55
6	2021-09-01	THM HCV 10 - 3	2021-10-27	58	155	154	450	27943	3,40
7	2021-09-02	THM HCV 20 - 1	2021-10-28	58	152	151	450	23027	2,95
8	2021-09-02	THM HCV 20 - 2	2021-10-28	58	154	155	452	25253	3,10
9	2021-09-02	THM HCV 20 - 3	2021-10-28	58	153	152	451	24287	3,05

**OBSERVACIONES:** Todos los datos del ítem de ensayo fueron proporcionados por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

ING. MERCEDES VILLACIS  
JEFE DE LABORATORIO

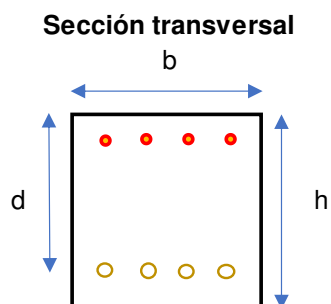
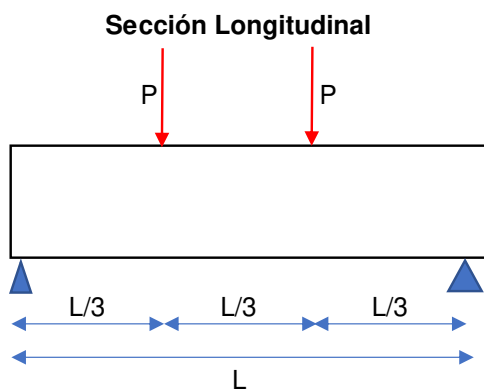


### **ANEXO 13**

**Cálculo de la carga máxima teórica que deberían soportar las vigas de hormigón armado sometidas a flexión**



## DISEÑO DE VIGA ARMADA



### DATOS DE MATERIALES

$f'_c=$	<b>21.04</b>	MPa
$f_y=$	420	MPa
$\beta_1=$	0.85	
$\rho_b=$	0.02172	
$\phi=$	0.9	

### DATOS DE DIMENSIONES

$b=$	25	cm
$h=$	25	cm
$r=$	4	cm
$d=$	21	cm
$L=$	70	cm

### ACERO MÍNIMO

$A_{s\text{mín}1}=$	0.45	cm <sup>2</sup>
$A_{s\text{mín}2}=$	1.75	cm <sup>2</sup>
$A_{s\text{mín}}=$	1.75	cm <sup>2</sup>

### ACERO MÁXIMO

$A_{s\text{máx}1}=$	13.13	cm <sup>2</sup>
$A_{s\text{máx}2}=$	8.55	cm <sup>2</sup>
$A_{s\text{máx}}=$	8.55	cm <sup>2</sup>

### ACERO A USAR (Tomando un valor entre el acero mínimo y máximo)

#### ACERO INFERIOR

$A_{s\text{cal}(+)}=$	4.50	cm <sup>2</sup>
$A_{s\text{col}(+)}=$	4.524	cm <sup>2</sup>
<b>Barras</b>	4 $\phi$ 12	

#### ACERO SUPERIOR

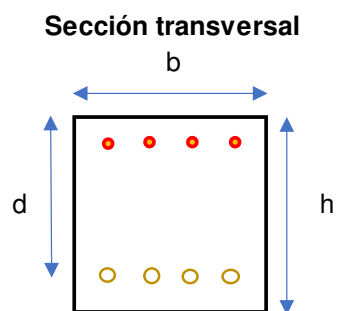
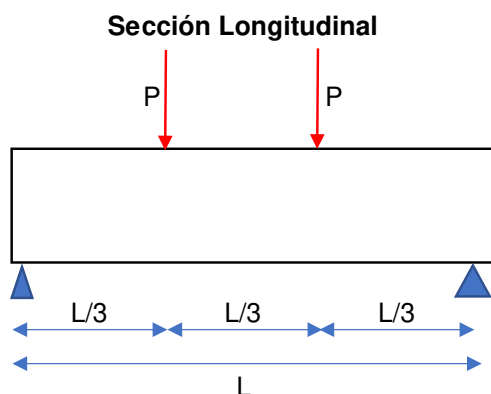
$A_{s\text{cal}(-)}=$	1.75	cm <sup>2</sup>
$A_{s\text{col}(-)}=$	2.011	cm <sup>2</sup>
<b>Barras</b>	4 $\phi$ 8	

