



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL**

TEMA:

“EFECTOS DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO DEL
CEMENTO PORTLAND EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL
CONCRETO ESTRUCTURAL”

AUTOR: Gonzalo David Rodriguez Villavicencio

TUTOR: PhD. Diana Carolina Coello Fiallos

AMBATO – ECUADOR

Septiembre - 2021

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutora del Trabajo Experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, con el tema: **“EFECTOS DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO DEL CEMENTO PORTLAND EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO ESTRUCTURAL”**, elaborado por el Sr. Gonzalo David Rodriguez Villavicencio, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 1805145560 estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

- Que el presente trabajo experimental es original de su autor.
- Ha sido revisado cada uno de sus capítulos componentes.
- Esta concluido en su totalidad.

Ambato, Septiembre 2021

.....
PhD. Diana Carolina Coello Fiallos

TUTORA

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, **Gonzalo David Rodriguez Villavicencio** con C.I. 1805145560 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Trabajo Experimental con el tema: **“EFECTOS DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO DEL CEMENTO PORTLAND EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO ESTRUCTURAL”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor de la investigación, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Septiembre 2021



Gonzalo David Rodriguez Villavicencio

C.I. 1805145560

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Trabajo Experimental o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo Experimental, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este documento dentro de las regulaciones de la Universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Septiembre 2021



Gonzalo David Rodriguez Villavicencio
C.I. 1805145560
AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por el estudiante Gonzalo David Rodriguez Villavicencio de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **“EFECTOS DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO DEL CEMENTO PORTLAND EN LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL CONCRETO ESTRUCTURAL”**,

Ambato, Septiembre 2021

Para constancia firman:

Ing. Mg. Maritza Elizabeth Ureña Aguirre

Miembro Calificador

Ing. Mg. Wladimir José Ramírez Cabrera

Miembro Calificador

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a mis abuelitos Gonzalo y Teresa que fueron los pilares fundamentales durante el largo trayecto de la carrera, a mis padres Ángel y Myriam quienes me dieron, educación, apoyo y consejos, que con su trabajo y sacrificio me han permitido cumplir esta meta.

A mis amigos con quienes viví muchas experiencias y siempre me brindaron su apoyo de manera desinteresada, aportando a mi formación tanto profesional y como ser humano.

Gracias por confiar en mí.

Gonzalo Rodriguez

AGRADECIMIENTO

Agradezco a toda mi familia por alentarme en cada decisión, por ser mi fuerza, por confiar en mí y guiarme por el buen camino.

A mis compañeros con quienes compartí una de las mejores etapas de mi vida.

A mi compañero tesista Ricardo Panimbosa, con quien se realizó el trabajo de campo y laboratorio, por su ayuda y amistad a lo largo de estos años.

A mi tutora, PhD. Diana Coello quien con su experiencia y conocimiento me orientó en el desarrollo de esta tesis.

A los docentes Ing. Santiago Medina, Ing. Favio Portilla, Ing. Maritza Ureña por su buena voluntad y por compartir sus conocimientos conmigo.

A la Dirección de Investigación y Desarrollo (DIDE) por medio del grupo de investigación SciTeM de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica con el proyecto “Estudio de las propiedades físicas y morfológicas de aluminosilicatos para reemplazo parcial del cemento portland en el concreto estructural” dentro del cual se desarrolló esta investigación.

A todos los integrantes de los laboratorios de la facultad de Ingeniería Civil por la ayuda brindada en la ejecución del estudio.

Gracias a todos.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO

A.- PÁGINAS PRELIMINARES

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACION	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDO	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiii
ÍNDICE DE GRÁFICOS	xv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii

B.- CONTENIDO

CAPITULO I.....	1
1.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	1
1.1.1 Justificación.....	1
1.1.2 Antecedentes	3
1.1.3 Fundamentación Teórica.....	11
1.1.4 Hipótesis.....	34
1.2 OBJETIVOS	34
1.2.1 General:.....	34
1.2.2 Específicos:	34
CAPITULO II	35
2.1 MATERIALES.....	35
2.1.1 Zeolita Verde Natural de uso comercial (ZV).....	35
2.1.2 Cemento Holcim Fuerte tipo GU (CGU).....	37
2.1.3 Cemento SRM 114q.....	38
2.1.4 Mercurio (Hg)	39
2.1.5 Agregado Grueso (AG).....	40

2.1.6	Agregado Fino (AF)	40
2.1.7	Aditivo Plastificante (AP)	41
2.1.8	Agua (H ₂ O)	41
2.1.9	Gasolina Extra (GE)	42
2.1.10	Tripolifosfato de Sodio (STP)	42
2.2	EQUIPOS	44
2.2.1	Frasco Le Chatelier	44
2.2.2	Aparato de Permeabilidad al Aire Blaine	45
2.2.3	Hidrómetro 152H	46
2.2.4	Aparato Manual de Vicat	46
2.2.5	Aparato Automático de Vicat	47
2.2.6	Baño María	48
2.2.7	Tanque de curado	49
2.2.8	Equipo básico utilizado en la dosificación y elaboración de especímenes de Hormigón	51
2.3	MÉTODO	52
2.3.1	Densidad Real (NTE INEN 156)	54
2.3.2	Finura método de Blaine (NTE INEN 196)	56
2.3.3	Análisis Hidrométrico (ASTM D422)	61
2.3.4	Tiempo de Fraguado (NTE INEN 158)	65
2.3.5	Fabricación de Especímenes de Hormigón (NTE INEN 1576)	68
CAPITULO III		71
3.1	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	71
3.1.1	Densidad Real	72
3.1.2	Finura método de Blaine	76
3.1.3	Ensayo hidrométrico	84
3.1.4	Tiempo de Fraguado	89
3.1.5	Diseño de la mezcla método de la densidad óptima	97
3.1.6	Propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido	104
3.1.7	Ensayo a compresión de los especímenes de hormigón	121
3.2	VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS	136
CAPITULO IV		137
4.1	CONCLUSIONES	137
4.2	RECOMENDACIONES	140
BIBLIOGRAFÍA		142

ANEXOS.....	148
A1. DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO	148
A2. DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO.....	149
A3. DENSIDAD APARENTE SUELTA DEL AGREGADO FINO Y GRUESO	150
A4. DENSIDAD APARENTE COMPACTADA DEL AGREGADO FINO Y GRUESO.....	150
A5. DENSIDAD APARENTE COMPACTADA DE LA MEZCLA.....	151
A6. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO FINO.....	152
A7. CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS ÁRIDOS	153
A8. LECTURAS DEL APARATO AUTOMÁTICO DE VICAT PARA LA PASTA DE CEMENTO	154
A9. LECTURAS DEL APARATO AUTOMÁTICO DE VICAT PARA LA PASTA DE CEMENTO CON 10% DE SUSTITUCIÓN DE ZEOLITA.....	155
A10. LECTURAS DEL APARATO AUTOMÁTICO DE VICAT PARA LA PASTA DE CEMENTO CON 15% DE SUSTITUCIÓN DE ZEOLITA.....	156
A11. LECTURAS DEL APARATO AUTOMÁTICO DE VICAT PARA LA PASTA DE CEMENTO CON 20% DE SUSTITUCIÓN DE ZEOLITA.....	157
A12. FOTOGRAFÍAS.....	158

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Historia del cemento [14].	3
Figura 2. Estructura interna de la pasta de cemento [16].	4
Figura 3. Procesos en la fabricación de cemento Portland [23].	6
Figura 4. Puzolana en estado natural [46].	14
Figura 5. Agregados o áridos. a) Agregado Grueso, b) Agregado Fino.	15
Figura 6. Mezcla de Concreto.	17
Figura 7. Muestras de Zeolita Natural.	22
Figura 8. Unidades de construcción de la zeolita [61].	23
Figura 9. Unidades secundarias de construcción (SBU) [61].	23
Figura 10. Frasco de Le Chatelier [63].	27
Figura 11. Aparato de Blaine [67].	28
Figura 12. Hidrómetro 152 H [70].	29
Figura 13. Aparato Manual de Vicat [71].	30
Figura 14. Resistencia a la penetración de una pasta de cemento Portland [75].	32
Figura 15. Equipo Automático de Vicat C090/A [74].	32
Figura 16. Zeolita Verde.	35
Figura 17. Cemento Holcim Tipo GU [78].	37
Figura 18. Cemento Estandarizado SRM 114q [79].	39
Figura 19. Mercurio [80].	39
Figura 20. Ripio 3/4.	40
Figura 21. Polvo de roca.	40
Figura 22. Aditivo Sikament N-100.	41
Figura 23. Gasolina Extra.	42
Figura 24. Solución defloculante. a) Tripolifosfato de sodio, b) Agua destilada.	43
Figura 25. Frasco Le Chatelier.	44
Figura 26. Aparato de Permeabilidad al Aire Blaine [86].	45
Figura 27. Hidrómetro 152H.	46
Figura 28. Aparato Manual de Vicat.	47
Figura 29. Aparato Automático de Vicat.	48
Figura 30. Baño María.	49
Figura 31. Tanque de Curado.	49
Figura 32. Máquina de compresión Shimadzu.	50
Figura 33. Proceso Metodológico.	53
Figura 34. Micrografía SEM Cemento CGU [94].	88
Figura 35. Espécimen de hormigón.	99
Figura 36. Recolección de los agregados.	158
Figura 37. Ensayos de los agregados para la dosificación del hormigón.	158
Figura 38. Determinación de la densidad real, Método de Le Chatelier.	158
Figura 39. Determinación de la finura con el aparato de permeabilidad al aire	158
Figura 40. Análisis hidrométrico de la zeolita ZV.	159
Figura 41. Determinación de la consistencia normal (Vicat Manual).	159
Figura 42. Determinación del tiempo de fraguado (Vicat Automático).	159
Figura 43. Elaboración de los especímenes de hormigón.	159

