



**Dosificación de un hormigón para una resistencia de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ , con la inclusión de ceniza volcánica sin el uso de aditivos**

Cayo Toaquiza, Rebeca Luzmila; Padilla Guerrero, María Fernanda; Pantoja Santillán, Santiago Gabriel y

Pinto Berrezueta, Israel Fernando

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Civil

Trabajo de Integración Curricular, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Ing. Aldás Vaca, Maribel Alexandra Mgs.

Ing. Durán Carrillo, José Ricardo Mgs.

Sangolquí, 10 de septiembre de 2021



## Document Information

---

Analyzed document	Incidencia_ceniza_volcánica_Cayo_Padilla_Pantoja_Pinto.pdf (D112125611)
Submitted	9/6/2021 2:50:00 PM
Submitted by	
Submitter email	biblioteca@espe.edu.ec
Similarity	2%
Analysis address	ilbbioteca.GDC@analysis.urkund.com

Firma



.....  
**Ing. Aldás Vaca, Maribel Alexandra Mgs.**  
C.C.: 0913158440

Firma



.....  
**Ing. Durán Carrillo, José Ricardo Mgs.**  
C.C.: 1706351192





**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN**

**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Nosotros, **Cayo Toaquiza, Rebeca Luzmila; Padilla Guerrero, María Fernanda; Pantoja Santillán, Santiago Gabriel y Pinto Berrezueta, Israel Fernando**, con cédulas de ciudadanía N°. **1726212036, 1718522392, 1004368351 y 1725569709**, respectivamente; declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de Integración Curricular **“Dosificación de un hormigón para una resistencia de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ , con la inclusión de ceniza volcánica sin el uso de aditivos”**, es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 10 de septiembre del 2021**

Firma

**Cayo Toaquiza, Rebeca Luzmila**  
C.C.: 1726212036

Firma

**Padilla Guerrero, María Fernanda**  
C.C.: 1718522392

Firma

**Pantoja Santillán, Santiago Gabriel**  
C.C.: 1004368351

Firma

**Pinto Berrezueta, Israel Fernando**  
C.C.: 1725569709



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y DE LA CONSTRUCCIÓN**  
**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Nosotros **Cayo Toaquiza, Rebeca Luzmila; Padilla Guerrero, María Fernanda; Pantoja Santillán, Santiago Gabriel y Pinto Berrezueta, Israel Fernando**, con cédulas de ciudadanía N°. **1726212036, 1718522392, 1004368351 y 1725569709**, respectivamente, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de Integración Curricular “**Dosificación de un hormigón para una resistencia de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ , con la inclusión de ceniza volcánica sin el uso de aditivos**”, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

**Sangolquí, 10 de septiembre del 2021**

Firma

.....  
**Cayo Toaquiza, Rebeca Luzmila**  
C.C.: 1726212036

Firma

.....  
**Padilla Guerrero, María Fernanda**  
C.C.: 1718522392

Firma

.....  
**Pantoja Santillán, Santiago Gabriel**  
C.C.: 1004368351

Firma

.....  
**Pinto Berrezueta, Israel Fernando**  
C.C.: 1725569709

## Dedicatoria

*Con mucho amor dedicado a mis padres Juan y María, quienes, con su amor incondicional, paciencia y esfuerzo han sido mi pilar fundamental a lo largo de toda mi carrera universitaria y a lo largo de mi vida. Gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía.*

*A mis hermanos Juan, Blanquita, Edgar, Miriam, Geovanny, Mika y mi sobrina Shanik, quienes han sido mi fuente de inspiración para seguir luchando día a día con firmeza. Gracias por estar conmigo en todo momento y darme los mejores años de mi vida, llenos de alegría y amor.*

*Finalmente, a mis amigos por apoyarme cuando más los necesité, por depositar en mí su confianza y ser ese granito de arena que complementa mi vida.*

***Rebeca Luzmila Cayo Toaquiza***

*A mi madre Zoila y a mi Tío Hugo, por ser la luz que ilumina mi vida, quienes con su amor, paciencia, dedicación y esfuerzo me impulsan a ser mejor cada día, por enseñarme que rendirme no es una opción y por inculcarme el amor por lo que uno hace.*

*A mi padre Hermes y a mi familia, por ser mi inspiración, por fortalecer mis valores como ser humano, y primordialmente por el apoyo y cariño brindado a lo largo de estos años.*

*A Ricardo, por ser mi complemento, por motivarme día a día, por confiar en mí, por tu apoyo, paciencia y amor.*

*A mis grandes amigos, por su cariño, compañía, por compartir la misma pasión por nuestra profesión y por ser un refugio en los altos y bajos de la carrera universitaria.*

***María Fernanda Padilla Guerrero***

*A mis padres Iván y Lolita por su amor incondicional.*

*A mi hermana Andú por abrir el camino y ser un referente, soporte y amiga en este trayecto de vida.*

*A mis amigos por permitirme estar a su lado.*

***Santiago Gabriel Pantoja Santillán***

*A mis padres, quienes siempre han estado a mi lado y depositaron su confianza en mí, por haberme brindado todo su apoyo incondicional durante este trayecto de vida, enseñándome sobre perseverancia, constancia y dedicación, ayudándome a conseguir mis metas y sueños.*

*A mi hermana quien me ha acompañado y apoyado en mi vida personal y estudiantil, siendo una motivación para salir adelante. A mi familia por haberme apoyado con sus palabras de aliento e impulsarme a lograr mis objetivos, siempre compartiendo grandes consejos de vida.*

*A mis mejores amigos, los que me han acompañado a lo largo de esta etapa de mi vida, quienes me han brindado su cariño y apoyo para salir adelante, con los cuales hemos compartido momentos extraordinarios, un viaje lleno de alegrías y tristezas, éxitos y fracasos, sobre todo un viaje lleno de aprendizaje.*

***Israel Fernando Pinto Berrezueta***

## Agradecimiento

*A nuestros padres por ser los grandes maestros de vida que nos enseñaron y guiaron a ser cada vez mejores personas.*

*A la prestigiosa Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, la cual abre sus puertas a jóvenes como nosotros, preparándonos para un futuro competitivo y formándonos como personas de bien.*

*A nuestros docentes, a quienes les debemos gran parte de nuestros conocimientos, gracias a su paciencia y enseñanza.*

*Un agradecimiento especial a nuestros tutores, la Ing. Maribel Aldás y el Ing. Ricardo Durán, quienes nos supieron guiar y apoyar en el desempeño de este proyecto.*

*Al Ing. Juan Haro por ser un excelente profesional, por acompañarnos a lo largo de la realización de este proyecto compartiéndonos sus conocimientos y brindándonos su amistad y confianza.*

*Al personal administrativo de REVTON S.A, quienes estuvieron prestos a ayudarnos y brindarnos el material necesario para realizar nuestro proyecto.*

***Rebeca Cayo, Ma. Fernanda Padilla, Gabriel Pantoja, Fernando Pinto***

## Índice de contenido

<b>Certificación .....</b>	<b>3</b>
<b>Responsabilidad de autoría .....</b>	<b>4</b>
<b>Autorización de publicación .....</b>	<b>4</b>
<b>Dedicatoria.....</b>	<b>5</b>
<b>Agradecimiento .....</b>	<b>8</b>
<b>Índice de contenido .....</b>	<b>9</b>
<b>Índice de tablas.....</b>	<b>15</b>
<b>Índice de figuras .....</b>	<b>20</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>23</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>24</b>
<b>Capítulo I.....</b>	<b>25</b>
<b>Generalidades.....</b>	<b>25</b>
Planteamiento del problema .....	25
Antecedentes .....	26
Justificación e importancia.....	27
Objetivos.....	28
Objetivo general.....	28
Objetivos específicos.....	28
<b>Capítulo II.....</b>	<b>29</b>
<b>Marco Teórico .....</b>	<b>29</b>
Puzolanas como materiales conglomerantes.....	29
Definición .....	29
Tipos de puzolanas.....	30

	10
Puzolanas naturales .....	30
Puzolanas artificiales .....	31
Ceniza volcánica .....	32
Características del Volcán Sangay .....	33
Propiedades mineralógicas de la ceniza .....	34
El hormigón en el Ecuador .....	39
Componentes .....	40
Cemento .....	40
Agregado Grueso .....	42
Agregado Fino. ....	43
Agua .....	44
Fabricación del hormigón .....	44
Materiales utilizados .....	46
Ensayos para caracterizar los materiales .....	49
Ensayos a realizar durante la fundición .....	50
Asentamiento .....	50
Temperatura .....	51
Curado del hormigón .....	52
Resistencia a la compresión .....	53
Módulo de elasticidad .....	55
Determinación del módulo de elasticidad .....	57
Coeficiente de Poisson .....	58
<b>Capítulo III .....</b>	<b>60</b>
<b>Metodología .....</b>	<b>60</b>

Caracterización del cemento.....	60
Requisitos específicos de la norma NTE INEN 2380:2011 .....	62
Propiedades físicas .....	62
Especificaciones técnicas de Holcim Fuerte Tipo GU .....	64
Requisitos físicos. ....	64
Resistencia .....	65
Propiedades físicas y mecánicas de los agregados fino y grueso del hormigón .....	66
Ensayos de laboratorio de agregado fino.....	66
Peso específico y absorción.....	66
Masa unitaria del agregado fino .....	70
Masa unitaria suelta.....	70
Masa unitaria compactada.....	70
Granulometría de agregado fino.....	72
Módulo de finura. ....	73
Determinación de contenido de humedad en arena .....	74
Resultados obtenidos.....	75
Ensayos de laboratorio de agregado grueso .....	78
Peso específico y absorción.....	78
Masa unitaria del agregado grueso .....	81
Masa unitaria suelta.....	81
Masa unitaria compactada.....	82
Granulometría de agregado grueso .....	83
Determinación de contenido de humedad en el ripio.....	84
Abrasión.....	85

Resultados obtenidos.....	88
Ensayos de laboratorio de ceniza volcánica .....	92
Peso específico y absorción.....	92
Determinación del contenido de humedad.....	93
Diseño de hormigón para probetas sin adición de ceniza, con resistencias $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .....	94
Resumen de la caracterización de los agregados. ....	96
Elección del asentamiento .....	96
Elección del tamaño máximo nominal del agregado grueso (TMN).....	98
Estimación del contenido de aire .....	99
Cantidad de agua de mezclado .....	100
Coeficiente de variación para diferentes controles.....	103
Resistencia de diseño ( $f_{cr}$ ) .....	104
Relación agua/cemento .....	107
Contenido de cemento.....	109
Volumen de agregado grueso .....	110
Contenido de agregado fino.....	114
Cálculo de proporciones.....	115
Diseño de mezcla para las probetas de análisis .....	117
Ajuste por humedad de los agregados.....	120
Resumen de diseño de probetas sin ceniza.....	123
Resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	123
Resistencia $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .....	124
Diseño de hormigón para probetas con ceniza .....	125

<b>Capítulo IV.....</b>	<b>126</b>
<b>Resultados.....</b>	<b>126</b>
Datos en fundición .....	126
Resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	126
Resistencia $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .....	128
Valores y rangos de asentamiento para fundiciones $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y $240 \text{ kg/cm}^2$ .....	129
Análisis de esfuerzo a la compresión del hormigón. ....	130
Análisis de esfuerzo a la compresión del hormigón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	130
Resistencia del hormigón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ sin ceniza .....	130
Resistencia del hormigón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con incidencia de la ceniza al 5% .....	133
Resistencia del hormigón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con incidencia de la ceniza al 10% .....	135
Resistencia del hormigón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con incidencia de la ceniza al 15% .....	138
Comparación de esfuerzo a la compresión en cilindros de hormigón con y sin ceniza volcánica para $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	140
Comparación final de resistencias para un $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .....	143
Análisis de esfuerzo a la compresión del hormigón $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .....	146
Resistencia del hormigón $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ sin ceniza .....	146
Resistencia del hormigón $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ con incidencia de la ceniza al 5%. ....	148
Resistencia del hormigón $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ con incidencia de la ceniza al 10% .....	151
Resistencia del hormigón $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ con incidencia de la ceniza al 15% .....	153
Comparación de esfuerzo a la compresión en cilindros de hormigón con y sin ceniza volcánica para $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .....	156
Comparación final de resistencias para un $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .....	159
Análisis del módulo de elasticidad del hormigón convencional con y sin ceniza volcánica....	161

Cálculo modelo del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson. ....	161
Resultados comparativos para módulos de elasticidad experimentales y teóricos con un f'c=210 kg/cm <sup>2</sup> .....	165
Resultados comparativos para módulos de elasticidad experimentales y teóricos con un f'c=240 kg/cm <sup>2</sup> .....	167
Análisis de Precios Unitarios .....	169
Rubros de hormigón f'c=210 kg/cm <sup>2</sup> con y sin incidencia de ceniza .....	169
Rubros de hormigón f'c=240 kg/cm <sup>2</sup> con y sin incidencia de ceniza .....	177
Resumen de costo – beneficio .....	185
<b>Capítulo V.....</b>	<b>187</b>
<b>Conclusiones y Recomendaciones.....</b>	<b>187</b>
Conclusiones .....	187
Recomendaciones .....	190
<b>Referencias.....</b>	<b>192</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>198</b>

### Índice de tablas

Tabla 1	<i>Resultados del análisis químico – elemental de la muestra 1 de ceniza</i> .....	35
Tabla 2	<i>Resultados del análisis químico – elemental de la muestra 2 de ceniza</i> .....	36
Tabla 3	<i>Resultados del análisis químico – elemental de la muestra 3 de ceniza</i> .....	38
Tabla 4	<i>Tipos de fallas de probetas de hormigón</i> .....	54
Tabla 5	<i>Normas según los materiales cementantes</i> .....	60
Tabla 6	<i>Especificaciones del cemento según las aplicaciones constructivas</i> .....	61
Tabla 7	<i>Requisitos físicos para cada tipo de cemento</i> .....	62
Tabla 8	<i>Especificaciones técnicas del cemento Holcim Tipo GU</i> .....	64
Tabla 9	<i>Datos de pesos de picnómetro y agregado fino</i> .....	75
Tabla 10	<i>Cálculo de densidades y absorción del agregado fino</i> .....	75
Tabla 11	<i>Porcentajes de material fino retenido y pasante por cada tamiz</i> .....	76
Tabla 12	<i>Límites de gradación del árido fino</i> .....	76
Tabla 13	<i>Gradación de la muestra para partículas menores a 37.5 mm</i> .....	87
Tabla 14	<i>Datos de pesos de material de agregado grueso</i> .....	88
Tabla 15	<i>Cálculos de densidades y absorción agregado grueso</i> .....	89
Tabla 16	<i>Porcentajes de material grueso retenido y pasante por cada tamiz</i> .....	89
Tabla 17	<i>Límites granulométricos del árido grueso</i> .....	90
Tabla 18	<i>Datos de abrasión del agregado grueso</i> .....	91
Tabla 19	<i>Datos de pesos de picnómetro y ceniza volcánica</i> .....	92
Tabla 20	<i>Cálculo de densidades y porcentaje de absorción de la ceniza volcánica</i> .....	93
Tabla 21	<i>Contenido de humedad de la ceniza volcánica</i> .....	93

Tabla 22 <i>Caracterización de los agregados</i> .....	96
Tabla 23 <i>Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción</i> .....	97
Tabla 24 <i>Valores recomendados del TMN de acuerdo con los elementos estructurales</i> .....	98
Tabla 25 <i>Valores recomendados para el contenido de aire en el concreto para varios grados de exposición</i> .....	99
Tabla 26 <i>Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado</i> .....	100
Tabla 27 <i>Interpolación de cantidad de agua (kg) para un asentamiento de 5 cm</i> .....	101
Tabla 28 <i>Interpolación de cantidad de agua (kg) para un asentamiento de 8 cm</i> .....	102
Tabla 29 <i>Interpolación de cantidad de agua (kg) para un asentamiento de 7,50 cm</i> .....	102
Tabla 30 <i>Grado de control del hormigón según la clase de operación</i> .....	103
Tabla 31 <i>Relación entre la resistencia a la compresión y la relación agua cemento (a/c) máxima permisible</i> .....	107
Tabla 32 <i>Interpolación de relación (a/c) para un fcr de 240 kg/cm<sup>2</sup></i> .....	109
Tabla 33 <i>Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto (b/b<sub>o</sub>)</i> .....	111
Tabla 34 <i>Interpolación de relación b/b<sub>o</sub> para un tamaño máximo nominal de 13mm</i> .....	112
Tabla 35 <i>Interpolación de relación b/b<sub>o</sub> para un tamaño máximo nominal de 20mm</i> .....	113
Tabla 36 <i>Interpolación de relación b/b<sub>o</sub> para un módulo de finura de 2,934</i> .....	113
Tabla 37 <i>Cálculo del volumen a fundir en m<sup>3</sup></i> .....	117
Tabla 38 <i>Volumen de cada material para las fundiciones de f'c = 210 kg/cm<sup>2</sup></i> .....	118
Tabla 39 <i>Pesos secos de cada material para fundiciones de f'c = 210 kg/cm<sup>2</sup></i> .....	118
Tabla 40 <i>Volumen de cada material para las fundiciones de f'c = 240 kg/cm<sup>2</sup></i> .....	119
Tabla 41 <i>Pesos secos de cada material para fundiciones de f'c = 240 kg/cm<sup>2</sup></i> .....	120

Tabla 42	<i>Agua retirada para los pesos húmedos de los agregados de <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math></i>	121
Tabla 43	<i>Pesos húmedos de cada material para fundiciones de <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math></i>	121
Tabla 44	<i>Agua retirada para los pesos húmedos de los agregados de <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math></i>	122
Tabla 45	<i>Pesos húmedos de cada material para fundiciones de <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math></i>	122
Tabla 46	<i>Tabla de resumen de diseño de probetas sin adición de ceniza <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math></i>	123
Tabla 47	<i>Tabla de resumen de diseño de probetas sin adición de ceniza <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math></i>	124
Tabla 48	<i>Parámetros para fundición <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math></i>	126
Tabla 49	<i>Parámetros para fundición <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math></i>	128
Tabla 50	<i>Valores de asentamiento y rangos de tolerancia</i>	129
Tabla 51	<i>Datos de las probetas de hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 0 % de ceniza</i>	130
Tabla 52	<i>Tabla resumen, resistencias <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 0 % de ceniza</i>	132
Tabla 53	<i>Datos de las probetas de hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 5 % de ceniza</i>	133
Tabla 54	<i>Tabla resumen, resistencias <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 5 % de ceniza</i>	134
Tabla 55	<i>Datos de las probetas de hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 10 % de ceniza</i>	135
Tabla 56	<i>Tabla resumen, resistencias <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 10 % de ceniza</i>	137
Tabla 57	<i>Datos de las probetas de hormigón <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 15 % de ceniza</i>	138
Tabla 58	<i>Tabla resumen, resistencias <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 15 % de ceniza</i>	139
Tabla 59	<i>Comparación de resistencia <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 0% y 5% de contenido de ceniza</i>	140
Tabla 60	<i>Comparación de resistencia <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 0% y 10% de contenido de ceniza</i>	141
Tabla 61	<i>Comparación de resistencia <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 0% y 15% de contenido de ceniza</i>	142
Tabla 62	<i>Comparación de resistencia <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 0%, 5%, 10% y 15% de contenido de ceniza</i>	144
Tabla 63	<i>Datos de las probetas de hormigón <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 0 % de ceniza</i>	146

Tabla 64	<i>Tabla resumen, resistencias <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 0 % de ceniza</i>	147
Tabla 65	<i>Datos de las probetas de hormigón <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 5 % de ceniza</i>	148
Tabla 66	<i>Tabla resumen, resistencias <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 5 % de ceniza</i>	150
Tabla 67	<i>Datos de las probetas de hormigón <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 10 % de ceniza</i>	151
Tabla 68	<i>Tabla resumen, resistencias <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 10 % de ceniza</i>	152
Tabla 69	<i>Datos de las probetas de hormigón <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 15 % de ceniza</i>	153
Tabla 70	<i>Tabla resumen, resistencias <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 15 % de ceniza</i>	155
Tabla 71	<i>Comparación de resistencia <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 0% y 5% de contenido de ceniza</i>	156
Tabla 72	<i>Comparación de resistencia <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 0% y 10% de contenido de ceniza</i>	157
Tabla 73	<i>Comparación de resistencia <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 0% y 15% de contenido de ceniza</i>	158
Tabla 74	<i>Comparación de resistencia <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 0%, 5%, 10% y 15% de contenido de ceniza</i>	159
Tabla 75	<i>Datos del cilindro 11 <math>f'c=210 \text{ kg/cm}^2</math> con 0% de ceniza</i>	161
Tabla 76	<i>Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson del cilindro 11 para un <math>f'c=210 \text{ kg/cm}^2</math> sin incidencia de ceniza. Análisis de <math>\sigma_1</math> y <math>\epsilon_1</math></i>	162
Tabla 77	<i>Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson del cilindro 11 para un <math>f'c=210 \text{ kg/cm}^2</math> sin incidencia de ceniza. Análisis de <math>\epsilon_2</math> y <math>\epsilon_2</math></i>	163
Tabla 78	<i>Datos para módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson</i>	164
Tabla 79	<i>Resumen del módulo de elasticidad para dosificación <math>f'c=210 \text{ kg/cm}^2</math></i>	165
Tabla 80	<i>Resumen del módulo de elasticidad para dosificación <math>f'c=240 \text{ kg/cm}^2</math></i>	167
Tabla 81	<i>Rubro de Hormigón simple <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math></i>	169
Tabla 82	<i>Rubro de Hormigón simple <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 5% de ceniza adicional</i>	171
Tabla 83	<i>Rubro de Hormigón simple <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con el 10% de ceniza adicional</i>	173

Tabla 84 <i>Rubro de Hormigón simple <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 15% de ceniza adicional</i> .....	175
Tabla 85 <i>Rubro de Hormigón simple <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math></i> .....	177
Tabla 86 <i>Rubro de Hormigón simple <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 5% de ceniza adicional</i> .....	179
Tabla 87 <i>Rubro de Hormigón simple <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con el 10% de ceniza adicional</i> .....	181
Tabla 88 <i>Rubro de Hormigón simple <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 15% de ceniza adicional</i> .....	183
Tabla 89 <i>Cuadro comparativo del análisis costo-beneficio para un hormigón <math>f'c=210 \text{ kg/cm}^2</math></i> ..	185
Tabla 90 <i>Cuadro comparativo del análisis costo-beneficio para un hormigón <math>f'c=240 \text{ kg/cm}^2</math></i> ..	186

## Índice de figuras

Figura 1 <i>Proceso de formación de cenizas volantes</i> .....	31
Figura 2 <i>Emisión de gases del volcán Sangay</i> .....	33
Figura 3 <i>Espectro EDS de la muestra 1 de ceniza</i> .....	36
Figura 4 <i>Espectro EDS de la muestra 2 de ceniza</i> .....	37
Figura 5 <i>Espectro EDS de la muestra 3 de ceniza</i> .....	39
Figura 6 <i>Cemento Holcim fuerte tipo GU</i> .....	41
Figura 7 <i>Muestra de agregado grueso</i> .....	42
Figura 8 <i>Muestra de agregado fino</i> .....	43
Figura 9 <i>Fabricación de hormigón</i> .....	45
Figura 10 <i>Agregado grueso de ¾" provenientes de la cantera de Pintag</i> .....	46
Figura 11 <i>Agregado fino utilizado en el proyecto</i> .....	46
Figura 12 <i>Sacos de cemento empleados en el proyecto. Cemento Holcim fuerte Tipo GU</i> .....	47
Figura 13 <i>Ceniza proveniente del Volcán Sangay</i> .....	48
Figura 14 <i>Prueba de asentamiento – cono de Abrams</i> .....	51
Figura 15 <i>Toma de temperatura en hormigón fresco</i> .....	52
Figura 16 <i>Curva de esfuerzo – deformación</i> .....	55
Figura 17 <i>Curva esfuerzo – deformación específica del hormigón</i> .....	56
Figura 18 <i>Curva esfuerzo – deformación por el criterio de la secante</i> .....	58
Figura 19 <i>Comparativo de resistencia del cemento Holcim fuerte Tipo GU</i> .....	65
Figura 20 <i>Agregado fino en saturación</i> .....	67
Figura 21 <i>Verificación del estado del agregado fino</i> .....	68

Figura 22	<i>Colocación del picnómetro y la bomba de vacíos</i>	69
Figura 23	<i>Peso del agregado fino compactado</i>	71
Figura 24	<i>Uso del tamizador automático</i>	73
Figura 25	<i>Límites de gradación para áridos finos</i>	77
Figura 26	<i>Remoción de humedad superficial del agregado grueso</i>	79
Figura 27	<i>Enrasado del molde metálico</i>	82
Figura 28	<i>Juego de tamices con agregado grueso</i>	83
Figura 29	<i>Retirada del material y las cargas abrasivas de la Máquina de los Ángeles</i>	86
Figura 30	<i>Límites de gradación para áridos gruesos</i>	91
Figura 31	<i>Secuencia de pasos para la dosificación de mezclas</i>	95
Figura 32	<i>Resistencia promedio de diseño (<math>f'c</math>) a los 28 días, para diferentes valores de <math>f'c</math> y coeficientes de variación</i>	104
Figura 33	<i>Valor de <math>f'c</math> para resistencia de <math>210 \text{ kg/cm}^2</math></i>	105
Figura 34	<i>Valor de <math>f'c</math> para resistencia de <math>240 \text{ kg/cm}^2</math></i>	106
Figura 35	<i>Curva de resistencia a la compresión y la relación <math>a/c</math></i>	108
Figura 36	<i>Curva de resistencia <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 0 % de ceniza</i>	132
Figura 37	<i>Curva de resistencia <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 5 % de ceniza</i>	135
Figura 38	<i>Curva de resistencia <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 10 % de ceniza</i>	137
Figura 39	<i>Curva de resistencia <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 15 % de ceniza</i>	140
Figura 40	<i>Curva de resistencia comparativa, <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 0 % y 5 % de ceniza</i>	141
Figura 41	<i>Curva de resistencia comparativa, <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 0 % y 10 % de ceniza</i>	142
Figura 42	<i>Curva de resistencia comparativa, <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 0 % y 15 % de ceniza</i>	143

Figura 43 <i>Curva de resistencia comparativa, <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> con 0%, 5%, 10% y 15% de incidencia de ceniza</i> .....	145
Figura 44 <i>Curva de resistencia <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 0 % de ceniza</i> .....	148
Figura 45 <i>Curva de resistencia <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 5 % de ceniza</i> .....	150
Figura 46 <i>Curva de resistencia <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 10 % de ceniza</i> .....	153
Figura 47 <i>Curva de resistencia <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 15 % de ceniza</i> .....	155
Figura 48 <i>Curva de resistencia comparativa, <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 0 % y 5 % de ceniza</i> .....	156
Figura 49 <i>Curva de resistencia comparativa, <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 0 % y 10 % de ceniza</i> .....	157
Figura 50 <i>Curva de resistencia comparativa, <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 0 % y 15 % de ceniza</i> .....	158
Figura 51 <i>Curva de resistencia comparativa, <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con 0%, 5%, 10% y 15 % de incidencia de ceniza</i> .....	160
Figura 52 <i>Módulos de elasticidad vs % de ceniza para dosificación <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math></i> .....	166
Figura 53 <i>Módulos de elasticidad vs % de ceniza para dosificación <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math></i> .....	167

## Resumen

El propósito del presente proyecto de investigación es realizar la evaluación del comportamiento del hormigón diseñado, con la adición de puzolana de origen volcánico en porcentaje al cemento de la mezcla, buscando una óptima relación de proporciones de sus componentes para aumentar sus capacidades mecánicas, dando como resultado mejores valores de resistencia y módulo de elasticidad. Se utiliza materiales pétreos: ripio de la cantera de Pintag y arena de la concesión minera Rancho La Paz localizada en el kilómetro 14 de la vía Alóag – Santo Domingo de los Tsáchilas y la ceniza procedente del volcán Sangay ubicado en la provincia de Morona Santiago, Ecuador. Este material puzolánico será adicionado en porcentajes del 5%, 10% y 15% con respecto al peso del cemento, el cual está definido mediante una dosificación convencional del hormigón. Para realizar el análisis de la resistencia y módulo de elasticidad del hormigón, se requiere la elaboración de probetas con una previa caracterización de los materiales a utilizar, así como la correcta dosificación para las resistencias establecidas ( $210 \text{ kg/cm}^2$  y  $240 \text{ kg/cm}^2$ ). Estas probetas serán ensayadas a los 4, 7, 14 y 28 días, para este último ensayo se utilizan 6 muestras con el objetivo de obtener datos más confiables para su análisis.

Con el análisis de los resultados obtenidos por medio de un método comparativo entre las muestras con y sin adición de ceniza, se logró establecer una relación de los valores de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad, determinando cuál es el porcentaje óptimo de adición de puzolana volcánica y su nivel de incidencia con un hormigón que contenga únicamente cemento como material aglomerante.

### Palabras Claves:

- **DOSIFICACIÓN**
- **CENIZA VOLCÁNICA**
- **RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN**

### **Abstract**

The purpose of this research project is to evaluate the behavior of the concrete designed with the addition of pozzolan of volcanic origin as a percentage of the cement in the mix, seeking an optimal ratio of proportions of its components to increase its mechanical capacities, resulting in better values of strength and modulus of elasticity. Stone materials are used: gravel from the Pintag quarry and sand from the Rancho La Paz mining concession located at kilometer 14 of the Alóag - Santo Domingo de los Tsáchilas road and ash from the Sangay volcano located in the province of Morona Santiago, Ecuador. This pozzolanic material will be added in percentages of 5%, 10% and 15% with respect to the weight of cement, which is defined by a conventional dosage of concrete.

In order to analyze the strength and modulus of elasticity of the concrete, it is necessary to prepare specimens with a previous characterization of the materials to be used, as well as the correct dosage for the established strengths (210 kg/cm<sup>2</sup> and 240 kg/cm<sup>2</sup>). These specimens will be tested at 4, 7, 14 and 28 days; for this last test, 6 samples will be used in order to obtain more reliable data for analysis.

With the analysis of the results obtained by means of a comparative method between the samples with and without ash addition, it was possible to establish a relationship between the values of compressive strength and modulus of elasticity, determining the optimum percentage of volcanic pozzolan addition and its level of incidence with a concrete containing only cement as a binding material.

#### **Keywords:**

- **DOSAGE**
- **VOLCANIC ASH**
- **COMPRESSIVE STRENGTH**

## Capítulo I

### Generalidades

#### Planteamiento del problema

Actualmente, el sector de la construcción se ha visto en la necesidad de elaborar nuevas formas de fabricar hormigón con diferentes características para solventar las necesidades presentes en los diversos requerimientos técnicos en obras civiles. Entre los parámetros variables que se puede optar, está la utilización de nuevos materiales llamados complementarios o suplementarios en el hormigón, como por ejemplo: el uso de puzolanas de origen volcánico, cuyo principal valor radica en la aptitud presente para formar productos hidratados con propiedades conglomerantes, las cuales le hacen un componente con bastante valor sobre la mezcla de concreto al poder utilizarlas como aditivo o como suplemento en el mismo (Castro Solano, 2020).

La relevancia de abordar la adición de minerales puede entenderse desde una perspectiva ingenieril al mejorar el desempeño del hormigón en algunos aspectos, como también desde la perspectiva ambiental, al permitir una reducción del porcentaje de clínker en el cemento y de las elevadas emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a su proceso de manufactura. El proceso de fabricación del cemento se constituye hoy como una de las principales fuentes industriales de emisión de dióxido de carbono (Castro Solano, 2020).

Bajo este contexto, el presente proyecto de investigación plantea el análisis comparativo de probetas diseñadas con dosificaciones de hormigón, que añade porcentajes de puzolana de origen volcánico respecto al peso del cemento; con la finalidad de poder establecer un aumento en la resistencia a la compresión. Adicionalmente, se evalúan los valores de módulos de elasticidad mediante probetas de hormigón. Dichas propiedades ayudarán a

establecer la viabilidad técnica de la utilización de las dosificaciones con valores de incremento de puzolana de origen volcánico (Castro Solano, 2020).

### **Antecedentes**

El uso del hormigón como elemento constructivo ha estado presente en estructuras y edificaciones desde los albores del Imperio Romano hasta nuestros días. Paralelamente con el hormigón han ido evolucionando los elementos básicos de las obras en las que se ha utilizado este material, la puesta en obra del mismo, los ensayos que se realizan sobre este para asegurar su calidad y los aditivos utilizados en su elaboración. En la actualidad son muchos los factores que intervienen en el resultado de la resistencia final del material, destacándose: la temperatura ambiente en el momento del hormigonado, los aditivos empleados y los ensayos a los que se somete el hormigón (Nistal Cordero et al., 2012).

El mercado mundial de cemento está en constante expansión, incluyendo al Ecuador; por tanto, para mejorar los estándares de construcción en el país es importante avanzar en la aplicación de nuevos materiales constructivos, principalmente en las variedades de concretos, que respondan a las necesidades de las obras de infraestructura que se presentan actualmente (Cabrera, 2018).

La Cordillera Central y la Cordillera Occidental están constituidas por rocas volcano-sedimentarias y magmáticas que se caracterizan por tener buenas propiedades en lo referente a resistencia, como materiales de construcción. Junto con la piedra pómez, puzolanas, las rocas carbonatadas y el mármol son los yacimientos y depósitos más importantes del Ecuador (Castro Solano, 2020).

### **Justificación e importancia**

El empleo de una menor cantidad de cemento Portland y mayor cantidad de materiales con características puzolánicas de origen volcánico durante la elaboración de hormigón desempeña un papel importante en el desarrollo de industria de la construcción (Cuetara et al., 2020)

Cada vez, la incorporación de los Materiales Cementantes Suplementarios (MCS), son frecuentes en las mezclas de hormigones basados en cemento puzolánico, ya que dichos materiales mejoran las propiedades mecánicas y de durabilidad. El uso apropiado de puzolanas naturales beneficia de manera funcional las prestaciones del hormigón, además de su desempeño y durabilidad (Rivera López, 2013).

Por otro lado, las cenizas volcánicas debido a la forma esférica de sus partículas poseen la capacidad de reducir el agua de mezclado y mejorar la trabajabilidad de la mezcla (Cuetara et al., 2020).

Los parámetros convencionales para establecer la dosificación del hormigón no toman en consideración las propiedades físico – químicas que posee la ceniza volcánica para alcanzar una resistencia estimada del hormigón. Debido a lo antes mencionado, al determinar una proporción óptima de adición de ceniza (respecto al peso de cemento) se permite experimentar una variación en el manejo común de la metodología para los materiales convencionales del hormigón: arena, ripio, agua y cemento.

Además, la ceniza al ser un material que se encuentra de forma natural no requiere de un proceso industrializado para su producción, a comparación del cemento hidráulico que debido a su método de elaboración, lo convierte en el material con mayor costo dentro de la dosificación del concreto (Galeas Arias & Guzmán Chávez, 2019).

## **Objetivos**

### ***Objetivo general***

Determinar la dosificación del cemento, áridos gruesos, áridos finos, ceniza volcánica y agua, para varias resistencias de hormigones sin aditivos, así como la determinación del módulo de elasticidad  $E$  para cada uno de ellos, con materiales pétreos, ripio de la cantera de Pintag y arena de la concesión minera Rancho La Paz localizada en el kilómetro 14 de la vía Alóag – Santo Domingo de los Tsáchilas.

### ***Objetivos específicos***

- Determinar las características físico-mecánicas de los materiales pétreos.
- Determinar las características físico-mecánicas de la ceniza volcánica.
- Determinar la dosificación de los diferentes componentes del hormigón, incluida la ceniza volcánica, al 0%, 5%, 10%, 15%; para una resistencia de  $f'c=210\text{kg/cm}^2$  y  $f'c=240\text{kg/cm}^2$ .
- Determinar el módulo de Elasticidad y el módulo de resistencia final a la rotura, para cada uno de los porcentajes de ceniza especificados.

## Capítulo II

### Marco Teórico

#### **Puzolanas como materiales conglomerantes**

El uso de materiales cementantes es muy antiguo. Los griegos y romanos empleaban caliza calcinada y posteriormente, aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra triturada o tejas quebradas; este es conocido como el primer concreto de la historia (Rivera López, 2013).

La sílice activa y la alúmina que se encuentran naturalmente en las cenizas se combinaban con la cal para producir lo que fue conocido como cemento puzolánico, proveniente del nombre del pueblo de Puzzuoli, donde se encontraron por primera vez esas cenizas volcánicas. El nombre de cemento puzolánico se utiliza hasta nuestros días para describir cementos obtenidos de moler materiales naturales a temperatura normal (Salazar, 2002).

Algunas de las estructuras romanas en las cuales la mampostería se unía con morteros a base de puzolanas, tales como el Coliseo de Roma y el “Pont du Gard”, al sur de Francia, han sobrevivido hasta esta época, con su material de cementación aún duro y firme. En la actualidad, las puzolanas son materiales de gran importancia en la producción de cemento Portland (Rivera López, 2013).

#### ***Definición***

Se define a la puzolana como un material que posee en su composición química contenido de sílice o alúmina, que una vez pulverizado tiene la capacidad de reaccionar químicamente en presencia de agua con hidróxido de calcio a temperatura ambiente, formando compuestos con propiedades hidráulicas, es decir, tiene la propiedad de fraguar y endurecer para formar compuestos estables (Rivera López, 2013).

### ***Tipos de puzolanas***

Las puzolanas según su origen pueden ser divididas en dos grupos: naturales y artificiales, aunque puede existir un grupo intermedio constituido por puzolanas naturales que se someten a tratamientos térmicos de activación, con el objetivo de incrementar su hidraulicidad (Salazar, 2002).

Las puzolanas tratadas, pese a ser naturales, se pueden considerar como artificiales debido al tratamiento que reciben para su activación. Aunque también podrían denominarse puzolanas mixtas o intermedias, por poseer los caracteres tanto de las puzolanas naturales como de las artificiales (Salazar, 2002).

**Puzolanas naturales.** Las puzolanas naturales son materiales silíceos o silíceo-aluminosos encontrados en la naturaleza, que se presentan como rocas o minerales, sin propiedades cementicias por sí mismas, pero que finamente molidas son capaces de reaccionar al agua en temperatura ambiente (Trusilewicz, 2014).

Los materiales denominados como puzolanas naturales pueden tener dos orígenes distintos, uno puramente mineral y otro orgánico. Las puzolanas naturales de origen mineral son productos de transformación de cenizas volcánicas que, debido a una continua acción atmosférica se convirtieron en rocas volcánicas más o menos consolidadas y compactas. La mayoría de las puzolanas naturales son de origen volcánico y fueron los primeros materiales que empleó el hombre en la construcción de antiguas estructuras en Egipto, Grecia, Roma y la India (Salazar, 2002).

Las puzolanas naturales de origen orgánico son rocas sedimentarias abundantes en sílice hidratadas y formadas en yacimientos o depósitos de origen submarino, por acumulación de esqueletos y caparzones silíceos de animales o plantas (Salazar, 2002).