### CÁLCULO DE MOMENTO NOMINAL, MOMENTO ÚLTIMO Y CARGA

$M_n(+)=$	3.59	T.m
$M_u=\phi M_n=$	3.23	T.m
<b>P=</b>	13.84	T

$M_n(-)=$	1.69	T.m
$M_u=\phi M_n=$	1.52	T.m

## DISEÑO DE VIGA ARMADA



## DATOS DE MATERIALES

$f'_c=$	26.52	MPa
$f_y=$	420	MPa
$\beta_1=$	0.85	
$\rho_b=$	0.0273724	
$\phi=$	0.9	

## DATOS DE DIMENSIONES

$b=$	25	cm
$h=$	25	cm
$r=$	4	cm
$d=$	21	cm
$L=$	70	cm

## ACERO MINIMO

$As_{mín1}=$	0.51	cm <sup>2</sup>
$As_{mín2}=$	1.75	cm <sup>2</sup>
$As_{mín}=$	1.75	cm <sup>2</sup>

## ACERO MÁXIMO

$As_{máx1}=$	13.13	cm <sup>2</sup>
$As_{máx2}=$	10.78	cm <sup>2</sup>
$As_{máx}=$	10.78	cm <sup>2</sup>

## ACERO A USAR (Tomando un valor entre el acero mínimo y máximo)

## ACERO INFERIOR

$As_{cal(+)}=$	4.50	cm <sup>2</sup>
$As_{col(+)}=$	4.524	cm <sup>2</sup>
<b>Barras</b>	4 $\phi$ 12	

## ACERO SUPERIOR

$As_{cal(-)}=$	1.75	cm <sup>2</sup>
$As_{col(-)}=$	2.011	cm <sup>2</sup>
<b>Barras</b>	4 $\phi$ 8	

## CÁLCULO DE MOMENTO NOMINAL, MOMENTO ÚLTIMO Y CARGA

$M_n(+)=$	3.67	T.m
$M_u=\phi M_n=$	3.3	T.m
<b>P=</b>	14.14	T

$M_n(-)=$	1.71	T.m
$M_u=\phi M_n=$	1.54	T.m

## **ANEXO 14**

**Informe del ensayo a flexión de las vigas de hormigón armado a los 28 y 56 días**



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### FLEXIÓN EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0125 - 1

Quito, 23 de noviembre de 2021

Hoja 03 de 04

#### DATOS DEL CLIENTE

**Razón social:** ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
**Dirección:** LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
**Teléfono:** 0992824575; 0979009219

#### DATOS DEL PROYECTO

**Proyecto:** ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA.

**Contratante:** \*\*\*

**Contratista:** \*\*\*

**Fiscalizador:** \*\*\*

**ELEMENTO:** VIGA HORMIGÓN ARMADO

**NORMA:** \*\*\*

No.	FECHA	DESCRIPCIÓN	FECHA	EDAD	ALTO	ANCHO	LUZ LIBRE	CARGA	MÓDULO DE ROTURA
	FÁBRICA		ROTURA	(días)	(mm)	(mm)	(mm)	(N)	(MPa)
1	2021-09-03	THM HAS - 1	2021-10-01	28	***	***	700	260400	***
2	2021-09-03	THM HAS - 2	2021-10-01	28	***	***	700	273500	***
3	2021-09-03	THM HAS - 3	2021-10-01	28	***	***	700	289300	***
4	2021-09-08	THM HACV 10 - 1	2021-10-06	28	***	***	700	197700	***
5	2021-09-08	THM HACV 10 - 2	2021-10-06	28	***	***	700	219700	***
6	2021-09-08	THM HACV 10 - 3	2021-10-06	28	***	***	700	181700	***
7	2021-09-09	THM HACV 20 - 1	2021-10-07	28	***	***	700	111700	***
8	2021-09-09	THM HACV 20 - 2	2021-10-07	28	***	***	700	139800	***
9	2021-09-09	THM HACV 20 - 3	2021-10-07	28	***	***	700	155000	***