Figura 44. Vibrado del hormigón.....	160
Figura 45. Especímenes de hormigón	160
Figura 46. Curado del hormigón.	160
Figura 47. Ensayo a compresión de los especímenes de hormigón.	160

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Contenido de los Óxidos en el Cemento Portland [42].....	11
Tabla 2. Compuestos principales del Cemento Portland [42].....	12
Tabla 3. Requisitos Físicos Normalizados del cemento hidráulico [44].....	13
Tabla 4. Clasificación estructural de las zeolitas según Meier [61].....	24
Tabla 5. Especificaciones Técnicas Zeolita Verde Natural ZV [77]	36
Tabla 6. Requisitos físicos del cemento Holcim Fuerte tipo GU [44], [78].	38
Tabla 7. Corrección por temperatura (Ct) para el hidrómetro 152 H [92].	62
Tabla 8. Profundidad Efectiva del hidrómetro 152 H [92].	63
Tabla 9. Constante “a” en función de la gravedad específica [92].	64
Tabla 10. Datos requeridos por el método de la densidad óptima.	68
Tabla 11. Resistencia a compresión en función de la relación agua/cemento [57]....	68
Tabla 12. Cantidad de pasta según el asentamiento requerido [57].	69
Tabla 13. Densidad Real del Cemento CGU.	72
Tabla 14. Densidad Real de la Zeolita ZV.	73
Tabla 15. Calibración del aparato y preparación de la masa de la muestra.	76
Tabla 16. Ensayo de calibración del aparato de permeabilidad al aire.	77
Tabla 17. Finura del cemento CGU con el aparato de permeabilidad al aire	78
Tabla 18. Determinación de la constante “b” para la Zeolita ZV.	80
Tabla 19. Finura de la zeolita ZV con el aparato de permeabilidad al aire.....	81
Tabla 20. Análisis granulométrico de la zeolita ZV por hidrómetro.	85
Tabla 21. Consistencia normal del cemento y porcentajes de sustitución de zeolita. 89	
Tabla 22. Lecturas del aparato automático de Vicat para la muestra de cemento.	90
Tabla 23. Lecturas del aparato automático de Vicat para la mezcla Z10.	91
Tabla 24. Lecturas del aparato automático de Vicat para la mezcla Z15.	93
Tabla 25. Lecturas del aparato automático de Vicat para la mezcla Z20	94
Tabla 26. Tiempo de fraguado diferentes mezclas.....	96
Tabla 27. Resultados de los ensayos para la dosificación del hormigón.	97
Tabla 28. Dosificación para la mezcla de control.	102
Tabla 29. Dosificación CEM para 12 especímenes sin corrección por humedad....	102
Tabla 30. Resumen de la dosificación para todas las mezclas.....	103
Tabla 31. Propiedades del hormigón fresco para la mezcla de control.....	104
Tabla 32. Propiedades de la mezcla CEM a los 7 días.....	104
Tabla 33. Propiedades de la mezcla CEM a los 14 días.....	105
Tabla 34. Propiedades de la mezcla CEM a los 28 días.....	105
Tabla 35. Propiedades de la mezcla CEM a los 56 días.....	106
Tabla 36. Propiedades del hormigón fresco de la mezcla Z10	107
Tabla 37. Propiedades de la mezcla Z10 a los 7 días.	107
Tabla 38. Propiedades de la mezcla Z10 a los 14 días.....	108
Tabla 39. Propiedades de la mezcla Z10 a los 28 días.....	108
Tabla 40. Propiedades de la mezcla Z10 a los 56 días.....	109
Tabla 41. Propiedades del hormigón fresco de la mezcla Z15.	110
Tabla 42. Propiedades de la mezcla Z15 a los 7 días.....	110

Tabla 43. Propiedades de la mezcla Z15 a los 14 días.....	111
Tabla 44. Propiedades de la mezcla Z15 a los 28 días.....	111
Tabla 45. Propiedades de la mezcla Z15 a los 56 días.....	112
Tabla 46. Propiedades del hormigón fresco de la mezcla Z20	113
Tabla 47. Propiedades de la mezcla Z20 a los 7 días.....	113
Tabla 48. Propiedades de la mezcla Z20 a los 14 días.....	114
Tabla 49. Propiedades de la mezcla Z20 a los 28 días.....	114
Tabla 50. Propiedades de la mezcla Z20 a los 56 días.....	115
Tabla 51. Densidad Promedio en estado fresco (kg/m ³)	116
Tabla 52. Densidad promedio de la mezcla de control (CEM).....	117
Tabla 53. Densidad promedio de la muestra con 10% de sustitución (Z10).....	118
Tabla 54. Densidad promedio de la muestra con 15% de sustitución (Z15).....	119
Tabla 55. Densidad promedio de la muestra con 20% de sustitución (Z20).....	120
Tabla 56. Resistencia a la compresión de la mezcla CEM a los 7 días.....	121
Tabla 57. Resistencia a la compresión de la mezcla CEM a los 14 días.....	121
Tabla 58. Resistencia a la compresión de la mezcla CEM a los 28 días.....	122
Tabla 59. Resistencia a la compresión de la mezcla CEM a los 56 días.....	122
Tabla 60. Resistencia a la compresión de la mezcla Z10 a los 7 días.....	122
Tabla 61. Resistencia a la compresión de la mezcla Z10 a los 14 días.....	123
Tabla 62. Resistencia a la compresión de la mezcla Z10 a los 28 días.....	123
Tabla 63. Resistencia a la compresión de la mezcla Z10 a los 56 días.....	123
Tabla 64. Resistencia a la compresión de la mezcla Z15 a los 7 días.....	124
Tabla 65. Resistencia a la compresión de la mezcla Z15 a los 14 días.....	124
Tabla 66. Resistencia a la compresión de la mezcla Z15 a los 28 días.....	124
Tabla 67. Resistencia a la compresión de la mezcla Z15 a los 56 días.....	125
Tabla 68. Resistencia a la compresión de la mezcla Z20 a los 7 días.....	125
Tabla 69. Resistencia a la compresión de la mezcla Z20 a los 14 días.....	125
Tabla 70. Resistencia a la compresión de la mezcla Z20 a los 28 días.....	126
Tabla 71. Resistencia a la compresión de la mezcla Z20 a los 56 días.....	126
Tabla 72. Resistencia a compresión de la mezcla de control (CEM).....	127
Tabla 73. Resistencia a compresión de la mezcla con 10% de sustitución (Z10)....	128
Tabla 74. Resistencia a compresión mezcla con 15% de sustitución (Z15)	129
Tabla 75. Resistencia a compresión mezcla con 20% de sustitución (Z20)	130
Tabla 76. Resumen de la resistencia a compresión de las mezclas para 24 MPa	135

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Esquema comparativo de la densidad real del cemento CGU.....	72
Gráfico 2. Esquema comparativo de la densidad real de la zeolita ZV.	74
Gráfico 3. Esquema comparativo de la densidad real del cemento y la zeolita.	75
Gráfico 4. Esquema comparativo de los ensayos de finura del cemento CGU.....	79
Gráfico 5. Constante b para la muestra de Zeolita ZV.....	80
Gráfico 6. Esquema comparativo de los ensayos de finura de la zeolita ZV.....	82
Gráfico 7. Esquema comparativo de la finura del cemento y la zeolita.....	83
Gráfico 8. Análisis granulométrico de la zeolita ZV por medio del hidrómetro.	86
Gráfico 9. Análisis entre los diámetros de las partículas del cemento y la zeolita. ...	88
Gráfico 10. Tiempo de fraguado de la pasta de cemento.	90
Gráfico 11. Tiempo de fraguado de la pasta del cemento y 10% de zeolita.....	92
Gráfico 12. Tiempo de fraguado de la pasta de cemento y 15% de zeolita.	93
Gráfico 13. Tiempo de fraguado de la pasta de cemento y 20% de zeolita.	95
Gráfico 14. Análisis de los tiempos de fraguado.	96
Gráfico 15. Densidad promedio en estado fresco.	116
Gráfico 16. Densidad promedio de la mezcla de control (CEM).....	117
Gráfico 17. Densidad promedio de la muestra con 10% de sustitución (Z10).	118
Gráfico 18. Densidad promedio de la muestra con 15% de sustitución (Z15).	119
Gráfico 19. Densidad promedio de la muestra con 20% de sustitución (Z20).	120
Gráfico 20. Resistencia a la compresión (CEM).....	127
Gráfico 21. Resistencia a la compresión (Z10).....	128
Gráfico 22. Resistencia a la compresión (Z15).....	129
Gráfico 23. Resistencia a la compresión (Z20).....	130
Gráfico 24. Comparación de la resistencia a compresión a los 7 días.	131
Gráfico 25. Comparación de la resistencia a compresión a los 14 días.	132
Gráfico 26. Comparación de la resistencia a compresión a los 28 días.	133
Gráfico 27. Comparación de la resistencia a compresión a los 56 días.	134
Gráfico 28. Comparación del comportamiento a compresión de todas las mezclas.	135

RESUMEN

Este estudio analiza las propiedades físicas y mecánicas de la zeolita natural como material suplementario del cemento en la elaboración de concreto estructural como una propuesta ecológica en la mitigación del dióxido carbónico producto de la fabricación del cemento.

Se determinaron las propiedades físicas del cemento y zeolita: densidad real, finura y granulometría por hidrómetro. También se realizó un análisis del tiempo de fraguado al sustituir parcialmente el cemento por zeolita. Finalmente se elaboraron especímenes de hormigón estructural para una resistencia de 24 Megapascales con diferentes porcentajes de sustitución de zeolita y se ensayaron a compresión.