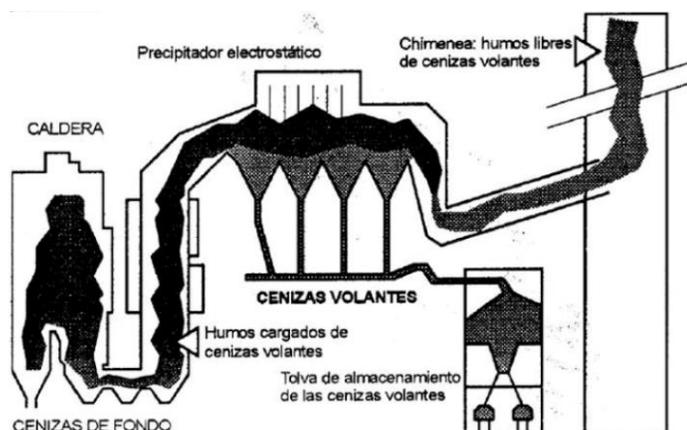
**Puzolanas artificiales.** Las puzolanas artificiales son materiales que deben su condición puzolánica a un previo tratamiento térmico. Dentro de esta denominación se incluyen los subproductos de determinadas operaciones industriales, tales como: residuos de bauxita, polvos de chimeneas de altos hornos y cenizas volantes (Tobón, 2000).

En la actualidad, las puzolanas artificiales de mayor peso son las cenizas volantes debido a las ventajas económicas y técnicas que ofrecen al ser un material de desecho que permite aumentar la trabajabilidad del hormigón y disminuir el calor de hidratación (Tobón, 2000).

Las cenizas volantes son un subproducto de la industria energética, concretamente de las centrales termoeléctricas que utilizan carbón para la generación del vapor de agua. Contienen un alto porcentaje de sílice y alúmina, que como hemos visto son las componentes básicas de los materiales puzolánicos. Además pueden contener distintas proporciones de óxidos de hierro, calcio, magnesio, potasio, etc. (Gómez, 2009).

**Figura 1**

*Proceso de formación de cenizas volantes*



*Nota.* El gráfico evidencia el proceso de formación de cenizas volantes en centrales termoeléctricas. Tomado de *Caracterización y utilización de puzolanas como aditivos minerales en cementos* (p.35), por A. Gómez, 2009, Universidad Politécnica de Valencia.

Según Gómez (2009), en todo el mundo se generan al año unos 650 millones de toneladas de cenizas de carbón, de las cuales se estima que el 70% son cenizas volantes, aptas para su aplicación como puzolana. Lamentablemente solo 35 de esos millones son reutilizados mientras que el resto son almacenados, con todos los riesgos y gastos que esto conlleva, o utilizadas como relleno de tierras lo que supone, además de un desperdicio de un material valioso, un grave peligro de contaminación de suelos y aguas.

### **Ceniza volcánica**

La ceniza volcánica son partículas piroclásticas de tamaño menor a 2 mm, producidas por fragmentación de las rocas. Después de una erupción, las autoridades civiles, los productores agrícolas y la población, tienen a menudo una gran preocupación por los efectos de la ceniza volcánica en la salud, tanto de humanos como de animales, los daños en los cultivos y en los suelos (Sánchez et al., 2018).

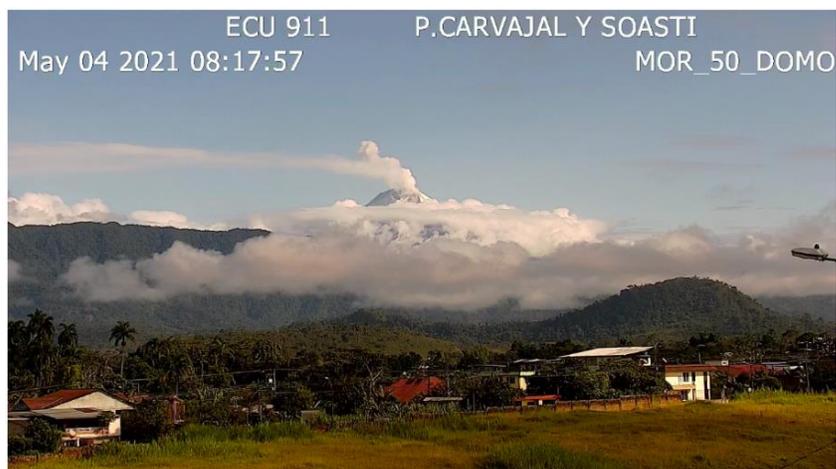
La ceniza es el producto más ampliamente distribuido de las erupciones volcánicas explosivas, y las zonas que se encuentran a cientos de kilómetros de un volcán en erupción pueden recibir caídas de este material (Stewart et al., 2006).

El viento es el principal medio de transporte para que las pequeñas partículas de cenizas volcánicas alcancen grandes distancias. Se ha encontrado ceniza a miles de kilómetros de distancia del sitio de la erupción. Cuanto menor sea el tamaño de la partícula, más viajará por acción del viento (Stewart et al., 2006).

Para la investigación, se utiliza ceniza volcánica proveniente del Volcán Sangay como puzolana natural. La ceniza fue recolectada en la ciudad de Guamote, provincia de Chimborazo, el martes 04 de mayo de 2021. Es importante indicar que el volcán Sangay se encuentra en erupción permanente (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2021).

## Figura 2

### *Emisión de gases del volcán Sangay*



*Nota.* El gráfico muestra la emisión de gases en Macas. Foto captada por el sistema ECU-911.

Tomado de *Informe del volcán Sangay No. 2021-127* (p.1), por Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2021, Escuela Politécnica Nacional.

Según el informe emitido por el Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional (2021), respecto al volcán Sangay con fecha viernes 7 de mayo, la columna de ceniza del volcán avanzaba hacia el occidente, produciendo caídas de ceniza fuertes reportadas en las comunidades de Pungalá, Flores, Guamote, Cebada y Palmira.

### ***Características del Volcán Sangay***

El volcán Sangay (5230 msnm), está ubicado al este de la Cordillera Real, en la provincia de Morona Santiago; es el volcán activo más meridional de la Zona Volcánica Norte de los Andes (NVZ). Es uno de los volcanes más activos del Ecuador, manteniéndose en actividad eruptiva desde 1628 (Valverde, 2014).

Según Monzier et al (1999), el Sangay es un complejo andesítico que está formado por tres edificios sucesivos (Sangay I, II y III), cuyos tamaños y volúmenes son decrecientes en el tiempo. Durante la historia, su actividad se ha caracterizado principalmente por un

comportamiento estromboliano. Esto indica una fuerte presencia de explosiones de bloques y ceniza, además de frecuentes flujos de lava, flujos piroclásticos, lahares y una intensa actividad fumarólica.

En erupciones grandes se han registrado caídas de ceniza, principalmente hacia el occidente asociados a los edificios Sangay I y II. La actividad explosiva del volcán es el principal responsable del permanente cambio de la forma de la cima, debido a que la actividad superficial mediante emisiones constantes de flujos piroclásticos, flujos de lava y columnas de ceniza afectan las zonas cercanas al volcán (Valverde, 2014).

### ***Propiedades mineralógicas de la ceniza***

Con la finalidad de describir y caracterizar las propiedades de la ceniza utilizada en el diseño del hormigón, se obtuvieron datos de gran valor para la investigación proporcionados por el Ing. Theofilos Toulkeridis, PhD., docente de la Universidad de las Fuerzas Armadas.

Los datos comprenden la caracterización mineralógica de tres muestras de ceniza del volcán Sangay tomadas en la ciudad de Babahoyo y analizadas por la empresa alemana Bruker Nano Analytics, utilizando espectrometría de dispersión de energía mediante un microscopio electrónico de barrido.

La espectroscopía de energía dispersa de rayos X (EDS) es una técnica analítica que permite la caracterización química y elemental de un material. Mediante una fuente de energía que activa la muestra, como es un rayo X, se permite analizar la composición de un determinado volumen de material. La posición de los picos en el espectro identifica el elemento, mientras que la intensidad de la señal corresponde a la concentración del elemento dentro de la muestra (Chávez Rivas et al., 2014).

A continuación, se detalla los resultados de las muestras mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) y el análisis elemental EDS.

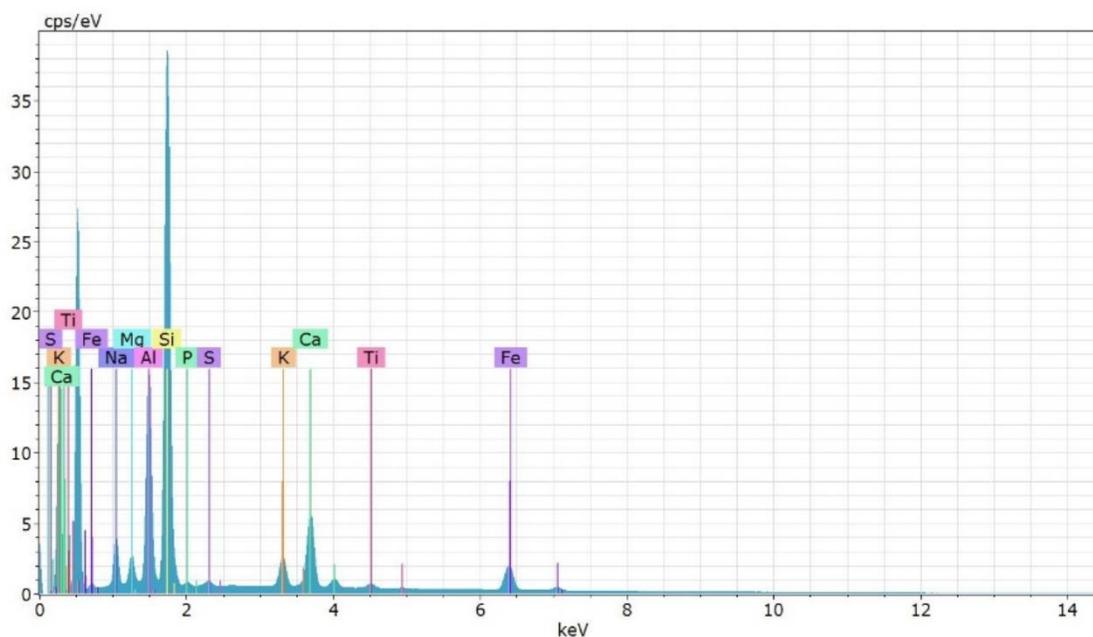
**Tabla 1***Resultados del análisis químico – elemental de la muestra 1 de ceniza*

<b>Elemento</b>	<b>Número Atómico</b>	<b>Peso</b> -	<b>Peso</b> %	<b>Peso Atómico</b> %	<b>Error</b>
Sodio	11	2,66744112	6,26240269	8,255375538	0,202135626
Magnesio	12	1,217658812	2,85872095	3,564565584	0,093584586
Aluminio	13	8,141248691	19,1133657	21,4684607	0,423492164
Silicio	14	18,4324724	43,2742691	46,69582484	0,827610105
Fósforo	15	0,366034177	0,85934546	0,840822506	0,039579627
Sulfuro	16	0,341055083	0,80070156	0,756756843	0,037505601
Potasio	19	1,879718254	4,4130506	3,420672554	0,082186364
Calcio	20	5,448457585	12,7914484	9,672620575	0,183803011
Titanio	22	0,475701498	1,11681353	0,706898396	0,0381488
Hierro	26	3,624744425	8,50988202	4,618002469	0,117706837
	<b>Total</b>	<b>42,59453204</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	

*Nota.* La tabla muestra los resultados del estudio por EDS y SEM en porcentaje de peso para cada elemento dentro de la muestra 1. Fuente: (Toulkeridis et al., n.d.).

**Figura 3**

*Espectro EDS de la muestra 1 de ceniza*



*Nota.* El gráfico representa al espectro EDS establecido para la muestra 1. Los valores analizados corresponden a los elementos analizados en la tabla 1. Fuente: (Toulkeridis et al., n.d.).

**Tabla 2**

*Resultados del análisis químico – elemental de la muestra 2 de ceniza*

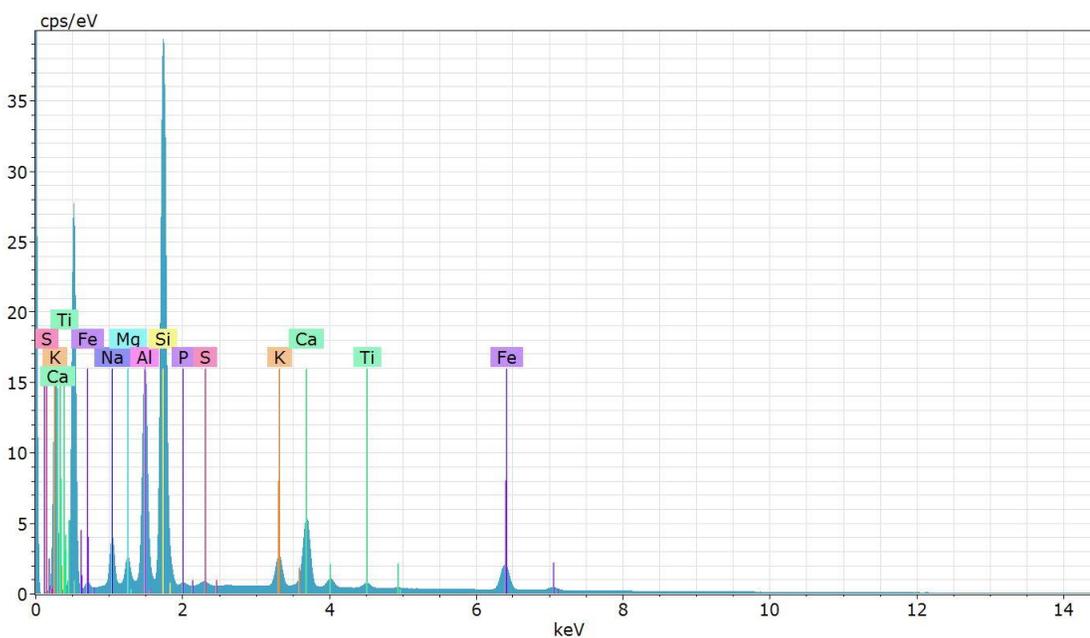
Elemento	Número Atómico	Peso -	Peso %	Peso Atómico %	Error
Sodio	11	2,734497836	6,352599861	8,369557849	0,20658513
Magnesio	12	1,148266958	2,667575897	3,324350451	0,089683343
Aluminio	13	8,238437819	19,13897983	21,48511547	0,428248281
Silicio	14	18,86636349	43,82905574	47,26782244	0,846501491
Fósforo	15	0,343500424	0,797996882	0,780356239	0,038692143
Sulfuro	16	0,332906524	0,773385853	0,730528353	0,037210484
Potasio	19	1,943271911	4,51447747	3,497319074	0,084115696
Calcio	20	5,135713908	11,93094214	9,016839508	0,174693618

Elemento	Número Atómico	Peso	Peso	Peso Atómico	Error
		-	%	%	
Titanio	22	0,511574908	1,18845612	0,751821343	0,039128258
Hierro	26	3,790800352	8,806530205	4,776289272	0,121944298
Total		43,04533413	100	100	

*Nota.* La tabla muestra los resultados del estudio por EDS y SEM en porcentaje de peso para cada elemento dentro de la muestra 2. Fuente: (Toulkeridis et al., n.d.).

#### Figura 4

*Espectro EDS de la muestra 2 de ceniza*



*Nota.* El gráfico representa al espectro EDS establecido para la muestra 2. Los valores analizados corresponden a los elementos analizados en la tabla 2. Fuente: (Toulkeridis et al., n.d.).

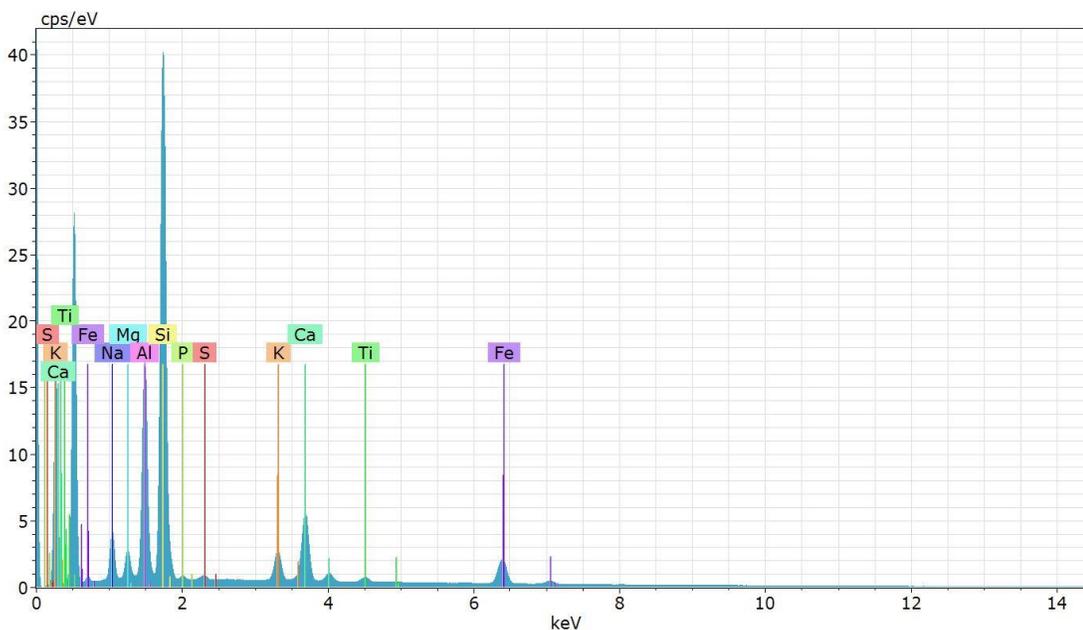
**Tabla 3***Resultados del análisis químico – elemental de la muestra 3 de ceniza*

Elemento	Número Atómico	Peso	Peso	Peso Atómico	Error
		-	%	%	
Sodio	11	2,836173701	6,337075674	8,3376373	0,213331
Magnesio	12	1,263121041	2,822286103	3,51232054	0,096142
Aluminio	13	8,706293255	19,45312418	21,807775	0,451144
Silicio	14	19,47778829	43,52068363	46,8707908	0,873123
Fósforo	15	0,406255882	0,907727994	0,88644242	0,041168
Sulfuro	16	0,332156963	0,742163222	0,70007307	0,037184
Potasio	19	2,02220545	4,518365346	3,4955233	0,086514
Calcio	20	5,325374883	11,89888462	8,98026069	0,180219
Titanio	22	0,504257666	1,126700733	0,71177572	0,038929
Hierro	26	3,881617196	8,672988505	4,6974012	0,124263
	Total	44,75524433	100	100	

*Nota.* La tabla muestra los resultados del estudio por EDS y SEM en porcentaje de peso para cada elemento dentro de la muestra 3. Fuente: (Toulkeridis et al., n.d.).

**Figura 5**

*Espectro EDS de la muestra 3 de ceniza*



*Nota.* El gráfico representa al espectro EDS establecido para la muestra 3. Los valores analizados corresponden a los elementos analizados en la tabla 3. Fuente: (Toulkeridis et al., s.f.).

La microscopía electrónica de barrido reveló que las tres muestras de ceniza provenientes del volcán Sangay manifiestan una distribución muy similar entre ellas. Entre los elementos químicos más representativos dentro de la muestra se tienen el silicio, aluminio, calcio y sodio; todos ellos con valores cercanos o mayores al 10% de porcentaje en peso de la muestra analizada.

### **El hormigón en el Ecuador**

El hormigón es una roca artificial considerada como una mezcla en proporciones adecuadas de cemento, áridos y agua. El contacto del cemento con el agua provoca una reacción de hidratación que genera el endurecimiento de la mezcla. La mezcla de cemento con arena y agua se denomina mortero (Yancha Alvarado, 2013).

El hormigón es uno de los materiales de construcción de mayor uso, el cual posee una estructura sumamente compleja a diferencia de la mayoría de los materiales que se manejan en ingeniería civil, no solo a nivel microscópico sino a simple vista, su estructura real dista de ser la de un material homogéneo (Yancha Alvarado, 2013).

Al ser fabricado en estado plástico, se le obliga al hormigón a utilizar moldes que lo sostengan mientras adquiere resistencia suficiente para que la estructura sea autoportante. Esta característica impone ciertas restricciones, pero al mismo tiempo aporta algunas ventajas, una de estas es su moldeabilidad, la cual brinda al calculista gran libertad en la elección de formas. Gracias a esto, es posible construir estructuras tipo cascarones, que en otro material serían muy difíciles de obtener (González & Robles, 2005).

En las estructuras de hormigón armado el monolitismo es una consecuencia natural dentro de su construcción, a diferencia de las estructuras metálicas que no logran la continuidad entre sus elementos pese a los serios problemas en ejecución y diseño que contemplan las conexiones (González & Robles, 2005).

### ***Componentes***

Si tomamos en cuenta la dosificación en peso debido a los materiales que componen al hormigón, los agregados conforman las tres cuartas partes de esta mezcla. Debido a esto, es indispensable para el estudio del hormigón realizar la caracterización física y mecánica de los materiales con la finalidad de poder llevar a cabo la dosificación de sus componentes en la mezcla de concreto, consiguiendo así un hormigón de la resistencia de diseño esperada (Castro Solano, 2020).

**Cemento.** El cemento es un conglomerante hidráulico que es obtenido de la incineración a altas temperaturas de piedra de cal, arcilla y diversos minerales para formar un

componente denominado clínker, que a su vez es adicionado con agregados especiales como el yeso para obtener el material en su forma final, lista para la comercialización (Coppiano Gutiérrez, 2016).

Debido a las diversas propiedades mecánicas que el cemento le brinda al hormigón, lo convierte en uno de los materiales constructivos más empleados y con variedades de propiedades entre sus tipos de acuerdo a sus proveedores (Castro Solano, 2020).

Aun cuando el cemento más usado es el denominado Cemento Portland Tipo I, existen en el mercado variedades como el cemento Tipo II y Tipo III, los cuales son usados en caso de hormigones que necesiten protección moderada a sulfatos y altas resistencias iniciales respectivamente (Castro Solano, 2020).

Para este análisis se utilizó cemento Fuerte Tipo GU marca Holcim, el cual está diseñado según el proveedor para construcción en general; este tipo de cemento escogido corresponde al denominado como Tipo I.

### **Figura 6**

*Cemento Holcim fuerte tipo GU*



Nota. El gráfico indica una muestra de saco de cemento marca Holcim. Tomado de *Ficha técnica – Cemento hidráulico Tipo GU para la construcción en general* (p.7), por Holcim Ecuador S.A., 2015.

**Agregado Grueso.** La grava o agregado grueso es uno de los principales componentes del hormigón; por lo tanto, su calidad es importante para garantizar un hormigón de buena resistencia. Se denomina agregado grueso a la grava o una combinación de ésta con un subproducto de la trituración de piedra cuyas partículas sean mayores a 5 mm y generalmente entre 9.5 mm y 38 mm.

Para producir concretos con mejor comportamiento se requiere que los agregados tengan una gradación continua, lo que origina una reducción en la cantidad de agua para cierta trabajabilidad, incrementándose la resistencia, durabilidad del concreto y disminuyéndose los costos (Méndez, 2012).

Está demostrado que la rugosidad incrementa la adherencia entre la pasta de cemento y el agregado, esto se debe a que la forma y textura del agregado grueso influye en la resistencia del hormigón, como es en el caso del agregado triturado ya que genera una mayor resistencia a comparación del redondeado o canto rodado (Coppiano Gutiérrez, 2016).

### **Figura 7**

*Muestra de agregado grueso*



*Nota.* La figura representa el agregado grueso de  $\frac{3}{4}$ ". Tomado de *Ficha técnica de productos, agregado grueso  $\frac{3}{4}$* , por Avenza SAS, n.d.

**Agregado Fino.** El agregado fino en efecto compone la mayor parte del porcentaje en peso del hormigón. Se denomina agregado fino al material pétreo proveniente de la desintegración natural o artificial de las rocas, que logra pasar el tamiz 9.5 mm y se retiene en el tamiz N°200 (Galeas Arias & Guzmán Chávez, 2019).

Su composición consta de arena natural proveniente de canteras aluviales o de arena producida artificialmente. La forma de las partículas deberá ser generalmente cúbica o esférica y razonablemente libre de partículas delgadas, planas o alargadas (Frías Muñoz & Salazar Amagua, 2019).

Los fragmentos de roca por los que está compuesto la arena deben ser de perfil angular, duro, resistente y compacto, adicionalmente debe estar exento de sedimentos como materiales orgánicos, arcilla, limo, polvo y sales que pueden ser dañinas para la mezcla de concreto. En el caso de la producción artificial se deberán rechazar partículas laminares, planas o alargadas sin importar el equipo de procesamiento que se emplee.

### **Figura 8**

*Muestra de agregado fino*



*Nota.* La figura evidencia una muestra de agregado fino seco. Tomado de *Tecnología del Concreto y Mortero* (pg. 49), por G. Rivera López, 2013, Universidad del Cauca.

**Agua.** El agua es un componente clave en el hormigón, debido a que se utiliza desde la mezcla para lograr la reacción hidráulica con el cemento Portland, hasta después del fraguado de la mezcla para curarla debidamente (Coppiano Gutiérrez, 2016).

Se considera que si el agua es apta para consumo humano debido a su composición química también es adecuada para producir mortero u hormigón; por lo tanto, cualquier agua que pueda beberse contribuye a la mezcla de hormigón (Rivera López, 2013).

El agua dentro de la mezcla cumple dos funciones principales, ya que permite la hidratación del material cementante y facilita la manejabilidad de la mezcla. La cantidad de agua que necesita el material cementante para su hidratación varía entre el 25% y 30% de la masa de este material, pero no es hasta el 40%, que la mezcla empieza a ser trabajable. Por este motivo, se debe colocar la menor cantidad de agua en la mezcla, pero considerando que el hormigón sea trabajable (Frías Muñoz & Salazar Amagua, 2019).

Las sustancias orgánicas contenidas en aguas naturales, afectan considerablemente el tiempo de fraguado inicial del cemento y la resistencia última del hormigón, mientras que las sustancias inorgánicas fuera de los límites permisibles pueden causar un deterioro gradual del hormigón (Rivera López, 2013).

### **Fabricación del hormigón**

La elaboración del hormigón se fundamenta básicamente en una mezcla de componentes pétreos como: agregados, pasta y en ciertos casos aditivos en cantidades determinados. La pasta, es la combinación del cemento y agua, conjunto con los agregados, generalmente arena y ripio (piedra triturada) crean una masa sólida compacta, consecuencia del endurecimiento que ocurre durante la reacción química entre el cemento y agua (Galeas Arias & Guzmán Chávez, 2019).

El concreto presenta dos estados después de la realización de la mezcla de sus componentes, el estado plástico en donde la mezcla se presenta de manera fluida, de tal manera que la colocación y compactación sean los apropiados, mientras tanto, en el estado endurecido la pasta obtenida reduce la permeabilidad de cualquier fluido a sus interiores, este estado es ideal cuando se presenta en estructuras que se encuentren expuestas a la acción del agua (ASOCRETO, 2010).

Para obtener la resistencia requerida es fundamental determinar las cantidades exactas de materiales a utilizarse, que se obtienen mediante ensayos realizados en el laboratorio que determinan las propiedades, físicas mecánicas, así como, las características principales de los agregados que permiten establecer una relación óptima entre el agua y el cemento (Galeas Arias & Guzmán Chávez, 2019).

### **Figura 9**

*Fabricación de hormigón*



*Nota.* La imagen indica una muestra de hormigón fresco.

Como propuesta de alternativas de materiales dentro de la elaboración del hormigón se ha establecido adicionar ceniza volcánica respecto al peso del cemento, en cantidades variables para poder establecer la proporción necesaria y determinar el mejor rendimiento del concreto.

## **Materiales utilizados**

El agregado grueso que se utilizó en este proyecto se origina en la cantera de Pintag localizada en la provincia de Pichincha, cantón Quito. El material está constituido por roca triturada cuyo tamaño nominal es de 19 mm (3/4").

### **Figura 10**

*Agregado grueso de 3/4" provenientes de la cantera de Pintag*



*Nota.* La figura indica una muestra del agregado grueso de 3/4" este material proviene de la cantera de Pintag.

El agregado fino consiste en arena natural sedimentada obtenida de la concesión minera Rancho La Paz localizada en el kilómetro 14 de la vía Alóag – Santo Domingo de los Tsáchilas, perteneciente a la parroquia de Alóag, cantón Mejía, provincia de Pichincha.

### **Figura 11**

*Agregado fino utilizado en el proyecto*



*Nota.* La figura indica una muestra del agregado fino obtenida de la concesión minera Rancho La Paz localizada en el kilómetro 14 de la vía Alóag – Santo Domingo de los Tsáchilas.

El agregado cementante empleado fue el Holcim Tipo GU.

**Figura 12**

*Sacos de cemento empleados en el proyecto. Cemento Holcim fuerte Tipo GU*



*Nota.* La figura indica el cemento utilizado en el proyecto fue de tipo hidráulico.

El agua utilizada para la fabricación de la mezcla de hormigón es la misma que se distribuye en la red dentro de la Universidad de las Fuerzas Armadas. Cabe considerar el hecho de que esta agua carece de un tratamiento de potabilización que garantice el consumo humano y por ende una satisfactoria elaboración del concreto.

Debido a lo anteriormente mencionado, se han realizado varios análisis del agua subterránea utilizada por esta institución con el fin de determinar los parámetros fuera del límite de acuerdo con la Norma INEN 1108 correspondiente a agua potable.

Los resultados de los informes realizados por la empresa LabMos y el Centro de Investigación Científica de la Universidad de las Fuerzas Armadas anexo 1 realizadas en los años 2008 y 2011 respectivamente, concluyen:

- Presencia de un contenido de minerales disueltos totales en el orden de 1.372,35 ppm, valor que se considera en el límite de aguas naturales hasta 1.500 ppm, para propósitos múltiples.
- Concentración de sólidos suspendidos, sodio, plomo y cloruro superior a la Norma INEN 1108.
- Presencia de alta dureza como  $\text{CaCO}_3$ .

Tomando en cuenta los resultados obtenidos por los informes de análisis del agua cruda no se podría considerar al agua de la red interna como potable. Sin embargo, la norma 1855-2 (NTE INEN, 2015), correspondiente a los requisitos para hormigón preparado en obra, explica que a falta de agua potable, el agua de mezcla debe ser clara y de apariencia limpia, libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, materiales orgánicos y otras sustancias que puedan ser dañinas para el hormigón o el acero de refuerzo.

Finalmente, la ceniza proveniente del Volcán Sangay, recolectada en la ciudad de Guamote, provincia de Chimborazo.

### **Figura 13**

*Ceniza proveniente del Volcán Sangay*



*Nota.* La figura contiene una muestra de ceniza volcánica usada en el proyecto.

## **Ensayos para caracterizar los materiales**

Una vez seleccionados los materiales a emplearse en la elaboración del hormigón, se realizan los ensayos necesarios de laboratorio que permitan justificar la calidad de los componentes que forman parte de la dosificación del cemento, así como, determinar las propiedades físicas mecánicas de cada uno de los materiales que ayuden a establecer las cantidades mínimas necesaria para realizar la mezcla. Los ensayos se sujetan al procedimiento descrito en las normas INEN y ASTM, requisitos fundamentales para la dosificación requerida (Galeas Arias & Guzmán Chávez, 2019).

### ***Agregado fino***

- Peso específico y absorción
- Densidades aparentes
- Granulometría
- Determinación de contenido de humedad

### ***Agregado grueso***

- Peso específico y absorción
- Densidades aparentes
- Granulometría
- Determinación de contenido de humedad
- Abrasión

### ***Ceniza***

- Peso específico y absorción
- Determinación de contenido de humedad

### **Ensayos a realizar durante la fundición**

Para garantizar la elaboración del hormigón, se debe verificar que los valores de asentamiento sean iguales tanto a lo planteado en la dosificación, como el valor obtenido en campo; también se debe hacer la toma de temperatura del hormigón, pues esta determina la calidad del mismo. Por eso estos ensayos son importantes ya que están directamente ligados a la resistencia de las probetas de análisis.

#### ***Asentamiento***

El ensayo del asentamiento representa la resistencia que pone el hormigón a experimentar deformaciones, se le llama también consistencia y el ensayo se lo realiza mediante el cono de Abrams, este procedimiento proporciona información útil sobre la uniformidad de las mezclas y es una herramienta muy importante en el control de calidad del hormigón fresco.

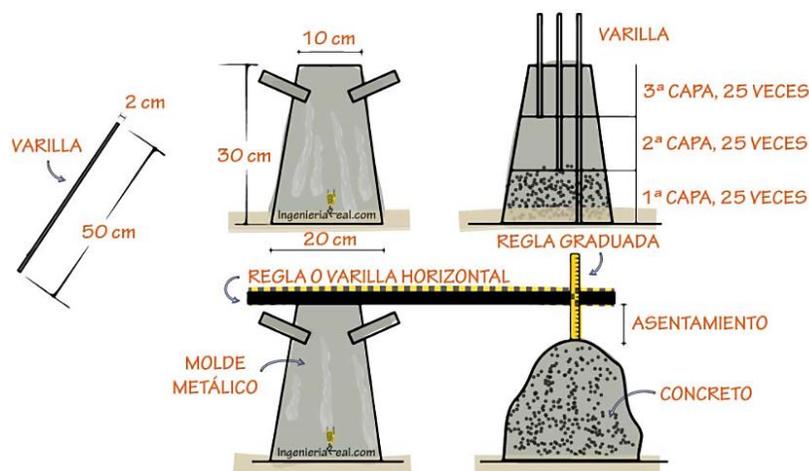
El ensayo se realiza colocando el hormigón fresco en un molde con forma de cono truncado, se realiza el llenado del molde en capas, cada una de ellas de igual volumen, varillar 25 veces por cada capa, se enrasa la parte superior del mismo con la varilla y se retira el material alrededor.

Se eleva el molde a una velocidad constante y de forma vertical procurando no topar la mezcla, la diferencia de la posición inicial y la desplazada, medida desde el centro de la superficie superior de la mezcla se reporta como el asentamiento del hormigón (Huarcaya Garzón, 2014).

El método de ensayo se realiza en concordancia con la norma ASTM C143.

**Figura 14**

*Prueba de asentamiento – cono de Abrams*



*Nota.* La figura muestra el ensayo de asentamiento del hormigón mediante el cono de Abrams.

Tomado de *Ingeniería Real – Prueba de revenimiento del concreto*, por Pinto, n.d.

### **Temperatura**

La temperatura es un factor importante que influye en la calidad, tiempo de fraguado y la resistencia del hormigón, sin este dato predecir su comportamiento es bastante difícil.

Una temperatura inicial alta en el hormigón es un indicador de altas resistencias a edades tempranas, por el contrario, bajas temperaturas son indicadores de un hormigón que llegara a altas resistencias a edades tardías. La temperatura se usa también para indicar el tipo de curado y protección necesaria para llegar a optimas resistencias. El control de este parámetro evita problemas inmediatos y futuros, la temperatura afecta el comportamiento de los aditivos químicos, incluso de aire, materiales puzolánicos y otros tipos de adiconantes (ASTM International, 2008).

**Figura 15**

*Toma de temperatura en hormigón fresco*



*Nota.* La figura indica la toma de temperatura en el hormigón fresco.

**Curado del hormigón**

El curado del hormigón es el conjunto de acciones que proveen condiciones adecuadas para la hidratación del cemento en hormigones y morteros. Un curado eficiente es muy importante para lograr una buena calidad del hormigón.

En el periodo de fraguado y endurecimiento del hormigón se debe asegurar el mantenimiento de humedad del mismo, para ello se deben tomar medidas adecuadas.

El curado deberá realizarse manteniendo húmedas las superficies de los elementos del hormigón, mediante riego directo o a través de un material adecuado que sea capaz de retener la humedad (ASTM International, 2009).

Según Yancha Alvarado (2013), las condiciones básicas de un curado adecuado son:

- El hormigón debe estar lo suficientemente húmedo para garantizar la hidratación del cemento.

- Temperatura adecuada que permitirá una buena hidratación del cemento.
- Realizar el curado lo más pronto posible, tan pronto el hormigón absorbe el agua de exudación.

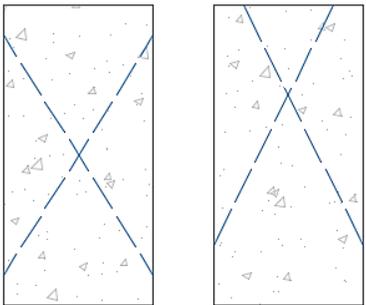
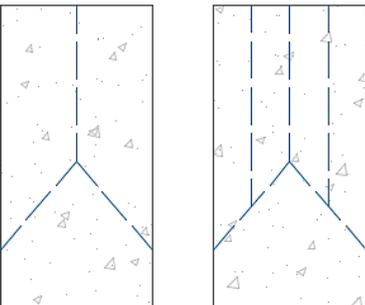
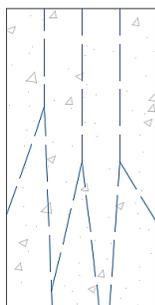
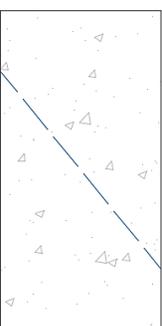
### **Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión se define como una característica mecánica del hormigón, que tiene la capacidad de soportar solicitaciones de carga, mismas que vienen en términos de esfuerzo (Caicedo Barona & Tipán Quinatoa, 2019; Galeas Arias & Guzmán Chávez, 2019). El ensayo se detalla a continuación, en base a la normativa (ASTM C39, 2003).

- Seleccionar los cilindros a ensayarse.
- Tomar datos de diámetros, alturas y pesos de los cilindros, se recomienda registrar por lo menos 2 valores para realizar un promedio y se verifica que no exista una variación mayor al 2% entre los datos.
- Verificar que las caras de los cilindros estén totalmente lisas, con el fin de tener un correcto contacto con la máquina de ensayo, caso contrario es conveniente colocar un refrentado.
- Colocar un cojinete listo en la parte inferior de la máquina de ensayo, sobre ella se coloca el cilindro a ensayarse, seguido de un cojinete en la cara superior; a la par se colocan las pesas necesarias hasta conseguir alinear el espécimen con el centro de la máquina de ensay.
- Verificar que el indicador de carga este en 0, así como con velocidad de 0,25 MPa/s.
- Ensayar el cilindro hasta que falle la muestra, se registran datos de carga máxima, resistencia a la compresión y el tipo de falla en función a la tabla 4, donde se puede apreciar un esquema de los tipos de fallas.

Tabla 4

Tipos de fallas de probetas de hormigón

Tipos de fallas probetas de hormigón				
				
				
<b>Tipo 1</b>	<b>Tipo 2</b>			<b>Tipo 3</b>
<p>Conos en ambos extremos razonablemente bien formados, fisuras a través de la cabecera menor a 25 mm.</p>	<p>Cono bien formado en uno de los extremos, fisuras verticales que recorren a través de la cabecera.</p>			<p>Fisuras verticales en ambos extremos, conos no muy definidos.</p>
				
<b>Tipo 4</b>	<b>Tipo 5</b>		<b>Tipo 6</b>	
<p>Fractura diagonal sin fisuras a través de los bordes, golpear con un martillo para distinguir del tipo 1.</p>	<p>Fracturas a los lados, en el extremo superior o en el fondo (ocurren comúnmente cuando se ensaya con neoprenos).</p>		<p>Similar al tipo 5, pero el extremo del cilindro está en punta.</p>	

*Nota.* La tabla muestra cada tipo de falla del hormigón y las evidencias con una gráfica. Tomado de *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* (p.53), por Galeas Arias & Guzmán Chávez, 2019.