**OBSERVACIONES:** Todos los datos del ítem de ensayo fueron proporcionados por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

Los ensayos de las muestras fueron realizados tomando como guía la norma INEN 2554, sin embargo ya que dicha norma no contempla vigas de hormigón armado, únicamente se ha reportado la carga de rotura.

ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DE LABORATORIO





ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### FLEXIÓN EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0125 - I

Quito, 23 de noviembre de 2021

Hoja 04 de 04

#### DATOS DEL CLIENTE

**Razón social:** ADRIANA SOLANGE HUERTAS; ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
**Dirección:** LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
**Teléfono:** 0992824575; 0979009219

#### DATOS DEL PROYECTO

**Proyecto:** ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA.  
**Contratante:** \*\*\*  
**Contratista:** \*\*\*  
**Fiscalizador:** \*\*\*  
**ELEMENTO:** VIGA HORMIGÓN ARMADO  
**NORMA:** \*\*\*

No.	FECHA	DESCRIPCIÓN	FECHA	EDAD	ALTO	ANCHO	LUZ LIBRE	CARGA (N)	MÓDULO DE ROTURA
	FÁBRICA		ROTURA	(días)	(mm)	(mm)	(mm)		(MPa)
1	2021-09-03	THM HS - 1	2021-10-29	56	***	***	700	270500	***
2	2021-09-03	THM HS - 2	2021-10-29	56	***	***	700	293700	***
3	2021-09-03	THM HS - 3	2021-10-29	56	***	***	700	393900	***
4	2021-09-08	THM HCV 10 - 1	2021-11-03	56	***	***	700	314400	***
5	2021-09-08	THM HCV 10 - 2	2021-11-03	56	***	***	700	269100	***
6	2021-09-08	THM HCV 10 - 3	2021-11-03	56	***	***	700	276500	***
7	2021-09-09	THM HCV 20 - 1	2021-11-04	56	***	***	700	195100	***
8	2021-09-09	THM HCV 20 - 2	2021-11-04	56	***	***	700	212200	***
9	2021-09-09	THM HCV 20 - 3	2021-11-04	56	***	***	700	252600	***

**OBSERVACIONES:** Todos los datos del ítem de ensayo fueron proporcionados por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.

Los ensayos de las muestras fueron realizados tomando como guía la norma NTE INEN 2554, sin embargo ya que dicha norma no contempla vigas de hormigón armado, únicamente se ha reportado la carga de rotura.

ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DE LABORATORIO



## **ANEXO 15**

**Informe del ensayo de permeabilidad del hormigón**



**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES, MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS



### PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN EN HORMIGÓN

INF. No. 21 - 0138 - I

Quito, 1 de diciembre de 2021

Hoja 01 de 01

#### DATOS DEL CLIENTE

**Razón social:** ADRIANA SOLANGE HUERTAS, ERICK SANTIAGO MINIGUANO  
**Dirección:** LADRÓN DE GUEVARA E11-253 Y ANDALUCÍA  
**Teléfono:** 0992824575, 0979009219

#### DATOS DEL PROYECTO

**Proyecto:** ESTUDIO COMPARATIVO DE LOS EFECTOS SOBRE LA RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL HORMIGÓN ARMADO CON CENIZA VOLCÁNICA.