Los ensayos de densidad y finura arrojaron valores de 2.892 y 2.404 gramos sobre centímetros cúbicos y una superficie específica de 476 y 569 metros cuadrados sobre kilogramos para el cemento y la zeolita respectivamente, el estudio hidrométrico de la zeolita obtuvo un tamaño promedio de partículas de 3.54 micrómetros, la determinación del tiempo de fraguado de una pasta de cemento con un porcentaje de zeolita concluyó que se requiere mayor cantidad de agua para alcanzar su consistencia normal y que el tiempo total de fraguado aumenta a medida que el porcentaje de zeolita es mayor.

Los especímenes modificados, muestran una densidad y resistencia a la compresión menores que la muestra patrón durante las cuatro edades estudiadas, el máximo valor a los 28 días (19.5 Megapascales) se obtuvo con un 10 por ciento de sustitución, sin embargo, en todos los casos es evidente un aumento lineal de la resistencia conforme avanza el tiempo de curado.

Palabras clave: Zeolita natural, Resistencia a compresión, Densidad Le Chatelier, Finura Blaine, Hidrómetro, Fraguado Vicat.

ABSTRACT

The purpose of this research was to analyze the physical and mechanical properties of natural zeolite to be used as a supplementary cementitious material for structural concrete as an ecological proposal to help mitigate the pollution generated by the manufacture of materials such as cement.

Three physical properties of cement and zeolite were carried out: real density, fineness and granulometry by hydrometer. Furthermore, to performance a setting time analysis when ZV as supplementary cementitious material in CGU. Finally, structural concrete specimens were made for a design resistance of 24 Megapascals with different percentages of substitution of zeolite and the compression tests are carried out on the different specimens.

The density and fineness tests yielded values of 2.892 and 2.404 grams per cubic centimeter and a specific surface area of 476 and 569 square meters over kilograms for cement and zeolite respectively, the hydrometric study obtained an average particle size for zeolite of 3.54 micrometers, the determination of the setting time of a cement paste with a percentage of zeolite concluded that a greater amount of water is required to reach the state of normal consistency, and that the total setting time increases as the percentage of zeolite is higher.

The modified specimens show a lower density and compressive strength than the standard specimens during the four studied ages. The maximum value at 28 days (19.5 Megapascals) was obtained with 10 percent substitution; however, in all cases a linear increase in strength is evident as the curing time progresses.

Keywords: Natural zeolite, Concrete compression, Density Le Chatelier, Fineness Blaine, Hydrometer, Setting time Vicat.

CAPITULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1.1 Justificación

El cemento Pórtland ha contribuido ampliamente al desarrollo económico de la sociedad moderna, sin embargo, su fabricación sustentada en el uso de recursos no renovables ha generado la producción de grandes cantidades de gases de efecto invernadero [1]. Esta actividad produce calentamiento global, por esta razón se busca reducir este efecto estudiando nuevos sustitutos para el cemento, entre los materiales que se han estudiado para su posible sustitución se encuentran los aluminosilicatos que son minerales que se encuentran en la corteza terrestre. Los estudios en estos materiales han avanzado en la determinación de porcentajes de sustitución del cemento común (sustitución parcial), siempre y cuando mejore o no perjudique las propiedades propias que debe cumplir el hormigón en la construcción [2]–[6].

Actualmente es común a nivel mundial la utilización de puzolanas naturales y artificiales en la producción de cementos mezclados, hormigones y aglomerantes de tipo cal-puzolana. A tal efecto se han llevado a cabo estudios en diferentes partes del mundo sobre la utilización de puzolanas, tanto de origen natural como artificial [7]. Los materiales cementantes suplementarios (SCM, de sus siglas en inglés) se utilizan como sustitución de cemento en hormigón y mortero, esta incorporación es favorable, ya que disminuye el costo total, elimina los impactos ambientales y aumenta la resistencia a largo plazo y durabilidad con lo cual se logra un mejoramiento del perfil ecológico del cemento [8]. Las adiciones de puzolana se utilizan como SCM, siempre que la puzolana sea reactiva, la contribución de los productos de la reacción puzolánica está asociada con: la cantidad de Ca(OH)_2 (hidróxido de calcio) producida durante la reacción de hidratación del cemento, la finura del material, así como el tipo y período de curado durante las primeras edades [9]. En el Ecuador no hay suficiente experiencia

en la utilización de este recurso natural de origen volcánico, mediante un estudio más elaborado y conociendo la viabilidad para la extracción y explotación a gran escala se podría contar con grandes posibilidades en la producción de hormigones mediante la sustitución parcial con zeolitas ecuatorianas del cemento Pórtland [7], [10]- [12].

El siguiente trabajo investigativo se realiza para establecer la viabilidad en la fabricación de hormigones estructurales al sustituir cantidades de cemento en pequeños porcentajes por zeolita natural de uso comercial en el Ecuador, para ello será necesario determinar la compatibilidad de este material con el cemento tipo GU a través del análisis de sus propiedades físicas como finura, densidad y granulometría para establecer su influencia durante el fraguado y resistencia mecánica característica.

1.1.2 Antecedentes

Desde finales del siglo XVIII y hasta bien entrado el XIX numerosos técnicos y fabricantes contribuyeron al estudio de los cementos naturales, estos estudios condujeron a la invención del cemento Portland y al nacimiento de una poderosa industria [13], [14].



Figura 1. Historia del cemento [14].

El cemento es un conglomerante hidráulico finamente molido que amasado con agua forma una pasta que fragua y endurece por medio de procesos de hidratación y endurecido, tiene la capacidad de resistir hasta bajo el agua. El cemento portland es el más ocupado en la industria de la construcción por tener caliza, arcilla y yeso. Los cementos se emplean principalmente para elaboración de morteros y hormigones, para su fabricación necesita del Clinker el cual es finamente molido [15]. En la Figura 2 se presenta la estructura interna de una muestra de pasta de cemento representada por Microscopía electrónica de barrido SEM [16].

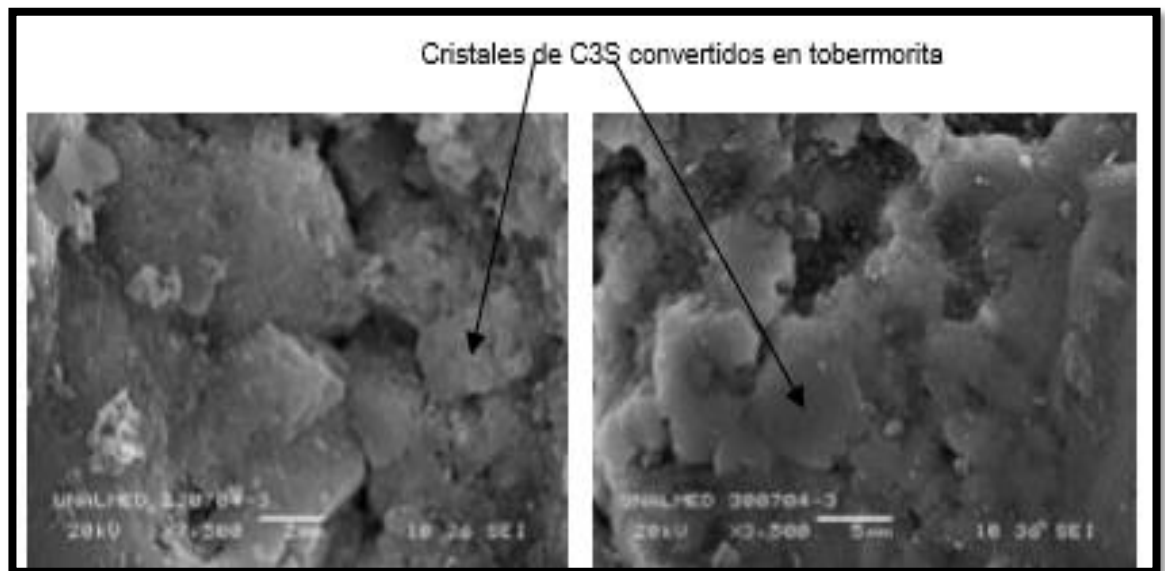


Figura 2. Estructura interna de la pasta de cemento [16].

A partir de 1900 el cemento Portland es industrializado como la materia prima principal en la construcción [17].

La fabricación del cemento (Figura 3), se efectúa a partir de la mezcla de piedra caliza (70-80 %) y de arcilla (20-30 %) rica en silicatos. Esta mezcla al ser calcinada (1400 °C) se transforma en el llamado clínker. Esta mezcla se enfría a 100 °C antes de molerse, se le agrega también $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ como regulador del fraguado [18]. A continuación, se detalla el proceso para su fabricación:

- 1. Obtención y preparación de materias primas:** Inician los estudios, evaluación y extracción minera de materias primas (calizas y arcillas) necesarias para conseguir la composición deseada de óxidos metálicos para la producción de clínker.
- 2. Molienda y cocción de materias primas:** Esta etapa comprende la molienda de las materias primas por molinos de bolas, por prensas de rodillos o a fuerza de compresión elevadas, que producen un material de gran finura, se selecciona los materiales de acuerdo con el diseño de la mezcla previsto antes de ingresar al horno.
- 3. Fabricación del clínker:** El polvo fino obtenido anteriormente se calcina en un horno aproximadamente a 1500 grados centígrados, obteniéndose el denominado clínker de cemento Pórtland que es un producto intermedio en el proceso de elaboración de cemento.
- 4. Molienda de Cemento:** Luego de la calcinación se procede con la molienda conjunta del clínker, yeso y otros materiales denominados "adiciones".
- 5. Almacenamiento y despacho:** Finalmente el producto final es almacenado en silos para su comercialización al granel o en sacos [19]-[22].