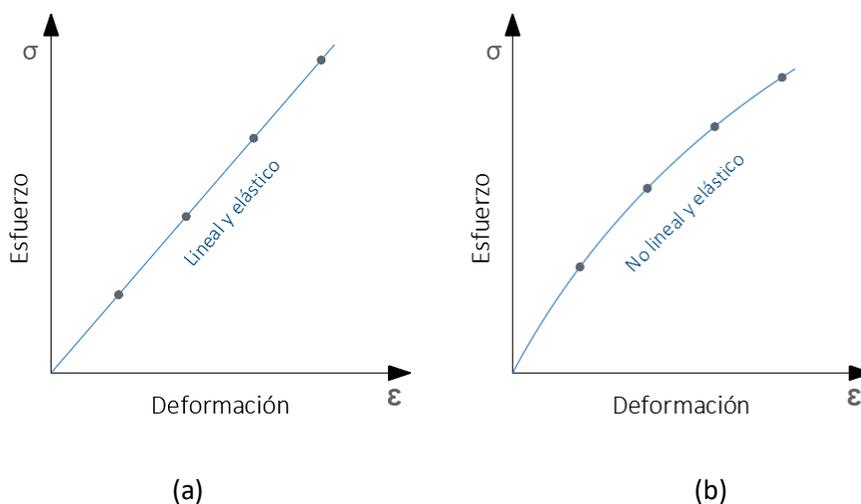
## Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad o módulo de Young, es uno de los parámetros mecánicos más importantes del hormigón, definido por la ecuación  $E_c = \text{esfuerzo}/\text{deformación}$  que permite determinar la resistencia del concreto ante una deformación (Arequipa Maldonado et al., 2012).

El concreto es considerado un material no perfectamente elástico y por consiguiente no se obtiene una ecuación elástica lineal. La curva tensión – deformación que se forma a partir de la fuerza que recibe puede manifestarse de dos maneras; la primera, en el cual se forma una recta como se muestra en la figura 16a definiendo al material como elástico; mientras que, si la curva es como se muestra en la figura 16b, se concluye que el material no es perfectamente elástico (Chele Chele, 2019).

**Figura 16**

*Curva de esfuerzo – deformación*



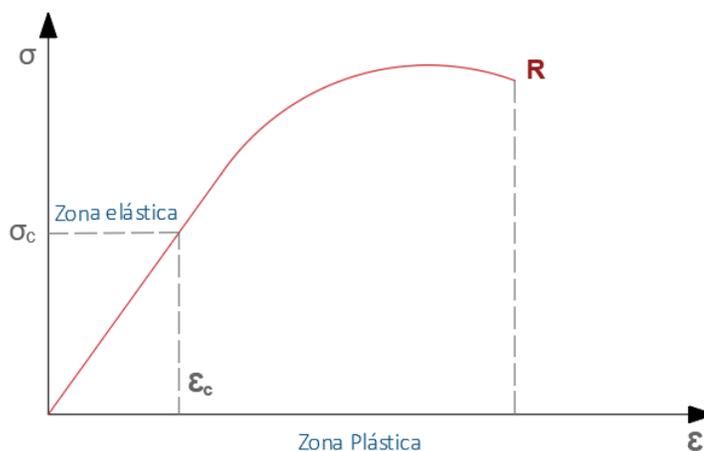
*Nota.* La figura representa la curva de esfuerzo – deformación. (a) representa la curva lineal y elástico, (b) representa la curva no lineal y elástico. Tomado de *Determinación del módulo de elasticidad en hormigones estructurales de 21 y 28 MPa utilizando agregados de la cantera Agresa* (pg. 24), por Chele Chele, 2019, Universidad Estatal del Sur de Manabí.

La deformación que sufre el hormigón durante el proceso de aplicación de la carga no sigue una regla establecida, debido a que el parámetro del módulo de elasticidad depende de una serie de aspectos como: su resistencia, la magnitud y velocidad de la carga aplicada, las características físicas mecánicas de los agregados, así como el tiempo que transcurre luego del cual se registran las observaciones durante el ensayo (Chele Chele, 2019).

Según Chele Chele (2019), el comportamiento de deformación que el hormigón sufre es bastante complejo. Además, al ser un material con un comportamiento elástico-plástico, presenta una rotura instantánea R que no advierte, como un material frágil.

### Figura 17

Curva esfuerzo – deformación específica del hormigón



*Nota.* La figura representa la deformación específica del hormigón, así como la zona elástica y plástica en las que trabaja. Tomado de *Determinación del módulo de elasticidad en hormigones estructurales de 21 y 28 MPa utilizando agregados de la cantera Agresa* (pg. 25), por Chele Chele, 2019, Universidad Estatal del Sur de Manabí.

### ***Determinación del módulo de elasticidad***

El ensayo se realiza dentro del rango elástico del material, para el caso del hormigón, dicho rango corresponde aproximadamente hasta el 40% de su resistencia máxima a la compresión (Castro Solano, 2020).

De acuerdo a la norma ASTM C469, el módulo de elasticidad del hormigón se obtiene utilizando el principio de carga estática y la deformación que se produce; así como del método de la secante, en donde se evalúa la pendiente que se genera entre dos puntos, el punto 1 (cero) y el punto 2 (40% de  $f'c$ ), por tal razón se define que el módulo de elasticidad viene dado por la ecuación 1 (Castro Solano, 2020).

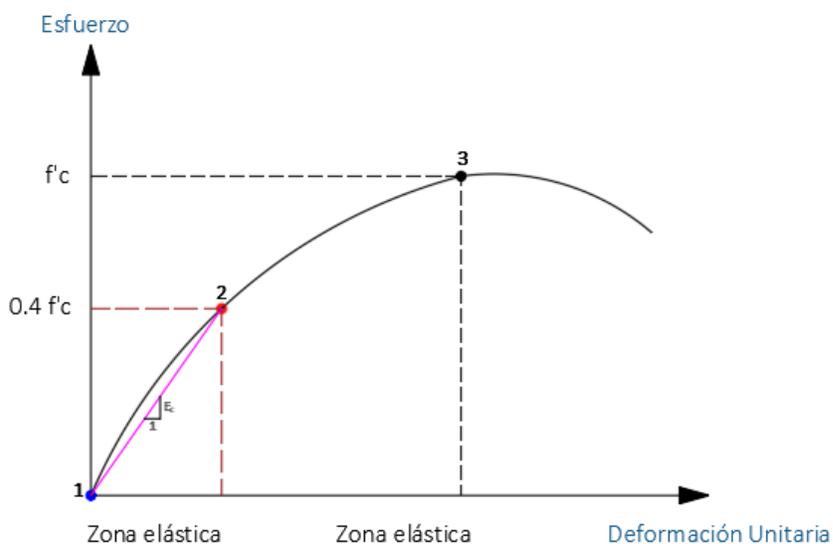
$$E_c = \frac{\sigma_f - \sigma_0}{\varepsilon_f - \varepsilon_0} \quad (1)$$

Según Castro Solano (2020), las abreviaturas para módulo de elasticidad son:

- $E_c$  = Módulo de elasticidad (MPa)
- $\sigma_f$  = Esfuerzo final al 40% de la resistencia  $f'c$  (MPa)
- $\sigma_0$  = Esfuerzo inicial (MPa)
- $\varepsilon_f$  = Deformación unitaria final al 40% de la resistencia  $f'c$
- $\varepsilon_0$  = Deformación unitaria inicial

**Figura 18**

*Curva esfuerzo – deformación por el criterio de la secante*



*Nota.* La figura representa el criterio de la secante para el análisis de esfuerzo – deformación.

Tomado de *Estudio de la sustitución parcial de cemento de alta Resistencia inicial por puzolana de ceniza volcánica en el diseño de hormigón* (pg. 70), por Castro Solano, 2020, Universidad Politécnica Nacional.

### **Coeficiente de Poisson**

El coeficiente de Poisson es definido como la relación entre la deformación unitaria transversal con respecto a la deformación unitaria longitudinal (ASTM International, 2014; Castro Solano, 2020).

Al aplicar esfuerzos de tracción a un elemento de hormigón, este presenta una deformación negativa debido a una disminución del ancho del elemento y una deformación positiva debido a que se tiene un aumento en la longitud del elemento.

Cuando se presentan esfuerzos de compresión, los signos de la deformación serán contrarios a los esfuerzos de tracción, ya que se presenta una disminución en la longitud del cilindro y un ensanchamiento en el ancho del elemento (Cadena Tuquinga & Palacios Lagos, 2017).

$$\mu = \frac{(\varepsilon_{t1} - \varepsilon_{t2})}{(\varepsilon_2 - 0.00005)} \quad (2)$$

Donde:

- $\mu$  = Coeficiente de Poisson.
- $\varepsilon_{t2}$  = Deformación unitaria transversal, en la altura media del espécimen producida por S2.
- $\varepsilon_{t1}$  = Deformación unitaria transversal, en la altura media del espécimen producida por S1.
- $\varepsilon_2$  = Deformación unitaria longitudinal producida por el esfuerzo S2.

## Capítulo III

### Metodología

#### Caracterización del cemento

El cemento hidráulico fragua y endurece por reacción química con el agua y a esta mezcla se le conoce como pasta. La pasta al adicionarse con agregados gruesos y finos actúa como un adherente y une los agregados para producir el hormigón, el material más versátil y más usado en el mundo (Coque Quishpe & Lechon Churuchumbi, 2021; Portland Cement Association, 2004).

Los materiales cementantes deben cumplir con las normas especificadas en la tabla 5, para garantizar buena ejecución de la mezcla de hormigón y por ende satisfacer las especificaciones de diseño en base a conceptos de: resistencia y módulo de elasticidad.

**Tabla 5**

*Normas según los materiales cementantes*

<b>Materiales cementante</b>	<b>Normas</b>
Cemento portland	ASTM C150M
Cementos hidráulicos adicionados	ASTM C595M, se excluyen los Tipos IS ( $\geq 70$ ) y Tipo IT ( $S \geq 70$ )
Cemento hidráulico expansivo	ASTM C845M
Cemento hidráulico	ASTM C1157M
Ceniza volante y puzolana natural <sup>a</sup>	ASTM C618M <sup>a</sup>
Cemento de escoria	ASTM C989M
Humo de sílice	ASTM C1240

*Nota.* La tabla explica que las normas especificadas son de acuerdo al material cementante a usarse en los procesos constructivos. <sup>(a)</sup> En este proyecto se utilizará cemento hidráulico y ceniza volcánica (puzolana natural). Tomado de *ACI 318 – 19* (p.517), por ACI Committee 318, 2019.

Para cada tipo de cemento se establece la normativa que certifica la calidad del mismo y por ende garantiza los usos que se le dé según la aplicación constructiva especificada por el diseñador del proyecto, tal como se muestra en la tabla 6.

**Tabla 6**

*Especificaciones del cemento según las aplicaciones constructivas*

Aplicaciones	Especificación del cemento		
	ASTM C 150 Cementos portland	ASTM C 595 Cementos hidráulicos mezclados	ASTM C 1157 Cementos hidráulicos
Uso general	I	IS IP I(PM) I(SM) S, P	GU
Moderado calor de hidratación	II (opción de moderado calor)	IS(MH) IP(MH) I(PM)(MH) I(SM)(MH)	MH
Alta resistencia inicial	III	-	HE
Bajo calor de hidratación	IV	P(LH)	LH
Moderada resistencia a los sulfatos	II	IS(MS) IP(MS) P(MS) I(PM)(MS) I(SM)(MS)	MS
Alta resistencia a los sulfatos	V	-	HS
Resistencia a la reacción álcali- sílice (RAS)	Opción de bajo álcalis	Opción de baja reactividad	Opción R

Nota. La tabla especifica el tipo de cemento para las diferentes aplicaciones estructurales.

Tomado de *Diseño y control de mezclas de concreto* (p.31), por Portland Cement Association, 2004.

Holcim Ecuador S.A. (2015) indica que produce varios tipos de cementos en base a la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380 (normativa desarrollada en base a ASTM C 1157). Su producto de mayor demanda es el cemento Holcim Fuerte Tipo GU que está diseñado para todo tipo de construcción en general, es importante enfatizar que este cemento cumple y sobrepasa los parámetros de la norma NTE INEN 2380, satisfaciendo así las características de: resistencia y durabilidad.

### ***Requisitos específicos de la norma NTE INEN 2380:2011***

Dentro de los requisitos específicos que analiza esta normativa se tiene el concepto de composición química, donde no se especifica criterios de evaluación para el cemento, sin embargo este debe ser analizado para propósitos informativos (NTE INEN 2380, 2011).

### **Propiedades físicas**

Las propiedades físicas están en función del cumplimiento de los requisitos redactados en la tabla 7, mismos que se encuentran establecidos para cada tipo de cemento y a su vez especifica la norma de ensayo aplicable para cada parámetro de análisis. Adicional si el fabricante especifica requisitos opcionales el cemento debe cumplir con la tabla 2 de la norma NTE INEN 2380 .

**Tabla 7**

*Requisitos físicos para cada tipo de cemento*

<b>Tipo de cemento</b>	<b>Norma de ensayo aplicable</b>	<b>GU</b>	<b>HE</b>	<b>MS</b>	<b>HS</b>	<b>MH</b>	<b>LH</b>
Finura	INEN 196	a	a	a	a	a	a
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	INEN 200	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80
Tiempo de fraguado, método de Vicat <sup>b</sup>	INEN 158						
Inicial no menos de, minutos		45	45	45	45	45	45

Tipo de cemento	Norma de ensayo aplicable	GU	HE	MS	HS	MH	LH
Inicial no más de, minutos		420	420	420	420	420	420
Contenido de aire del mortero, en volumen, %	INEN 195	c	c	c	c	c	c
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo <sup>d</sup>							
1 día		-	12	-	-	-	-
3 días	INEN 488	13	24	11	11	5	-
7 días		20	-	18	18	11	11
28 días		28	-	-	25	-	21
Calor de hidratación							
7 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo	INEN 199	-	-	-	-	290 (70)	250 (60)
28 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo		-	-	-	-	-	290 (70)
Expansión en barra de mortero 14 días, % máximo	INEN 2 529	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Expansión por sulfatos (resistencia a sulfatos) <sup>e</sup>							
6 meses, % máximo	INEN 2 503	-	-	0,10	0,05	-	-
1 año, % máximo		-	-	-	0,10	-	-

*Nota.* La tabla contiene las consideraciones de la norma INEN 2380. <sup>(a)</sup> El porcentaje retenido en el tamiz de 45 µm (No.325) por vía húmeda y el área de la superficie específica determinada en el equipo de permeabilidad al aire en m<sup>2</sup>/kg, ambos deben ser informados en todos los certificados de resultados requeridos al fabricante. <sup>(b)</sup> El tiempo de fraguado se refiere al tiempo de fraguado inicial en la NTE INEN 158. <sup>(c)</sup> Se debe informar el contenido de aire en todos los certificados de resultados de ensayos requeridos al fabricante. <sup>(d)</sup> Los cementos pueden ser despachados antes que estén disponibles los datos de ensayo de mayor edad. En tales casos, el valor del ensayo puede dejarse en blanco. € En los ensayos de cemento HS, no se requieren los ensayos a un año cuando el cemento cumple con el límite a 6 meses. Un cemento HS que no

cumple con el límite a 6 meses, no debe ser rechazado a menos que tampoco cumpla el límite a un año. Tomado de *Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos* (p.4), por NTE INEN 2380, 2011.

### **Especificaciones técnicas de Holcim Fuerte Tipo GU**

Los cementos adicionados de la INEN 2380 reducen el impacto ambiental y reducen un 35% las emisiones de CO<sub>2</sub> respecto a los cementos portland (Holcim Ecuador S.A., 2015, p.6).

**Requisitos físicos.** Los valores presentados en la tabla 8, son el promedio de muestras de cemento típico despachado por Holcim.

**Tabla 8**

*Especificaciones técnicas del cemento Holcim Tipo GU*

Parámetro	Valores comparativos	
	INEN 2380	Valor referencial
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0,80	-0,06
Tiempo de fraguado inicial, método de Vicat	No menos de, minutos	45
	No más de, minutos	420
Contenido de aire del mortero, en volumen, %		<sup>a</sup> 3
	1 día	<sup>a</sup> 9
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo	3 días	13
	7 días	20
	28 días	28
Expansión en barras de mortero 14 días, % máx.	0,020	0,002

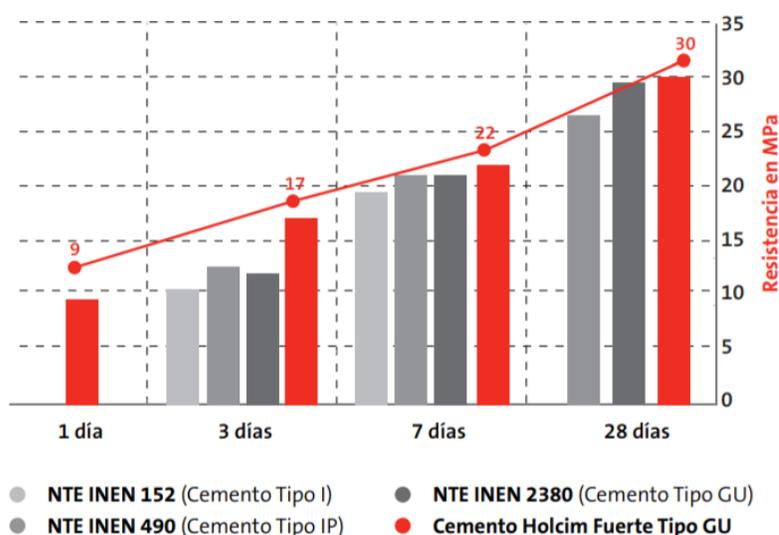
*Nota.* La tabla muestra la certificación que emite Holcim para el cemento fuerte Tipo GU. (<sup>a</sup>) Límite no especificado por la NTE INEN 2380. Tomado de *Ficha técnica – Cemento hidráulico Tipo GU para la construcción en general* (p.7), por Holcim Ecuador S.A., 2015.

## Resistencia

Dependiendo de los requisitos de diseño de cada construcción, el diseñador establece la resistencia del proyecto y para alcanzar la resistencia deseada es necesario verificar la calidad de cada uno de sus materiales. La figura 19 muestra el comportamiento de Holcim fuerte Tipo GU enfocado a la resistencia que se tiene para cada edad del hormigón y lo compara con la normativa que le rige; evidenciando así que su resistencia es mayor a las especificadas en norma.

**Figura 19**

*Comparativo de resistencia del cemento Holcim fuerte Tipo GU*



*Nota.* La figura indica la resistencia que garantiza Holcim Fuerte Tipo GU. Este análisis es comparado con los diferentes tipos de cemento y su normativa vigente. Tomado de *Ficha técnica – Cemento hidráulico Tipo GU para la construcción en general* (p.8), por Holcim Ecuador S.A., 2015.

Con los criterios antes analizados, se puede determinar que el cemento a emplearse satisface los requerimientos dados por normativa y permitirá garantizar un buen desempeño del hormigón para las resistencias establecidas en este proyecto.

### **Propiedades físicas y mecánicas de los agregados fino y grueso del hormigón**

Caracterizar los componentes del hormigón es indispensable para determinar de forma correcta la calidad del material, asegurando que las dosificaciones realizadas lleguen a adquirir las resistencias para las que fueron diseñadas. Para ello es necesario conocer y seguir las disposiciones de las normativas correspondientes (Castro Solano, 2020).

### **Ensayos de laboratorio de agregado fino**

Para lograr un correcto proceso de dosificación, es necesario conocer las propiedades de la arena o agregado fino, de esta manera establecer de manera adecuada las relaciones y proporciones de los distintos componentes (Castro Solano, 2020).

### ***Peso específico y absorción***

Según las normas; ASTM C127 y ASTM C128, el peso específico o gravedad específica es un valor adimensional, el cual es obtenido a partir de la relación de la densidad de un material en particular con respecto a la densidad del agua destilada (ASTM International, 2015).

Para realizar estos ensayos se necesita que la muestra esté libre de impurezas y partículas que hayan pasado por el tamiz N° 200, para garantizar esta condición se procede a lavar la muestra. Es necesario que el material se encuentre en condición saturada, se toma una muestra representativa del agregado y se la sumerge en agua durante 24 horas (Galeas Arias & Guzmán Chávez, 2019).

**Figura 20**

*Agregado fino en saturación*



*Nota.* La figura indica el agregado fino en un balde metálico, donde se mantiene en sumersión durante 24 horas.

Una vez el material se encuentra totalmente saturado se procede a colocarlo en una bandeja y esparcirlo de manera uniforme, esto con el fin de que el secado se de en un tiempo menor. Este ensayo requiere que el agregado se encuentre en condición de superficie seca saturada (SSS), para verificar que cumpla esta condición se llena el molde cono truncado con la muestra, compactándola de tal forma que una vez lleno el molde se hayan dado 25 apisonadas, este proceso se repite por capas hasta lograr una compactación uniforme. Se enraza el molde y se retira todo el material que haya quedado repartido alrededor. Se retira el molde de la superficie y se verifica que se derrumba ligeramente, si cumple esta condición, hemos llegado al punto de (SSS), si el material mantiene la geometría del cono o se derrumba de forma excesiva, el ensayo no tiene validez (ASTM International, 2015).

**Figura 21**

*Verificación del estado del agregado fino*



*Nota.* La figura indica el cono truncado, ligeramente derrumbado, esto indica que el material está en el estado correcto de SSS.

Una vez el material se encuentre en la condición de (SSS), se coloca 500 gramos de arena dentro del picnómetro de 1000 cm<sup>3</sup> antes de conectar a la bomba de vacíos con el fin de extraer el aire contenido en el agregado, se llena el recipiente con agua destilada hasta la marca de graduación y se agita. Se debe verter de manera cuidadosa el agregado en el picnómetro, el cual ha sido pesado con anterioridad. Secar el material durante 24 horas a una temperatura constante de aproximadamente 110 °C, transcurrido este tiempo se pesa el material seco (Galeas Arias & Guzmán Chávez, 2019).

**Figura 22**

*Colocación del picnómetro y la bomba de vacíos*



*Nota.* La figura indica la colocación de la bomba de vacíos en el picnómetro, con el objetivo de extraer el aire atrapado en el agregado.

#### **Proceso de cálculo**

- A= Masa de la muestra seca al horno.
- B= Masa del picnómetro lleno con agua, hasta la marca de calibración.
- C= Masa del picnómetro lleno con muestra y agua hasta la marca de calibración.
- S= Masa de muestra saturada superficialmente seca.

*Densidad Relativa (SH)*

$$R = \frac{A}{(B + S - C)}$$

(3)

*Densidad Relativa (SSS)*

$$DR = \frac{S}{(B + S - C)} \quad (4)$$

*Densidad Relativa Aparente*

$$DRA = \frac{A}{(B + A - C)} \quad (5)$$

*Absorción*

$$Abs = \frac{S - A}{A} * 100\% \quad (6)$$

### ***Masa unitaria del agregado fino***

La densidad de un material es directamente proporcional al nivel de compactación al que se le aplique, por esta razón se determinan dos valores, masa unitaria suelta y compactada, ambos datos son necesarios para el proceso de dosificación del hormigón y deberán ser tomados en cuenta al momento del cálculo respectivo, para este proceso se usaran las Normas ASTM C29 y NTE INEN 858.

**Masa unitaria suelta.** Para realizar este proceso, se determina el volumen del molde cilíndrico y se registra su peso, posteriormente se llena el molde con el material el cual debió pasar previamente un proceso de secado al horno de al menos 24 horas a una temperatura constante de 110 °C, se retira el sobrante y se enrasa el molde dejando la superficie del material a un solo nivel, una vez enrasado se toma su peso (Castro Solano, 2020).

**Masa unitaria compactada.** El proceso se realizará de forma similar a la masa unitaria, la diferencia radica en que, al momento del llenado del recipiente cilíndrico, se lo hace en 3 capas de igual espesor, cada una compactada mediante 25 aplicaciones de la barra de

compactación, una vez compactado se procede a retirar el material sobrante y enrasar, pesar el molde con el material compactado (Castro Solano, 2020).

### Figura 23

*Peso del agregado fino compactado*



*Nota.* La figura indica el peso del balde metálico y el agregado fino compactado.

$$\text{Masa unitaria} = \frac{B - A}{V} \quad (7)$$

Según Orbe Pinchao & Zúñiga Morales (2013), las abreviaturas para masa unitaria son:

- A= Peso del recipiente en gramos.
- B= Peso del recipiente con material suelto o compactado, en gramos.
- V= Volumen del molde, en centímetros cúbicos.

### ***Granulometría de agregado fino***

La granulometría de un material corresponde a la distribución de las partículas, este análisis se lo realiza mediante el uso de tamices de diferentes aberturas, las cuales están descritas en la Norma ASTM C33. Mediante este proceso también se obtiene el módulo de finura del material, el cual representa el índice para evaluar o clasificar los agregados en función del tamaño de las partículas que lo componen (Castro Solano, 2020).

El proceso de ensayo fue realizado acorde las normas ASTM C136 y NTE INEN 696.

Según Castro Solano (2020), el equipo empleado para granulometría fina es:

- Tamices: 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100
- Tamizadora automática
- Balanza
- Bandejas – taras
- Horno

#### **Proceso de cálculo**

Secar el agregado fino durante 24 horas a una temperatura constante de 110 °C, una vez el material se encuentre seco, pesar aproximadamente una porción de 500 gr y colocar en el juego de tamices, los tamices deben estar armados de tal forma que el de mayor abertura se encuentre en la parte superior. Colocar el juego de tamices en el agitador automático durante 1 minuto, se retiran los tamices y se pesa el material atrapado en cada uno de ellos (Castro Solano, 2020).

Con los pesos retenidos en los tamices, se determina los porcentajes retenidos acumulados y el porcentaje que pasa por cada tamiz, con estos datos se obtendrán las curvas granulométricas (Castro Solano, 2020).

**Figura 24**

*Uso del tamizador automático*



*Nota.* La figura indica la colocación del juego de tamices en el tamizador automático.

**Módulo de finura.** Según Sanhueza R. (n.d.) el módulo de finura es un índice que ayuda en la clasificación de los agregados pétreos en función de su granulometría.

Es la suma de los porcentajes retenidos acumulados de un árido, dividido para 100, de una serie de tamices. Este índice indica el tamaño medio de un árido, a mayor módulo de finura, mayor tamaño.

Castro Solano (2020), afirma que para módulo de finura se usa los tamices 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100.

$$M_f = \frac{\sum \% \text{ retenido acumulados de los tamices}}{100} \quad (8)$$

Donde:

- Mf = Módulo de finura de agregado fino.

### ***Determinación de contenido de humedad en arena***

El contenido de humedad de un material depende de varios factores; la procedencia, el transporte y el almacenaje del mismo. La humedad presente en la arena puede influir en la cantidad final de agua que será usada para la mezcla de la dosificación, pudiendo ocasionar una mezcla con un alto contenido de agua o, por otro lado, una mezcla reseca y poco manejable.

La metodología de ensayo para obtener el contenido de humedad de la arena se detalla en la norma NTE INEN 862 (Castro Solano, 2020).

Según Castro Solano (2020), el equipo empleado para determinar el contenido de humedad en arena, es:

- Balanza
- Bandejas – taras
- Horno

#### **Proceso de cálculo**

Se toma una tara vacía y se procede a pesarla, colocar una porción del material en la tara y tomar nuevamente el peso correspondiente. Dejar secar el material durante 24 horas a una temperatura constante de 110 °C y pesar el material una vez se encuentre seco.

$$\% W = \frac{B - C}{C - A} * 100\% \quad (9)$$

Donde:

- A= Peso de la tara en gramos
- B= Peso de la tara con material húmedo, en gramos.
- C= Peso de la tara con material seco, en gramos.
- % W= Porcentaje de humedad.

**Resultados obtenidos****Peso específico y absorción****Tabla 9***Datos de pesos de picnómetro y agregado fino*

<b>Datos</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
<b>A</b>	Peso de la muestra seca al horno	477,06	g
<b>B</b>	Peso del picnómetro con agua, hasta marca de calibración	1251,93	g
<b>C</b>	Peso del picnómetro con muestra y agua, hasta marca de calibración	1553,81	g
<b>S</b>	Peso de la muestra saturada superficialmente seca	500,09	g

*Nota.* Esta tabla muestra los datos de pesos del picnómetro utilizado y el agregado fino.

**Tabla 10***Cálculo de densidades y absorción del agregado fino*

<b>Cálculos</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Dr SH	Densidad relativa (gravedad específica) SH	2,407	-
Dr SSS	Densidad relativa (gravedad específica) SSS	2,523	-
Dr A	Densidad relativa Aparente (gravedad específica Aparente)	2,723	-
DA	Densidad Aparente	2,712	Kg/dm <sup>3</sup>
Abs	Absorción	4,827	%

*Nota.* Esta tabla muestra los valores obtenidos para densidades relativas, densidades aparentes y porcentaje de absorción.

**Granulometría de finos**

**Tabla 11**

*Porcentajes de material fino retenido y pasante por cada tamiz*

Juego de tamices	Peso total retenido (g)	Peso retenido acumulado (g)	Porcentaje retenido (%)	Porcentaje retenido acumulado (%)	Porcentaje que pasa (%)
Tamiz 3/8"	0,88	0,88	0,15	99,85	99,85
Tamiz N°4	13,76	14,64	2,44	102,29	97,56
Tamiz N°8	77,28	91,92	15,31	117,60	84,69
Tamiz N°16	161,92	253,84	42,28	159,89	57,72
Tamiz N°30	141,27	395,10	65,81	225,70	34,19
Tamiz N°50	120,90	516,00	85,95	311,65	14,05
Tamiz N°100	52,91	568,91	94,77	406,42	5,23
Pasante Tamiz N°100	31,41	600,32	100,00	506,42	0,00
Total	600,32				293,43
				Módulo de finura	2,934

*Nota.* Esta tabla muestra los resultados de los ensayos granulométricos realizados al agregado fino, así como su módulo de finura.

**Requisitos para el árido fino.** Según la norma NTE INEN 872, se establecen los requisitos de granulometría y calidad para los áridos fino y grueso, para utilizarlos en el hormigón.

El árido fino deber ser graduado dentro de los límites de la tabla 12 o de la figura 25.

**Tabla 12**

*Límites de gradación del árido fino*

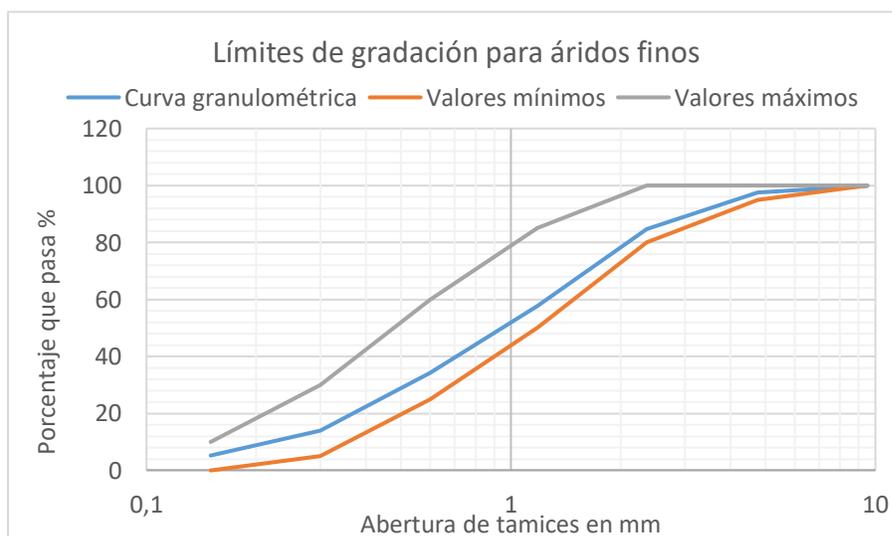
Tamiz NTE INEN 154	Porcentaje que pasa
9,50 mm	100%

Tamiz NTE INEN 154	Porcentaje que pasa
4,75 mm	95% a 100%
2,36 mm	80% a 100%
1,18 mm	50% a 85%
0,60 mm	25% a 60%
0,30 mm	5% a 30%
0,15 mm	0% a 10%

*Nota.* Esta tabla muestra los rangos máximos y mínimos para los porcentajes de material que pasan por cada tamiz. Tomado de *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 872* (p.2), por Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011b.

**Figura 25**

*Límites de gradación para áridos finos*



*Nota.* Esta gráfica muestra los límites superiores e inferiores para la gradación del árido fino.

Tomado de *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 872* (p.2), por Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011b.

### **Ensayos de laboratorio de agregado grueso**

Los ensayos de laboratorio realizados al agregado grueso son similares a los descritos anteriormente, con ciertas variaciones en el proceso. Es necesario conocer las propiedades del ripio o agregado grueso, de esta manera se logrará establecer de manera adecuada las relaciones y proporciones de los distintos componentes al momento de realizar las dosificaciones (Castro Solano, 2020).

### ***Peso específico y absorción***

Las normas que serán utilizadas serán las: ASTM C127 y NTE INEN 857, el peso específico o gravedad específica es un valor adimensional, el cual es obtenido a partir de la relación de la densidad de un material en particular con respecto a la densidad del agua destilada (ASTM International, 2015).

Para realizar estos ensayos se necesita que la muestra esté libre de impurezas y partículas finas que hayan quedado adheridas a la superficie, para garantizar esta condición se procede a lavar la muestra. Es necesario que el material se encuentre en condición saturada, se toma una muestra representativa del agregado y se la sumerge en agua durante 24 horas (Galeas Arias & Guzmán Chávez, 2019).

Una vez el material se encuentra totalmente saturado se procede a colocarlo en una bandeja y esparcirlo de manera uniforme. Este ensayo requiere que el agregado se encuentre en condición de superficie seca saturada (SSS), para verificar que cumpla esta condición se coloca el material sobre una franela y se procede a secar las gravas, hasta que hayan perdido su brillo correspondiente a la humedad superficial (ASTM International, 2015).

**Figura 26**

*Remoción de humedad superficial del agregado grueso*



*Nota.* La figura indica el proceso de remoción de la humedad superficial del agregado grueso, hasta llegar a la condición de SSS.

Una vez el material se encuentre en la condición de (SSS), se pesa el material en aire. Para obtener el peso sumergido, se coloca la canastilla de la balanza en el agua y se obtiene su peso sumergido, colocar el agregado en la canastilla sumergida y se procede a tomar su peso. Finalmente, el material se coloca en una bandeja y se deja secar durante 24 horas a una temperatura constante y se obtiene su peso seco (Castro Solano, 2020).

#### **Equipo empleado**

- Canasta metálica
- Balanza
- Tanque con agua
- Bandejas – taras
- Horno
- Franela

### Proceso de cálculo

$$D = B - A \quad (10)$$

$$P_{esp} = \frac{E}{C - D} \quad (11)$$

$$\delta_{sss} = \frac{C}{C - D} \quad (12)$$

$$P_{esp-ap} = \frac{E}{E - D} \quad (13)$$

$$Abs = \frac{C - E}{E} * 100\% \quad (14)$$

Castro Solano (2020), indica que las abreviaturas respecto a peso específico corresponden a:

- A= Masa de canasta sumergida, en gramos.
- B= Masa de canasta y material sumergido, en gramos
- C= Masa de material en estado superficie saturada seca en aire, en gramos.
- D= Masa de material sumergido, en gramos.
- E= Masa de material seco, en gramos.
- $P_{esp}$ = Peso específico del ripio, en gramos/cm<sup>3</sup>.
- $\delta_{sss}$ = Peso específico en estado superficie saturada seca, en gramos/cm<sup>3</sup>.
- $P_{esp-ap}$ = Peso específico aparente, en gramos/cm<sup>3</sup>
- Abs= Porcentaje de absorción del agregado.

### **Masa unitaria del agregado grueso**

La masa unitaria de un material corresponde al peso del mismo para un determinado volumen, este valor de densidad varía notablemente si el material se encuentra suelto o compactado, es por esta razón que se miden ambos valores (Castro Solano, 2020).

Estos ensayos fueron definidos por medio de las Normas ASTM C29 y NTE INEN 858.

Según Castro Solano (2020), el equipo empleado para determinar la masa unitaria del agregado grueso, es:

- Molde cilíndrico
- Barra de compactación
- Balanza

#### **Proceso de cálculo**

$$Masa\ unitaria = \frac{B - A}{V} \quad (15)$$

Orbe Pinchao & Zúñiga Morales (2013), indica que las abreviaturas corresponden a:

- A= Peso del recipiente en gramos
- B= Peso del recipiente con material suelto o compactado, en gramos.
- V= Volumen del molde, en centímetros cúbicos.

**Masa unitaria suelta.** Para realizar este proceso, se determina el volumen del molde cilíndrico y se registra su peso, posteriormente se llena el molde con el material el cual debió pasar previamente un proceso de secado al horno de al menos 24 horas, se retira el sobrante y se enrasa el molde, una vez enrasado se toma su peso (Castro Solano, 2020).

**Masa unitaria compactada.** El proceso se realizará de forma similar a la masa unitaria suelta, la diferencia radica en que, al momento del llenado del recipiente cilíndrico, se lo hace en 3 capas de igual espesor, cada una compactada mediante 25 aplicaciones de la barra de compactación, una vez compactado se procede a retirar el material sobrante y enrasar, pesar el molde con el material compactado (Castro Solano, 2020).

**Figura 27**

*Enrasado del molde metálico*



*Nota.* La figura indica el proceso de enrasado que se hace con el material, antes de tomar su peso respectivo.

### ***Granulometría de agregado grueso***

La granulometría de un material corresponde a la distribución de las partículas, este análisis proporciona una buena idea de las características físicas del material y su comportamiento conjunto dentro de la mezcla, se lo realiza mediante el uso de tamices de diferentes aberturas (Castro Solano, 2020).

El proceso de ensayo fue realizado acorde las normas ASTM C136 y NTE INEN 696.

### **Figura 28**

*Juego de tamices con agregado grueso*



*Nota.* La figura indica el juego de tamices con el agregado grueso, colocado en el tamizador automático.

**Equipo empleado:**

- Tamices
- Tamizadora automática
- Balanza
- Bandejas – taras
- Horno

**Proceso de cálculo**

Secar el agregado grueso durante 24 horas a una temperatura constante de 110 °C, una vez el material se encuentre seco, pesar aproximadamente una porción de 6000 gr y colocar en el juego de tamices (el proceso se realiza tres veces, 2000 gr cada vez), los tamices deben estar armados de tal forma que el de mayor abertura se encuentre en la parte superior. Colocar el juego de tamices en el agitador automático durante 1 minuto, posteriormente se retiran los tamices y se pesa el material atrapado en cada uno de ellos (Castro Solano, 2020).

Con los pesos retenidos en los tamices, se determina los porcentajes retenidos acumulados y el porcentaje que pasa por cada tamiz, con estos datos se obtendrán las curvas granulométricas (Castro Solano, 2020).

***Determinación de contenido de humedad en el ripio***

La humedad presente en el agregado grueso puede influir en la cantidad final de agua que será usada para la mezcla de la dosificación, pudiendo ocasionar variaciones con el agua de mezclado.

La metodología de ensayo para obtener el contenido de humedad del agregado grueso se detalla en la norma NTE INEN 862 (Castro Solano, 2020).