**Contratante:** \*\*\*

**Contratista:** \*\*\*

**Fiscalizador:** \*\*\*

**NORMA:** UNE-EN 12390-8

No.	IDENTIFICACIÓN	FECHA DE ENSAYO	DESCRIPCIÓN	DIRECCIÓN DE APLICACIÓN DE AGUA	PROFUNDIDAD DE PENETRACIÓN MÁXIMA	FILTRACIONES DE AGUA
					(mm)	
1	THM-HS-1	2021-10-15	Probeta cilíndrica	Paralela	24,0	No
2	THM-HS-2	2021-10-15	Probeta cilíndrica	Paralela	33,0	No
3	THM-HS-3	2021-10-15	Probeta cilíndrica	Paralela	32,0	No
4	THM-HC10-1	2021-10-21	Probeta cilíndrica	Paralela	36,0	No
5	THM-HC10-2	2021-10-21	Probeta cilíndrica	Paralela	35,0	No
6	THM-HC10-3	2021-10-21	Probeta cilíndrica	Paralela	35,0	No
7	THM-HC201	2021-10-28	Probeta cilíndrica	Paralela	62,0	No
8	THM-HC202	2021-10-28	Probeta cilíndrica	Paralela	45,0	No
9	THM-HC203	2021-10-28	Probeta cilíndrica	Paralela	58,0	No
10	THM-HS-1	2021-11-12	Probeta cilíndrica	Paralela	21,0	No
11	THM-HS-2	2021-11-12	Probeta cilíndrica	Paralela	19,0	No
12	THM-HS-3	2021-11-12	Probeta cilíndrica	Paralela	21,0	No
13	THS-HCV10-1	2021-11-18	Probeta cilíndrica	Paralela	40,0	No
14	THS-HCV10-2	2021-11-18	Probeta cilíndrica	Paralela	33,0	No
15	THS-HCV10-3	2021-11-18	Probeta cilíndrica	Paralela	33,0	No
16	THS-HCV20-1	2021-11-25	Probeta cilíndrica	Paralela	46,0	No
17	THS-HCV20-2	2021-11-25	Probeta cilíndrica	Paralela	51,0	No
18	THS-HCV20-3	2021-11-25	Probeta cilíndrica	Paralela	50,0	No

**OBSERVACIONES:** Todos los datos del ítem de ensayo (fecha de fabricación, identificación) son proporcionadas por el cliente por lo que involucra su total responsabilidad.  
Los resultados reportados en el presente informe corresponden únicamente a los ítems ensayados.  
Los ensayos fueron ejecutados en probetas cilíndricas de dimensiones (10 x 20) cm.

  
ING. MERCEDES VILLACÍS  
JEFE DEL LABORATORIO



## **ANEXO 16**

**Fotografías de los ensayos realizados**



## Elaboración y curado de probetas de hormigón

### Preparación de materiales



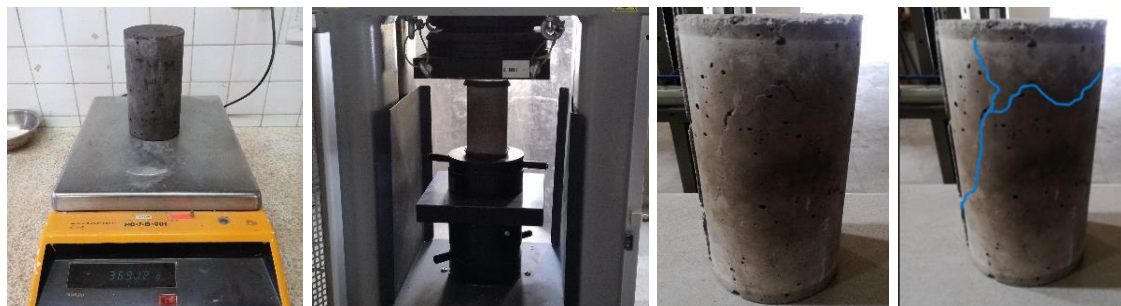
### Fundición de vigas y cilindros



### Curado de especímenes



### Ensayo de compresión simple del hormigón



### Ensayo de módulo de elasticidad





## Ensayo a flexión de vigas



### Sección de falla



## Ensayo de permeabilidad