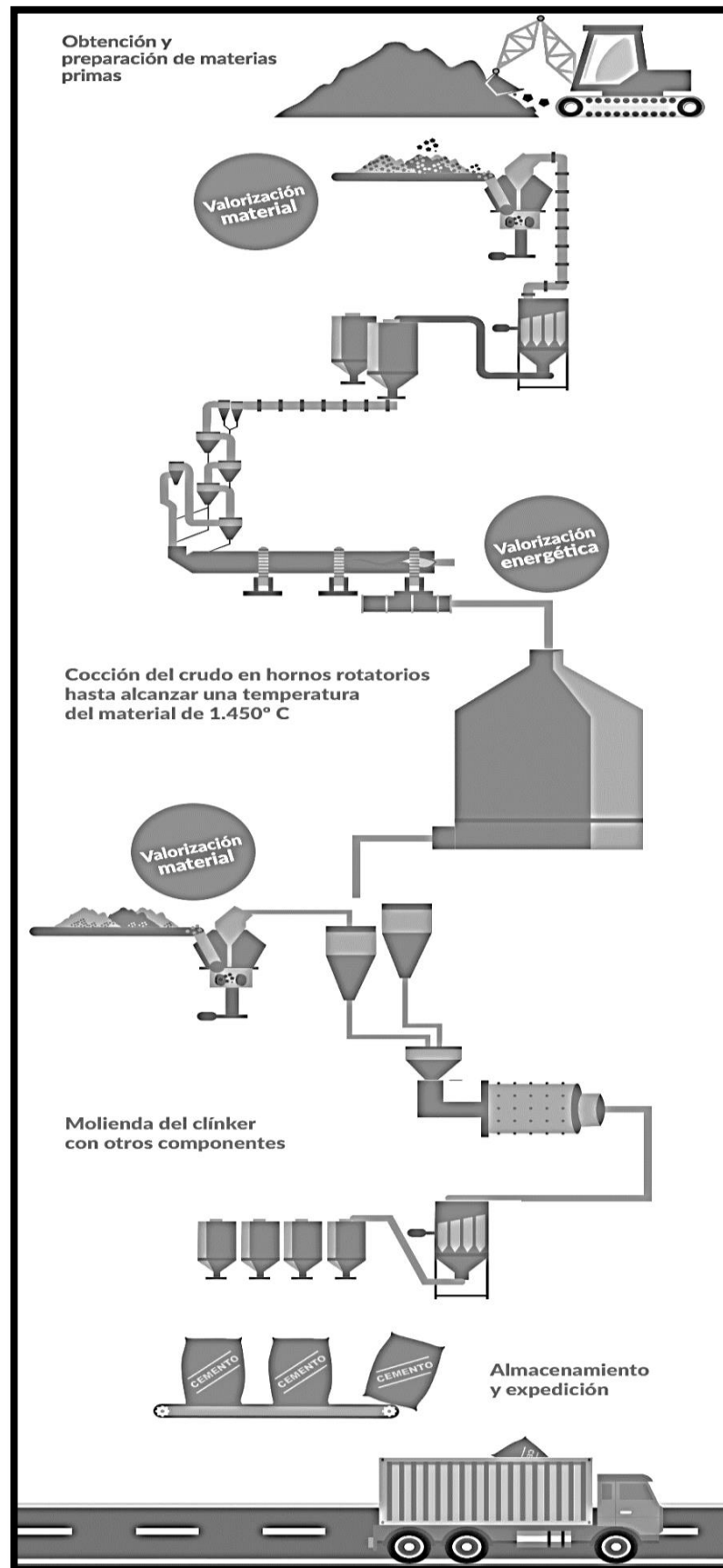


Figura 3. Procesos en la fabricación de cemento Portland [23].

La búsqueda por un desarrollo sostenible en la fabricación de materiales de construcción entre ellos el cemento, ha llevado a que se realicen varias investigaciones alrededor del mundo buscando reducir el consumo de este con sustituciones de otros materiales de entre los cuales los aluminosilicatos destacan por su compatibilidad en la elaboración de hormigones, manteniendo o mejorando sus propiedades mecánicas y reduciendo las emisiones de CO₂ producto de la fabricación del cemento.

Las Zeolitas fueron descubiertas por primera vez en 1756 por el Barón Axel Fredrick Constedt, quien la nombró a partir de las palabras griegas zein (hervir) y lithos (piedra), es decir “piedra hirviente” [24]. En la década de 1920, investigadores descubrieron que las zeolitas poseen características especiales de adsorción otorgándole a este material un potencial comercial significativo, pero en aquella época las fuentes de material natural eran limitadas, esto trajo consigo a que se diera por primera vez la producción de zeolitas sintéticas a inicios de los años 50 por la Union Carbide Corporation [25]. Para finales de los años 50, los primeros grandes depósitos fueron descubiertos en antiguos lagos salinos del oeste norte-americano y en espesos depósitos de montículos marinos en Italia y Japón. Consecutivamente, más de 2000 yacimientos distintos de zeolitas naturales fueron encontrados en más de 40 países alrededor del mundo, desde entonces 85 especies de zeolitas naturales fueron reconocidas y más de 100 especies fueron sintetizadas en laboratorio [26],[27].

Las zeolitas son de gran interés industrial ya que poseen diversas propiedades teniendo aplicaciones muy diversas y siendo utilizados en actividades como:

La nutrición animal, diferentes estudios señalan los beneficios de la zeolita en la eficiencia alimenticia, la utilización de nutrientes, la prevención de la aflatoxicosis y la reducción de la humedad y en la eliminación de malos olores en el sector avícola [24], [28], [29].

Según la American Chemical Society la zeolita natural “Clintoptilolite” puede remover y controlar el amoníaco en aguas residuales, en la orina de la cama de gatos y en los establos de caballos, además es adecuado para adsorber los COV (Compuestos Orgánicos Volátiles) que causan malos olores por humedad y previenen la aparición de hongos [24], [30].

Minería y metalurgia, según Curi y colaboradores [31] se establece que: las zeolitas naturales son eficientes en la remoción de metales pesados (Pb, Cu, Ni, As, Cd, Hg, Zn) en efluentes minero-metalúrgicos, utilizadas también para la adsorción de vapores de mercurio en hornos de copelas quemadores de amalgama, además desde el punto de vista económico estos tratamientos descontaminantes tienen una gran ventaja sobre los tratamientos convencionales.

Industria química farmacéutica, estudios como el Anghel y colaboradores, han demostrado la capacidad antibacteriana de derivados zeolíticos, esas propiedades se deben principalmente a las características estructurales y químicas que presentan estos minerales, lo que hace posible su empleo para la formulación de fármacos dirigidos al tratamiento de infecciones bacterianas [32].

Agricultura, Núñez en su investigación [33] señala que los suelos tratados con fertilizantes que incluyen zeolita se encuentran mejor abastecidos de fósforo y potasio apreciándose una disminución en la acidez y mejorando el rendimiento del suelo en cultivos como la caña de azúcar, arroz y café.

Diseño de mezclas asfálticas, en el estudio realizado por Loren y colaboradores [34] se descubrió que al adicionar zeolita natural en mezclas asfálticas se obtuvo un aumento en las densidades y módulos de rigidez, esto se atribuyó a una disminución del porcentaje de huecos presentes en la mezcla ya que al ser un material fino sus partículas se comportan como filler mineral, esperando a largo plazo un aumento en la durabilidad de este tipo de asfalto.

En el ámbito constructivo el uso de zeolita como material cementante suplementario ha sido abordado por varios investigadores.

Costafreda a lo largo de sus investigaciones [35]-[38] ha demostrado la factibilidad del uso de varios tipos de zeolita natural en la fabricación de morteros y hormigones. En 2007 en su investigación [35] reporta que las zeolitas naturales y las tobas dacíticas zeolitizadas pueden ser empleadas en morteros, ya que la reactividad puzolánica de ambas se manifiesta de una manera similar con una respuesta química de estos minerales muy favorable. Luego en [36] del 2008 ahondó más en su investigación con zeolitas y demostró que ciertos morteros fabricados a base de zeolita-cemento y toba-cemento, alcanzaban resistencias que superaban la del cemento

Portland normal transcurridos los 28 y 90 días de curado. En su artículo [37] se dedicó al estudio de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de zeolitas naturales procedentes de México, Cuba y España concluyendo que esta variedad de zeolitas parece ser idónea en la fabricación de cementos, morteros y hormigones, además que sus propiedades varían de un individuo a otro dentro de la propia familia mineralógica exigiéndose estudios de caracterización previa utilización de cualquier zeolita. Finalmente se concluyó que las zeolitas tipo: mordenita-esmectita, mordenita-clinoptilolita, clinoptilolita-heulandita, cuarzo-estilbita y tobas zeolitizadas, se pueden utilizar en la fabricación de cementos, morteros y hormigones de altas resistencias mecánicas, observándose además características adicionales como: baja permeabilidad haciéndolos resistentes al ataque de sulfatos y reducción de ciertos fenómenos de carácter destructivo, como la reacción álcalis-sílice y álcalis-carbonato, ambos responsables de la fisuración y expansión en estructuras hormigonadas [38].

Robalino y Eguez en su investigación comprobaron la eficiencia de la zeolita del peñón de la ESPOL al ser utilizada como material puzolánico suplementario en sustitución del 20% en el cemento portland para la fabricación de morteros, los resultados obtenidos evidenciaron el aumento en la resistencia a la compresión se da en un 6.5% con respecto a la muestra patrón a la edad de 28 días y en un 8.6% a los 90 días concluyendo así que las zeolitas son idóneas y muy competitivas en el campo de la construcción [24].

Jacob y Das detallan que las propiedades del hormigón endurecido aumentan con una sustitución de 25% de zeolita en comparación con un hormigón tradicional a los 28 días, en ensayos de compresión la resistencia aumentó de 20.53 MPa a 22.66 MPa con respecto a la muestra patrón, la resistencia a la tracción aumenta de 3,57 MPa a 6 MPa y la resistencia a la flexión se incrementó de 9.3 MPa a 10.5 MPa siendo notoria la mejora en todas las propiedades mecánicas del hormigón [3].