**Equipo empleado**

- Balanza
- Bandejas – taras
- Horno

**Proceso de cálculo**

Se toma una tara vacía y se procede a pesarla, colocar una porción del material en la tara y tomar nuevamente el peso correspondiente. Dejar secar el material durante 24 horas a una temperatura constante de 110 °C y pesar el material una vez se encuentre seco.

$$\% W = \frac{B - C}{C - A} * 100\% \quad (16)$$

Donde:

- A= Peso de la tara en gramos
- B= Peso de la tara con material húmedo, en gramos.
- C= Peso de la tara con material seco, en gramos.
- % W= Porcentaje de humedad.

***Abrasión***

El ensayo de abrasión permite determinar la capacidad del material de resistir la erosión en la superficie de las partículas, se requiere del uso de una carga abrasiva conformada por esferas de acero que golpean el material mediante la rotación producida por la Máquina de los Ángeles (Castro Solano, 2020).

La metodología de ensayo para obtener los datos de abrasión del agregado grueso se detalla en la norma ASTM C131 y NTE INEN 860 (Castro Solano, 2020).

**Figura 29**

*Retirada del material y las cargas abrasivas de la Máquina de los Ángeles*



*Nota.* La figura indica la retirada del material ensayado, junto a las cargas abrasivas (esferas de acero) utilizadas para el desgaste del árido grueso.

#### **Equipo empleado**

- Máquina de los Ángeles
- Tamices
- Balanza
- Carga abrasiva (esferas de acero)
- Horno

### Proceso de cálculo

Debemos separar la muestra mediante tamizado, de acuerdo a los rangos de tamaño para obtener una gradación adecuada, para partículas menores a 37.5 mm (Castro Solano, 2020).

**Tabla 13**

*Gradación de la muestra para partículas menores a 37.5 mm*

Tamaño de las aberturas de tamiz (mm)		Masa con tamaños indicados (gr)			
Pasa	Retenido en	Gradaciones			
		A	B	C	D
37,5	25,0	1250 ± 25			
25,0	19,0	1250 ± 25			
19,0	12,5	1250 ± 10	2500 ± 10		
12,5	9,5	1250 ± 10	2500 ± 10		
9,5	6,3			2500 ± 10	
6,3	4,75			2500 ± 10	
4.75	2,36				5000 ± 10
	Total	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10
	Número de esferas	12	11	8	6

Nota: Esta tabla muestra las gradaciones que corresponden en relación con el tamaño del agregado grueso. Tomado de *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 872* (p.4), por Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011b y (Castro Solano, 2020).

Una vez obtenida la gradación correspondiente, se procede a separar el material necesario para el ensayo con los pesos iniciales. Se coloca la muestra en la Máquina de los Ángeles junto a la carga abrasiva, el número de esferas está en función de la gradación elegida.

El tipo de gradación también determina la cantidad de revoluciones. Se hace rotar la Máquina de los Ángeles hasta completar el total de revoluciones y pesar el material atrapado en el tamiz N° 12 (Castro Solano, 2020).

$$\% \text{ Abrasión} = \frac{A - B}{A} * 100\% \quad (17)$$

Donde:

- A= Peso inicial del agregado, en gramos.
- B= Peso del agregado, retenido en el tamiz N° 12, en gramos.

### **Resultados obtenidos**

#### **Peso específico y absorción**

**Tabla 14**

*Datos de pesos de material de agregado grueso*

<b>Datos</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
A	Peso en aire de la muestra seca al horno	3,34	Kg
B	Peso en aire de la muestra saturada superficialmente seca	3,46	Kg
C	Peso aparente en agua de la muestra saturada	2,03	Kg

*Nota:* Esta tabla muestra los datos obtenidos de pesos del agregado grueso.

**Tabla 15***Cálculos de densidades y absorción agregado grueso*

<b>Cálculos</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Dr SH	Densidad relativa (SH) condición seca	2,333	-
Dr SSS	Densidad relativa (SSS) condición saturada superficialmente seca	2,417	-
Dr A	Densidad relativa aparente	2,547	-
DA	Densidad Aparente	2,538	kg/dm <sup>3</sup>
	Absorción	3,601	%

*Nota.* Esta tabla muestra los datos obtenidos de las densidades relativas, densidades aparentes y absorción del agregado grueso.

#### **Granulometría de gruesos**

**Tabla 16***Porcentajes de material grueso retenido y pasante por cada tamiz*

<b>Juego de tamices</b>	<b>Peso total retenido (g)</b>	<b>Peso retenido acumulado (g)</b>	<b>Porcentaje retenido (%)</b>	<b>Porcentaje retenido acumulado (%)</b>	<b>Porcentaje que pasa (%)</b>
Tamiz 1 ½"	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Tamiz 1"	0,00	0,00	0,00	0,00	100,00
Tamiz ¾"	63,61	63,61	1,06	1,06	98,94
Tamiz ½"	4761,13	4824,74	80,39	81,45	19,61
Tamiz ⅜"	753,11	5577,85	92,94	174,38	7,06
Tamiz N°4	404,38	5982,23	99,67	274,06	0,33
Tamiz N°8	5,77	5988,00	99,77	373,83	0,23
Pasante Tamiz N°8	13,41	6001,41	99,99	473,82	0,01
TOTAL	6001,41				326,18

*Nota:* Esta tabla muestra los resultados de los ensayos granulométricos realizados al agregado grueso.

**Requisitos para el árido grueso.** Según la norma NTE INEN 872, se establecen los requisitos de granulometría y calidad para los áridos fino y grueso, para utilizarlos en el hormigón.

El árido grueso debe consistir en grava, grava triturada, piedra triturada, escoria de altos hornos enfriada al aire u hormigón de cemento hidráulico triturado, o una combinación de estos, conforme a los requisitos de la norma correspondiente (Peña Galván, 2015).

El árido grueso debe cumplir con los requisitos para el número de tamaño especificado, indicados en el anexo 2. Para nuestro tamaño nominal se escogió el número de tamaño 6 de piedra (que es de acuerdo al tamaño máximo nominal de tamices de 19.0 a 9.5 mm).

**Tabla 17**

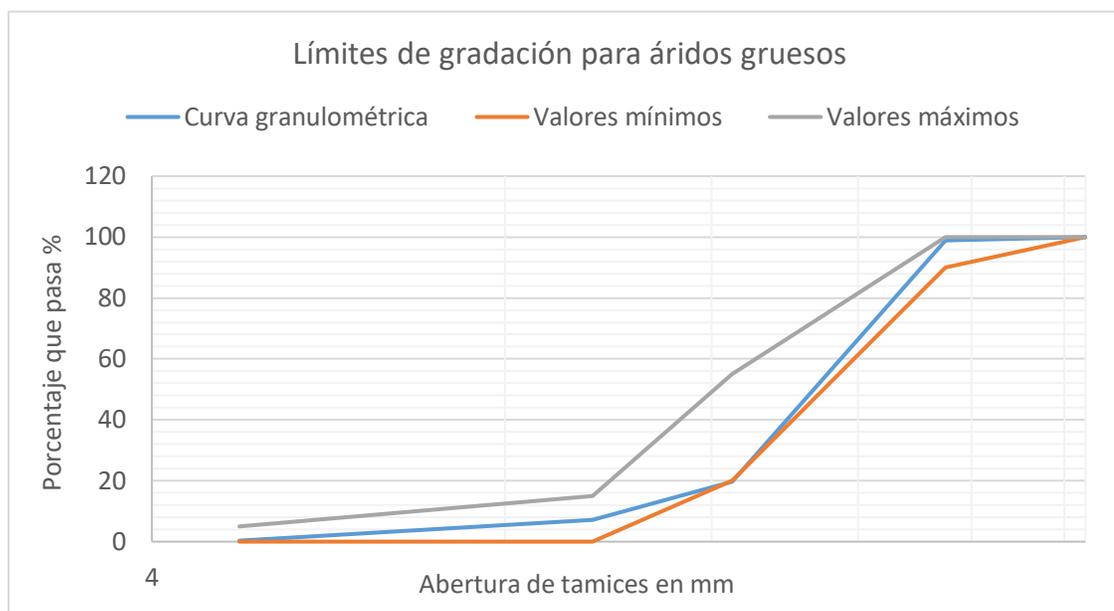
*Límites granulométricos del árido grueso*

Tamiz NTE INEN 154	Porcentaje que pasa
25,00 mm	100%
19,00 mm	90% a 100%
12,50 mm	20% a 55%
9,50 mm	0% a 15%
4,75 mm	0% a 5%

*Nota.* Esta tabla muestra los rangos máximos y mínimos para los porcentajes de material que pasan por cada tamiz, los valores corresponden a la gradación para el número de tamaño 6, especificado en el anexo 2. Tomado de *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 872* (p.5), por (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).

**Figura 30**

*Límites de gradación para áridos gruesos*



*Nota.* Esta gráfica muestra los límites superiores e inferiores para la gradación del árido grueso, se puede apreciar que la curva granulométrica está dentro de los parámetros permitidos por la normativa vigente. Tomado de *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 872* (p.5), por Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011b.

### **Abrasión**

**Tabla 18**

*Datos de abrasión del agregado grueso*

<b>Degradación de árido grueso – Partículas menores a 37,5 mm – NTE INEN 860</b>			
A	Masa Inicial de la muestra de ensayo	5,002	Kg
B	Masa de la muestra retenida en el tamiz de 1,70 mm después de ensayo	3,734	Kg
%	Valor de degradación en desgaste	25,35	%

*Nota.* Esta tabla muestra los valores de pesos y porcentaje de abrasión del árido grueso.

### Ensayos de laboratorio de ceniza volcánica

La tabla 5 indica la normativa que debe cumplir los materiales cementantes, donde se especifica que la normativa ASTM C618 certifica la calidad de cenizas volantes (Valderrama et al., 2011).

Los ensayos de laboratorio complementados con el análisis mineralógico de la ceniza, nos permite tener una correcta caracterización del material a usar en la dosificación.

#### ***Peso específico y absorción***

El porcentaje de absorción de la ceniza es 6,848%, este valor es fundamental en el diseño de las probetas con contenido de ceniza, pues interviene directamente a la cantidad de agua de la mezcla.

**Tabla 19**

*Datos de pesos de picnómetro y ceniza volcánica*

<b>Datos</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
A	Peso de la muestra seca al horno	468,050	g
B	Peso del picnómetro con agua, hasta marca de calibración	1251,480	g
C	Peso del picnómetro con muestra y agua, hasta marca de calibración	1542,940	g
S	Peso de la muestra saturada superficialmente seca	500,100	g

*Nota.* Esta tabla muestra los datos de pesos del picnómetro utilizado y la ceniza volcánica.

**Tabla 20***Cálculo de densidades y porcentaje de absorción de la ceniza volcánica*

<b>Cálculos</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Dr SH	Densidad relativa (gravedad específica) SH	2,243	-
Dr SSS	Densidad relativa (gravedad específica) SSS	2,397	-
Dr A	Densidad relativa Aparente (gravedad específica Aparente)	2,650	-
DA	Densidad Aparente	2,644	kg/dm <sup>3</sup>
Abs	Absorción	6,848 <sup>a</sup>	%
t	Temperatura	22,200	°

*Nota.* Esta tabla muestra los valores obtenidos para densidades relativas, densidades aparentes y porcentaje de absorción de la ceniza volcánica. (<sup>a</sup>) Valor utilizado en la dosificación.

***Determinación del contenido de humedad***

La humedad natural de la ceniza es 0,75%, se evidencia el cálculo en la tabla 21.

**Tabla 21***Contenido de humedad de la ceniza volcánica*

<b>Nombre de la tara</b>	<b>Peso de la tara (g)</b>	<b>Peso de la tara + suelo húmedo (g)</b>	<b>Peso de la tara + suelo seco (g)</b>	<b>Peso del agua (g)</b>	<b>Peso del suelo seco (g)</b>	<b>Contenido de humedad (%)</b>
Punto	142,88	855,24	850,45	4,79	707,57	0,68
Asterisco	144,75	807,56	802,11	5,45	657,36	0,83

*Nota.* La tabla contiene el promedio de dos mediciones del contenido de humedad de la ceniza.

**Diseño de hormigón para probetas sin adición de ceniza, con resistencias  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$**

Castro Solano (2020) establece que previo a la estimación de las cantidades de material en la dosificación, es necesario un estudio detallado de las especificaciones técnicas de la obra para establecer sus requisitos de diseño.

Así como también la puesta en sitio y la colocación del hormigón. Estas características brindan una mejor idea de las propiedades que se buscan obtener durante el diseño del hormigón y la construcción en general (Castro Solano, 2020).

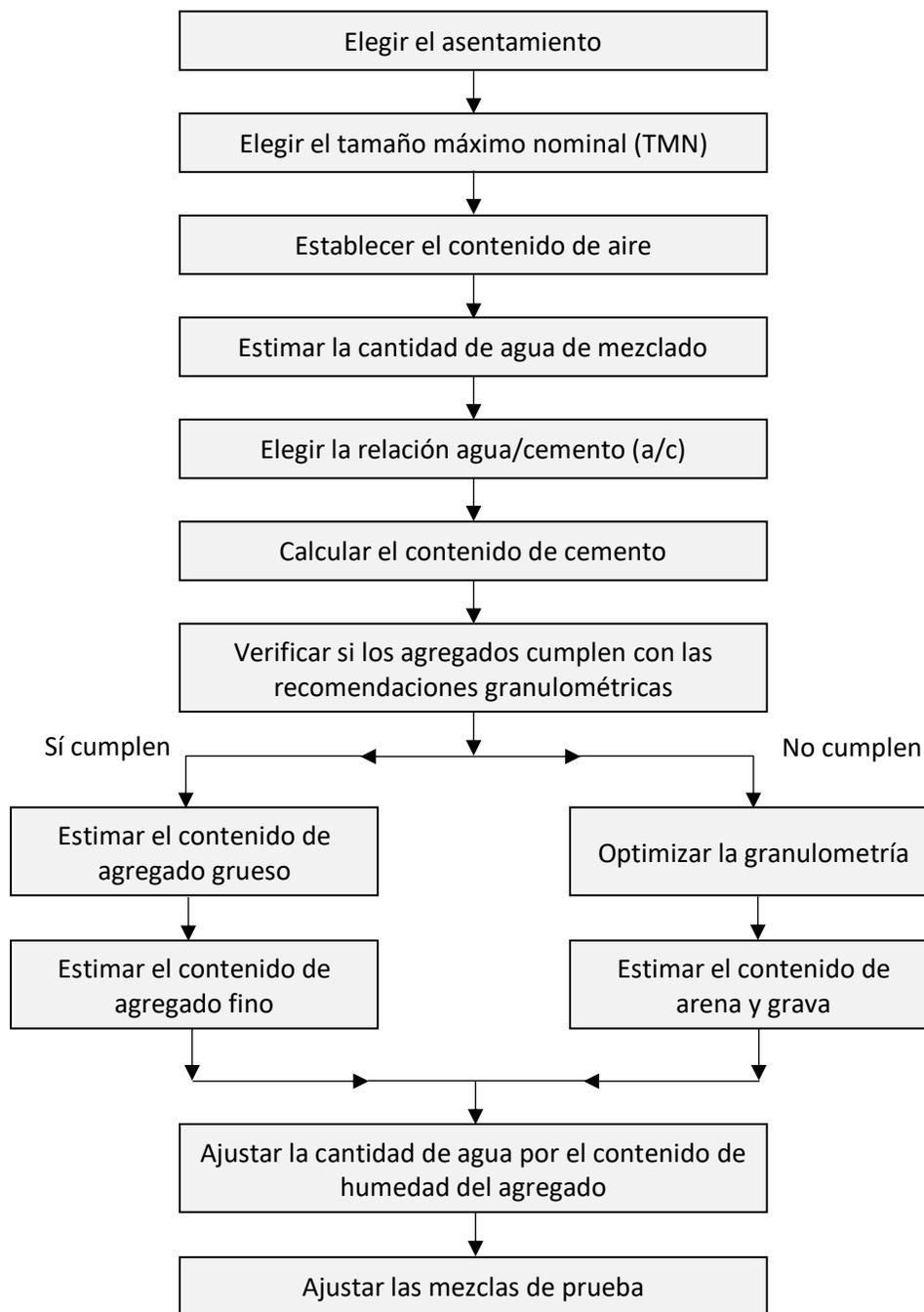
La dosificación de la mezcla de concreto debe establecerse de acuerdo con el Artículo 4.2.3 del ACI 301 o por medio de un método alternativo aceptable para el profesional facultado para diseñar. Los métodos alternativos se basan en la probabilidad de cumplir con los requisitos de resistencia de los ensayos de aceptación de las probetas con curado estándar que cumplen o exceden la probabilidad asociada con el método del Artículo 4.2.3 del ACI 301 (ACI Committee 318, 2019, p.545).

La dosificación de la mezcla de concreto debe establecerse para que el concreto sea trabajable y colocado sin segregación en las probetas, además debe cumplir con los requisitos de resistencia y durabilidad (ACI Committee 318, 2019).

La figura 31 indica un orden secuencial del método de dosificación. Donde se evidencia que la optimización de las proporciones de la mezcla de concreto cumplan con las características deseadas con los materiales disponibles, esto se logra mediante el sistema de ajuste y reajuste (Sánchez de Guzmán & Osorio Redondo, 1997).

**Figura 31**

*Secuencia de pasos para la dosificación de mezclas*



*Nota.* El diagrama indica la secuencia a seguir para la correcta dosificación del hormigón.

Tomado de *Colección básica del concreto. Tecnología y propiedades* (p.190) por

Sánchez de Guzmán & Osorio Redondo, 1997.

### **Resumen de la caracterización de los agregados.**

Con las propiedades de los agregados y las características de diseño del hormigón, se realiza la dosificación para las resistencias previamente establecidas (Castro Solano, 2020).

**Tabla 22**

#### *Caracterización de los agregados*

Parámetro de análisis	Unidad	Agregado	
		Grueso	Fino
Densidad relativa aparente (Gravedad específica aparente)	gr/cm <sup>3</sup>	2,545	2,723
Densidad relativa (Gravedad específica) (SSS)	gr/cm <sup>3</sup>	2,416	2,523
Densidad relativa (Gravedad específica) (SH)	gr/cm <sup>3</sup>	2,333	2,407
Densidad aparente	gr/cm <sup>3</sup>	2,536	2,712
Absorción de agua	%	3,579	4,827
Humedad natural	%	3,449	7,401
Tamaño máximo nominal	in	0,750	-
Módulo de finura	-	-	2,934
Masa unitaria compactada	gr/cm <sup>3</sup>	1,317	1,443
Masa unitaria suelta	gr/cm <sup>3</sup>	1,233	1,269
Valor de degradación	%	25,354	-

*Nota.* La tabla presenta un resumen de los datos de los ensayos realizados a cada uno de los agregados, estos ensayos fueron realizados en el apartado anterior.

#### **Elección del asentamiento**

Los valores del asentamiento recomendados son los mostrados en la tabla 23 y se usan cuando el método de compactación utilizado es la vibración (para otros métodos se deben sumar 2,50 cm a los valores de la tabla 23).

Tabla 23

Valores de asentamiento recomendados para diversas clases de construcción

Asentamiento (cm)	Consistencia (Tipo de concreto)	Grado de trabajabilidad	Tipo de estructura y condiciones de colocación
0 – 2,0	Muy seca	Muy pequeño	Vigas o pilotes de alta resistencia con vibraciones de formaletas.
2,0 – 3,5	Seca	Pequeño	Pavimentos vibrados con máquina mecánica.
3,5 – 5,0	Semiseca	Pequeño	Construcciones en masas voluminosas. Losas medianamente reforzadas con vibración. Fundaciones en concreto simple. Pavimentos con vibradores normales.
5,0 – 10,0	Media	Medio	Losas medianamente reforzadas y pavimentos compactados a mano. Columnas, vigas, fundaciones y muros, con vibración.
10,0 – 15,0	Húmeda	Alto	Secciones con mucho refuerzo. Trabajos donde la colocación sea difícil. Revestimiento de túneles. No recomendable para compactarlo con demasiada vibración

Nota. Esta tabla evidencia los diferentes valores de asentamiento para el hormigón de acuerdo con la consistencia del concreto. Tomado de *Colección del concreto – Tecnología del concreto – Tomo 1. Materiales, propiedades y diseño de Mezclas* (p.187), por Niño Hernandez, 2010.

Para este proyecto se trabaja con una consistencia media donde los valores de asentamiento están entre 5,0 cm – 10,0 cm; entonces el asentamiento considerado es de 5,0 cm y se aumenta 2,50 cm debido a que no se usa vibrador. Por lo tanto, se establece lo siguiente:

**Resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .** El asentamiento es de 7,50 cm.

**Resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .** El asentamiento es de 7,50 cm.

### ***Elección del tamaño máximo nominal del agregado grueso (TMN)***

Se debe buscar una granulometría bien graduada para garantizar que el índice de vacíos sea menor. Los valores recomendados del TMN para los diferentes tipos de construcción, se encuentran en la tabla 24.

**Tabla 24**

*Valores recomendados del TMN de acuerdo con los elementos estructurales*

Dimensión mínima del elemento (cm)	Tamaño máximo nominal en mm (pulgadas)			
	Muros reforzados, vigas y columnas	Muros sin refuerzo	Losas muy reforzadas	Losas sin refuerzo o poco reforzadas
6 – 15	12 (½") – 19 (¾")	19 (¾")	19 (¾") – 25 (1")	19 (¾") – 38 (1 ½")
19 – 29	19 (¾") – 38 (1 ½")	38 (1 ½")	38 (1 ½") – 76 (3")	-
30 – 74	38 (1 ½") – 76 (3")	76 (3")	38 (1 ½") – 76 (3")	76 (3")
75 o más	38 (1 ½") – 76 (3")	152 (6")	38 (1 ½") – 76 (3")	76 (3") – 152 (6")

*Nota.* La tabla establece el tamaño máximo nominal del agregado de acuerdo con la dimensión mínima del concreto y a la aplicación estructural que requiere. Tomado de *Colección del concreto – Tecnología del concreto – Tomo 1. Materiales, propiedades y diseño de Mezclas* (p.188), por Niño Hernandez, 2010.

En este proyecto se trabaja con probetas de diámetro de 15cm y altura de 30cm, además el criterio a usar en la selección del árido es "aplicación estructural", razón por la cual el tamaño del agregado utilizado es de ¾" o 19mm, el mismo que es apto para el enfoque de este escrito.

Resultando:

**Resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .** Tamaño máximo nominal: ¾" o 19mm.

**Resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .** Tamaño máximo nominal: ¾" o 19mm.

### **Estimación del contenido de aire**

El contenido de aire beneficia la manejabilidad y la cohesión de la mezcla. La tabla 25 muestra los valores recomendados para estimar el contenido de aire de la mezcla, teniendo como base las referencias que se especifican en la norma ACI 318 S-08 (Romero Quintero & Hernández Rico, 2014).

**Tabla 25**

*Valores recomendados para el contenido de aire en el concreto para varios grados de exposición*

Agregado grueso		Porcentaje promedio aproximado de contenido de aire	Porcentaje promedio total de aire recomendado para los siguientes grados de exposición		
Pulgadas	mm		Suave	Mediano	Severo
3/8	9,51	3,0	4,5	6,0	7,5
1/2	12,50	2,5	4,0	5,5	7,0
3/4	19,10	2,0	3,5	5,0	6,0
1	25,40	1,5	3,0	4,5	6,0
1 1/2	38,10	1,0	2,5	4,5	5,5
2	50,80	0,5	2,0	4,0	5,0
3	76,10	0,3	1,5	3,5	4,5
6	152,4	0,2	1,0	3,0	4,0

*Nota.* La tabla muestra que la incorporación de aire incluido es notoriamente menor cuando se determina que la estructura no estará expuesta a ambientes severos. Tomado de *Colección del concreto – Tecnología del concreto – Tomo 1. Materiales, propiedades y diseño de Mezclas* (p.189), por Niño Hernandez, 2010.

Resultando en este proyecto:

**Resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .** Contenido de aire aproximado: 2,0 %.

**Resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .** Contenido de aire aproximado: 2,0 %.

### **Cantidad de agua de mezclado**

La manejabilidad, adherencia e hidratación del hormigón están relacionados a la cantidad de agua establecida en la mezcla. La tabla 26 establece la demanda de agua según los criterios de asentamiento y TMN del agregado.

**Tabla 26**

*Requerimientos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes asentamientos y TMN del agregado*

Condiciones del contenido de aire	Asentamiento (cm)	Agua en Kg/m <sup>3</sup> de concreto para los TMN del agregado indicados (mm)							
		10	13	20	25	40	50	70	150
Concreto sin aire incluido	3 a 5	205	200 <sup>a</sup>	185 <sup>a</sup>	180	160	155	145	125
	8 a 10	225	215 <sup>a</sup>	200 <sup>a</sup>	195	175	170	160	140
	15 a 18	240	230	210	205	185	180	170	-
	Cantidad aproximada de aire atrapado en concreto sin aire incluido (%)	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Concreto con aire incluido	3 a 5	180	175	165	160	145	140	135	120
	8 a 10	200	190	180	175	160	155	150	135
	15 a 18	215	205	190	185	170	165	160	-
	Promedio recomendable de contenido total de aire (%)	8	7	6	5	4,5	4	3,5	3

*Nota.* La tabla muestra estimaciones de agua de acuerdo al TMN del agregado y el asentamiento de la mezcla. (<sup>a</sup>) Valores utilizados en el proyecto considerando que el concreto a realizar es sin aire incluido. Tomado de *Tecnología del concreto – Tomo 1. Materiales, propiedades y diseño de Mezclas* (p.191), por Niño Hernandez, 2010.

Para el cálculo del contenido de agua, considerando un concreto sin aire incluido con asentamiento de 7,50 cm y el tamaño máximo nominal del agregado de  $\frac{3}{4}$ " , se debe realizar 3 interpolaciones de los valores <sup>(a)</sup> de la tabla 26. Detalladas a continuación:

- Interpolación en el asentamiento de 5 cm, para obtener la cantidad de agua para el TMN de 19 mm.
- Interpolación en el asentamiento de 8 cm, para obtener la cantidad de agua para el TMN de 19 mm.
- Interpolación para un asentamiento de 7,50 cm, utilizando los valores calculados en las anteriores interpolaciones.

Entonces:

- Para un asentamiento de 5 cm.

**Tabla 27**

*Interpolación de cantidad de agua (kg) para un asentamiento de 5 cm*

Tamaño máximo nominal (mm)	Cantidad de agua (kg para cada m <sup>3</sup> )
13	200
19	x
20	185

*Nota.* La tabla indica los valores utilizados para interpolar la cantidad de agua (kg) para un TMN de  $\frac{3}{4}$ " (19 mm).

Por lo tanto, para un TMN de 19mm la cantidad de agua es 187,14 kg, valor evidenciado en la ecuación 18.

$$x = 185 - \frac{(20 - 19) * (185 - 200)}{(20 - 13)} = 187,14 \quad (18)$$

- Para un asentamiento de 8 cm.

**Tabla 28**

*Interpolación de cantidad de agua (kg) para un asentamiento de 8 cm*

Tamaño máximo nominal (mm)	Cantidad de agua (kg para cada m <sup>3</sup> )
13	215
19	x
20	200

*Nota.* La tabla indica los valores utilizados para interpolar la cantidad de agua (kg) para un TMN de ¾" (19 mm).

Por lo tanto, para un TMN de 19mm la cantidad de agua es 202,14 kg, valor evidenciado en la ecuación 19.

$$x = 200 - \frac{(20 - 19) * (200 - 215)}{(20 - 13)} = 202,14 \quad (19)$$

- Para un asentamiento de 7,50 cm.

**Tabla 29**

*Interpolación de cantidad de agua (kg) para un asentamiento de 7,50 cm*

Asentamiento (cm)	Cantidad de agua (kg para cada m <sup>3</sup> )
5,00	187,14
7,50	x
8,00	202,14

*Nota.* La tabla indica los valores utilizados para interpolar la cantidad de agua (kg) para un asentamiento de 7,50 cm.

Por lo tanto, para un TMN de 19mm la cantidad de agua es 199,64 kg, valor evidenciado en la ecuación 20.

$$x = 202,14 - \frac{(8,00 - 7,50) * (202,14 - 187,14)}{(8,00 - 5,00)} = 199,64 \quad (20)$$

Por lo tanto, se obtiene:

**Resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .** Estimación de agua de mezcla 199,64 l

**Resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .** Contenido de aire aproximado: 199,64 l

### ***Coefficiente de variación para diferentes controles***

A través del coeficiente de variación se puede evidenciar el nivel de control en la elaboración y tratamiento de los especímenes y la calidad de los métodos de ensayo, pudiendo ser los mismos para trabajos en el campo y para especímenes tomados en el laboratorio (Cabrera Piña, 2016, p.62).

**Tabla 30**

*Grado de control del hormigón según la clase de operación*

Clase de operación	Grado de control			
	Excelente	Bueno	Regular	Pobre
Construcción en general	10	10 – 15	15 – 20	20
Laboratorio	5	5 – 7	7 - 10	10

*Nota.* La tabla muestra el grado de control según la clase de operación establecido para las probetas en análisis. Tomado de *Guide to evaluation of strength test results of concrete* (p.7), por ACI Committee 214, 2011.

Considerando que el laboratorio tiene una piscina de curado sin control de temperatura de acuerdo a lo que especifica la norma para el proceso de curado del hormigón, se establece un grado de control regular. Entonces:

**Resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .** Grado de control: regular. Coeficiente de variación: 10.

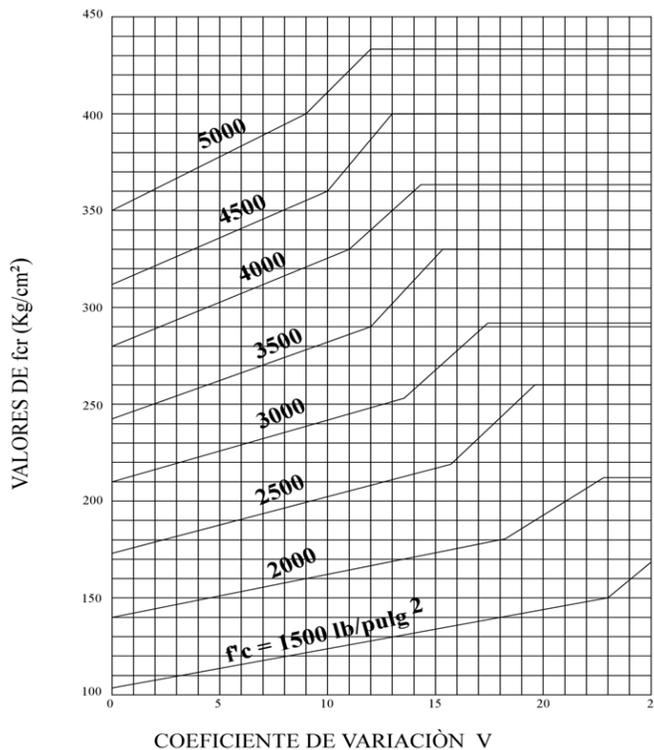
**Resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .** Grado de control: regular. Coeficiente de variación: 10.

**Resistencia de diseño ( $fcr$ )**

El valor de  $fcr$  es la resistencia a la compresión a los 28 días, el mismo que es establecido según el valor de  $f'c$  y el coeficiente de variación, todo ese cálculo es resumido en la figura 32.

**Figura 32**

*Resistencia promedio de diseño ( $fcr$ ) a los 28 días, para diferentes valores de  $f'c$  y coeficientes de variación*



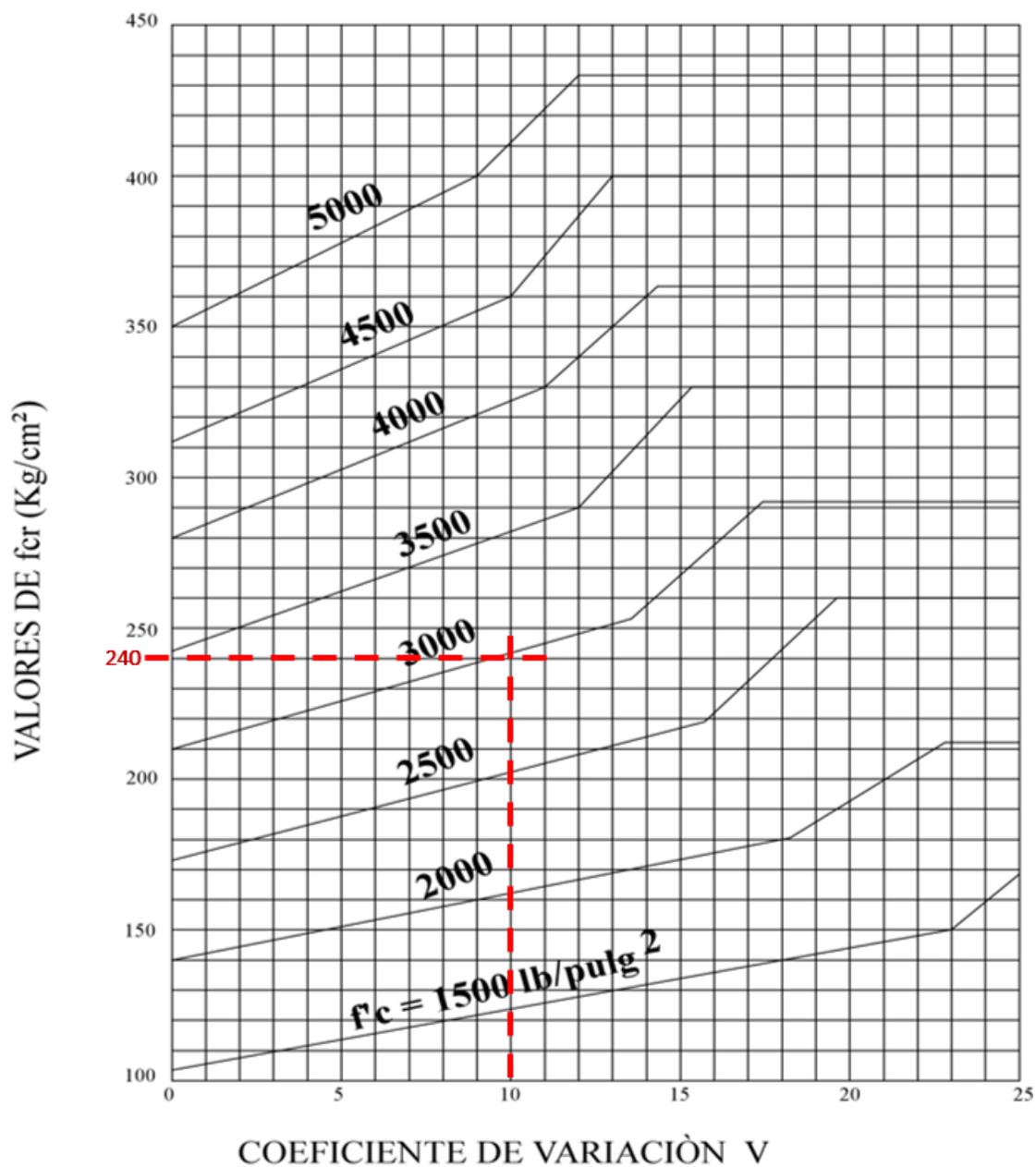
*Nota.* La figura establece el valor de resistencia a la compresión a los 28 días. Tomado de *Concreto simple* (p.128), por Rivera López, 2013, Universidad del Cauca.

Por lo tanto, los valores de  $f_{cr}$  para este proyecto son:

**Resistencia  $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ . Resistencia promedio de diseño ( $f_{cr}$ ):  $240 \text{ kg/cm}^2$ .**

**Figura 33**

*Valor de  $f_{cr}$  para resistencia de  $210 \text{ kg/cm}^2$*



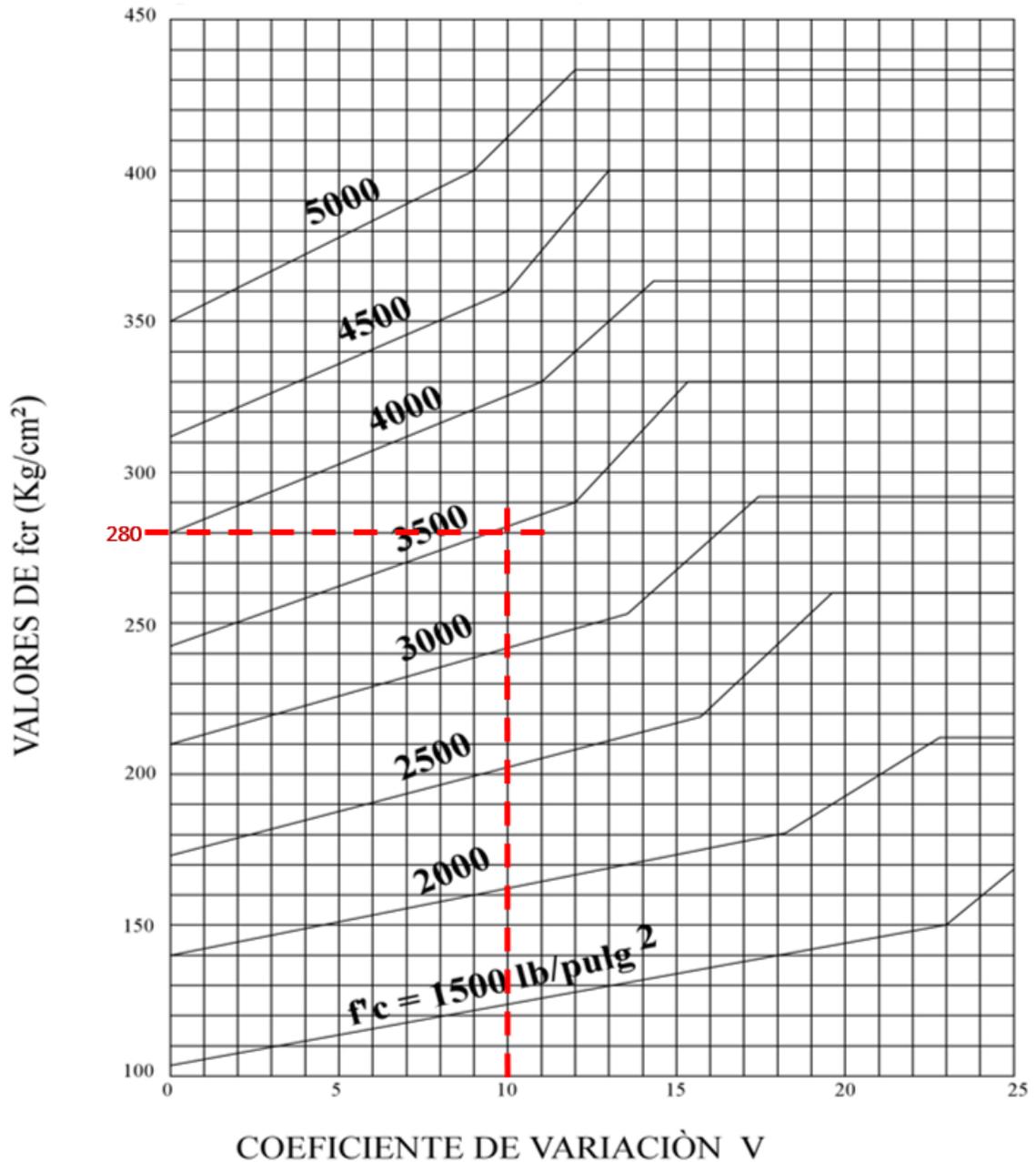
*Nota.* La figura contiene el cálculo de  $f_{cr}$  para la resistencia de  $210 \text{ kg/cm}^2$ . Adaptado de

*Concreto simple* (p.128), por Rivera López, 2013, Universidad del Cauca.