Fernando Morante en su estudio de caracterización por Difractometría de Rayos X (DRX), Fluorescencia de Rayos X (FRX), Espectrofotometría de Rayos Infrarrojos por Transformada de Fourier (FT-IR) y Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), determinó que los únicos tipos de zeolitas encontrados en las costas del Ecuador son Clinoptilolita y heulandita. Luego en la convención: "Curso Internacional de Zeolitas y sus Aplicaciones" suscitado en Guayaquil, del 4 al 8 de marzo de 2002,

y en la “Reunión Internacional sobre Zeolitas” celebrada en Río de Janeiro dio a conocer la factibilidad en el empleo de estas zeolitas para la fabricación de cementos puzolánicos de altas prestaciones dando pie a futuras investigaciones en la utilización de este mineral en el área de la construcción [39].

Entre las propiedades que se deben estudiar para comprobar la viabilidad al usar zeolita como sustituto parcial del cemento Costafreda 2018 señala que: se deberá analizar la caracterización de las zeolitas desde el punto de vista geométrico, físico y químico.

Con respecto a la caracterización física se deben estudiar al menos una de las siguientes propiedades: densidad real, densidad aparente y absorción.

El tamaño de las partículas de zeolita es otro de los apartados fundamentales ya que de esta depende el carácter filler del material, los ensayos que se pueden realizar para este fin son los de granulometría por medio del hidrómetro y finura en términos de superficie específica por el aparato Blaine.

Adicionalmente es necesario conocer la influencia que tiene la zeolita en los tiempos de fraguado con respecto a una muestra patrón, lo que se logra mediante el aparato de Vicat [5].

1.1.3 Fundamentación Teórica

1.1.3.1 El cemento

1.1.3.1.1 Definición

El cemento, término que proviene del latín “caementum” que significa piedra en bruto, es un material que se ha usado en la construcción desde la antigüedad, se cree que el primer uso fue como pasta y mortero elaborado con arcilla o greda, yeso y cal para unir mampuestos en los primeros intentos de edificaciones. En Roma en el siglo I a.C. se empezó a utilizar un cemento natural, que ha resistido la inmersión en agua marina por milenios. En la Antigua Grecia los primeros cementos naturales utilizaban tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini [40], [41].

1.1.3.1.2 Características Química del Cemento

La composición química del cemento Portland es muy compleja, pero puede definirse esencialmente como un compuesto de cal, alúmina y sílice [18], al reducir los granos a 150 micras de diámetro y llevándolos a una temperatura de 1400 °C a 1650 °C se obtiene una mezcla de silicato de calcio del 70-80 % y aluminato de calcio del 20-30 % a esta mezcla se le conoce como clínker [42]. En la Tabla 1 se detalla los porcentajes los diferentes de óxidos presentes en el cemento:

Tabla 1. Contenido de los Óxidos en el Cemento Portland [42].

ÓXIDO	SÍMBOLO	CONTENIDO EN %
CaO	C	60 - 67
SiO ₂	S	5 - 17
Al ₂ O ₃	A	3 - 8
Fe ₂ O ₃	F	0.5 - 6
MgO	M	0.1 - 4
Na ₂ O,K ₂ O	...	0.4 - 1.3
SO ₃	...	0.1- 2.5
TiO ₂	...	0 - 0.5
Mn ₂ O ₃	...	0 - 0.3

Tabla 2. Compuestos principales del Cemento Portland [42].

COMPONENTE	SÍMBOLO	(%)
SILICATO TRICÁLCICO	$3CaO SiO_2$	40 - 50
SILICATO DICÁLCICO	$2CaO SiO_2$	20 - 30
ALUMINATO TRICÁLCICO	$3CaO Al_2O_3$	10 - 15
FERROALUMINATO TETRACÁLCICO	$4CaO Al_2O_3 Fe_2O_3$	5 - 10

El cemento tiene 4 componentes principales (Tabla 2) estos surgen de la combinación de la cal, sílice, alúmina y hierro; y que cumplen funciones determinadas [42], [43] como se detalla a continuación:

- **Silicato Tricálcico (SC₃):** Compuesto principal del Clinker; su resistencia y calor de hidratación iniciales son elevados. Su fraguado es lento y su endurecimiento rápido.
- **Silicato Dicálcico (SC₂):** Proporciona resistencia al cemento a largo plazo, su fraguado y endurecimiento son lentos. Posee un calor de hidratación bajo, con una mayor estabilidad química.
- **Aluminato Tricálcico (AC₃):** Proporciona alto calor de hidratación, alta velocidad de fraguado controla la resistencia a corto plazo debido a su gran retracción, regula el tiempo de fraguado.
- **Ferro aluminato Tetracálcico (C₄AF):** Tiene bajo calor de hidratación y gran velocidad de fraguado. Su presencia se debe a la utilización de fundentes que contienen hierro en la fabricación del Clinker.

La norma NTE INEN 2380 clasifica los cementos hidráulicos de acuerdo con las propiedades específicas, estos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Requisitos Físicos Normalizados del cemento hidráulico [44].

Tipo de cemento	Norma de ensayo aplicable	GU	HE	MS	HS	MH	LH
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 ^A	INEN 158						
Inicial, no menos de, minutos		45	45	45	45	45	45
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 ^D	INEN 488						
1 día		–	12	–	–	–	–
3 días		13	24	11	11	5	–
7 días		20	–	18	18	11	11
28 días		28	–	–	25	–	21
Calor de hidratación	INEN 199						
7 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo		–	–	–	–	290 (70)	250 (60)
28 días, kJ/kg (kcal/kg), máximo		–	–	–	–	–	290 (70)
Expansión en barra de mortero	INEN 2 529						
14 días, % máximo		0,020	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
Expansión por sulfatos (resistencia a sulfatos) ^E	INEN 2 503						
6 meses, % máximo		–	–	0,10	0,05	–	–
1 año, % máximo		–	–	–	0,10	–	–

^A 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 m²/kg, ambos deben ser informados en todos los certificados de resultados requeridos al fabricante.

^B El tiempo de fraguado se refiere al tiempo de fraguado inicial en la NTE INEN 158.

^C Se debe informar el contenido de aire en todos los certificados de resultados de ensayos requeridos al fabricante. El valor obtenido en el mortero no garantiza necesariamente que el contenido de aire en el hormigón sea el mismo.

^D 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. Alternativamente, el fabricante puede proveer valores estimativos basados en datos históricos de producción. El informe debe indicar si se proporcionan tales estimaciones.

^E 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.

Enlistándose 6 tipos de la siguiente forma:

- **Tipo GU:** Para construcción en general.
- **Tipo HE:** Alta resistencia inicial.
- **Tipo MS:** Moderada resistencia a los sulfatos.
- **Tipo HS:** Alta resistencia a los sulfatos.
- **Tipo MH:** Moderado calor de hidratación.
- **Tipo LH:** Bajo calor de hidratación.

El cemento tipo GU es aquel tipo de cemento que puede ser utilizado en todo tipo de construcciones cuando no se requieran características y/o propiedades especiales que pueden ser otorgadas por otro tipo de cemento. Los usos de este cemento son principalmente en obras de albañilería y estructuras de carácter común (pavimentos, pisos, edificios en concreto armado, puentes, tubería, productos de concreto prefabricado y otros).

1.1.3.2 Materiales Cementantes Suplementarios

Se le llaman adiciones activas a aquellas que tienen la capacidad de reaccionar con el agua y con el CH (productos portlandita) del cemento portland hidratado a temperatura ambiente (adiciones puzolánicas), o reaccionar con el agua directamente (adiciones hidráulicas), para formar productos cohesivos y estables, esta propiedad hace posible el remplazo de parte del cemento portland, o del Clinker, con adiciones activas manteniendo buenos desempeños del cementante. Por este motivo a estas adiciones se las conoce como materiales cementantes suplementarios (SCM), además en el cemento se pueden encontrar adiciones no activas como el filler calizo [45].

Los cementos adicionados están formados por cemento portland molido juntamente con uno o varios materiales conocidos como adiciones por ejemplo las puzolanas.

- **Puzolanas:** Materiales naturales, artificiales o subproductos industriales de silicio o aluminosilicatos que en presencia de agua e hidróxido de calcio forman compuestos con propiedades cementantes. Dentro de estos encontramos las zeolitas y cenizas volantes obtenidas de los quemadores de las centrales termoeléctricas.



Figura 4. Puzolana en estado natural [46].

1.1.3.3 Agregados o Áridos

En ingeniería civil el término árido hace referencia a una masa de piedra molida, grava, arena, etc., predominantemente compuesta de partículas individuales, pero incluyendo en algunos casos arcillas y sedimentos. El tamaño de partícula más grande en los áridos puede tener un diámetro de 150 mm (Agregado Grueso), mientras que la partícula más pequeña puede ser de solo entre 5 y 10 micras (Agregado Fino). Los áridos tienen dos usos principales: como material base para cimientos y pavimentos, y como ingrediente del hormigón de cemento portland y del hormigón asfáltico [47].



Figura 5. Agregados o áridos. a) Agregado Grueso, b) Agregado Fino.

En la elección de estos será fundamental tener en cuenta propiedades como la estructura de las partículas, la porosidad, la densidad, la resistencia, etc. Serán determinantes en el futuro comportamiento del concreto en el inicial estado plástico y su posterior endurecido [48].

En función de la aplicación a la que están destinados, los áridos deben reunir características diferentes, asociadas a su naturaleza petrográfica o al proceso empleado para su producción, entre las que cabe destacar:

- **Propiedades geométricas:** Tamaño, forma de las partículas, caras de fractura, calidad de los finos, etc.

- **Propiedades mecánicas y físicas:** Resistencia al desgaste, resistencia a la fragmentación, resistencia al pulimento, densidad, porosidad, contenido en agua, etc.
- **Propiedades térmicas y de alteración:** Resistencia a los ciclos de hielo y deshielo, etc.
- **Propiedades químicas:** Contenido en azufre, cloruros, materia orgánica, contaminantes ligeros, reactividad potencial, etc. [49].

1.1.3.3.1 Función de los áridos en el concreto

Los áridos ocupan entre un 65 y 75% del volumen total del hormigón. Debe darse gran atención a su elección y control, ya que de sus características dependerán:

- **Docilidad del hormigón fresco:** Para obtener una misma dosis de agua, un árido de granulometría fina, tendrá por lo general una mayor trabajabilidad.
- **Durabilidad de las estructuras:** Es indispensable que las arenas presenten una estructura granulométrica buena ya que la calidad del hormigón depende en gran medida de la del mortero
- **Economía en las mezclas:** El lograr tener una buena estructura granulométrica del árido grueso permite reducir la proporción de mortero y por lo tanto el cemento.
- **Resistencia del hormigón endurecido:** Si se disminuye la cantidad de cemento, teniendo una buena granulometría del árido grueso, no afecta la resistencia del hormigón. Lo ideal es un esqueleto bien graduado, con buenas proporciones de áridos [50].

1.1.3.4 El Concreto

Es el material de construcción más utilizado en las grandes obras de infraestructura (represas, puentes, carreteras, plantas de tratamiento de agua, pozos petrolíferos) y en la arquitectura de edificios, junto con el acero, son los materiales base de la Ingeniería Civil.

Es una “piedra artificial”, constituida básicamente por:

- **Pasta de cemento:** Mezcla de cemento y de agua, aglomerante activo del hormigón.
- **Agregados o áridos:** Esqueleto inerte del hormigón.

Todos estos materiales se mezclan homogéneamente, en cantidades adecuadas para constituir una masa plástica y trabajable, que puede ser moldeada en la forma en que se desee, en esta etapa, el concreto o también llamado “hormigón”, puede ser fácilmente transportado y depositado en la construcción a la que está destinado. A medida que transcurre el tiempo, el cemento y el agua de esta mezcla se van combinando, mediante un proceso fisicoquímico que incluye la hidratación de los componentes del cemento, dando como resultado, en primer lugar, el fraguado del hormigón y posteriormente su endurecimiento gradual, que en condiciones adecuadas de temperatura y tiempo prosigue indefinidamente en el tiempo, con un incremento en la capacidad resistente del hormigón [51].



Figura 6. Mezcla de Concreto.

1.1.3.4.1 Propiedades del Concreto

Las propiedades del concreto son sus características o cualidades básicas, estas características pueden variar en un grado considerable mediante el control de sus ingredientes.

Las principales propiedades que afectan al concreto en estado fresco son:

- **Trabajabilidad:** Es la facilidad con la que puede distribuirse el concreto dentro de los encofrados. Debe tener la necesaria consistencia, para lo cual afectarán: la cantidad de agua, la forma y medida de los áridos, la cantidad de Cemento, la existencia de aditivos, y la presencia de cenizas. También la correspondiente cohesión, que es la resistencia del material a segregarse.
- **Homogeneidad:** El hormigón es considerado un material heterogéneo debido a que está constituido por distintos elementos, sin embargo, la homogeneidad como propiedad en estado fresco se refiere a que en cualquier parte de la masa los componentes estén perfectamente mezclados y en la proporción adecuada.

Las propiedades que afectan al concreto en estado endurecido son:

- **Densidad:** Es la cantidad de peso por unidad de volumen, variará con la clase de áridos y con la forma de colocación en obra. La densidad de los Hormigones ligeros oscilará entre los 200 y los 1500 kg/m³, y en los Hormigones ordinarios de 2000 a 2600 kg/m³.
- **Resistencia Mecánica:** Es la capacidad que tiene el concreto para soportar las cargas que se apliquen sin agrietarse o romperse. Es diferente según el tipo de esfuerzos de que se trate: su resistencia a la compresión es unas diez veces mayor que su resistencia a la tracción. Por lo general se determina por la resistencia final de una probeta en compresión, como el concreto suele aumentar su resistencia en un período largo, la resistencia a la compresión a los 28 días es la medida más común de esta propiedad. La baja resistencia a la tracción es la que llevó a incorporar varillas de Hierro o Acero al Hormigón, para conformar el Hormigón Armado.
- **Durabilidad:** Es la capacidad para resistir el paso del tiempo, debe ser capaz de resistir la intemperie, acción de productos químicos y desgastes, a los cuales estará sometido en el servicio.
- **Porosidad:** La porosidad se considera la proporción de huecos respecto de la masa total. Influye en la resistencia, la densidad, y la permeabilidad del Hormigón.
- **Permeabilidad:** Es la capacidad de un material de ser atravesado por líquidos o gases, esta propiedad es importante para su resistencia a los ataques químicos,

depende en parte del exceso de agua en el amasado y del posterior curado del Hormigón [52]-[54].

1.1.3.4.2 Aditivos para el Concreto

Los aditivos son ingredientes distintos del propio cemento portland, del agua y de los áridos, que pueden añadirse al hormigón para proporcionar una cualidad específica a la mezcla plástica (fresca) o al hormigón endurecido.

Para facilitar el trabajo con el hormigón fresco o plástico hace falta añadir más agua que la necesaria para la hidratación, el exceso de agua, más allá de los requisitos de hidratación, resulta perjudicial para todas las propiedades deseables del hormigón endurecido. Por tanto, se han desarrollado aditivos reductores de agua o también llamadas aditivos plastificantes para mejorar la facilidad de trabajo con el hormigón y, al mismo tiempo, mantener sus cualidades.

Los reductores de agua incrementan la movilidad de las partículas de cemento en la mezcla plástica, permitiendo conseguir una igual facilidad de trabajo del hormigón con un menor contenido de agua.

Los reductores de agua neutralizan la atracción estática entre las superficies de los gránulos de cemento. Como resultado, las agrupaciones de gránulos se parten. La repulsión mutua de las cargas del mismo signo hace que los gránulos de cemento se alejen entre sí, consiguiendo una mejor distribución de las partículas, una hidratación más uniforme y una pasta menos viscosa.

Los reductores de agua pueden utilizarse para conseguir tres objetivos diferentes:

- Se puede añadir un reductor de agua sin alterar los otros porcentajes de la mezcla, con lo que se incrementa el grado de asentamiento, que es una medida de la consistencia del hormigón y un indicador de la facilidad con la que se puede trabajar con el mismo.
- La resistencia de la mezcla puede incrementarse utilizando un reductor de agua y rebajando la cantidad de agua mientras se mantiene el contenido de cemento constante.
- El coste de la mezcla puede reducirse, el reductor de agua permite reducir la cantidad de agua, lo que a su vez permite reducir la cantidad de cemento

manteniendo la relación agua-materiales cementosos igual a la de la mezcla original. De esta manera, la calidad de la mezcla, medida según la resistencia a la compresión se mantiene constante, aunque se disminuye la cantidad de cemento [47].

1.1.3.4.3 Diseño de mezclas de concreto

Los métodos de dosificación de hormigones tienen por finalidad encontrar las proporciones en que hay que mezclar a los diferentes componentes de estos para conseguir mezclas que posean determinadas características de consistencia, compacidad, resistencia, durabilidad, etc.

No existe un método único de dosificación, sino que, dependiendo de las condiciones que deba reunir el hormigón, los resultados que se consigan con él serán buenos cuando éste se haya elegido convenientemente y se hayan realizado las correcciones oportunas mediante pruebas [55].

Existen diferentes procedimientos o métodos de dosificación, cada uno requiere, en función de la calidad del resultado que se busque, un mayor conocimiento o información de los materiales a emplear como constituyentes del hormigón.

Los métodos de dosificación se pueden clasificar de la siguiente forma:

- **Métodos empíricos:** Cuando no es estudiada la dosificación y no se tienen en cuenta las características de los materiales componentes y éstos se proporcionan en volumen o peso.
- **Métodos semiempíricos:** Cuando se fija la relación agua/cemento en peso, mientras que los agregados se proporcionan mediante tanteos sucesivos en volumen.
- **Métodos racionales:** Cuando además de fijar la relación agua /cemento en peso, se determinan los contenidos óptimos de cada uno de los componentes en base al estudio de las características físicas de los agregados [56].

1.1.3.4.3.1 Método de la Densidad Óptima

Este método de dosificación racional de mezclas de hormigón surgió como alternativa al método ACI debido a que este exige granulometrías de los agregados que muchas veces en Ecuador no se logran obtener y son consideradas deficientes para ser utilizadas por la norma americana.

Fue desarrollado en los laboratorios de materiales de la Universidad Central del Ecuador, el propósito del método es crear una roca artificial, mediante el relleno de los espacios vacíos que dejan los agregados, y que estos sean llenados con pasta de cemento y agua, considerando lo siguiente:

1. Un volumen aparente de agregado grueso contiene un cierto porcentaje de vacíos entre partículas, que debe ser llenado por el agregado fino.
2. Una mezcla de agregado fino y grueso correspondiente a su densidad óptima, dejan porcentaje de vacíos que deben ser llenados por la pasta de cemento y agua. Pero esta pasta no sólo debe ocupar los vacíos que deja la mezcla de agregados, sino que deberá cubrir todas y cada una de las partículas constituyendo el enlace o punto de unión entre partículas. [57]-[58].

1.1.3.5 Las Zeolitas

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos hidratados, que pueden ser de origen natural o sintético. Las zeolitas naturales se formaron como resultado de las erupciones volcánicas mediante reacciones hidrotérmicas de rocas volcánicas de silicio y ricas en álcalis [59]. Las zeolitas, de manera general, están compuestas por aluminio, silicio, sodio, calcio, magnesio, potasio y agua [60].

El término "zeolita" fue utilizado inicialmente para designar a una familia de minerales naturales que presentaban, como propiedades particulares, el intercambio de iones y la deshidratación reversible de agua, esta última propiedad dio origen al nombre genérico de zeolita, el cual deriva de dos palabras griegas, zeo: que ebulle, y lithos: piedra [61].