Resistencia  $f'_c = 240 \text{ kg/cm}^2$ . Resistencia promedio de diseño (fcr):  $280 \text{ kg/cm}^2$ .

Figura 34

Valor de fcr para resistencia de  $240 \text{ kg/cm}^2$



Nota. La figura contiene el cálculo de fcr para la resistencia de  $240 \text{ kg/cm}^2$ . Adaptado de

*Concreto simple* (p.128), por Rivera López, 2013, Universidad del Cauca.

### **Relación agua/cemento**

Al establecer la relación agua/cemento se determinan parámetros de: resistencia, durabilidad, impermeabilidad y acabado de la mezcla de concreto. Para determinar la relación se utiliza la tabla 31 o la figura 35 (los valores del diagrama son obtenidos de la tabla antes mencionada).

**Tabla 31**

*Relación entre la resistencia a la compresión y la relación agua cemento (a/c) máxima permisible*

Resistencia a la compresión a los 28 días en Kg/cm <sup>2</sup>	Relación agua/cemento (a/c) máxima permisible			
	Concreto sin inductor de aire		Concreto con inductor de aire	
	Relación absoluta por peso	Litros por saco de cemento de 50 Kg	Relación absoluta por peso	Litros por saco de cemento de 50 Kg
175	0,65	32,4	0,54	27,0
210 <sup>a</sup>	0,58 <sup>a</sup>	29,3	0,46	23,0
245 <sup>a</sup>	0,51 <sup>a</sup>	25,7	0,40	20,0
280 <sup>b</sup>	0,44 <sup>b</sup>	22,2	0,35	17,7
315	0,38	19,1	0,30	15,1
350	0,31	15,1	-	-

*Nota.* La tabla muestra la relación agua/cemento (a/c) que se tiene para cada resistencia a la compresión y según el contenido de aire del concreto.

(<sup>a</sup>) Valores usados para establecer la relación (a/c) para la resistencia de 210 kg/cm<sup>2</sup>.

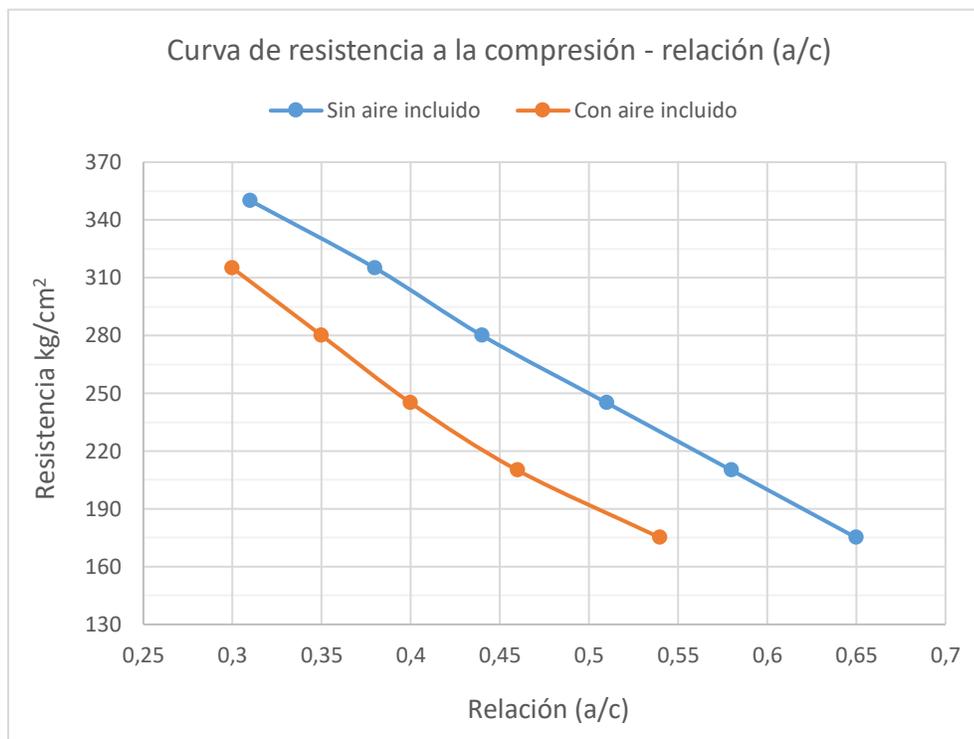
(<sup>b</sup>) Valores usados para establecer la relación (a/c) para la resistencia de 240 kg/cm<sup>2</sup>.

Tomado de *Tecnología del concreto - Tomo 1. Materiales, propiedades y diseño de Mezclas*

(p.193), por Niño Hernandez, 2010.

**Figura 35**

Curva de resistencia a la compresión y la relación a/c



*Nota.* La figura muestra la relación agua/cemento (a/c) expuesta en la tabla 31. Tomado de *Tecnología del concreto - Tomo 1. Materiales, propiedades y diseño de Mezclas* (p.192), por Niño Hernandez, 2010.

Para este proyecto la relación agua cemento (a/c), es:

**Resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .** Para esta dosificación, como se ha mencionado anteriormente, el concreto es sin inductor de aire y tiene una resistencia a la compresión a los 28 días de  $240 \text{ kg/cm}^2$ ; para obtener la relación agua/cemento para este valor se debe interpolar considerando los valores de la tabla 31. Entonces:

**Tabla 32**

*Interpolación de relación (a/c) para un fcr de 240 kg/cm<sup>2</sup>*

Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación (a/c) absoluta por peso para un concreto sin inductor de aire
210	0,58
240	x
245	0,51

*Nota.* La tabla indica los valores utilizados para interpolar la relación agua/cemento (a/c) para un fcr de 240 kg/cm<sup>2</sup>.

Por lo tanto, para una relación a la compresión de 240 kg/cm<sup>2</sup> la relación agua/cemento (a/c) es 0,52, valor evidenciado en la ecuación 21.

$$x = 0,51 - \frac{(245 - 240) * (0,51 - 0,58)}{(245 - 210)} = 0,52 \quad (21)$$

**Resistencia f'c = 240 kg/cm<sup>2</sup>.** La relación (a/c) es 0,44, valor establecido en la tabla 31 para un concreto sin inductor de aire con un fcr de 280 kg/cm<sup>2</sup>.

### **Contenido de cemento**

La cantidad de cemento es establecida por la ecuación 22, que relaciona la cantidad de agua y la relación agua/cemento (a/c).

$$a/c = \frac{\text{Cantidad de agua}}{\text{Cantidad de cemento}} \Rightarrow \text{Contenido de cemento} = \frac{\text{Cantidad de agua}}{a/c} \quad (22)$$

Para este proyecto, se tiene:

**Resistencia f'c = 210 kg/cm<sup>2</sup>.** Para la relación a/c de 0,52 y cantidad de agua de 199,64 el contenido de cemento es 383,92 kg para cada m<sup>3</sup>; valor calculado en la ecuación 23.

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{199,64 \text{ kg}}{0,52} = 383,92 \text{ kg} \quad (23)$$

**Resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .** Para la relación a/c de 0,44 y cantidad de agua de 199,64 el contenido de cemento es 453,73 kg para cada  $\text{m}^3$ ; valor calculado en la ecuación 24.

$$\text{Contenido de cemento} = \frac{199,64 \text{ kg}}{0,44} = 453,73 \text{ kg} \quad (24)$$

### **Volumen de agregado grueso**

Se debe hallar el volumen de agregado grueso por  $\text{m}^3$  de concreto. El cálculo se basa en el volumen unitario de concreto ( $\text{m}^3$ ), expresado por la relación  $b/b_o$  (Niño Hernandez, 2010, p.195)

Los valores de la tabla 33 se basan en los agregados que cumplen con la granulometría recomendada en la norma ASTM C 33. Razón por la cual esta tabla únicamente funciona cuando la grava y la arena cumplen con los requerimientos de la norma.

La ecuación 25 expresa que el volumen de las partículas de agregado grueso por  $\text{m}^3$ , relaciona la masa unitaria compacta (MUC) con la densidad aparente de la grava (dg)

$$b_{or} = \frac{MUC}{dg} \quad (25)$$

El volumen total de agregado grueso que posee la mezcla para un  $\text{m}^3$  se explica en la ecuación 26, misma que es el resultado de la multiplicación de los valores hallados en la tabla 33 por el volumen de las partículas de agregado grueso ecuación 25.

$$b = \left( \frac{b}{b_o} \right) * b_{or} \quad (26)$$

Para calcular el volumen total de agregado grueso de este proyecto, se considera que el TMN del agregado es  $\frac{3}{4}$ " (19 mm) y el módulo de finura de la arena es 2,934. (valores especificados en la tabla 22).

**Tabla 33**

*Volumen de agregado grueso por unidad de volumen de concreto (b/b<sub>o</sub>)*

Tamaño máximo nominal del agregado	Volumen de agregado grueso seco y compactado con varilla, por unidad de volumen de concreto para diferentes módulos de finura de agregado fino			
	Módulo de finura			
mm	2,40	2,60	2,80	3,00
10	0,50	0,48	0,46	0,44
13 <sup>a</sup>	0,59	0,57	0,55 <sup>a</sup>	0,53 <sup>a</sup>
20 <sup>a</sup>	0,66	0,64	0,62 <sup>a</sup>	0,60 <sup>a</sup>
25	0,71	0,69	0,67	0,65
40	0,75	0,73	0,71	0,69
50	0,78	0,76	0,74	0,72
75	0,82	0,80	0,78	0,76
150	0,87	0,85	0,83	0,81

*Nota.* La tabla detalla los volúmenes que están en base a agregados en condiciones de secado al horno descritos en ASTM C29. Estos volúmenes son seleccionados de relaciones empíricas para producir concreto con un grado de trabajabilidad adecuado para construcción usual reforzada.

(<sup>a</sup>) Valores usados para determinar la relación b/b<sub>o</sub> en el proyecto. Tomado de *Tecnología del concreto - Tomo 1. Materiales, propiedades y diseño de Mezclas* (p.196), por Niño Hernandez, 2010.

Como se observa en la tabla 33 no hay valores exactos para el TMN y módulo de finura del proyecto; por lo tanto, se debe realizar 3 interpolaciones detalladas a continuación

- Interpolación en el tamaño máximo nominal de 13mm, para obtener la relación  $b/b_o$  para el módulo de finura de 2,934.
- Interpolación en el tamaño máximo nominal de 20mm, para obtener la relación  $b/b_o$  para el módulo de finura de 2,934.
- Interpolación para un tamaño máximo nominal de 19mm, utilizando los valores calculados en las anteriores interpolaciones.

Entonces:

- Para un tamaño máximo nominal de 13mm.

**Tabla 34**

*Interpolación de relación  $b/b_o$  para un tamaño máximo nominal de 13mm*

Módulo de finura	Relación $b/b_o$
2,800	0,55
2,934	x
3,000	0,53

*Nota.* La tabla indica los valores utilizados para interpolar la relación  $b/b_o$  para un módulo de finura de 2,934.

Por lo tanto, para un módulo de finura de 2,934 la relación  $b/b_o$  es 0,537, valor evidenciado en la ecuación 27.

$$x = 0,53 - \frac{(3,000 - 2,934) * (0,53 - 0,55)}{(3,000 - 2,800)} = 0,537 \quad (27)$$

- Para un tamaño máximo nominal de 20 mm.

**Tabla 35**

*Interpolación de relación  $b/b_o$  para un tamaño máximo nominal de 20mm*

Módulo de finura	Relación $b/b_o$
2,800	0,62
2,934	x
3,000	0,60

*Nota.* La tabla indica los valores utilizados para interpolar la relación  $b/b_o$  para un módulo de finura de 2,934.

Por lo tanto, para un módulo de finura de 2,934 la relación  $b/b_o$  es 0,607, valor evidenciado en la ecuación 28.

$$x = 0,60 - \frac{(3,000 - 2,934) * (0,60 - 0,62)}{(3,000 - 2,800)} = 0,607 \quad (28)$$

- Para un módulo de finura de 2,934.

**Tabla 36**

*Interpolación de relación  $b/b_o$  para un módulo de finura de 2,934*

Tamaño máximo nominal (mm)	Relación $b/b_o$
13,00	0,537
19,00	X
20,00	0,607

*Nota.* La tabla indica los valores utilizados para interpolar la relación  $b/b_o$  para un módulo de finura de 2,934.

Por lo tanto, para el TMN de 19 mm la relación  $b/b_o$  es 0,597, valor evidenciado en la ecuación 29.

$$x = 0,607 - \frac{(20,00 - 19,00) * (0,607 - 0,537)}{(20,00 - 13,00)} = 0,597 \quad (29)$$

Entonces, el volumen total de agregado grueso se calcula con la ecuación 30.

$$b = \left(\frac{b}{b_o}\right) * b_{o'} \Rightarrow b = \left(\frac{b}{b_o}\right) * \frac{MUC}{dg} \quad (30)$$

El agregado grueso del proyecto tiene un valor de masa unitaria compacta de 1,317  $g/cm^3$  y la densidad aparente es 2,536  $g/cm^3$ . Por lo tanto, el volumen de agregado grueso es de 0,310 en un  $m^3$  de mezcla, valor evidenciado en la ecuación 31.

$$b = 0,597 * \frac{1,317}{2,536} = 0,310 \quad (31)$$

Con ello, se obtiene:

**Resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .** El volumen total del agregado grueso  $b=0,310$  para un  $m^3$ .

**Resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .** El volumen total del agregado grueso  $b=0,310$  para un  $m^3$ .

### **Contenido de agregado fino**

Para un  $m^3$  de hormigón se calcula primero el volumen de agregado fino que interviene en la mezcla, usando la ecuación 32 y con ese valor se obtiene su porcentaje en la dosificación, mismo que se calcula con la ecuación 33.

$$Ck = \text{volumen de hormigón} - \text{volumen de concreto} - \text{volumen de agua} \quad (32)$$

$$\phi = \frac{Ck - (1000 * b)}{Ck} * 100 \quad (33)$$

**Resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .** El porcentaje de agregado fino es  $\phi=54,30\%$ . Valor calculado en la ecuación 35, para un volumen de cemento de  $122,27 \text{ dm}^3$ , volumen de agua  $199,64 \text{ dm}^3$  y  $b=0,310$ , datos obtenidos en incisos anteriores.

$$Ck = 1000,00 - 122,27 - 199,64 = 678,09 \text{ dm}^3 \quad (34)$$

$$\phi = \frac{678,09 - (1000 * 0,31)}{678,09} * 100 = 54,30\% \quad (35)$$

**Resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .** El porcentaje de agregado fino es  $\phi=52,75\%$ . Valor calculado en la ecuación 37, para un volumen de cemento de  $144,50 \text{ dm}^3$ , volumen de agua  $199,64 \text{ dm}^3$  y  $b=0,310$ , datos obtenidos en incisos anteriores.

$$Ck = 1000,00 - 144,50 - 199,64 = 655,86 \text{ dm}^3 \quad (36)$$

$$\phi = \frac{655,86 - (1000 * 0,31)}{655,86} * 100 = 52,75\% \quad (37)$$

### ***Cálculo de proporciones***

El cálculo de proporciones se realiza en base al factor  $k$ , que relaciona el volumen de los agregados con la masa del cemento, expresado en la ecuación 38.

$$k = \frac{Ck}{\text{Masa de cemento}} \quad (38)$$

Las proporciones para los agregados viene dado en las ecuaciones 39 y 40, para agregado fino y agregado grueso, respectivamente. Siendo  $d$ , la densidad aparente de cada árido.

$$f = \frac{k * \phi}{100} * df \quad (39)$$

$$g = \frac{k * (100 - \phi)}{100} * dg \quad (40)$$

**Resistencia f'c = 210 kg/cm<sup>2</sup>.** La proporción de agregado fino es 2,6 y para el agregado grueso es 2,0. Valores calculados en las ecuaciones 42 y 43.

$$k = \frac{678,087}{383,929} = 1,77 \quad (41)$$

$$f = \frac{1,77 * 54,30}{100} * 2,71 = 2,6 \quad (42)$$

$$g = \frac{1,77 * (100 - 54,30)}{100} * 2,54 = 2,0 \quad (43)$$

**Resistencia f'c = 240 kg/cm<sup>2</sup>.** La proporción de agregado fino es 2,1 y para el agregado grueso es 1,7. Valores calculados en las ecuaciones 45 y 46.

$$k = \frac{655,856}{453,734} = 1,44 \quad (44)$$

$$f = \frac{1,44 * 52,75}{100} * 2,71 = 2,1 \quad (45)$$

$$g = \frac{1,44 * (100 - 52,75)}{100} * 2,54 = 1,7 \quad (46)$$

### ***Diseño de mezcla para las probetas de análisis***

Con las proporciones establecidas en el apartado anterior se debe establecer el peso de cada material para el estudio, considerando que este se realiza con 14 probetas que tienen un diámetro de 15cm y altura 30cm, además se incluye una probeta extra para determinar el contenido de aire con dimensiones de diámetro de 20,3cm y altura 21,7cm. Por lo tanto, se tiene un volumen total a fundir de 0,0812 m<sup>3</sup>, resultado evidenciado en la tabla 37.

**Tabla 37**

*Cálculo del volumen a fundir en m<sup>3</sup>*

Tipo de probeta	Parámetro	Volumen de probetas		Volumen total de probetas	
		Valor	Unidad		
Probetas de ensayos	# de cilindros	14	-	0,074	m <sup>3</sup>
	Diámetro	15,00	cm		
	Altura	30,00	cm		
Probeta para contenido de aire en hormigón	# de cilindros	1	-	0,007	m <sup>3</sup>
	Diámetro	20,3	cm		
	Altura	21,7	cm		
Volumen total				0,081	m <sup>3</sup>

*Nota.* La tabla especifica el volumen a fundir para los diferentes tipos de probetas.

**Resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .** Se requiere 23,49 L de cantidad de agua, para 45,17 kg de cemento, y con ello la cantidad de arena es 117,48kg y de ripio se necesita 92,46kg (estos pesos de los agregados deben ser secos, es decir no consideran la humedad natural del material).

Estos resultados se evidencian en los cálculos siguientes.

Para la dosificación de 1:2,6:2,0 de este proyecto, se tiene que su sumatoria es 5,6. Este valor es representativo para determinar el volumen de los materiales, evidenciado en la ecuación 47.

Obteniendo:

$$Vol_{material} = \frac{\text{proporción del material}}{\sum \text{de proporciones}} * \text{Volumen total de probetas} \quad (47)$$

**Tabla 38**

*Volumen de cada material para las fundiciones de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$*

<b>Volumen del material</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Volumen de cemento	0,0144	m <sup>3</sup>
Volumen de arena	0,0374	m <sup>3</sup>
Volumen de ripio	0,0294	m <sup>3</sup>

*Nota.* La tabla especifica el volumen de cada material de acuerdo a las proporciones establecidas para resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .

Con el cálculo de volúmenes de cada material hay que establecer la cantidad de sus pesos, descartando la humedad natural y porcentaje de absorción de los áridos. Por lo tanto, se debe determinar la masa de cemento misma que se halla multiplicando su volumen por el peso específico de cemento. Con ello las cantidades de los materiales se especifican en la tabla 39.

**Tabla 39**

*Pesos secos de cada material para fundiciones de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$*

<b>Pesos secos de los materiales</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Masa de cemento	45,17	kg
Cantidad de agua	23,49	L

<b>Pesos secos de los materiales</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Cantidad de arena	117,48	kg
Cantidad de ripio	92,46	kg

*Nota.* La tabla detalla los pesos de cada material, considerando que estos fueron secados al horno a 110°C. Estos valores se utilizan en la fundición de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .

**Resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .** Se requiere 23,39 L de cantidad de agua, para 53,15 kg de cemento, y con ello la cantidad de arena es 109,90 kg y de ripio se necesita 92,05 kg (estos pesos de los agregados deben ser secos, es decir no consideran la humedad natural del material). Estos resultados se evidencian en los cálculos siguientes.

Para la dosificación de 1:2,1:1,7 de este proyecto, se tiene que su sumatoria es 4,8. Este valor es representativo para determinar el volumen de los materiales.

Obteniendo:

**Tabla 40**

*Volumen de cada material para las fundiciones de  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$*

<b>Volumen del material</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Volumen de cemento	0,0169	m <sup>3</sup>
Volumen de arena	0,0350	m <sup>3</sup>
Volumen de ripio	0,0293	m <sup>3</sup>

*Nota.* La tabla especifica el volumen de cada material de acuerdo a las proporciones establecidas para resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .

Con el cálculo de volúmenes de cada material hay que establecer la cantidad de sus pesos, descartando la humedad natural y porcentaje de absorción de los áridos. Por lo tanto, se

debe establecer la masa de cemento misma que se halla multiplicando su volumen por el peso específico de cemento. Con ello las cantidades de los materiales se especifican en la tabla 41.

**Tabla 41**

*Pesos secos de cada material para fundiciones de  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$*

<b>Pesos secos de los materiales</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Masa de cemento	53,15	kg
Cantidad de agua	23,39	L
Cantidad de arena	109,90	kg
Cantidad de ripio	92,05	kg

*Nota.* La tabla detalla los pesos de cada material, considerando que estos fueron secados al horno a 110°C. Estos valores se utilizan en la fundición de  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .

#### ***Ajuste por humedad de los agregados***

Los pesos calculados anteriormente hacen referencia a agregados secados al horno a 110°C, al tener los agregados en condiciones de humedad natural es necesario estimar la cantidad de agua, considerando que existe una cantidad dependiente del agua de mezclado y por lo tanto se debe restar la cantidad de exceso o sumar la cantidad en efecto. Para ello se utiliza la ecuación 48.

$$A = M(H - Abs) \quad (48)$$

Donde:

- A= Agua en exceso o defecto respecto a la condición sss.
- M=Peso de la muestra seca, en kg.
- H=Humedad del agregado en tanto por uno.
- Abs=Absorción del agregado en tanto por uno.

Resultando:

**Resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .** El peso de cemento es 45,16 kg; los valores que se ven modificados por la humedad de los agregados son el agua que desciende a 20,40 L, la arena incrementa su peso a 127,92 kg, al igual que el ripio a 94,08 kg.

**Tabla 42**

*Agua retirada para los pesos húmedos de los agregados de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$*

Tipo de agregado	Agua retirada para pesos húmedos (kg)
Agregado fino	4,775
Agregado grueso	-1,690
$\Sigma$	3,085

*Nota.* La tabla evidencia la sumatoria de agua retirar por las características de humedad y absorción de cada uno de los agregados.

El valor de 3,085kg se debe restar a la cantidad de agua para pesos secos; y para los agregados se debe calcular el peso considerando el contenido de humedad del árido. Con ello, la cantidad de material considerado los pesos húmedos son:

**Tabla 43**

*Pesos húmedos de cada material para fundiciones de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$*

Pesos húmedos de los materiales	Valor	Unidad
Masa de cemento	45,16	kg
Cantidad de agua	20,40	L
Cantidad de arena	127,92	kg
Cantidad de ripio	94,08	kg

*Nota.* La tabla detalla los pesos de cada material, considerando que estos valores son incluye el contenido de humedad de los agregados. Estos valores se utilizan en la fundición de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .

**Resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .** El peso de cemento es 53,15 kg; los valores que se ven modificados por la humedad de los agregados son el agua que desciende a 19,55 L, la arena incrementa su peso a 119,12 kg, al igual que el ripio a 95,27 kg.

**Tabla 44**

*Agua retirada para los pesos húmedos de los agregados de  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$*

<b>Tipo de agregado</b>	<b>Agua retirada para pesos húmedos (kg)</b>
Agregado fino	3,915
Agregado grueso	-0,075
$\Sigma$	3,839

*Nota.* La tabla evidencia la sumatoria de agua retirar por las características de humedad y absorción de cada uno de los agregados.

El valor de 3,839 kg se debe restar a la cantidad de agua para pesos secos; y para los agregados se debe calcular el peso considerando el contenido de humedad del árido. Con ello, la cantidad de material considerado los pesos húmedos son:

**Tabla 45**

*Pesos húmedos de cada material para fundiciones de  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$*

<b>Pesos húmedos de los materiales</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Masa de cemento	53,15	kg
Cantidad de agua	19,55	L
Cantidad de arena	119,12	kg
Cantidad de ripio	95,27	kg

*Nota.* La tabla detalla los pesos de cada material, considerando que estos valores son incluye el contenido de humedad de los agregados. Estos valores se utilizan en la fundición de  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .

**Resumen de diseño de probetas sin ceniza****Resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$** **Tabla 46***Tabla de resumen de diseño de probetas sin adición de ceniza  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$* 

<b>Resistencia <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math></b>		
<b>Parámetro de análisis</b>		<b>Valor</b>
Asentamiento (cm)		5,0 -10,0
Estimación de contenido de aire (%)		2,0
Grado de control regular. Coeficiente de variación		10
Resistencia de diseño (fcr) (kg/cm <sup>2</sup> )		240
Relación agua cemento (A/C)		0,52
Dosificación	C	1
	A	2,6
	R	2,0
Pesos secos de los materiales	Cemento (kg)	45,16
	Arena (kg)	117,48
	Ripio (kg)	92,46
	Agua (L)	23,49
Contenido de humedad	Arena (%)	7,40
	Ripio (%)	3,45
Pesos húmedos de los materiales	Cemento (kg)	45,16
	Arena (kg)	126,19
	Ripio (kg)	95,64
	Agua (L)	20,58

*Nota.* La tabla resume todos los parámetros analizados para establecer la dosificación modelo para  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .

**Resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$**

**Tabla 47**

*Tabla de resumen de diseño de probetas sin adición de ceniza  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$*

<b>Resistencia <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math></b>		
<b>Parámetro de análisis</b>		<b>Valor</b>
Asentamiento (cm)		5,0 -10,0
Estimación de contenido de aire (%)		2,0
Grado de control regular. Coeficiente de variación		10
Resistencia de diseño (fcr) ( $\text{kg/cm}^2$ )		280
Relación agua cemento (A/C)		0,44
	C	1
Dosificación	A	2,1
	R	1,7
Pesos secos de los materiales	Cemento (kg)	53,14
	Arena (kg)	109,90
	Ripio (kg)	92,05
	Agua (L)	23,39
Contenido de humedad	Arena (%)	7,40
	Ripio (%)	3,45
Pesos húmedos de los materiales	Cemento (kg)	53,14
	Arena (kg)	1118,04
	Ripio (kg)	95,23
	Agua (L)	20,68

*Nota.* La tabla resume todos los parámetros analizados para establecer la dosificación modelo para  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .

### **Diseño de hormigón para probetas con ceniza**

El diseño correspondiente a probetas con contenido de puzolana volcánica en porcentajes del 5%, 10% y 15% se realiza de igual manera que las probetas iniciales sin contenido de ceniza. La dosificación, pesos secos de los agregados y contenido de cemento, se mantienen sin ninguna variación.

Los valores de asentamiento, temperatura, contenido de aire y variación de agua en la mezcla a causa de la humedad natural del agregado, se especifican en la tabla 46 y tabla 47 para las resistencias  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y  $240 \text{ kg/cm}^2$  respectivamente.

Se realiza una corrección de contenido de agua en la mezcla, debido a la adición de ceniza, cuyo peso no está contemplado en la relación agua/cemento y por tanto el agua necesaria para la dosificación necesita un reajuste. Este cálculo se realiza en base a la ecuación 48 donde se especifica que se debe considerar que la cantidad de agua a agregar está en función del peso de la ceniza por el % de absorción del mismo; este procedimiento hay que realizar para cada fundición y por consiguiente para cada % de ceniza.

Los cálculos de las proporciones de materiales para las fundiciones con incidencia de ceniza, se encuentra en las tablas 48 y 49 para las dosificaciones de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y  $240 \text{ kg/cm}^2$  respectivamente.

## Capítulo IV

### Resultados

Los análisis de los resultados de cada uno de los cilindros, tanto para módulo de elasticidad, coeficiente de Poisson y resistencia a la compresión, son indispensables para validar la metodología propuesta; así como la determinación de las relaciones óptimas entre el porcentaje de ceniza utilizado, el estudio de la capacidad a compresión de las probetas de hormigón y las deformaciones transversales y longitudinales presentes al aplicar el 40% de carga de rotura, con el objetivo de mantener al cilindro en un rango elástico y de esta manera evitar daños en el deformímetro.

#### Datos en fundición

Se presentan los datos de peso de los agregados, cemento, ceniza y agua utilizada para elaborar el hormigón, así como los datos de asentamiento, temperatura y contenido de aire, estos últimos obtenidos luego de realizada la mezcla correspondiente.

#### *Resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$*

**Tabla 48**

*Parámetros para fundición  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$*

Parámetro de análisis		Resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$			
		0% ceniza	5% ceniza	10% ceniza	15% ceniza
Fecha de fundición		21 junio 2021	28 junio 2021	05 julio 2021	12 julio 2021
Dosificación	C	1	1	1	1
	A	2,6	2,6	2,6	2,6
	R	2,0	2,0	2,0	2,0
	A/C	0,52	0,52	0,52	0,52

Parámetro de análisis		Resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$			
		0% ceniza	5% ceniza	10% ceniza	15% ceniza
Pesos secos de materiales	Ceniza (kg)	0,00	2,26	4,52	6,78
	Cemento (kg)	45,16	45,16	45,16	45,16
	Arena (kg)	117,48	117,48	117,48	117,48
	Ripio (kg)	92,46	92,46	92,46	92,46
	Agua (L)	23,49	23,49	23,49	23,49
Pesos húmedos de materiales	Ceniza (kg)	0,00	2,26	4,52	6,78
	Cemento (kg)	45,16	45,16	45,16	45,16
	Arena (kg)	126,19	127,94	127,43	128,96
	Ripio (kg)	95,64	94,07	95,11	95,46
	Agua (L)	20,58	20,55	20,18	18,44
Agua adicional in situ (L)		4,50	3,50	6,00	6,50
Agua final en fundición (L)		25,08	24,05	26,18	24,94
Asentamiento (cm)		5,00	7,20	6,00	9,50
Temperatura (°C)		17,30	17,10	16,20	17,50
Contenido de aire (%)		2,30	2,10	2,60	2,30

*Nota.* Se muestran los valores de dosificación, relación a/c, peso de los materiales, valores de asentamiento, temperatura y contenido de aire para cada fundición perteneciente a la resistencia de  $210 \text{ kg/cm}^2$ .

**Resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$** **Tabla 49***Parámetros para fundición  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$* 

Parámetro de análisis		Resistencia $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$			
		0% ceniza	5% ceniza	10% ceniza	15% ceniza
Fecha de fundición		24 junio 2021	01 julio 2021	08 julio 2021	19 julio 2021
Dosificación	C	1	1	1	1
	A	2,1	2,1	2,1	2,1
	R	1,7	1,7	1,7	1,7
	A/C	0,44	0,44	0,44	0,44
Pesos secos de materiales	Ceniza (kg)	0,00	2,66	5,31	7,97
	Cemento (kg)	53,14	53,14	53,14	53,14
	Arena (kg)	109,90	109,90	109,90	109,90
	Ripio (kg)	92,05	92,05	92,05	92,05
	Agua (L)	23,39	23,39	23,39	23,39
Pesos húmedos de materiales	Ceniza (kg)	0,00	2,66	5,31	7,97
	Cemento (kg)	53,14	53,14	53,14	53,14
	Arena (kg)	118,04	119,14	120,59	114,10
	Ripio (kg)	95,23	95,27	94,50	93,84
	Agua (L)	20,68	19,73	19,24	26,55
Agua adicional in situ (L)		7,00	5,50	7,00	7,00
Agua final en fundición (L)		27,68	25,23	26,24	33,55
Asentamiento (cm)		8,00	7,00	6,30	8,00
Temperatura (°C)		19,00	16,40	17,60	18,50

Parámetro de análisis	Resistencia $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$			
	0% ceniza	5% ceniza	10% ceniza	15% ceniza
Contenido de aire (%)	2,40	2,20	2,50	2,80

*Nota.* Se muestran los valores de dosificación, relación a/c, peso de los materiales, valores de asentamiento, temperatura y contenido de aire para cada fundición perteneciente a la resistencia de  $240 \text{ kg/cm}^2$ .

**Valores y rangos de asentamiento para fundiciones  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y  $240 \text{ kg/cm}^2$**

De acuerdo a la tabla 46 y tabla 47, los valores de asentamiento para las fundiciones correspondientes a la resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y  $240 \text{ kg/cm}^2$  son las siguientes:

**Tabla 50**

*Valores de asentamiento y rangos de tolerancia*

Resistencia ( $\text{kg/cm}^2$ )	0 % de ceniza (cm)	5 % de ceniza (cm)	10 % de ceniza (cm)	15 % de ceniza (cm)	Rango de valores (cm)
210	5,00	7,20	6,00	9,50	5,00 – 10,00
240	8,00	7,00	6,30	8,00	5,00 – 10,00

*Nota.* La tabla muestra los valores obtenidos de asentamiento del hormigón fresco en (cm), así como los rangos de tolerancia debido al tipo de asentamiento elegido durante el diseño de la dosificación, el cual fue de consistencia media y se logra apreciar que todos los valores obtenidos están dentro de los rangos permisibles.

Se debe tener presente que la consistencia y asentamiento del hormigón está ligado directamente a la manejabilidad que tendrá en obra y en la resistencia a la compresión que se obtendrá en un futuro.

### Análisis de esfuerzo a la compresión del hormigón.

Los cilindros son ensayados a los 4, 7, 14 y 28 días, esto con el fin de determinar las curvas de tiempo - resistencia del hormigón propuesto. Por medio de estas curvas se logra reconocer las diferencias entre los datos obtenidos en las pruebas de resistencia.

Se realizan 14 cilindros por cada fundición, de los cuales dos son llevados a la cámara de curado rápido, dos ensayados a los 4, 7 y 14 días y seis para los 28 días; finalmente se calcula el promedio de cada día respectivamente y este dato es el utilizado en el análisis de resistencia.

### Análisis de esfuerzo a la compresión del hormigón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

#### Resistencia del hormigón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ sin ceniza

Tabla 51

Datos de las probetas de hormigón  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 0 % de ceniza

Ensayo de compresión de cilindros $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ sin ceniza								
Fecha de fundición: 21 de junio de 2021								
N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> ) %	
1	4 <sup>a</sup>	25/06/2021	15,3	30,9	12830,8	36,658	199,39	94,95
2	4 <sup>a</sup>	25/06/2021	15,0	30,5	11973,9	32,455	183,66	87,46
						Promedio	191,53	91,21
3	4	25/06/2021	15,1	30,2	11755,9	12,724	71,06	33,84
4	4	25/06/2021	14,9	30,3	11889,4	12,675	72,70	34,62
						Promedio	71,88	34,23
5	7	28/06/2021	15,2	30,6	12429,3	23,936	131,91	62,81
6	7	28/06/2021	15,1	30,7	12360,3	24,043	134,26	63,93
						Promedio	133,09	63,37

Ensayo de compresión de cilindros $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ sin ceniza								
Fecha de fundición: 21 de junio de 2021								
N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							( $\text{kg/cm}^2$ )	%
7	14	05/07/2021	14,9	30,7	12498,8	28,620	164,14	78,16
8	14	05/07/2021	15,0	30,7	12318,6	30,296	171,45	81,64
						Promedio	167,80	79,90
9	28	19/07/2021	15,2	30,7	11755,5	38,921	214,49	102,14
10	28	19/07/2021	15,3	30,5	12558,3	38,471	209,25	99,64
11 <sup>b</sup>	28	19/07/2021	15,1	30,1	12064,5	38,313	213,95	101,88
12 <sup>b</sup>	28	19/07/2021	15,1	30,4	11964,7	37,597	209,95	99,98
13 <sup>b</sup>	28	19/07/2021	15,0	30,2	11767,9	37,751	213,63	101,73
14 <sup>b</sup>	28	19/07/2021	15,3	30,7	12597,6	38,850	211,31	100,62
						Promedio	212,10	101,00

*Nota.* Se muestran los datos y dimensiones de las probetas de hormigón, la carga recibida y la resistencia obtenida.

(<sup>a</sup>) Probetas de curado rápido, 4 días.

(<sup>b</sup>) Probetas ensayadas para módulo de elasticidad.

Tabla 52

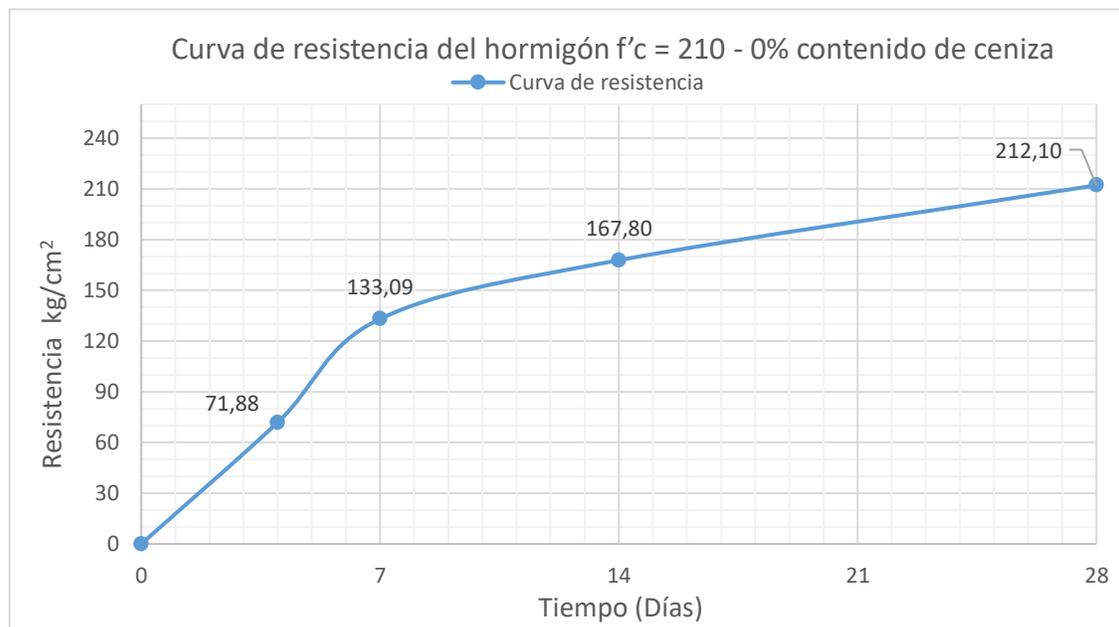
Tabla resumen, resistencias  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 0 % de ceniza

Edad (días)	Resistencia	
	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	%
4	71,88	34,23
7	133,09	63,37
14	167,80	79,90
28	212,10	101,00

*Nota.* Se muestran los valores promedios de resistencia obtenidos por medio de los ensayos de compresión del hormigón, así como el porcentaje de resistencia en relación a un  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ .

Figura 36

Curva de resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 0 % de ceniza



*Nota.* Curva de evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo, los valores representan las resistencias obtenidas con un  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y 0 % de ceniza.