Figura 7. Muestras de Zeolita Natural

1.1.3.5.1 Estructura

En las zeolitas la unidad estructural básica o “unidad primaria de construcción” es la configuración tetraédrica de cuatro átomos de oxígeno alrededor de un átomo central, generalmente de Si o Al, como se puede apreciar en la Figura 8 [61].

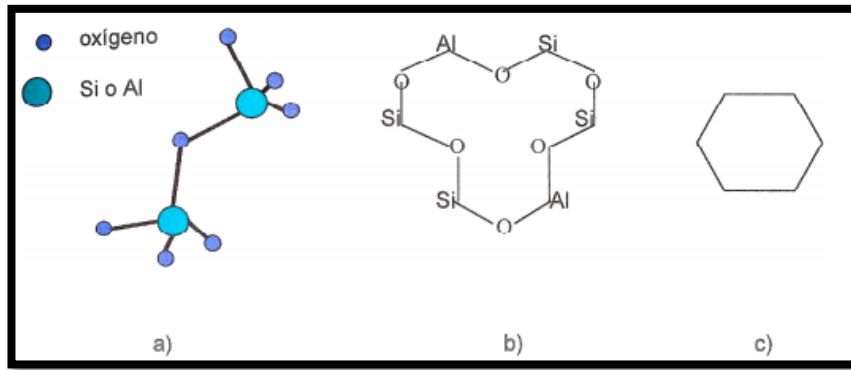


Figura 8. Unidades de construcción de la zeolita. a) dos tetraedros $\text{SiO}_4/\text{AlO}_4$ unidos a través de oxígenos, b) anillo de seis que contiene dos átomos de Al y cuatro de Si, c) versión abreviada del anillo [61].

1.1.3.5.2 Clasificación

Las unidades primarias o unidades estructurales básicas en las zeolitas son los tetraedros de $(\text{SiO}_4)^{4-}$ (anión silicato) y $(\text{AlO}_4)^{5-}$ (anión aluminato), en 1968 Meier apoyándose en estudio cristalográficos propuso una clasificación estructural de las zeolitas, la cual menciona la existencia de 8 unidades secundarias de construcción (SBU), en función de estas unidades y a la relación Silicio-Aluminio se tienen los diferentes tipos de zeolitas organizados como se muestran en la tabla 4, además en la figura 9 se muestra una forma simplificada de representar cada uno de los 8 grupos la cual se realiza incluyendo solo los átomos de silicio o aluminio y omitiendo los átomos de oxígeno [60], [61].

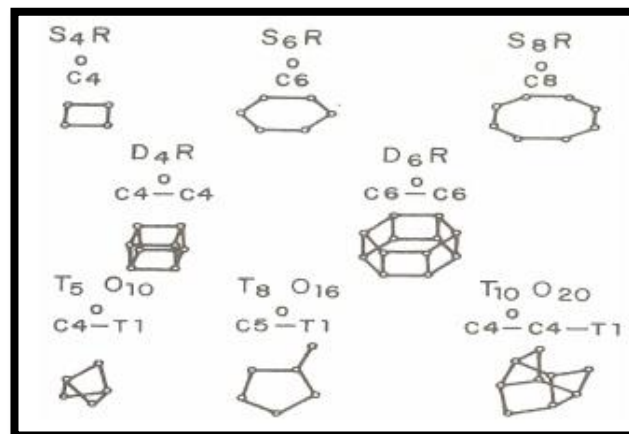


Figura 9. Unidades secundarias de construcción (SBU) [61].

Tabla 4. Clasificación estructural de las zeolitas según Meier [61].

GRUPO C ₄ (GRUPO DE LA FILIPSITA)			GRUPO C ₈ -T ₁ (GRUPO DE LA MORDENITA)			GRUPO C ₆ -C ₆ (GRUPO DE LA FAUJASITA)		
ZEOLITA	TO ₄	Si/Al	ZEOLITA	TO ₄	Si/Al	ZEOLITA	TO ₄	Si/Al
Li-ABW	8		Bikitaíta	9		Linde	24	
Filipsita	16		Dischiardita	24		Rho	46	
Harmotoma	16		Epistilbita	24	4-7	ZK5	96	
Gismondita	16		Ferrierita	36		Faujasita	192	
Na-P	16	1-3	Mordenita	48		Paulingita	672	1-3
Amicita	16		ZSM-5	96	<20	Linde N	768	
Garronita	16		ZSM-11	96				
Yugawaralita	16							
Merlionita	32							
GRUPO C ₄ -C ₄ (GRUPO DE LA ANALCIMA)			GRUPO C ₆ (GRUPO DE LA CHABAZITA)			GRUPO C ₄ -C ₄ (GRUPO DE LA HEULANDITA)		
Analcima	48		Sodalita	12		Brewsterita	16	
Leucita	48		Cancrinita	12		Heulandita	36	
Wairakita	48	1-3	Oferita	18		Estilbita	72	
A	48		Losod	24		Estellerita	72	
			Gmelinita	24	2,5-4,0	Barretita	72	2,2-5,0
			Liotita	36				
			Chabazita	36				
			Mazzita	36				
			Erionita	36				
			Aghanita	48				
			Levynita	54				
GRUPO C ₄ -T ₁ (GRUPO DE LA NATROLITA)			GRUPO C ₈ (GRUPO DE LA LAUMONTITA)					
Edingtonita	10		Laumontita	24	1-2			
Gonnardita	20							
Thomsonita	40	1-2						
Natrolita	40							
Scolecita	40							
Mesolita	120							

TO₄: Número de tetraedros por celda unitaria; Si/Al: Relación silicio-aluminio en el grupo estructural.

1.1.3.5.3 Propiedades Físicas

Según Giannetto 1990, las propiedades físicas de una zeolita deben de considerarse de dos formas: (a) desde el punto de vista de sus propiedades naturales, incluyendo la morfología, tipos del cristal, gravedad específica, densidad, color, tamaño del cristal o grano, el grado de cristalización, resistencia a la corrosión y abrasión; (b) desde el punto de vista de su desempeño físico como un producto para cualquier aplicación específica, tomando en cuenta las características de brillantez, color, área superficial, tamaño de partícula, dureza, resistencia al desgaste, entre otras [61].

1.1.3.5.4 Propiedades Químicas

Las aplicaciones de las zeolitas naturales se basan en una, o más de sus propiedades químicas, que generalmente incluye el intercambio iónico, adsorción o deshidratación y rehidratación. Estas propiedades están en función de la estructura cristalina de cada especie y de su composición catiónica [61].

1.1.3.5.5 La Zeolita en la Construcción

La zeolita se utiliza de varias formas en el mundo de la construcción y en la producción de materiales de construcción, más del 60% de la producción mundial de la zeolita se consume en la industria de la construcción de China para hacer hormigón ligero y de alta calidad. Pueden utilizarse para sustituir hasta 40% del cemento Portland para obtener un hormigón ligero con propiedades específicas [62].

1.1.3.5.6 Estudios en la construcción

El concreto es conocido en la construcción, por su resistencia y durabilidad esto depende del cemento portland, se conoce que la sustitución parcial del cemento por puzolana produce un aumento en la durabilidad del hormigón y como resultado la vida útil de las estructuras aumentaría, de acuerdo varias investigaciones como Markiv 2016 y Lekha 2017 que utilizaron un 10% de contenido de zeolita demostraron que luego de 180 días la resistencia a la compresión del hormigón que contiene zeolita excedía la resistencia del hormigón sin zeolita [2], [4].

Según estudios realizados por Jacob en 2017 el hormigón emite dióxido de carbono por lo cual se buscó resolver este problema con la sustitución de cemento por aluminosilicatos este mineral absorbe dióxido de carbono, se han presentado porcentajes de 15, 20, 25 y 30% de sustitución de aluminosilicatos por cemento en donde se estudia las propiedades físicas y mecánicas más la capacidad de absorción de dióxido de carbono sin pérdida de resistencia del hormigón [5].

Dopico en 2009 en su investigación explica que con la adición del mineral cal-zeolita en sustitución del cemento se producen cambios positivos en cuanto a resistencia, compacidad y disminución de poros en las mezclas de hormigón, con la utilización de hasta un 37 % del mineral cal-zeolita en sustitución del cemento se logra satisfacer con facilidad la resistencia a compresión del hormigón, trabajabilidad y durabilidad, reduciendo el consumo de cemento sin afectar las propiedades requeridas en la mezcla [9].

1.1.3.5.7 Las Zeolitas de la costa de Ecuador

Las características geológicas del Ecuador, con amplio desarrollo de rocas volcánicas y volcanógeno-sedimentarias en complejos de rocas de diferentes edades, permite inferir la presencia de zeolitas a partir de la alteración del vidrio volcánico. Se realizó en 1994 una toma de muestras por un grupo de investigadores cubanos a lo largo de las carreteras desde Quito hacia el norte (Grabén); hacia la costa (Manta); Serie Macuchi de la Cordillera Occidental y Grupo Darle, Miembro Borbón; hacia el sur en dirección a Cuenca en la Formación Tarqui, Serie Saraguro y en Loja y alrededores las Series Célica y Saraguro del Sinclinatorio Catamayo. De todas las muestras recogidas arrojaron resultados positivos las pertenecientes a la Serie Saraguro que afloran antes del poblado de Oña entre las ciudades de Cuenca y Loja y Cayo en las cercanías de la ciudad de Guayaquil, donde se pudo comprobar la presencia de tobas verdes zeolitizadas. Las muestras analizadas por difracción de rayos X dieron patrones típicos de las zeolitas clinoptilolita y mordenita [39].