**Resistencia del hormigón  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con incidencia de la ceniza al 5%**

**Tabla 53**

*Datos de las probetas de hormigón  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 5 % de ceniza*

<b>Ensayo de compresión de cilindros <math>f'c=210 \text{ kg/cm}^2</math> con ceniza al 5%</b>								
<b>Fecha de fundición: 28 de junio de 2021</b>								
N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							( $\text{kg/cm}^2$ )	%
1	4 <sup>a</sup>	02/07/2021	15,4	30,6	12423,6	45,339	243,41	115,91
2	4 <sup>a</sup>	02/07/2021	15,0	30,2	11832,7	42,494	240,47	114,51
						Promedio	241,94	115,21
3	4	02/07/2021	15,0	30,4	12009,9	16,305	92,27	43,94
4	4	02/07/2021	15,0	30,0	11785,6	18,351	103,85	49,45
						Promedio	98,06	46,70
5	7	05/07/2021	15,1	30,2	12127,5	29,666	165,66	78,89
6	7	05/07/2021	14,9	30,3	11777,2	32,712	187,61	89,34
						Promedio	176,64	84,11
7	14	12/07/2021	15,0	30,6	12543,0	38,685	218,91	104,24
8	14	12/07/2021	15,0	30,7	12431,3	39,654	224,40	106,86
						Promedio	221,66	105,55
9 <sup>b</sup>	28	26/07/2021	14,9	30,3	12133,4	45,770	262,50	125,00
10 <sup>b</sup>	28	26/07/2021	15,1	30,7	12446,0	48,225	269,30	128,24
11 <sup>b</sup>	28	26/07/2021	15,2	30,3	12158,0	47,004	259,04	123,35
12 <sup>b</sup>	28	26/07/2021	15,0	30,5	12519,5	45,871	259,58	123,61

Ensayo de compresión de cilindros $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con ceniza al 5%								
Fecha de fundición: 28 de junio de 2021								
N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							( $\text{kg/cm}^2$ )	%
13	28	26/07/2021	15,2	30,0	11842,4	50,186	276,57	131,70
14	28	26/07/2021	15,0	30,5	12665,0	46,600	263,70	125,57
Promedio							265,12	126,25

*Nota.* Se muestran los datos y dimensiones de las probetas de hormigón, la carga recibida y la resistencia obtenida.

(<sup>a</sup>) Probetas de curado rápido, 4 días.

(<sup>b</sup>) Probetas ensayadas para módulo de elasticidad.

**Tabla 54**

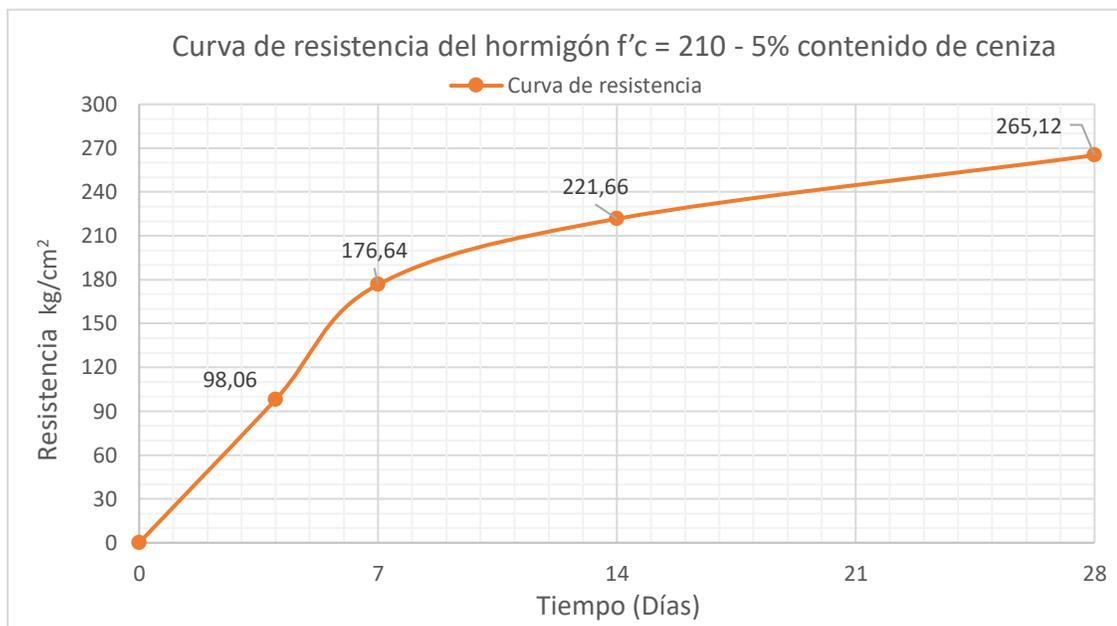
*Tabla resumen, resistencias  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 5 % de ceniza*

Tabla de resumen para $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con ceniza al 5%		
Edad (días)	Resistencia	
	$f'c$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	%
4	98,06	46,70
7	176,64	84,11
14	221,66	105,55
28	265,12	126,25

*Nota.* Se muestran los valores promedios de resistencia obtenidos por medio de los ensayos de compresión del hormigón, así como el porcentaje de resistencia en relación a un  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ .

**Figura 37**

Curva de resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 5 % de ceniza



*Nota.* Curva de evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo, los valores representan las resistencias obtenidas con un  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y 5 % de ceniza.

#### Resistencia del hormigón $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con incidencia de la ceniza al 10%

**Tabla 55**

Datos de las probetas de hormigón  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 10 % de ceniza

Ensayo de compresión de cilindros $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con ceniza al 10%								
Fecha de fundición: 05 de julio de 2021								
N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							(kg/cm <sup>2</sup> )	%
1	4 <sup>a</sup>	09/07/2021	15,0	30,2	11607,7	35,496	200,87	95,65
2	4 <sup>a</sup>	09/07/2021	15,4	30,7	12325,1	36,228	194,50	92,62
Promedio							197,69	94,14

---

**Ensayo de compresión de cilindros  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup> con ceniza al 10%**
**Fecha de fundición: 05 de julio de 2021**

N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							(kg/cm <sup>2</sup> )	%
3	4	09/07/2021	15,3	30,7	12487,3	13,290	72,29	34,42
4	4	09/07/2021	15,3	30,7	12273,5	12,593	68,50	32,62
						Promedio	70,40	33,52
5	7	12/07/2021	14,9	30,1	11738,0	17,455	100,11	47,67
6	7	12/07/2021	15,0	30,4	11948,6	17,836	100,94	48,07
						Promedio	100,53	47,87
7	14	19/07/2021	15,2	30,6	12385,6	25,235	139,07	66,22
8	14	19/07/2021	14,9	30,3	12068,9	25,619	146,93	69,97
						Promedio	143,00	68,10
9 <sup>b</sup>	28	02/08/2021	15,3	30,0	12442,4	35,157	191,23	91,06
10 <sup>b</sup>	28	02/08/2021	15,2	30,2	12086,8	33,356	183,83	87,54
11 <sup>b</sup>	28	02/08/2021	15,2	30,5	12123,5	33,385	183,99	87,61
12 <sup>b</sup>	28	02/08/2021	15,0	30,3	12142,2	34,081	192,86	91,84
13	28	02/08/2021	15,0	30,3	11870,4	33,401	189,02	90,01
14	28	02/08/2021	15,3	30,6	12605,0	34,982	190,28	90,61
						Promedio	188,54	89,78

---

*Nota.* Se muestran los datos y dimensiones de las probetas de hormigón, la carga recibida y la resistencia obtenida.

(<sup>a</sup>) Probetas de curado rápido, 4 días.

(<sup>b</sup>) Probetas ensayadas para módulo de elasticidad.

Tabla 56

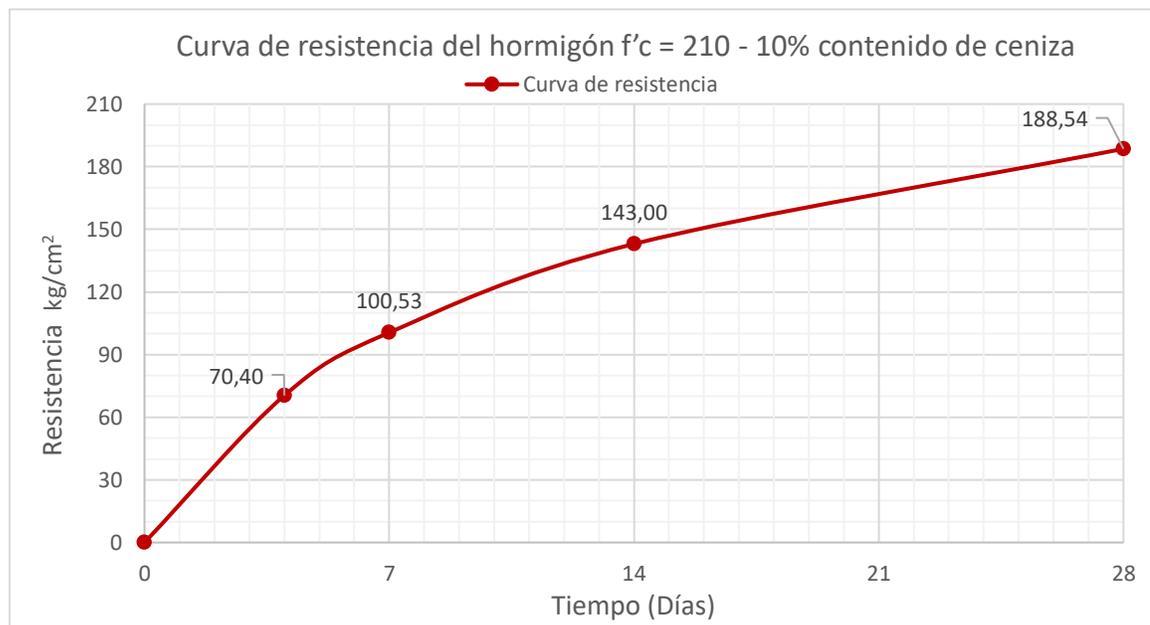
Tabla resumen, resistencias  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 10 % de ceniza

Edad (días)	Resistencia	
	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	%
4	70,40	33,52
7	100,53	47,87
14	143,00	68,10
28	188,54	89,78

Nota. Se muestran los valores promedios de resistencia obtenidos por medio de los ensayos de compresión del hormigón, así como el porcentaje de resistencia en relación a un  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ .

Figura 38

Curva de resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 10 % de ceniza



Nota. Curva de evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo, los valores representan las resistencias obtenidas con un  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y 5 % de ceniza.

**Resistencia del hormigón  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con incidencia de la ceniza al 15%**

**Tabla 57**

*Datos de las probetas de hormigón  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 15 % de ceniza*

<b>Ensayo de compresión de cilindros <math>f'c=210 \text{ kg/cm}^2</math> con ceniza al 15%</b>								
<b>Fecha de fundición: 12 de julio de 2021</b>								
N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							( $\text{kg/cm}^2$ )	%
1	4 <sup>a</sup>	16/07/2021	15,2	30,5	12163,0	32,958	181,63	86,49
2	4 <sup>a</sup>	16/07/2021	15,2	30,5	12164,4	32,519	179,21	85,34
						Promedio	180,42	85,92
3	4	16/07/2021	15,3	30,5	12305,4	13,301	72,35	34,45
4	4	16/07/2021	15,2	30,2	12044,9	11,104	61,20	29,14
						Promedio	66,78	31,80
5	7	19/07/2021	15,2	30,6	12515,0	17,560	96,78	46,09
6	7	19/07/2021	14,8	30,3	12064,7	16,147	93,86	44,70
						Promedio	95,32	45,39
7	14	26/07/2021	14,9	30,0	11727,2	27,192	155,95	74,26
8	14	26/07/2021	15,4	30,5	12515,7	23,488	126,10	60,05
						Promedio	141,03	67,15
9 <sup>b</sup>	28	09/08/2021	15,4	30,4	12505,9	32,919	176,74	84,16
10 <sup>b</sup>	28	09/08/2021	15,1	30,2	11857,4	32,410	180,99	86,19
11 <sup>b</sup>	28	09/08/2021	15,1	30,0	11762,1	32,005	178,73	85,11
12 <sup>b</sup>	28	09/08/2021	15,1	30,3	12106,8	32,218	179,91	85,67

**Ensayo de compresión de cilindros  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  con ceniza al 15%**  
**Fecha de fundición: 12 de julio de 2021**

N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							( $\text{kg/cm}^2$ )	%
13	28	09/08/2021	15,2	30,5	12138,2	33,486	184,54	87,88
14	28	09/08/2021	15,3	30,5	12461,2	32,380	176,12	83,87
Promedio							179,51	85,48

*Nota.* Se muestran los datos y dimensiones de las probetas de hormigón, la carga recibida y la resistencia obtenida.

(<sup>a</sup>) Probetas de curado rápido, 4 días.

(<sup>b</sup>) Probetas ensayadas para módulo de elasticidad.

**Tabla 58**

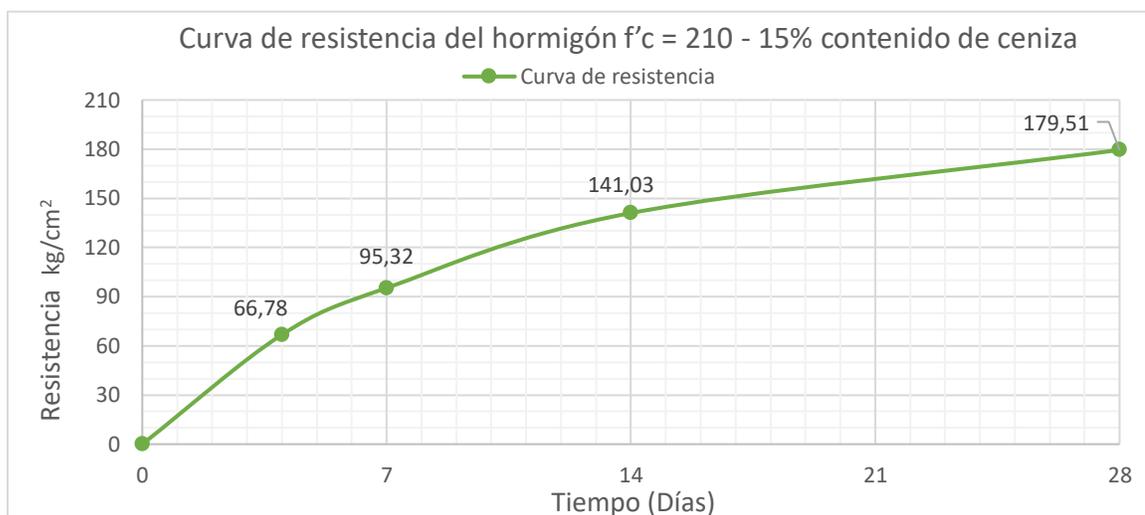
*Tabla resumen, resistencias  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 15 % de ceniza*

Edad (días)	Resistencia	
	$f'c$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	%
4	66,78	31,80
7	95,32	45,39
14	141,03	67,15
28	179,51	85,48

*Nota.* Se muestran los valores promedios de resistencia obtenidos por medio de los ensayos de compresión del hormigón, así como el porcentaje de resistencia en relación a un  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ .

**Figura 39**

Curva de resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 15 % de ceniza



*Nota.* Curva de evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo, los valores representan las resistencias obtenidas con un  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y 15 % de ceniza.

**Comparación de esfuerzo a la compresión en cilindros de hormigón con y sin ceniza volcánica para  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ .**

Una vez planteados los datos y curvas de resistencias, se relaciona el hormigón patrón (sin ceniza) con cada uno de los diferentes porcentajes de contenido de ceniza.

**Tabla 59**

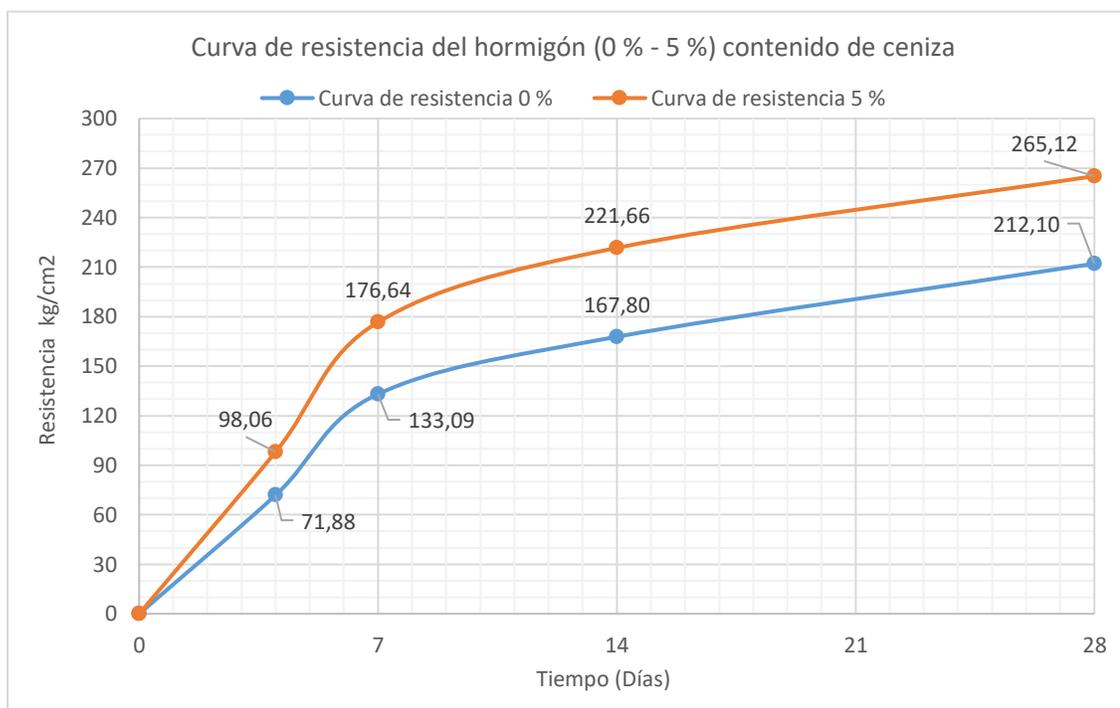
Comparación de resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 0% y 5% de contenido de ceniza

Tiempo Días	Resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a compresión	
	0% Ceniza kg/cm <sup>2</sup>	5% Ceniza kg/cm <sup>2</sup>
0	0,00	0,00
4	71,88	98,06
7	133,09	176,64
14	167,80	221,66
28	212,10	265,12

*Nota.* Esta tabla evidencia las resistencias en función del tiempo para el hormigón convencional y el hormigón con ceniza al 5%.

**Figura 40**

Curva de resistencia comparativa,  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 0 % y 5 % de ceniza



Nota. Curva de resistencia del hormigón,  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ , 0 % y 5 % de ceniza.

**Tabla 60**

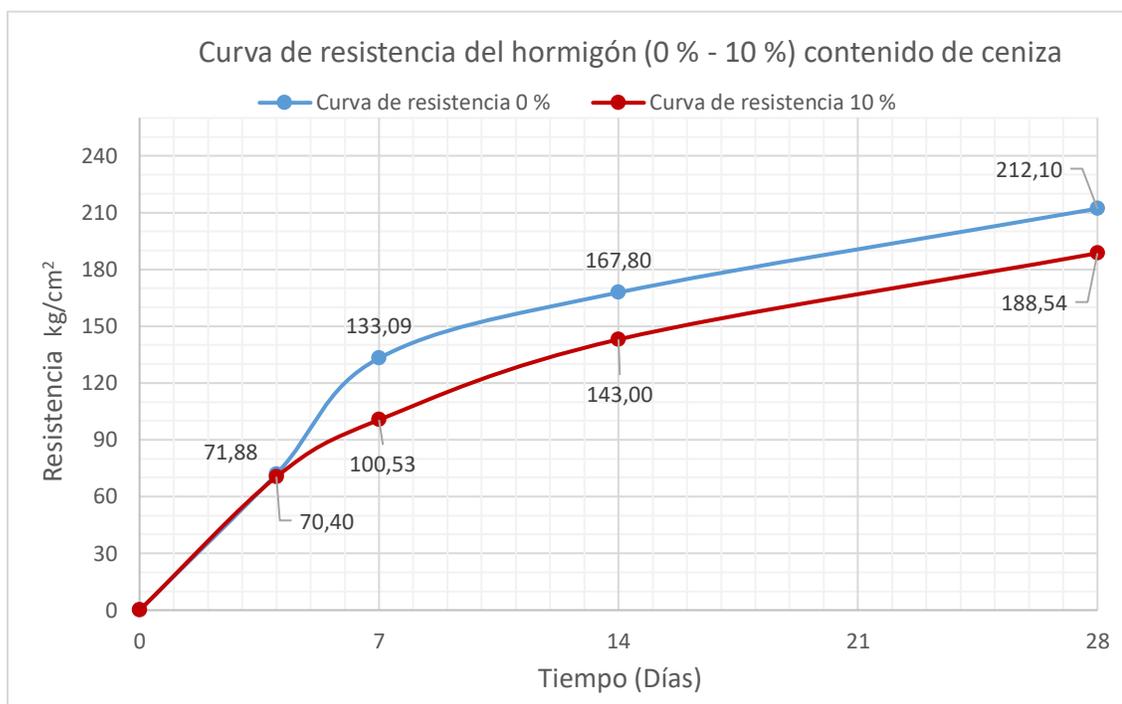
Comparación de resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 0% y 10% de contenido de ceniza

Resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a compresión		
Tiempo	0% Ceniza	10% Ceniza
Días	kg/cm2	kg/cm2
0	0,00	0,00
4	71,88	70,40
7	133,09	100,53
14	167,80	143,00
28	212,10	188,54

Nota. Esta tabla evidencia las resistencias en función del tiempo, para el hormigón convencional y el hormigón con ceniza al 10%.

**Figura 41**

Curva de resistencia comparativa,  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 0 % y 10 % de ceniza



Nota. Curva de resistencia del hormigón,  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ , 0 % y 10 % de ceniza.

**Tabla 61**

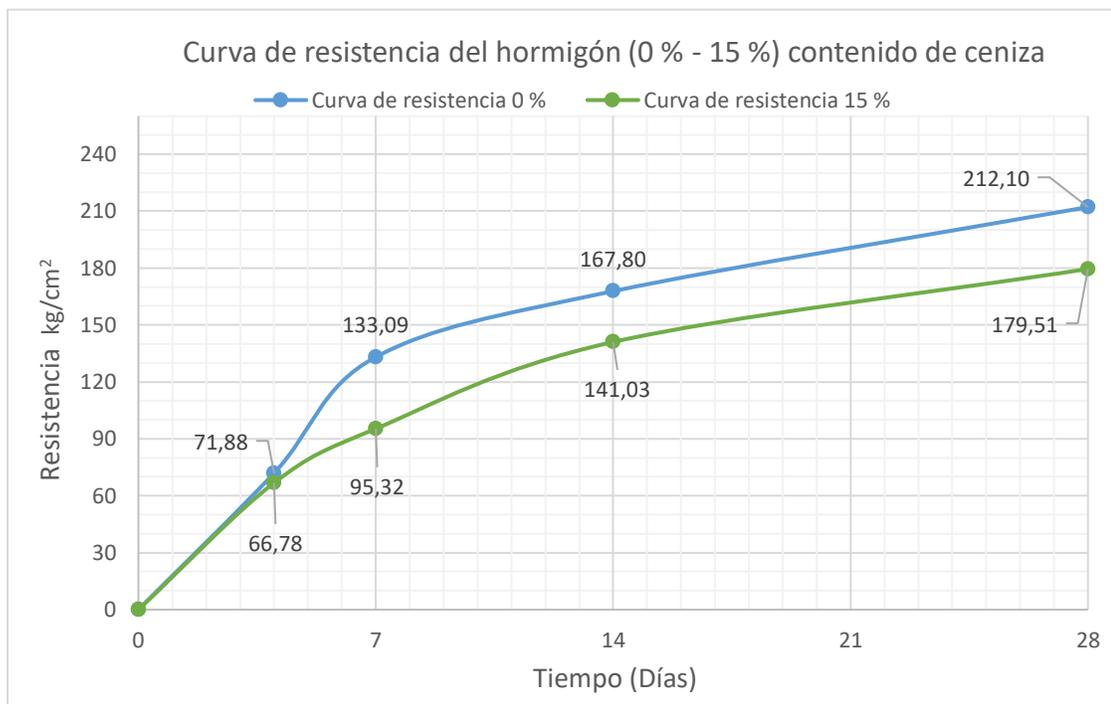
Comparación de resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 0% y 15% de contenido de ceniza

Resistencia $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ a compresión		
Tiempo	0% Ceniza	15% Ceniza
Días	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
0	0.00	0.00
4	71.88	66.78
7	133.09	95.32
14	167.80	141.03
28	212.10	179.51

Nota. Esta tabla evidencia las resistencias en función del tiempo, para el hormigón convencional y el hormigón con ceniza al 15%.

**Figura 42**

Curva de resistencia comparativa,  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 0 % y 15 % de ceniza



*Nota.* Curva de resistencia del hormigón,  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ , 0 % y 15 % de ceniza.

### **Comparación final de resistencias para un $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$**

Una vez analizadas todas las curvas de resistencias con diferentes porcentajes de contenido de ceniza, se procede a realizar una comparación general, donde se aprecia claramente que las resistencias obtenidas con la adición del 5% de ceniza fueron las más óptimas, mientras que adicionar 10 y 15% de contenido de ceniza, afecta las capacidades del hormigón y los datos obtenidos son menores al hormigón patrón (sin ceniza).

**Tabla 62**

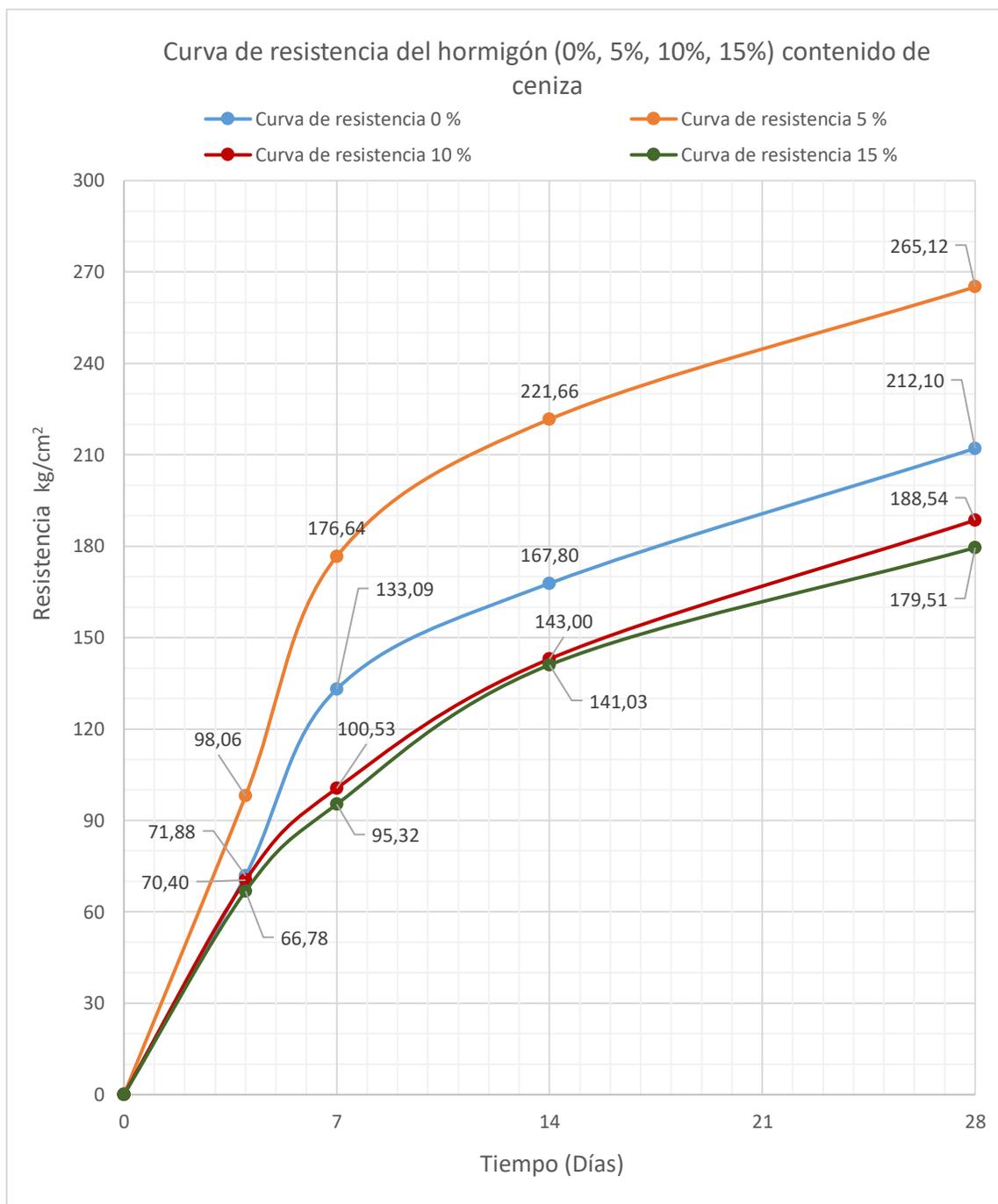
*Comparación de resistencia  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 0%, 5%, 10% y 15% de contenido de ceniza*

<b>Resistencia <math>f'c = 210 \text{ kg/cm}^2</math> a compresión</b>				
<b>Tiempo</b>	<b>0% Ceniza</b>	<b>5% Ceniza</b>	<b>10% Ceniza</b>	<b>15% Ceniza</b>
<b>Días</b>	<b>kg/cm2</b>	<b>kg/cm2</b>	<b>kg/cm2</b>	<b>kg/cm2</b>
0	0,00	0,00	0,00	0,00
4	71,88	98,06	70,40	66,78
7	133,09	176,64	100,53	95,32
14	167,80	221,66	143,00	141,03
28	212,10	265,12	188,54	179,51

*Nota.* Esta tabla evidencia las resistencias en función del tiempo, para el hormigón convencional con 0, 5, 10 y 15 % de contenido de ceniza.

Figura 43

Curva de resistencia comparativa,  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 0%, 5%, 10% y 15% de incidencia de ceniza



Nota. Curva comparativa de la resistencia del hormigón, para un  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ , con 0, 5, 10 y 15 % de ceniza.

**Análisis de esfuerzo a la compresión del hormigón  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$**

**Resistencia del hormigón  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  sin ceniza**

**Tabla 63**

*Datos de las probetas de hormigón  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 0 % de ceniza*

Ensayo de compresión de cilindros $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ sin ceniza								
Fecha de fundición: 24 de junio de 2021								
N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							( $\text{kg/cm}^2$ )	%
3	4 <sup>a</sup>	28/06/2021	15,3	30,3	11893,9	41,717	226,90	94,54
4	4 <sup>a</sup>	28/06/2021	15,5	30,6	12319,7	41,620	220,57	91,90
						Promedio	223,74	93,22
1	4	28/06/2021	15,4	30,7	12440,8	16,669	89,49	37,29
2	4	28/06/2021	15,4	30,5	12249,1	14,885	79,91	33,30
						Promedio	84,70	35,29
5	7	01/07/2021	15,1	30,0	11663,4	22,749	127,03	52,93
6	7	01/07/2021	15,2	30,1	11666,3	22,360	123,22	51,34
						Promedio	125,13	52,14
7	14	08/07/2021	15,0	30,3	11821,0	30,731	173,90	72,46
8	14	08/07/2021	15,1	30,4	12009,0	29,234	163,25	68,02
						Promedio	168,58	70,24
9 <sup>b</sup>	28	22/07/2021	15,3	30,5	12403,8	46,291	251,78	104,91
10 <sup>b</sup>	28	22/07/2021	15,3	30,5	12333,9	41,535	225,91	94,13
11 <sup>b</sup>	28	22/07/2021	15,0	30,3	11657,2	44,406	251,28	104,70
12 <sup>b</sup>	28	22/07/2021	15,2	30,4	11929,9	43,793	241,34	100,56

Ensayo de compresión de cilindros $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ sin ceniza								
Fecha de fundición: 24 de junio de 2021								
N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							( $\text{kg/cm}^2$ )	%
13	28	22/07/2021	15,2	30,7	12549,8	45,995	253,47	105,61
14	28	22/07/2021	15,1	30,2	12032,9	43,487	242,84	101,18
Promedio							244,44	101,85

*Nota.* Se muestran los datos y dimensiones de las probetas de hormigón, la carga recibida y la resistencia obtenida.

(<sup>a</sup>) Probetas de curado rápido, 4 días.

(<sup>b</sup>) Probetas ensayadas para módulo de elasticidad.

**Tabla 64**

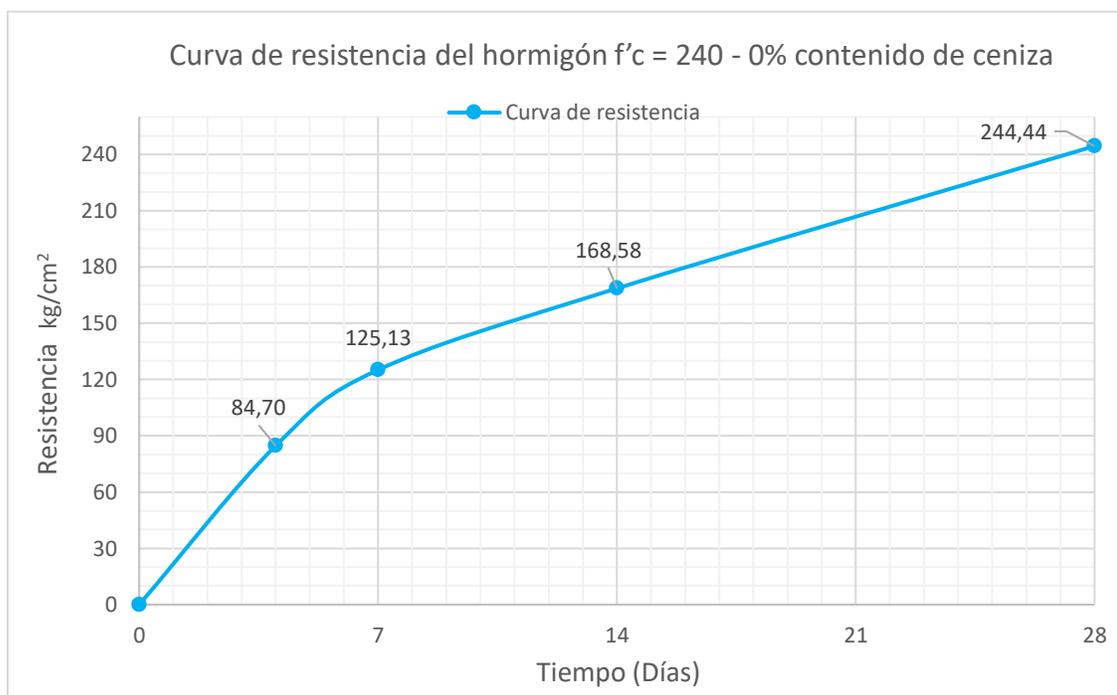
*Tabla resumen, resistencias  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 0 % de ceniza*

Tabla de resumen para $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ sin ceniza		
Edad (días)	Resistencia	
	$f'c$ ( $\text{kg/cm}^2$ )	%
4	84,70	35,29
7	125,13	52,14
14	168,58	70,24
28	244,44	101,85

*Nota.* Se muestran los valores promedios de resistencia obtenidos por medio de los ensayos de compresión del hormigón, así como el porcentaje de resistencia en relación a un  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ .

Figura 44

Curva de resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 0 % de ceniza



Nota. Curva de evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo, los valores representan las resistencias obtenidas con un  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  y 0 % de ceniza.

**Resistencia del hormigón  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con incidencia de la ceniza al 5%.**

Tabla 65

Datos de las probetas de hormigón  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 5 % de ceniza

Ensayo de compresión de cilindros $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ con ceniza al 5%								
Fecha de fundición: 01 de julio de 2021								
Nº	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia ( $\text{kg/cm}^2$ )	
							Resistencia	%
1	4 <sup>a</sup>	05/07/2021	15,2	30,5	12260,4	55,079	303,53	126,47
2	4 <sup>a</sup>	05/07/2021	15,3	30,4	11994,3	49,072	266,91	111,21
Promedio							285,22	118,84

**Ensayo de compresión de cilindros  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con ceniza al 5%**  
**Fecha de fundición: 01 de julio de 2021**

N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							(kg/cm <sup>2</sup> )	%
3	4	05/07/2021	15,1	30,5	12191,9	28,037	156,56	65,23
4	4	05/07/2021	15,4	30,5	12516,9	22,780	122,30	50,96
						Promedio	139,43	58,10
5	7	08/07/2021	15,0	30,1	11806,7	36,957	209,13	87,14
6	7	08/07/2021	15,2	30,7	12573,9	37,973	209,27	87,20
						Promedio	209,20	87,17
7	14	15/07/2021	15,2	30,6	12492,4	49,668	273,72	114,05
8	14	15/07/2021	15,3	30,7	12608,5	49,562	269,57	112,32
						Promedio	271,65	113,19
9 <sup>b</sup>	28	29/07/2021	15,2	30,5	12441,3	61,062	336,51	140,21
10 <sup>b</sup>	28	29/07/2021	15,3	30,1	12175,2	59,539	323,84	134,93
11 <sup>b</sup>	28	29/07/2021	15,2	30,2	12170,4	59,049	325,41	135,59
12 <sup>b</sup>	28	29/07/2021	14,9	30,1	11895,4	59,655	342,13	142,55
13	28	29/07/2021	14,9	30,2	11969,3	49,626	284,61	118,59
14	28	29/07/2021	15,1	30,4	12120,8	56,056	313,02	130,43
						Promedio	320,92	133,72

*Nota.* Se muestran los datos y dimensiones de las probetas de hormigón, la carga recibida y la resistencia obtenida.

(<sup>a</sup>) Probetas de curado rápido, 4 días.

(<sup>b</sup>) Probetas ensayadas para módulo de elasticidad.

Tabla 66

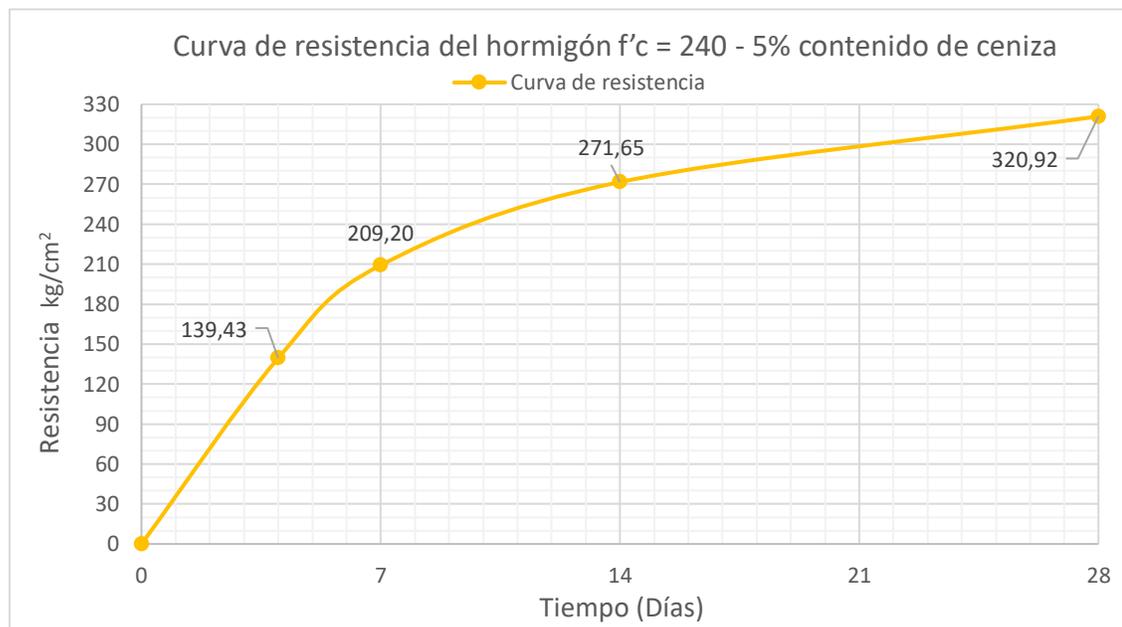
Tabla resumen, resistencias  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 5 % de ceniza

Edad (días)	Resistencia	
	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	%
4	139,43	58,10
7	209,20	87,17
14	271,65	113,19
28	320,92	133,72

*Nota.* Se muestran los valores promedios de resistencia obtenidos por medio de los ensayos de compresión del hormigón, así como el porcentaje de resistencia en relación a un  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ .

Figura 45

Curva de resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 5 % de ceniza



*Nota.* Curva de evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo, los valores representan las resistencias obtenidas con un  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  y 5 % de ceniza.

**Resistencia del hormigón  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con incidencia de la ceniza al 10%**

**Tabla 67**

*Datos de las probetas de hormigón  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 10 % de ceniza*

<b>Ensayo de compresión de cilindros <math>f'c = 240 \text{ kg/cm}^2</math> con ceniza al 10%</b>								
<b>Fecha de fundición: 08 de julio de 2021</b>								
N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							( $\text{kg/cm}^2$ )	%
1	4 <sup>a</sup>	12/07/2021	15,2	30,6	12288,0	45,603	251,31	104,71
2	4 <sup>a</sup>	12/07/2021	15,0	30,5	12043,3	43,261	244,81	102,00
						Promedio	248,06	103,34
3	4	12/07/2021	15,1	30,6	12238,0	15,852	88,52	36,88
4	4	12/07/2021	14,9	30,2	11715,1	15,879	91,06	37,94
						Promedio	89,79	37,41
5	7	15/07/2021	14,9	30,3	11880,4	22,794	130,72	54,47
6	7	15/07/2021	15,2	30,7	12548,6	23,527	129,65	54,02
						Promedio	130,19	54,24
7	14	22/07/2021	15,2	30,3	12098,9	35,074	193,29	80,54
8	14	22/07/2021	15,1	30,4	11766,4	33,578	187,50	78,13
						Promedio	190,40	79,33
9 <sup>b</sup>	28	05/08/2021	15,3	30,7	12500,5	44,191	240,36	100,15
10 <sup>b</sup>	28	05/08/2021	15,1	30,4	11995,9	40,673	227,12	94,63
11 <sup>b</sup>	28	05/08/2021	14,9	30,7	12507,8	40,642	233,08	97,12
12 <sup>b</sup>	28	05/08/2021	15,3	30,3	12104,6	42,995	233,85	97,44

Ensayo de compresión de cilindros $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ con ceniza al 10%								
Fecha de fundición: 08 de julio de 2021								
N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							(kg/cm <sup>2</sup> )	%
13	28	05/08/2021	14,9	30,6	12365,0	35,949	206,17	85,90
14	28	05/08/2021	14,9	30,2	12086,4	38,517	220,89	92,04
Promedio							226,91	94,55

*Nota.* Se muestran los datos y dimensiones de las probetas de hormigón, la carga recibida y la resistencia obtenida.

(<sup>a</sup>) Probetas de curado rápido, 4 días.

(<sup>b</sup>) Probetas ensayadas para módulo de elasticidad.

**Tabla 68**

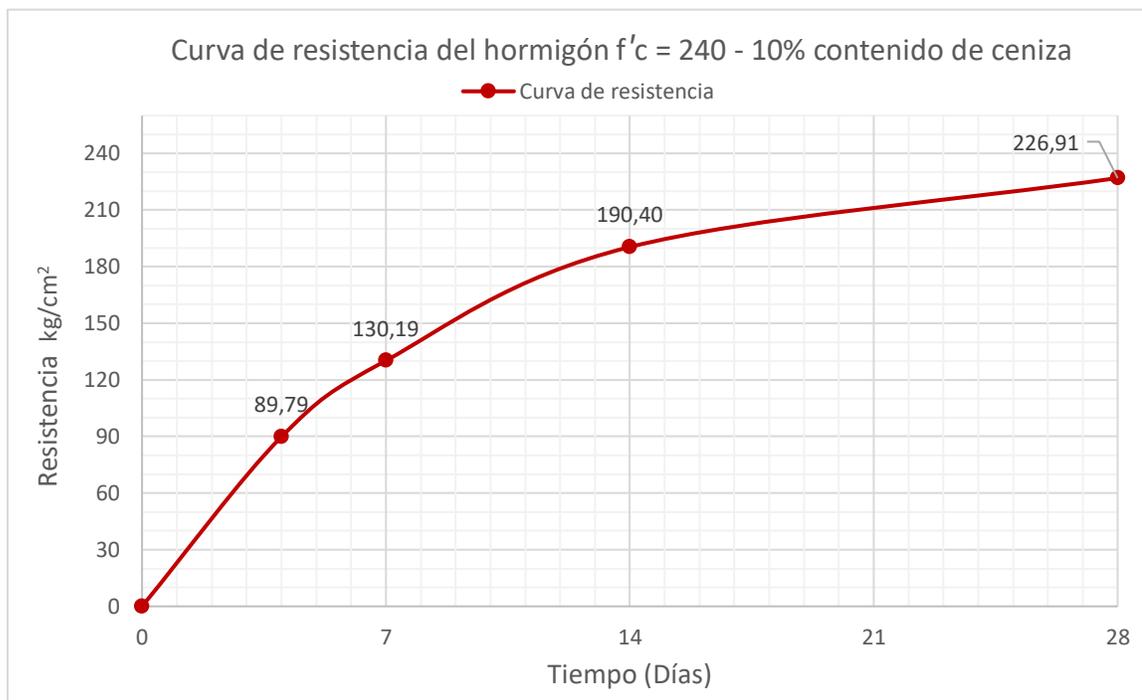
*Tabla resumen, resistencias  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 10 % de ceniza*

Tabla de resumen para $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ con ceniza al 10%		
Edad (días)	Resistencia	
	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	%
4	89,79	37,41
7	130,19	54,24
14	190,40	79,33
28	226,91	94,55

*Nota.* Se muestran los valores promedios de resistencia obtenidos por medio de los ensayos de compresión del hormigón, así como el porcentaje de resistencia en relación a un  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ .

Figura 46

Curva de resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 10 % de ceniza



*Nota.* Curva de evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo, los valores representan las resistencias obtenidas con un  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  y 10 % de ceniza.

#### Resistencia del hormigón $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ con incidencia de la ceniza al 15%

Tabla 69

Datos de las probetas de hormigón  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 15 % de ceniza

Ensayo de compresión de cilindros $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ con ceniza al 15%								
Fecha de fundición: 19 de julio de 2021								
Nº	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia (kg/cm <sup>2</sup> )	
							kg/cm <sup>2</sup>	%
1	4 <sup>a</sup>	23/07/2021	15,2	30,6	11998,0	40,187	221,47	92,28
2	4 <sup>a</sup>	23/07/2021	15,1	30,3	11694,8	38,260	213,65	89,02
Promedio							217,56	90,65

---

**Ensayo de compresión de cilindros  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con ceniza al 15%**
**Fecha de fundición: 19 de julio de 2021**

N°	Edad (días)	Fecha de ensayo	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (gr)	Carga (Tn)	Resistencia	
							( $\text{kg/cm}^2$ )	%
3	4	23/07/2021	15,3	30,6	12289,1	13,858	75,38	31,41
4	4	23/07/2021	15,3	30,6	12240,6	13,854	75,35	31,40
						Promedio	75,37	31,40
5	7	26/07/2021	14,9	30,3	12067,0	20,202	115,86	48,28
6	7	26/07/2021	15,2	30,5	12388,9	20,315	111,95	46,65
						Promedio	113,91	47,46
7	14	02/08/2021	15,3	30,6	12476,9	31,224	169,83	70,76
8	14	02/08/2021	15,2	30,6	12311,5	33,644	185,41	77,25
						Promedio	177,62	74,01
9 <sup>b</sup>	28	16/08/2021	15,2	30,2	12037,5	42,182	232,46	96,86
10 <sup>b</sup>	28	16/08/2021	15,3	30,6	12507,5	40,344	219,44	91,43
11 <sup>b</sup>	28	16/08/2021	15,1	30,0	11751,9	38,675	215,97	89,99
12 <sup>b</sup>	28	16/08/2021	15,2	30,2	12032,3	42,091	231,96	96,65
13	28	16/08/2021	15,3	30,6	12486,4	40,970	222,84	92,85
14	28	16/08/2021	15,1	30,1	11732,2	32,775	183,02	76,26
						Promedio	217,62	90,67

---

*Nota.* Se muestran los datos y dimensiones de las probetas de hormigón, la carga recibida y la resistencia obtenida.

(<sup>a</sup>) Probetas de curado rápido, 4 días.

(<sup>b</sup>) Probetas ensayadas para módulo de elasticidad.

**Tabla 70**

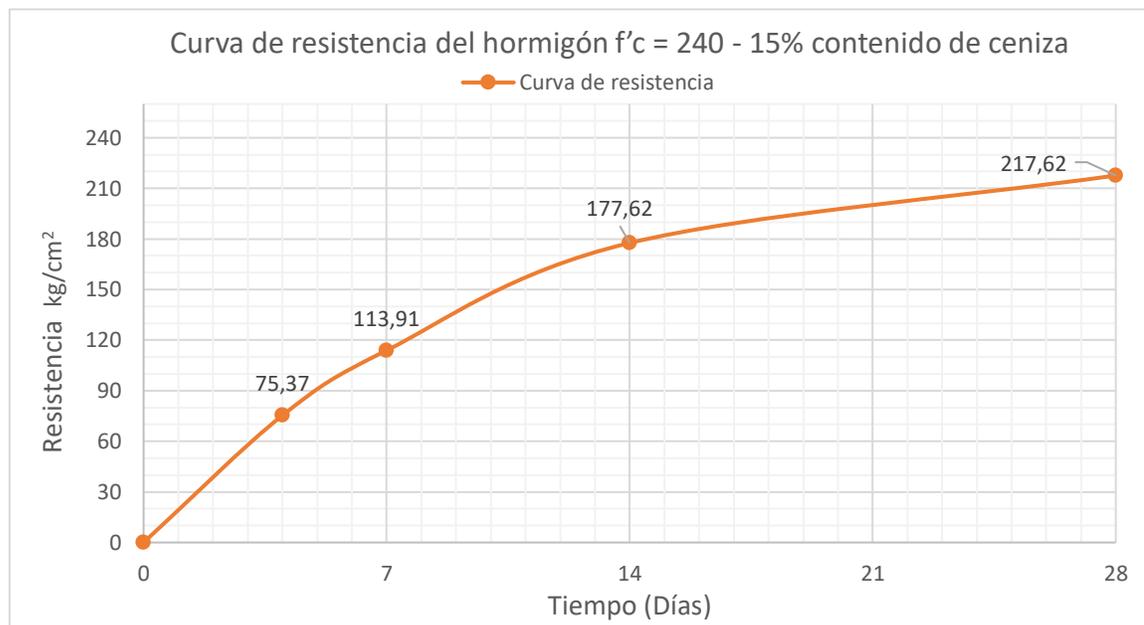
Tabla resumen, resistencias  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 15 % de ceniza

Edad (días)	Resistencia	
	$f'c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	%
4	75,37	31,40
7	113,91	47,46
14	177,62	74,01
28	217,62	90,67

*Nota.* Se muestran los valores promedios de resistencia obtenidos por medio de los ensayos de compresión del hormigón, así como el porcentaje de resistencia en relación a un  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ .

**Figura 47**

Curva de resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 15 % de ceniza



*Nota.* Curva de evolución de la resistencia del hormigón en el tiempo, los valores representan las resistencias obtenidas con un  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  y 15 % de ceniza.

**Comparación de esfuerzo a la compresión en cilindros de hormigón con y sin ceniza volcánica para  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$**

**Tabla 71**

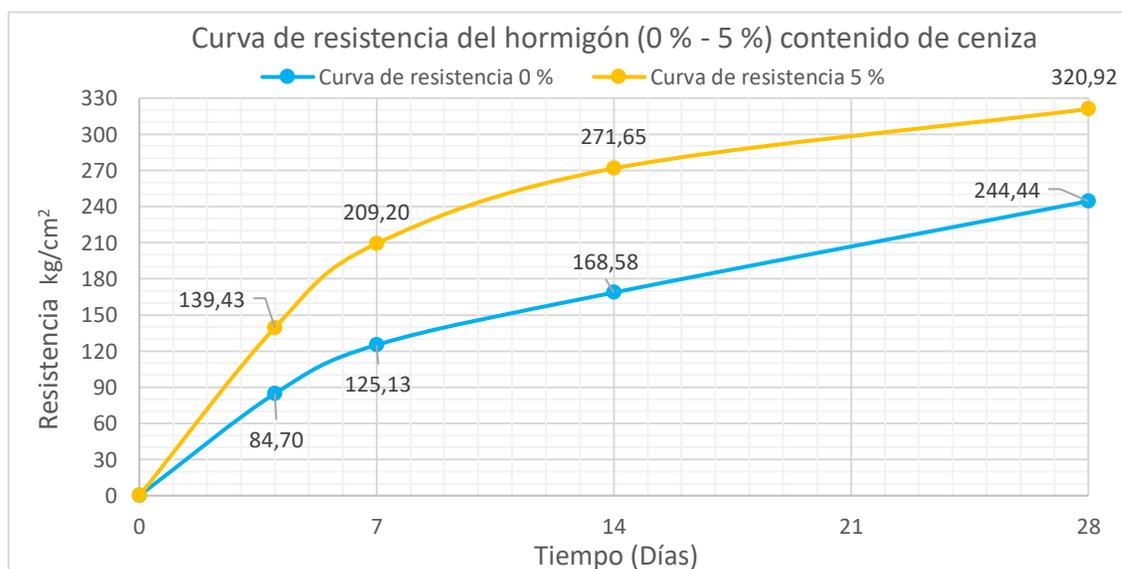
Comparación de resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 0% y 5% de contenido de ceniza

Resistencia $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ a compresión		
Tiempo	0% Ceniza	5% Ceniza
Días	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
0	0,00	0,00
4	84,70	139,43
7	125,13	209,20
14	168,58	271,65
28	244,44	320,92

Nota. Esta tabla evidencia las resistencias en función del tiempo, para el hormigón convencional y el hormigón con ceniza al 5%.

**Figura 48**

Curva de resistencia comparativa,  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 0 % y 5 % de ceniza



Nota. Curva de resistencia del hormigón,  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ , 0 % y 5 % de ceniza.

Tabla 72

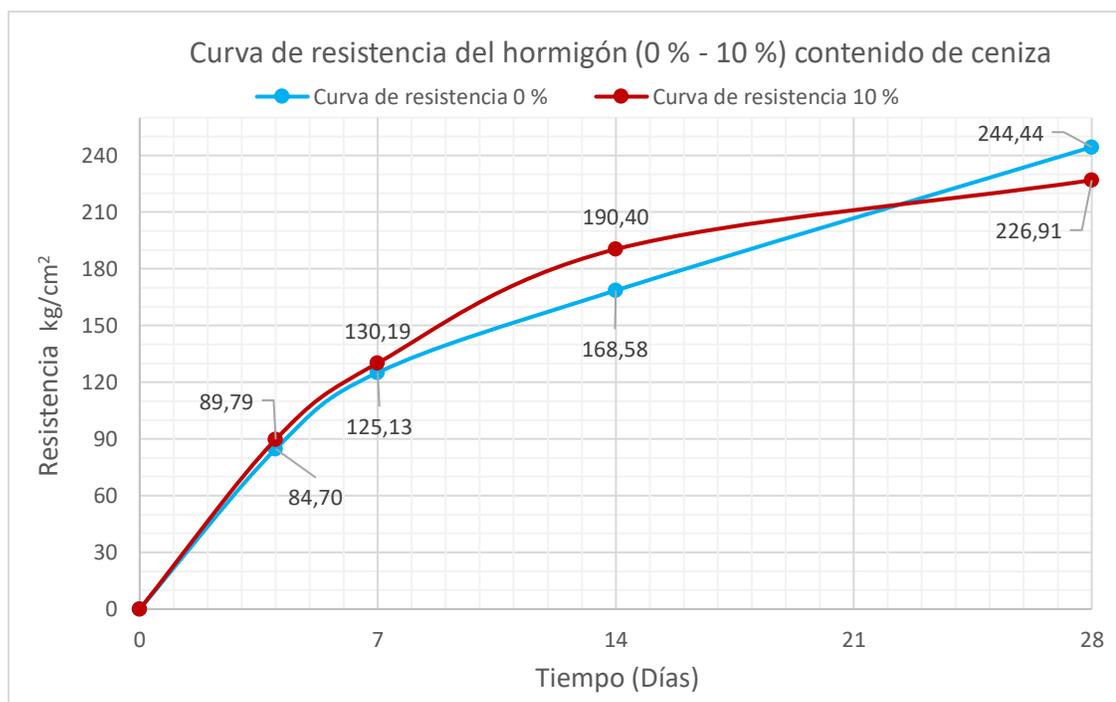
Comparación de resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 0% y 10% de contenido de ceniza

Resistencia $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ a compresión		
Tiempo	0% Ceniza	10% Ceniza
Días	kg/cm <sup>2</sup>	kg/cm <sup>2</sup>
0	0,00	0,00
4	84,70	89,79
7	125,13	130,19
14	168,58	190,40
28	244,44	226,91

Nota. Esta tabla evidencia las resistencias en función del tiempo, para el hormigón convencional y el hormigón con ceniza al 10%.

Figura 49

Curva de resistencia comparativa,  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 0 % y 10 % de ceniza



Nota. Curva de resistencia del hormigón,  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ , 0 % y 10 % de ceniza.

Tabla 73

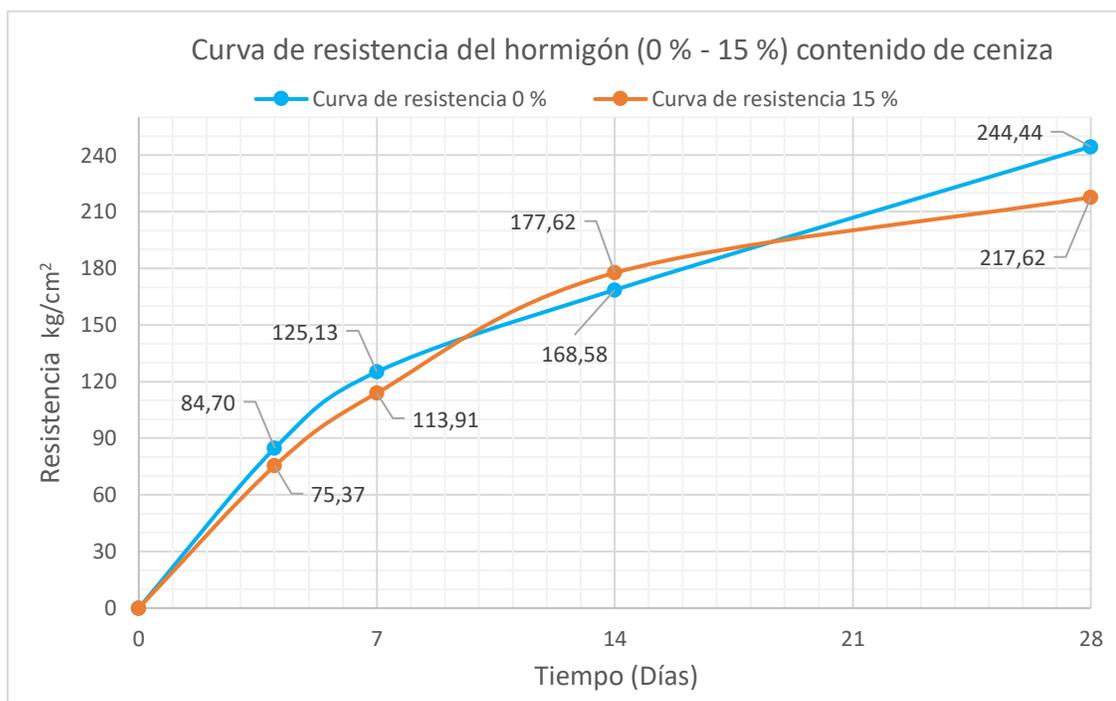
Comparación de resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 0% y 15% de contenido de ceniza

Resistencia $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ a compresión		
Tiempo Días	0% Ceniza kg/cm <sup>2</sup>	15% Ceniza kg/cm <sup>2</sup>
0	0,00	0,00
4	84,70	75,37
7	125,13	113,91
14	168,58	177,62
28	244,44	217,62

Nota. Esta tabla evidencia las resistencias en función del tiempo, para el hormigón convencional con 0 % y 15 % de contenido de ceniza.

Figura 50

Curva de resistencia comparativa,  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 0 % y 15 % de ceniza



Nota. Curva de resistencia del hormigón,  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ , 0 % y 15 % de ceniza.

### Comparación final de resistencias para un $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$

Al igual que el análisis con un  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  podemos apreciar que las resistencias obtenidas con la adición del 5% de ceniza fueron las más óptimas, mientras que adicionar 10 y 15% de contenido de ceniza, afecta las capacidades del hormigón y los datos obtenidos son menores al hormigón patrón (sin ceniza).

La adición de 10% y 15% de ceniza no representa una gran variación en las resistencias iniciales con respecto al hormigón patrón en los primeros días de prueba; sin embargo, donde hubo un ligero desface fue al alcanzar el día 28, donde se aprecia que la ceniza vuelve a afectar las capacidades del hormigón, produciendo un declive en las resistencias a largo plazo.

**Tabla 74**

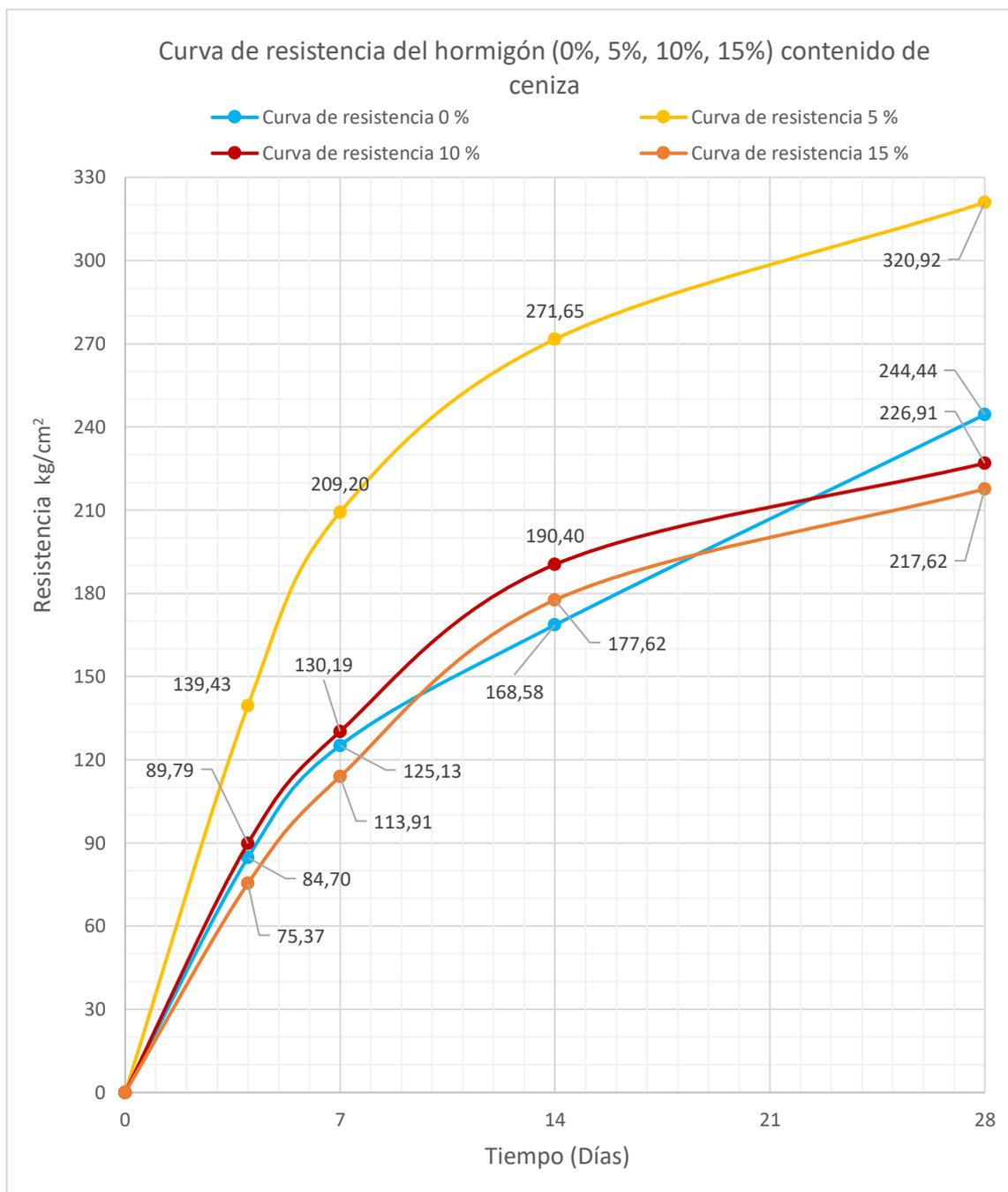
*Comparación de resistencia  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 0%, 5%, 10% y 15% de contenido de ceniza*

Resistencia $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ a compresión				
Tiempo	0% Ceniza	5% Ceniza	10% Ceniza	15% Ceniza
Días	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2	kg/cm2
0	0,00	0,00	0,00	0,00
4	84,70	139,43	89,79	75,37
7	125,13	209,20	130,19	113,91
14	168,58	271,65	190,40	177,62
28	244,44	320,92	226,91	217,62

*Nota.* Esta tabla evidencia las resistencias en función del tiempo, para el hormigón convencional con 0%, 5%, 10% y 15 % de contenido de ceniza.

Figura 51

Curva de resistencia comparativa,  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 0%, 5%, 10% y 15 % de incidencia de ceniza



Nota. Curva comparativa de la resistencia del hormigón, para un  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ , con 0, 5, 10 y 15 % de ceniza.

### **Análisis del módulo de elasticidad del hormigón convencional con y sin ceniza volcánica**

El análisis del módulo de elasticidad se realiza el día 28 después de la fundición, para el cual se usan 4 muestras, los datos detallados de cada probeta se encuentra en el anexo 7 para  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y en el anexo 8 para  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ .

#### ***Cálculo modelo del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.***

Se presentan los datos obtenidos del cilindro 11 y el cálculo detallado del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson para un  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  sin incidencia de ceniza.

**Tabla 75**

*Datos del cilindro 11  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  con 0% de ceniza*

<b>Datos Cilindro 11</b>	
Altura:	30,10 cm
Diámetro:	15,10 cm
Área:	179,08 $\text{cm}^2$
Resistencia	209,25 $\text{kg/cm}^2$
Carga de rotura	38,47 Tn

*Nota.* La tabla muestra los datos del cilindro 11 de  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 0% de ceniza.

#### **Procedimiento de cálculo**

- Determinación del primer punto (esfuerzo,  $\sigma_1$ ) para Módulo de elasticidad y (deformación transversal,  $\varepsilon_{t1}$ ) para coeficiente de Poisson, ambas para una deformación específica ( $\varepsilon_1$ ) de  $50 \times 10^{-6} \text{ mm/mm}$ .

**Tabla 76**

*Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson del cilindro 11 para un  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  sin*

*incidencia de ceniza. Análisis de  $\sigma_1$  y  $\varepsilon_{t1}$*

Deformación longitudinal	Deformación transversal			$\varepsilon$ unitaria	Carga	Esfuerzo	Deformaciones	$\varepsilon$ unitaria
$1 \times 10^{-3} \text{ mm}$	$1 \times 10^{-3} \text{ mm}$			mm/mm	Kg	MPa	mm	mm/mm
15	0	0	0	0,0000000	2490	1,363	0,015	0,0000498
	$\varepsilon_{t1}$	0	0	0,0000000		$\sigma_1$		0,0000500
20	199	1	1	0,0000033	3138	1,718	0,02	0,0000664

*Nota.* La tabla indica los valores utilizados para interpolar el esfuerzo ( $\sigma_1$ ) y la deformación transversal ( $\varepsilon_{t1}$ ) requerida.

Por lo tanto, para una deformación específica ( $\varepsilon_1$ ) de 0,00005, el esfuerzo ( $\sigma_1$ ) es 1,367, valor evidenciado en la ecuación 49 y una deformación transversal ( $\varepsilon_{t1}$ ) de 0, valor calculado en la ecuación 50.

$$\sigma_1 = (1,363) - \frac{(0,0000498 - 0,000050) * (1,363 - 1,718)}{(0,0000498 - 0,0000664)} = 1,367 \quad (49)$$

$$\varepsilon_{t1} = (200) - \frac{(0,00004983 - 0,000050) * (200 - 199)}{(0,00004983 - 0,00006645)} = 200 = 0 \quad (50)$$

- Determinación del segundo punto (deformación específica,  $\varepsilon_2$ ) para Módulo de elasticidad y (deformación transversal,  $\varepsilon_{t2}$ ) para coeficiente de Poisson, ambas al 40% de la carga de rotura.

**Tabla 77**

*Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson del cilindro 11 para un  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  sin incidencia de ceniza. Análisis de  $\epsilon_2$  y  $\epsilon_{t2}$*

Deformación longitudinal	Deformación transversal		$\epsilon_t$ unitaria	Carga	Esfuerzo	Deformaciones	$\epsilon$ unitaria
$1 \times 10^{-3} \text{ mm}$	$1 \times 10^{-3} \text{ mm}$		mm/mm	Kg	MPa	mm	mm/mm
125	183	4 17	0,0000565	15270	8,3598	0,125	0,000415
	$\epsilon_{t2}$	0 17	0,0000569	15388	$\sigma_2$		$\epsilon_2$
150	180	3 20	0,0000664	17868	9,7821	0,15	0,000498

*Nota.* La tabla indica los valores utilizados para interpolar la deformación específica ( $\epsilon_2$ ) y deformación transversal ( $\epsilon_{t2}$ ) requerido.

Cálculo del esfuerzo ( $\sigma_2$ ) al 40% de la carga de rotura del espécimen, valor evidenciado en la ecuación 51.

$$40\% \text{ de la carga de rotura} = 40\% * 38,471 \text{ Tn} = 15,388 \text{ Tn} \quad (51)$$

$$\sigma_2 = \frac{15,388 * 10^3 \text{ kg}}{179,08 \text{ cm}^2 * 10,2} = 8,4246 \text{ MPa} \quad (52)$$

Por lo tanto, para un esfuerzo ( $\sigma_2$ ) de 8,4246, la deformación específica ( $\epsilon_2$ ) es 0,0004191, valor evidenciado en la ecuación 53 y una deformación transversal ( $\epsilon_{t2}$ ) de 183, valor calculado en la ecuación 54.

$$\epsilon_2 = (0,0004) - \frac{(8,3598 - 8,4246) * (0,000415 - 0,000498)}{(8,3598 - 9,7821)} = 0,000419 \quad (53)$$

$$\varepsilon_{t2} = (183) - \frac{(15270 - 15388) * (183 - 180)}{(15270 - 17868)} = 183 \quad (54)$$

**Tabla 78**

*Datos para módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson*

<b>Datos módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson</b>		
$\sigma_1$	1,3667	MPa
$\sigma_2$	8,4246	MPa
$\varepsilon_{t1}$	0,0000000	mm/mm
$\varepsilon_{t2}$	0,0000569	mm/mm
$\varepsilon_1$	0,0000500	mm/mm
$\varepsilon_2$	0,0004191	mm/mm

*Nota.* La tabla indica los valores utilizados para el cálculo del módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.

- Determinación del Módulo de elasticidad

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (55)$$

$$E = \frac{8,4246 - 1,3667}{0,00042 - 0,00005} \quad (56)$$

$$E = 19123,52 \text{ MPa} \quad (57)$$

- Determinación del coeficiente de Poisson

$$\mu = \frac{\varepsilon_{t1} - \varepsilon_{t2}}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (58)$$

$$\mu = \frac{0,0000000 - 0,0000569}{0,0004191 - 0,00005} \quad (59)$$

$$\mu = 0,15 \quad (60)$$

**Resultados comparativos para módulos de elasticidad experimentales y teóricos con un  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$**

A continuación, se indican los resultados obtenidos de módulo de elasticidad experimental del hormigón, junto con el módulo de elasticidad teórico determinado por la ecuación planteada en el ACI 318.

**Tabla 79**

*Resumen del módulo de elasticidad para dosificación  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$*

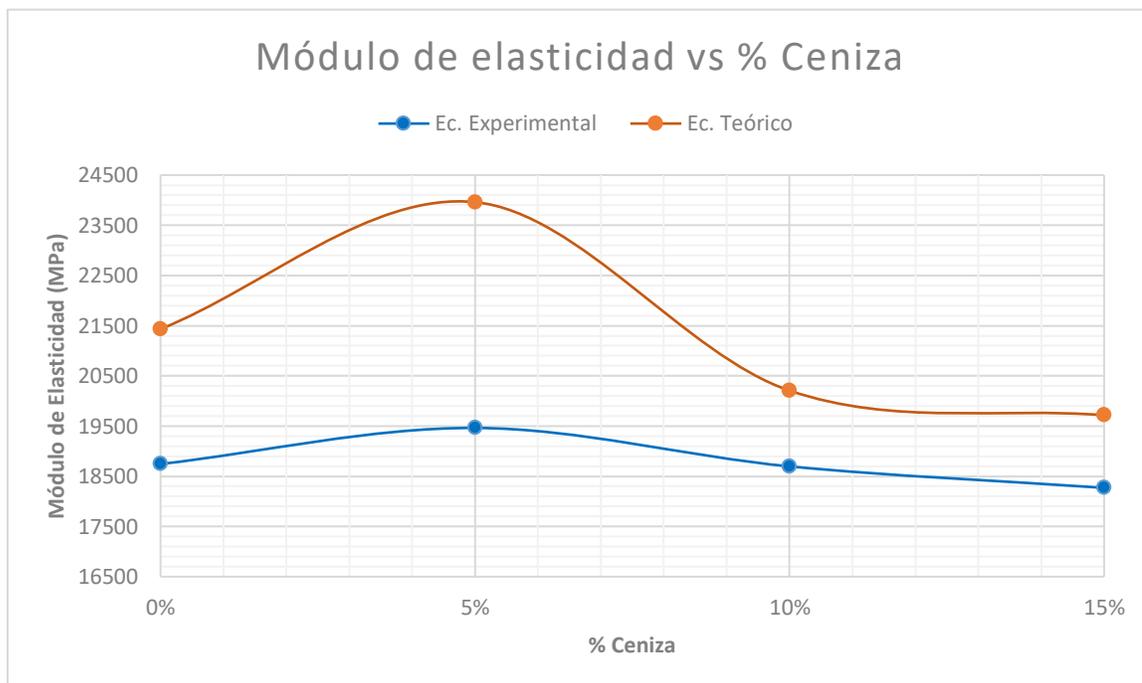
% Ceniza	Dosificación $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$			
	Resistencia Kg/cm <sup>2</sup>	MPa	Ec. Experimental MPa	Ec. Teórico $4700 \sqrt{f'c}$ MPa
-				
0%	212,10	20,79	18744,27	21432,10
5%	265,12	25,99	19462,85	23961,55
10%	188,54	18,48	18697,21	20206,62
15%	179,51	17,60	18269,97	19716,78

*Nota.* La tabla indica los valores obtenidos de módulo de elasticidad experimental y teórico.

El módulo de elasticidad del concreto con 5% de ceniza se encuentra distante al valor calculado con la fórmula propuesta por el ACI 318, mientras tanto, los valores que conforman al concreto del 0%, 10% y 15% tienen valores próximos con los valores del módulo teórico.

**Figura 52**

Módulos de elasticidad vs % de ceniza para dosificación  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$



*Nota.* El gráfico contiene las curvas de módulo de elasticidad experimental y teórico, respectivamente.

Se puede evidenciar que el valor del módulo de elasticidad aumenta con la incidencia del 5% de ceniza, mientras tanto, con el 10% y 15% conforme aumenta el contenido de ceniza, el módulo de elasticidad disminuye; por ende, el cálculo del módulo de Young se determina con la resistencia obtenida de acuerdo al ensayo, concluyendo que el módulo es directamente proporcional a la resistencia.

**Resultados comparativos para módulos de elasticidad experimentales y teóricos con un  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$**

**Tabla 80**

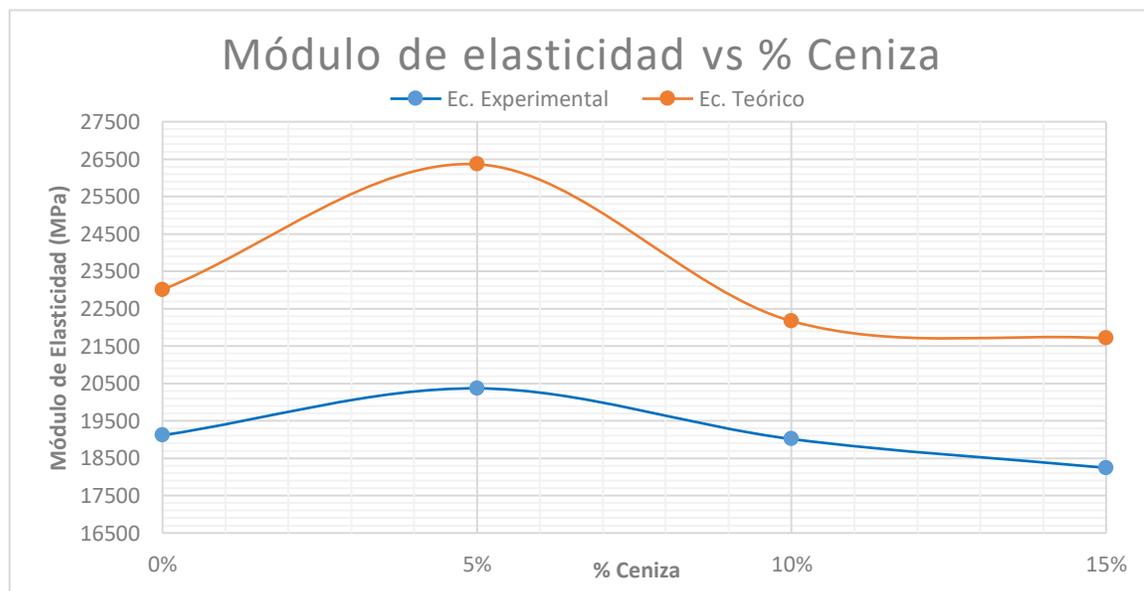
Resumen del módulo de elasticidad para dosificación  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$

% Ceniza	Resistencia		Ec. Experimental MPa	Ec. Teórico $4700 \sqrt{f'c}$ MPa
	$\text{Kg/cm}^2$	MPa		
-				
0%	244,44	23,96	19113,94	23008,1
5%	320,92	31,46	20368,83	26363,1
10%	226,91	22,25	19012,94	22168,0
15%	217,62	21,33	18243,10	21709,1

*Nota.* La tabla indica los valores obtenidos de módulo de elasticidad experimental y teórico.

**Figura 53**

Módulos de elasticidad vs % de ceniza para dosificación  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$



*Nota.* La gráfica contiene las curvas de módulo de elasticidad experimental y teórico.

El módulo de elasticidad del concreto con 0% y 5% de ceniza se encuentra distante al valor calculado con la fórmula propuesta por el ACI 318, mientras tanto, los valores que conforman al concreto del 10% y 15% de ceniza son bastante próximos a los valores del módulo teórico.

Se puede evidenciar que el valor del módulo de elasticidad incrementa con el 5% de ceniza, mientras tanto, con el 10% y 15% conforme aumenta el contenido de ceniza, el módulo disminuye; por ende, el cálculo del módulo de Young se determina con la resistencia obtenida de acuerdo al ensayo realizado, concluyendo que el módulo es directamente proporcional a la resistencia.

## Análisis de Precios Unitarios

### Rubros de hormigón $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$ con y sin incidencia de ceniza

- Hormigón  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  sin incidencia de ceniza

Tabla 81

Rubro de Hormigón simple  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$

Análisis de precios unitarios					
Rubro:	1	Unidad:		$\text{m}^3$	
Detalle:	Hormigón Simple $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$				
Equipo					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	$C=A*B$	R	$D=C*R$
Herramienta menor	1,00	\$ 1,11	\$ 1,11	1,00	\$ 1,11
Concreteira eléctrica a gasolina	1,00	\$ 3,01	\$ 3,01	1,00	\$ 3,01
Subtotal (M)					\$ 4,12
Mano de obra					
Descripción	Cantidad	Jornal/H	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	$C=A*B$	R	$D=C*R$
Maestro Mayor (Estr. Oc. C1)	1,00	\$ 4,06	\$ 4,06	1,00	\$ 4,06
Albañil (Estr. Oc. D2)	1,00	\$ 3,66	\$ 3,66	1,00	\$ 3,66
Peón (Estr. Oc. E2)	4,00	\$ 3,62	\$ 14,48	1,00	\$ 14,48
Subtotal (N)					\$ 22,20
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo	
		A	B	$C=A*B$	
Cemento hidráulico Tipo GU	kg	383,93	\$ 0,16	\$ 60,35	
Arena	m3	0,36	\$ 13,75	\$ 4,93	

<b>Análisis de precios unitarios</b>					
<b>Rubro:</b>	<b>1</b>	<b>Unidad:</b>		<b>m<sup>3</sup></b>	
<b>Detalle:</b>	<b>Hormigón Simple f'c = 210 kg/cm<sup>2</sup></b>				
Ripio	m3	0,31	\$ 13,75	\$ 4,26	
Agua	ltr	0,20	\$ 0,74	\$ 0,15	
Subtotal (O)				\$ 69,69	
Transporte					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo	
		A	B	C=A*B	
Subtotal (P)				\$ -	
Total, Costo Directo (M+N+O+P)				\$ 96,01	
Indirectos y Utilidades %			0,00%	\$ -	
Otros Indirectos %					
Costo Total del Rubro				\$ 96,01	
Valor Ofertado				<b>\$ 96,01</b>	

*Nota.* La tabla indica el análisis de precios unitarios de un hormigón simple de f'c = 210 kg/cm<sup>2</sup>

- Hormigón  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  con 5% de incidencia de ceniza

Tabla 82

Rubro de Hormigón simple  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 5% de ceniza adicional

Análisis de precios unitarios					
Rubro:	2		Unidad:	m <sup>3</sup>	
Detalle:	Hormigón Simple $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con 5% de ceniza adicional				
Equipo					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor	1,00	\$ 1,11	\$ 1,11	1,00	\$ 1,11
Concreteira eléctrica a gasolina	1,00	\$ 3,01	\$ 3,01	1,00	\$ 3,01
	Subtotal (M)				\$ 4,12
Mano de obra					
Descripción	Cantidad	Jornal/H	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Maestro Mayor (Estr. Oc. C1)	1,00	\$ 4,06	\$ 4,06	1,00	\$ 4,06
Albañil (Estr. Oc. D2)	1,00	\$ 3,66	\$ 3,66	1,00	\$ 3,66
Peón (Estr. Oc. E2)	4,00	\$ 3,62	\$ 14,48	1,00	\$ 14,48
	Subtotal (N)				\$ 22,20
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo	
		A	B	C=A*B	
Cemento hidráulico Tipo GU	kg	383,93	\$ 0,16	\$ 60,35	
Arena	m3	0,36	\$ 13,75	\$ 4,93	
Ripio	m3	0,31	\$ 13,75	\$ 4,26	
Agua	ltr	0,20	\$ 0,74	\$ 0,15	
Ceniza Sangay	kg	19,20	\$ 0,08	\$ 1,54	

<b>Análisis de precios unitarios</b>				
<b>Rubro:</b>	<b>2</b>	<b>Unidad:</b>	<b>m<sup>3</sup></b>	
<b>Detalle:</b>	<b>Hormigón Simple f'c = 210 kg/cm<sup>2</sup> con 5% de ceniza adicional</b>			
	Subtotal (O)		\$ 71,22	
	Transporte			
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo
		A	B	C=A*B
	Subtotal (P)		\$ -	
	Total, Costo Directo (M+N+O+P)			\$ 97,54
	Indirectos y Utilidades %		0,00%	\$ -
	Otros Indirectos %			
	Costo Total del Rubro			\$ 97,54
	Valor Ofertado			<b>\$ 97,54</b>

*Nota.* La tabla indica el análisis de precios unitarios de un hormigón simple de f'c = 210 kg/cm<sup>2</sup> con el 5% de ceniza adicional.

- Hormigón  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  con 10% de incidencia de ceniza

Tabla 83

Rubro de Hormigón simple  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con el 10% de ceniza adicional

Análisis de precios unitarios					
Rubro:	3		Unidad:	$\text{m}^3$	
Detalle:	Hormigón Simple $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con el 10% de ceniza adicional				
Equipo					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	$C=A*B$	R	$D=C*R$
Herramienta menor	1,00	\$ 1,11	\$ 1,11	1,00	\$ 1,11
Concreteira eléctrica a gasolina	1,00	\$ 3,01	\$ 3,01	1,00	\$ 3,01
	Subtotal (M)				\$ 4,12
Mano de obra					
Descripción	Cantidad	Jornal/H	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	$C=A*B$	R	$D=C*R$
Maestro Mayor (Estr. Oc. C1)	1,00	\$ 4,06	\$ 4,06	1,00	\$ 4,06
Albañil (Estr. Oc. D2)	1,00	\$ 3,66	\$ 3,66	1,00	\$ 3,66
Peón (Estr. Oc. E2)	4,00	\$ 3,62	\$ 14,48	1,00	\$ 14,48
	Subtotal (N)				\$ 22,20
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo	
		A	B	$C=A*B$	
Cemento hidráulico Tipo GU	kg	383,93	\$ 0,16	\$ 60,35	
Arena	m3	0,36	\$ 13,75	\$ 4,93	
Ripio	m3	0,31	\$ 13,75	\$ 4,26	
Agua	ltr	0,20	\$ 0,74	\$ 0,15	
Ceniza Sangay	kg	38,39	\$ 0,08	\$ 3,07	

Análisis de precios unitarios				
Rubro:	3	Unidad:		m <sup>3</sup>
Detalle:	Hormigón Simple f'c = 210 kg/cm <sup>2</sup> con el 10% de ceniza adicional			
	Subtotal (O)			\$ 72,76
	Transporte			
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo
		A	B	C=A*B
	Subtotal (P)			\$ -
	Total, Costo Directo (M+N+O+P)			\$ 99,08
	Indirectos y Utilidades %		0,00%	\$ -
	Otros Indirectos %			
	Costo Total del Rubro			\$ 99,08
	Valor Ofertado			\$ <b>99,08</b>

*Nota.* La tabla indica el análisis de precios unitarios de un hormigón simple de f'c = 210 kg/cm<sup>2</sup> con el 10% de ceniza adicional.

- Hormigón  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  con 15% de incidencia de ceniza

Tabla 84

Rubro de Hormigón simple  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  con 15% de ceniza adicional

Análisis de precios unitarios					
Rubro:	4	Unidad:		$\text{m}^3$	
Detalle:	Hormigón Simple $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con 15% de ceniza adicional				
Equipo					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	$C=A*B$	R	$D=C*R$
Herramienta menor	1,00	\$ 1,11	\$ 1,11	1,00	\$ 1,11
Concreteira eléctrica a gasolina	1,00	\$ 3,01	\$ 3,01	1,00	\$ 3,01
	Subtotal (M)				\$ 4,12
Mano de obra					
Descripción	Cantidad	Jornal/H	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	$C=A*B$	R	$D=C*R$
Maestro Mayor (Estr. Oc. C1)	1,00	\$ 4,06	\$ 4,06	1,00	\$ 4,06
Albañil (Estr. Oc. D2)	1,00	\$ 3,66	\$ 3,66	1,00	\$ 3,66
Peón (Estr. Oc. E2)	4,00	\$ 3,62	\$ 14,48	1,00	\$ 14,48
	Subtotal (N)				\$ 22,20
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo	
		A	B	$C=A*B$	
Cemento hidráulico Tipo GU	kg	383,93	\$ 0,16	\$ 60,35	
Arena	$\text{m}^3$	0,36	\$ 13,75	\$ 4,93	
Ripio	$\text{m}^3$	0,31	\$ 13,75	\$ 4,26	
Agua	ltr	0,20	\$ 0,74	\$ 0,15	
Ceniza Sangay	kg	57,59	\$ 0,08	\$ 4,61	

Análisis de precios unitarios				
<b>Rubro:</b>	<b>4</b>	<b>Unidad:</b>		<b>m<sup>3</sup></b>
<b>Detalle:</b>	<b>Hormigón Simple f'c = 210 kg/cm<sup>2</sup> con 15% de ceniza adicional</b>			
	Subtotal (O)			\$ 74,29
	Transporte			
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo
		A	B	C=A*B
	Subtotal (P)			\$ -
	Total, Costo Directo (M+N+O+P)			\$ 100,61
	Indirectos y Utilidades %		0,00%	\$ -
	Otros Indirectos %			
	Costo Total del Rubro			\$ 100,61
	Valor Ofertado			<b>\$ 100,61</b>

*Nota.* La tabla indica el análisis de precios unitarios de un hormigón simple de f'c = 210 kg/cm<sup>2</sup> con el 15% de ceniza adicional.

**Rubros de hormigón  $f'c=240$  kg/cm<sup>2</sup> con y sin incidencia de ceniza**

- **Hormigón  $f'c=240$  kg/cm<sup>2</sup> sin incidencia de ceniza**

**Tabla 85**

*Rubro de Hormigón simple  $f'c = 240$  kg/cm<sup>2</sup>*

<b>Análisis de precios unitarios</b>					
<b>Rubro:</b>	<b>5</b>	<b>Unidad:</b>		<b>m<sup>3</sup></b>	
<b>Detalle:</b>	<b>Hormigón Simple <math>f'c = 240</math> kg/cm<sup>2</sup></b>				
Equipo					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor	1,00	\$ 1,11	\$ 1,11	1,00	\$ 1,11
Concreteira eléctrica a gasolina	1,00	\$ 3,01	\$ 3,01	1,00	\$ 3,01
	Subtotal (M)				\$ 4,12
Mano de obra					
Descripción	Cantidad	Jornal/H	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Maestro Mayor (Estr. Oc. C1)	1,00	\$ 4,06	\$ 4,06	1,00	\$ 4,06
Albañil (Estr. Oc. D2)	1,00	\$ 3,66	\$ 3,66	1,00	\$ 3,66
Peón (Estr. Oc. E2)	4,00	\$ 3,62	\$ 14,48	1,00	\$ 14,48
	Subtotal (N)				\$ 22,20
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo	
		A	B	C=A*B	
Cemento hidráulico Tipo GU	kg	453,73	\$ 0,16	\$ 71,33	
Arena	m3	0,34	\$ 13,75	\$ 4,62	
Ripio	m3	0,31	\$ 13,75	\$ 4,26	

<b>Análisis de precios unitarios</b>				
<b>Rubro:</b>	<b>5</b>	<b>Unidad:</b>		<b>m<sup>3</sup></b>
<b>Detalle:</b>	<b>Hormigón Simple f'c = 240 kg/cm<sup>2</sup></b>			
Agua	ltr	0,20	\$ 0,74	\$ 0,15
Subtotal (O)				\$ 80,36
Transporte				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo
		A	B	C=A*B
Subtotal (P)				\$ -
Total, Costo Directo (M+N+O+P)				\$ 106,68
Indirectos y Utilidades %			0,00%	\$ -
Otros Indirectos %				
Costo Total del Rubro				\$ 106,68
Valor Ofertado				<b>\$ 106,68</b>

*Nota.* La tabla indica el análisis de precios unitarios de un hormigón simple de f'c = 240 kg/cm<sup>2</sup>

- Hormigón  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$  con 5% de incidencia de ceniza

Tabla 86

Rubro de Hormigón simple  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 5% de ceniza adicional

Análisis de precios unitarios					
Rubro:	6	Unidad:		$\text{m}^3$	
Detalle:	Hormigón Simple $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ con 5% de ceniza adicional				
Equipo					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	$C=A*B$	R	$D=C*R$
Herramienta menor	1,00	\$ 1,11	\$ 1,11	1,00	\$ 1,11
Concreteira eléctrica a gasolina	1,00	\$ 3,01	\$ 3,01	1,00	\$ 3,01
	Subtotal (M)				\$ 4,12
Mano de obra					
Descripción	Cantidad	Jornal/H	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	$C=A*B$	R	$D=C*R$
Maestro Mayor (Estr. Oc. C1)	1,00	\$ 4,06	\$ 4,06	1,00	\$ 4,06
Albañil (Estr. Oc. D2)	1,00	\$ 3,66	\$ 3,66	1,00	\$ 3,66
Peón (Estr. Oc. E2)	4,00	\$ 3,62	\$ 14,48	1,00	\$ 14,48
	Subtotal (N)				\$ 22,20
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo	
		A	B	$C=A*B$	
Cemento hidráulico Tipo GU	kg	453,73	\$ 0,16	\$ 71,33	
Arena	m3	0,34	\$ 13,75	\$ 4,62	
Ripio	m3	0,31	\$ 13,75	\$ 4,26	
Agua	ltr	0,20	\$ 0,74	\$ 0,15	
Ceniza Sangay	kg	22,69	\$ 0,08	\$ 1,81	

Análisis de precios unitarios				
Rubro:	6	Unidad:		m <sup>3</sup>
Detalle:	Hormigón Simple f'c = 240 kg/cm <sup>2</sup> con 5% de ceniza adicional			
	Subtotal (O)			\$ 82,17
	Transporte			
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo
		A	B	C=A*B
	Subtotal (P)			\$ -
	Total, Costo Directo (M+N+O+P)			\$ 108,49
	Indirectos y Utilidades %	0,00%		\$ -
	Otros Indirectos %			
	Costo Total del Rubro			\$ 108,49
	Valor Ofertado			<b>\$ 108,49</b>

*Nota.* La tabla indica el análisis de precios unitarios de un hormigón simple de f'c = 240 kg/cm<sup>2</sup> con el 5% de ceniza adicional.

- Hormigón  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$  con 10% de incidencia de ceniza

Tabla 87

Rubro de Hormigón simple  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con el 10% de ceniza adicional

Análisis de precios unitarios					
Rubro:	7		Unidad:	m <sup>3</sup>	
Detalle:	Hormigón Simple $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ con el 10% de ceniza adicional				
Equipo					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor	1,00	\$ 1,11	\$ 1,11	1,00	\$ 1,11
Concreteira eléctrica a gasolina	1,00	\$ 3,01	\$ 3,01	1,00	\$ 3,01
	Subtotal (M)				\$ 4,12
Mano de obra					
Descripción	Cantidad	Jornal/H	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Maestro Mayor (Estr. Oc. C1)	1,00	\$ 4,06	\$ 4,06	1,00	\$ 4,06
Albañil (Estr. Oc. D2)	1,00	\$ 3,66	\$ 3,66	1,00	\$ 3,66
Peón (Estr. Oc. E2)	4,00	\$ 3,62	\$ 14,48	1,00	\$ 14,48
	Subtotal (N)				\$ 22,20
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo	
		A	B	C=A*B	
Cemento hidráulico Tipo GU	kg	453,73	\$ 0,16	\$ 71,33	
Arena	m3	0,34	\$ 13,75	\$ 4,62	
Ripio	m3	0,31	\$ 13,75	\$ 4,26	
Agua	ltr	0,20	\$ 0,74	\$ 0,15	
Ceniza Sangay	kg	45,37	\$ 0,08	\$ 3,63	

Análisis de precios unitarios				
<b>Rubro:</b>	<b>7</b>	<b>Unidad:</b>		<b>m<sup>3</sup></b>
<b>Detalle:</b>	<b>Hormigón Simple f'c = 240 kg/cm<sup>2</sup> con el 10% de ceniza adicional</b>			
	Subtotal (O)			\$ 83,99
	Transporte			
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo
		A	B	C=A*B
	Subtotal (P)			\$ -
	Total, Costo Directo (M+N+O+P)			\$ 110,31
	Indirectos y Utilidades %		0,00%	\$ -
	Otros Indirectos %			
	Costo Total del Rubro			\$ 110,31
	Valor Ofertado			<b>\$ 110,31</b>

*Nota.* La tabla indica el análisis de precios unitarios de un hormigón simple de f'c = 240 kg/cm<sup>2</sup> con el 10% de ceniza adicional.

- Hormigón  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$  con 15% de incidencia de ceniza

Tabla 88

Rubro de Hormigón simple  $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$  con 15% de ceniza adicional

Análisis de precios unitarios					
Rubro:	8		Unidad:	m <sup>3</sup>	
Detalle:	Hormigón Simple $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$ con 15% de ceniza adicional				
Equipo					
Descripción	Cantidad	Tarifa	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Herramienta menor	1,00	\$ 1,11	\$ 1,11	1,00	\$ 1,11
Concreteira eléctrica a gasolina	1,00	\$ 3,01	\$ 3,01	1,00	\$ 3,01
	Subtotal (M)				\$ 4,12
Mano de obra					
Descripción	Cantidad	Jornal/H	Costo hora	Rendimiento	Costo
	A	B	C=A*B	R	D=C*R
Maestro Mayor (Estr. Oc. C1)	1,00	\$ 4,06	\$ 4,06	1,00	\$ 4,06
Albañil (Estr. Oc. D2)	1,00	\$ 3,66	\$ 3,66	1,00	\$ 3,66
Peón (Estr. Oc. E2)	4,00	\$ 3,62	\$ 14,48	1,00	\$ 14,48
	Subtotal (N)				\$ 22,20
Materiales					
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo	
		A	B	C=A*B	
Cemento hidráulico Tipo GU	kg	453,73	\$ 0,16	\$ 71,33	
Arena	m3	0,34	\$ 13,75	\$ 4,62	
Ripio	m3	0,31	\$ 13,75	\$ 4,26	
Agua	ltr	0,20	\$ 0,74	\$ 0,15	
Ceniza Sangay	kg	68,06	\$ 0,08	\$ 5,44	

Análisis de precios unitarios				
Rubro:	8	Unidad:	m <sup>3</sup>	
Detalle:	Hormigón Simple f'c = 240 kg/cm <sup>2</sup> con 15% de ceniza adicional			
	Subtotal (O)		\$ 85,80	
	Transporte			
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio uni.	Costo
		A	B	C=A*B
		Subtotal (P)		\$ -
	Total, Costo Directo (M+N+O+P)			\$ 112,12
	Indirectos y Utilidades %		0,00%	\$ -
	Otros Indirectos %			
	Costo Total del Rubro			\$ 112,12
	Valor Ofertado			\$ <b>112,12</b>

*Nota.* La tabla indica el análisis de precios unitarios de un hormigón simple de f'c = 240 kg/cm<sup>2</sup> con el 15% de ceniza adicional.

## Resumen de costo – beneficio

**Tabla 89**

*Cuadro comparativo del análisis costo-beneficio para un hormigón  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$*

Costo indicado para 1 m <sup>3</sup> de hormigón de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$				
Tipo de hormigón	Costo	Ahorro	Ahorro	Resistencia a la compresión obtenida
-	\$	\$	%	kg/cm <sup>2</sup>
Hormigón $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$	\$ 96,01	\$ -		212,10
5% de adición de ceniza	\$ 97,54	\$ -1,54	-1,60%	265,12
10% de adición de ceniza	\$ 99,08	\$ -3,07	-1,57%	188,54
15% de adición de ceniza	\$ 100,61	\$ -4,61	-1,55%	179,51

*Nota.* La tabla indica una comparación entre el costo del m<sup>3</sup> del hormigón convencional con el costo del m<sup>3</sup> de hormigón con los diferentes porcentajes de ceniza.

El cuadro comparativo costo-beneficio refleja que el hormigón con el 5% de ceniza adicional no presenta un ahorro significativo pero su resistencia de diseño alcanzó un valor de 265,12 kg/cm<sup>2</sup> superando considerablemente a la resistencia de diseño en un 25%. Los hormigones con el 10% y 15% adicional de ceniza no presenta ningún ahorro económico y su resistencia no alcanzó el valor de diseño, por lo cual se considera no apta para construcciones.

Tabla 90

Cuadro comparativo del análisis costo-beneficio para un hormigón  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$

Costo indicado para 1 m <sup>3</sup> de hormigón de $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$				
Tipo de hormigón	Costo	Ahorro	Ahorro	Resistencia a la compresión obtenida
-	\$	\$	%	kg/cm <sup>2</sup>
Hormigón $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$	\$ 106,68	\$ -		244,44
5% de adición de ceniza	\$ 108,49	\$ -1,81	-1,70%	320,92
10% de adición de ceniza	\$ 110,31	\$ -3,63	-1,67%	226,91
15% de adición de ceniza	\$ 112,12	\$ -5,44	-1,65%	217,62

*Nota.* La tabla indica una comparación entre el costo del m<sup>3</sup> del hormigón convencional con el costo del m<sup>3</sup> de hormigón con los diferentes porcentajes de ceniza.

El cuadro comparativo costo-beneficio refleja que el hormigón con el 5% de ceniza adicional no presenta un ahorro significativo pero su resistencia de diseño alcanzó un valor de 320,92 kg/cm<sup>2</sup> superando considerablemente a la resistencia de diseño en un 31%. Los hormigones con el 10% y 15% adicional de ceniza no presenta ningún ahorro económico y su resistencia no alcanzó el valor de diseño, por lo cual se considera no apta para construcciones.

## Capítulo V

### Conclusiones y Recomendaciones

#### Conclusiones

- El agregado grueso de la cantera de Pintag y el agregado fino de la concesión minera Rancho La Paz vía Alóag – Santo Domingo, utilizados en el proyecto cumplen con los requerimientos de granulometría expuestos en la norma NTE INEN 872.
- Al comparar el agregado grueso de 1" y 3/4", el de menor tamaño nominal permite mejorar la trabajabilidad y obtener resistencias de diseño óptimas.
- Generalmente la participación del agregado grueso es mayor al agregado fino en las proporciones de la dosificación del hormigón, sin embargo, en el estudio realizado, el agregado fino, presenta una mayor contribución debido a su alto módulo de finura.
- Al analizar las propiedades de la ceniza volcánica del volcán Sangay mediante espectroscopía de energía dispersa (EDS), se obtuvo que los aluminatos y silicatos, componentes principales de este material, mejoran la resistencia a la compresión del hormigón si se adicionan al cemento en valores cercanos al 5%.
- La gravedad específica, entre 2,0 y 2,7, demuestra que mineralógicamente las cenizas están constituidas por fases de ácidas a intermedias.
- Se estableció una dosificación base donde el contenido de cemento y los pesos secos de los agregados gruesos y finos para resistencias de  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  y  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ , se mantienen constantes en las diferentes adiciones de ceniza volcánica al 5%, 10% y 15%.
- De acuerdo con la normativa del ACI 301 para la dosificación de hormigones de 210  $\text{kg/cm}^2$  y 240  $\text{kg/cm}^2$ , se logró obtener resistencias de 212,10  $\text{kg/cm}^2$  y 244,44  $\text{kg/cm}^2$ ,

respectivamente; siendo este el punto de partida para el análisis de la incidencia de la ceniza.

- De acuerdo con el análisis de datos se concluye que para una dosificación convencional de hormigón de  $f'c=210 \text{ kg/cm}^2$  y  $f'c=240 \text{ kg/cm}^2$ , al emplear una adición del 5% de ceniza volcánica respecto al peso de cemento, se obtiene un incremento de resistencia del 25% y 31% a los 28 días, respectivamente. Los porcentajes de aumento están directamente relacionados con las resistencias a compresión obtenidas sin la adición de ceniza.
- La evolución de la resistencia del hormigón presenta cambios mínimos en los primeros días con la adición del 10% y 15% de ceniza con respecto a la dosificación modelo; en edades tardías esta tendencia nos indica que los valores de resistencia bajan conforme aumenta el contenido de ceniza.
- Los módulos de elasticidad obtenidos experimentalmente tanto para el hormigón de  $210 \text{ kg/cm}^2$  y  $240 \text{ kg/cm}^2$ , según la norma ASTM C469 reflejan un comportamiento muy similar a los módulos de elasticidad obtenidos mediante la fórmula propuesta por el ACI 318. El módulo de elasticidad que corresponde al contenido de 5% de ceniza muestra un dato mayor, mientras que, para el concreto con contenido del 10% y 15% de ceniza el valor es menor a medida que su porcentaje aumenta y esto se debe a que el módulo de Young se determina con la resistencia alcanzada, evidenciando que el módulo es directamente proporcional a la resistencia.
- Los valores obtenidos de la relación de Poisson varían entre 0,16 a 0,18 para hormigón de resistencia de  $210 \text{ kg/cm}^2$  y  $240 \text{ kg/cm}^2$ , generalmente este valor está en el rango de 0,15 a 0,20 para concretos normales o ligeros, concluyendo que los valores obtenidos para las dosificaciones de diseño se encuentran dentro del rango.

- El análisis costo-beneficio refleja que el hormigón con el 5% adicional de ceniza para ambas dosificaciones no representa un ahorro económico considerable, debido a que existe un adicional de esta puzolana y por ende un incremento en el costo de \$1,54 y \$1,81; sin embargo, se supera la resistencia de diseño propuesto de 210 kg/cm<sup>2</sup> y 240 kg/cm<sup>2</sup>, llegando a esfuerzos de 265,12 kg/cm<sup>2</sup> y 320,92 kg/cm<sup>2</sup> respectivamente, demostrando así un beneficio importante en la resistencia a un menor costo.
- El contenido de aire para el hormigón con 5% adicional de ceniza en ambas dosificaciones demostró un menor valor a comparación de los concretos con 0%, 10% y 15% de adición. De esta manera se podría relacionar al aumento de la resistencia a la compresión con la eliminación de vacíos en la mezcla por medio de la incorporación de ceniza para este porcentaje.

## Recomendaciones

- Utilizar agua en la mezcla que cumpla con los parámetros de calidad dados en la normativa, puesto que las impurezas afectan al tiempo de fraguado, resistencia del concreto, estabilidad volumétrica y también puede provocar eflorescencias o corrosión en el acero de refuerzo.
- Trabajar con agregados los cuales cumplan los límites granulométricos expuestos por la normativa correspondiente.
- Se debe procurar tener un correcto control de adición de la ceniza en las mezclas cementantes, debido a que un contenido excesivo es perjudicial para las resistencias de diseño.
- Realizar una correcta caracterización de los materiales para lograr las resistencias de diseño y no incurrir en errores al guiarse de tablas de dosificación estandarizadas.
- El grado de control debe ser elegido con cuidado y teniendo presente las condiciones de trabajo, así como la experiencia de los laboratoristas.
- El control de humedad se debe realizar antes de cada fundición, ya que el material tiende a ganar o perder agua con el paso del tiempo de acuerdo con las condiciones de almacenamiento.
- Se debe limpiar la concretera y el equipo utilizado luego de cada fundición, de tal forma que no exista contaminación con muestras anteriores y así evitar posibles modificaciones en las propiedades del hormigón.
- El concreto debe garantizar una mezcla sin segregación donde los agregados estén distribuidos homogéneamente, contribuyendo a la trabajabilidad de la muestra respecto a la resistencia de diseño.

- Es importante que la probeta posea un correcto enrasado al momento de su fabricación con el fin de corregir las imperfecciones de las superficies que podrían alterar los datos de resistencia y módulo de elasticidad en caso de presentarse pequeñas irregularidades.
- El curado del hormigón se debe realizar en condiciones adecuadas establecidas por la norma ACI 308R, alejando las muestras del sol, cambios bruscos de temperatura y procurando evitar la pérdida de humedad.
- Se sugiere que se considere a la ceniza volcánica como un material de construcción normado y aprovechado en localidades usualmente afectadas por erupciones volcánicas. Además, se podría contemplar usar métodos normados de recolección de ceniza para su posterior comercialización y aprovechamiento.
- Apoyando a la conservación del medio ambiente, se sugiere hacer investigaciones con diferentes tipos de cenizas y sus efectos en el comportamiento de la mezcla de concreto, como sustituto en porcentaje al peso del cemento.

## Referencias

- ACI Committee 214. (2011). *Guide to evaluation of strenght test results of concrete. July 2001.*
- ACI Committee 318. (2019). ACI 318 - 19. In *American Concrete Institute.*
- Arequipa Maldonado, E. R., Coba Santamaría, W. A., Garzón Chávez, D. F., & Vargas Quishpe, L. Á. (2012). *Modulo estatico de elasticidad del hormigon en base a su resistencia a la compresion simple  $F'c=21MPa$  y  $30 MPa$ .* 257.
- ASOCRETO. (2010). *Tecnología del Concreto Tomo 1* (Vol. 25, Issue 36).
- ASTM C39. (2003). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.* 4, 1–5.
- ASTM International. (2008). *ASTM C1064.*
- ASTM International. (2009). *ASTM C31.*
- ASTM International. (2014). *ASTM C469.*
- ASTM International. (2015). *ASTM C127.*
- Avensa SAS. (n.d.). *Agregado grueso 3/4"*. <http://www.avensa.co/services/agregado34/>
- Cabrera, M. I. (2018). Utilización de los concretos de alta resistencia y concretos celulares en la industria de la construcción ecuatoriana, clasificados por sectores: vivienda, electricidad, gas/petróleo, salud y educación. *Ingenio*, 1(1 SE-Artículos), 15–30.
- Cabrera Piña, J. C. (2016). *Control de los resultados de las pruebas de resistencia del hormigón hidráulico en la planta Hormiazuay en el Cantón Cuenca mediante métodos estadísticos.* 116.
- Cadena Tuquinga, A. B., & Palacios Lagos, P. A. (2017). *Influencia de la temperatura de curado en la resistencia a la compresion del hormigon y parámetros mecánicos. Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson.* Escuela Politécnica Nacional.

- Caicedo Barona, W. A., & Tipán Quinatoa, F. M. (2019). *Propiedades mecánicas del hormigón estructural ligero y celular, utilizando materiales de diferentes canteras en la ciudad de Quito*. Universidad Central del Ecuador.
- Castro Solano, E. P. (2020). *Estudio de la sustitución parcial de cemento de alta resistencia inicial por puzolana de ceniza volcánica en el diseño de hormigón*. Escuela Politécnica Nacional.
- Chávez Rivas, F., Rodríguez Iznaga, I., & Petranovskii, V. (2014). Caracterización por SEM , EDS y micro-Raman de la influencia de la relación molar  $\text{SiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$  y temperatura de reducción sobre el sistema CuZSM5. *Revista Mexicana de Física*, 60(October), 340–349.
- Chele Chele, E. P. (2019). *Determinación del módulo de elasticidad en hormigones estructurales de 21 y 28 MPa utilizando agregados de la cantera Agresa*. 05, 108.
- Coppiano Gutiérrez, I. J. (2016). *Uso de ceniza volcánica como puzolana natural en mezclas de hormigón*. Universidad Espíritu Santo.
- Coque Quishpe, L. P., & Lechon Churuchumbi, T. M. (2021). *Diseño de hormigón de alto desempeño tipo I sin adición de cenizas de cascarilla y paja de trigo*. Universidad Central del Ecuador.
- Cuetara, J. R., Howland Albear, J. J., & Andrade Perdrix, C. (2020). *Fabricación de hormigón a base de puzolanas naturales como material cementante suplementario . Uso de resistividad eléctrica para evaluar la porosidad y la tortuosidad* *Introducción Materiales y métodos*. December, 1–10.
- Frías Muñoz, G. G., & Salazar Amagua, R. F. (2019). *Diseño de hormigón de alta resistencia con escoria de acero reciclado como sustitución parcial de agregados*. Universidad Central del Ecuador.
- Galeas Arias, E. D., & Guzmán Chávez, F. A. (2019). *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.*

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL.

Gómez, A. (2009). *Caracterización y utilización de puzolanas como aditivos minerales activos en cementos*. Universidad Politécnica de Valencia.

González, O., & Robles, F. (2005). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado* (4ta ed).

Holcim Ecuador S.A. (2015). Ficha técnica - Cemento hidráulico Tipo GU para la construcción en general. *Holcim, Confianza Que Construye*, 1, 17.

[https://www.portaldirecta.com/portaldirecta/ec/CEMENTO\\_GU\\_G.pdf](https://www.portaldirecta.com/portaldirecta/ec/CEMENTO_GU_G.pdf)

Huarcaya Garzón, C. I. (2014). *Comportamiento del asentamiento en el concreto usando aditivo polifuncional Sikament 290N y aditivo super plastificante de alto desempeño Sika Viscoflow 20E*. Universidad Ricardo Palma.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011a). *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 860:2011*.

Instituto Ecuatoriano de Normalización. (2011b). *Norma Técnica Ecuatoriana INEN 872:2011*.

Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (2021a). *Informativo Volcán Sangay N° 2021-111*.

Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (2021b). *Informe diario del volcán Sangay No. 2021-127*.

Méndez, E. A. (2012). *Propuesta Para Sustitucion De Agregados Petreos Por Agregados Pet, En Diseño De Mezcla De Concreto Con Resistencia  $F'_{C}=150\text{Kg}/\text{Cm}^2$ , Usado Para Banquetas, Guarniciones Y Firmes*.

Monzier, M., Robin, C., Samaniego, P., Hall, M. L., Cotten, J., Mothes, P., & Arnaud, N. (1999). Sangay volcano, Ecuador: Structural development, present activity and petrology. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 90(1–2), 49–79. <https://doi.org/10.1016/S0377->

0273(99)00021-9

Niño Hernandez, J. R. (2010). *Colección del concreto -Tecnología del concreto -Tomo 1.*

*Materiales, propiedades y diseño de mezclas* (ASOCRETO (ed.); 3ra ed.).

Nistal Cordero, Á. F., Retana Maqueda, M. J., & Ruiz Abrio, T. (2012). El Hormigón: Historia,

Antecedentes En Obras Y Factores Indicativos De Su Resistencia. *Tecnología y Desarrollo, X*, 1–18.

NTE INEN. (2015). Hormigones. Hormigón preparado en obra. Requisitos. *Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1855, 27.*

NTE INEN 2380. (2011). Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos. *Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1*(Primera Edición), 5.

<http://181.112.149.203/buzon/normas/2380.pdf>

Orbe Pinchao, L. V., & Zúñiga Morales, P. S. (2013). *Optimización de la realización agua/cemento en el diseño de hormigones estándar establecidos en los códigos ACI-ASTM.* Escuela Politécnica Nacional.

Peña Galván, D. I. (2015). *“Estudio comparativo entre los hormigones: arena-ripio-cemento, granzón-ripio-cemento, puzolana-ripio-cemento con una misma dosificación y su incidencia en la resistencia a la rotura por compresión a los 7, 14, 21 y 28 días de edad.”* Universidad Técnica de Ambato.

Pinto, A. (n.d.). *Ingeniería Real.* Prueba de Revenimiento Del Concreto.

Portland Cement Association. (2004). Diseño y control de mezclas de Concreto. In *Journal of Experimental Botany: Vol. Primera Ed.*

[https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/54593011/Diseno\\_y\\_control\\_de\\_mezclas\\_de\\_concreto\\_-\\_PCA.pdf?response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DPortland\\_Cement\\_Association.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-](https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/54593011/Diseno_y_control_de_mezclas_de_concreto_-_PCA.pdf?response-content-disposition=inline%3Bfilename%3DPortland_Cement_Association.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-)

SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53

- Rivera López, G. A. (2013). Tecnología del concreto y Mortero. Concreto Simple. In *Universidad del Cauca*.
- Romero Quintero, A. F., & Hernández Rico, J. C. (2014). *Diseño de mezclas de hormigón por el método ACI y efectos de la adición de cenizas volantes de Termotasajero en la resistencia a la compresión*. [https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/915/Diseno de mezclas de hormigon por el metodo a.c.i..pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/915/Diseno%20de%20mezclas%20de%20hormigon%20por%20el%20metodo%20a.c.i..pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Salazar, A. (2002). Síntesis de la tecnología del concreto. Una manera de entender a los materiales compuestos. *Corporación Construir, 3 edición*, 1–9.
- Sánchez de Guzmán, D., & Osorio Redondo, J. D. (1997). *Colección básica del concreto. Tecnología y propiedades* (Asociación Colombiana de Productores de Concreto (ed.); 2da ed.).
- Sánchez, E., Vizcaino, G., Mejía, F., & Cipriani Ávila, I. (2018). Análisis mineralógico y multielemental de la ceniza volcánica, producto de la erupción del Cotopaxi en 2015, por difracción de rayos X (XRD) y espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS) y sus posibles aplicaciones e impactos. *InfoANALÍTICA*, 6(1), 9–23. <https://doi.org/10.26807/ia.v6i1.62>
- Sanhueza R., M. (n.d.). *Área de Hormigón - Ministerio de Obras Públicas de Chile*.
- Stewart, C., Johnston, D. M., Leonard, G. S., Horwell, C. J., Thordarson, T., & Cronin, S. J. (2006). Contamination of water supplies by volcanic ashfall: A literature review and simple impact modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 158(3–4), 296–306. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.07.002>
- Tobón, J. I. (2000). *Puzolanas en los alrededores de IRRRA. February*, 77–83.

- Trusilewicz, L. N. (2014). *Determinación del contenido de alúmina reactiva de la adiciones puzolánicas naturales y artificiales*. Universidad Politécnica de Madris.
- Valderrama, C. P., Torres Agredo, J., & Mejía de Gutierrez, R. (2011). A high unburned carbon fly ash concrete's performance characteristics. *Ingenieria e Investigacion*, 31(1), 39–46.
- Valverde, V. N. (2014). *Los Depósitos de Avalancha de Escombros Provenientes del Volcán Sangay: Caracterización Petrográfica - Geoquímica*. 174.
- Yancha Alvarado, A. G. (2013). *Módulo estático de elasticidad del hormigón en base a su resistencia a la compresión ( $f'_c$ =MPa), fabricado con materiales de la mina de San Ramón, ubicada en la parroquia de Mulaló en la provincia de Cotopaxi y cemento Chimborazo*. Universidad Central del Ecuador.

**Anexos**