1.1.3.6 Ensayos

1.1.3.6.1 Densidad Real del Cemento (Método del frasco de Le Chatelier)

El valor del peso específico del cemento portland normal es casi invariable cuando no hay más adiciones que la del yeso, su rango es entre 3.10 y 3.15 g/cm³. Si es un cemento con adiciones el contenido de Clinker por tonelada de cemento es menor y su valor está comprendido entre 3.00 y 3.10 g/cm³ obedeciendo al porcentaje de adiciones que tenga el cemento. Uno de los métodos más comunes para precisar la densidad es el de Le Chatelier establecido por la norma NTE INEN 156:2009, existen además métodos como lo son el de Shumann, Mann, Candlot y el del picnómetro [63]. El procedimiento con el frasco de Le Chatelier consiste en verter cualquier líquido cuyo peso específico sea menor a 1 g/cm, en un recipiente de cristal de formas definidas por normas, posteriormente se debe llenar el matraz hasta un punto comprendido entre las marcas 0 ml y 1 ml, luego se sumerge el matraz en el baño de temperatura constante donde permanecerá hasta que su contenido haya alcanzado la temperatura del agua. El objetivo de este procedimiento es medir el volumen

correspondiente a una masa de cemento al desplazarse un líquido que no reacciona con el cemento [64].

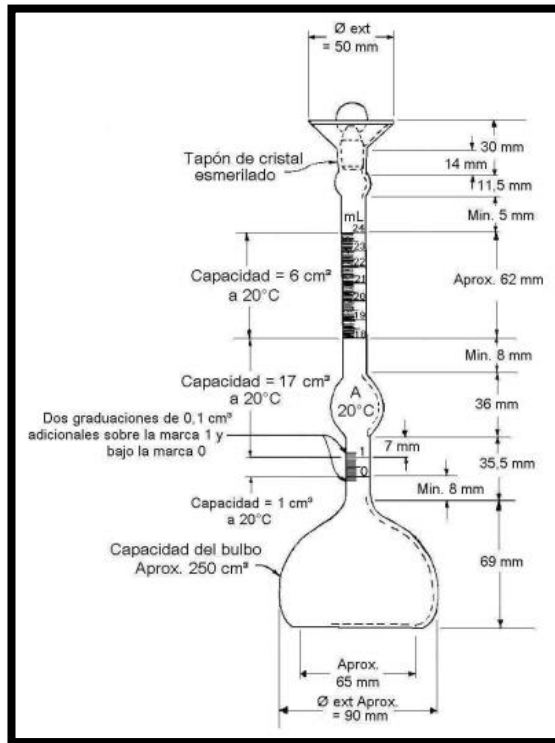


Figura 10. Frasco de Le Chatelier [63].

1.1.3.6.2 Finura del Cemento (Método de Blaine)

La finura es una propiedad muy importante del cemento y por ello tiene que someterse a un control cuidadoso, especialmente de los fabricantes. Las partículas de cemento, por ser muy pequeñas, no pueden ser separadas por mallas, por esta razón, el grado de finura del cemento se mide por otro tipo de métodos y parámetros, el parámetro de medición de la finura del cemento es el área específica, expresada como el área de la superficie total en cm^2 por gramo de cemento, el área especificada en cm^2/g significa la cantidad de superficie que un gramo de partículas de cemento puede cubrir. Así, un cemento con área específica mayor será más fino que otro con área específica menor.

Un aumento en la finura del cemento tiene los siguientes efectos:

- Hidratación temprana, un alto grado de finura eleva la cantidad de yeso requerido para propiciar un efecto retardante adecuado puesto que, en

cementos más finos, existe más cantidad de aluminato tricálcico (C_3A) libre para una velocidad de hidratación rápida.

- Desarrollo rápido de la resistencia a la compresión en el concreto, especialmente a edades mayores o cercanas a los 7 días [65].

El ensayo consiste en hacer pasar una cantidad determinada de aire a través de una capa de cemento de porosidad definida, la cantidad y el tamaño de los poros existentes en dicha capa son función del tamaño de las partículas y determinan el gasto del aire a través de la capa. El aparato Blaine de permeabilidad al aire consiste esencialmente de un mecanismo que permite pasar una cantidad definida de aire a través de una pastilla de cemento preparada con una porosidad definida. El número y tamaño de los poros en una pastilla preparada de porosidad definida es una función del tamaño de las partículas y determina la velocidad de flujo del aire a través de la pastilla [64], [66].

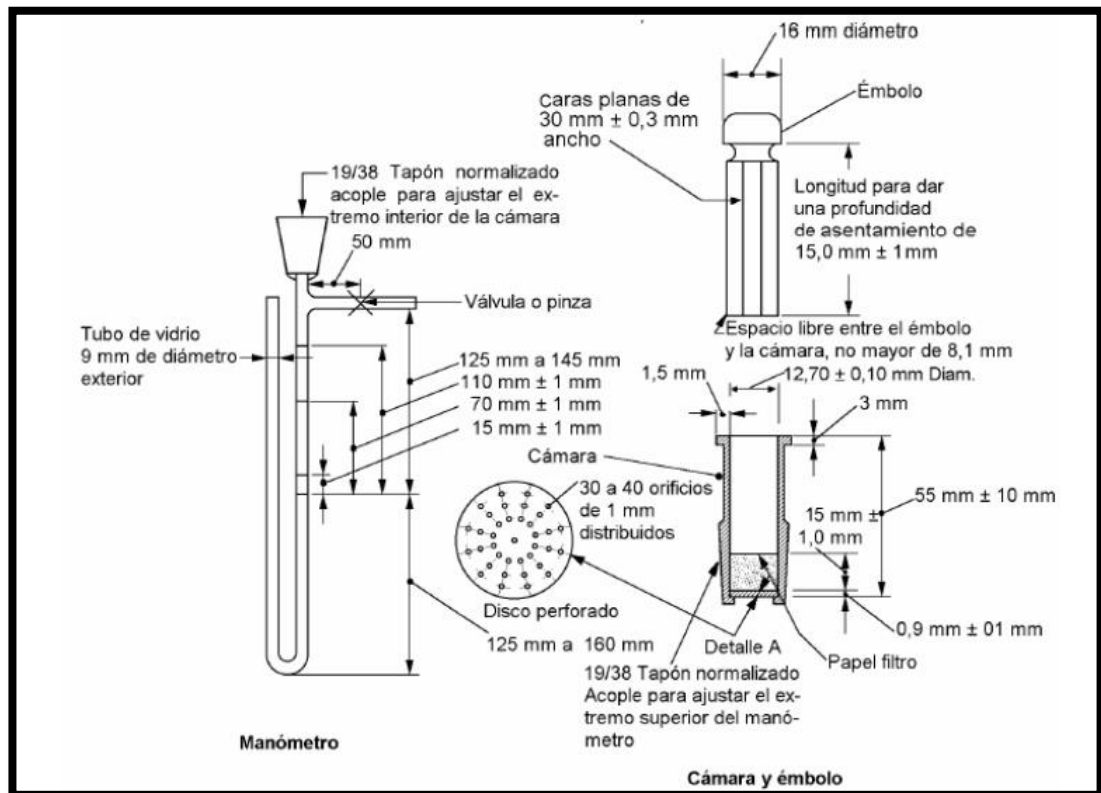


Figura 11. Aparato de Blaine [67].

1.1.3.6.3 Análisis granulométrico (Método del Hidrómetro)

El Método del Hidrómetro consiste en la determinación cuantitativa (porcentaje) de la distribución del tamaño de las partículas de las fracciones finas (limos y arcillas) de los suelos que pasan el tamiz o malla #200. Este método está basado en la sedimentación de un material en suspensión en un líquido, enunciado que se encuentra en la ley de Stokes, aquí se expresa que si una partícula esférica cae dentro del agua adquiere pronto una velocidad uniforme que depende del diámetro de la partícula, de su densidad y de la viscosidad del agua [68]-[70].

Este análisis está regulado por la norma ASTM D 422, en la cual tomamos una cantidad de suelo seco colocándolo en un recipiente junto con un agente dispersante durante un tiempo mínimo de 12 horas. Transcurrido el tiempo, el compuesto es transferido al recipiente de un agitador mecánico, en el cual es mezclado por un 1 minuto. Seguidamente, colocamos la muestra en un cilindro de sedimentación graduado y agregamos agua destilada hasta una medida indicada. Tapando con la mano o un tapón adecuado agitamos vigorosamente por 60 segundos. Ponemos en marcha el cronómetro e introducimos lentamente el hidrómetro en la muestra en suspensión. Procedemos a tomar lecturas con el hidrómetro a diferentes intervalos, y luego lo extraemos colocándolo en un cilindro con agua limpia. Como parte del ensayo, registramos la temperatura con un termómetro, una vez obtenidos los datos se hacen los cálculos, correcciones y gráficos correspondientes [69].

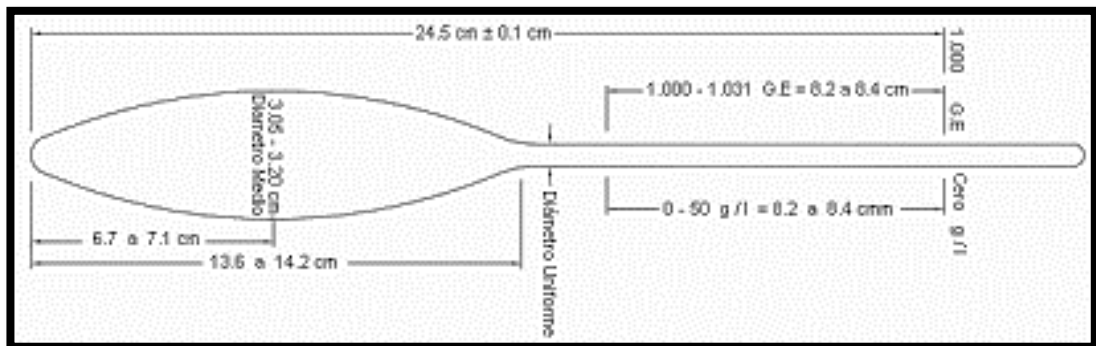


Figura 12. Hidrómetro 152 H [70].

1.1.3.6.4 Consistencia Normal del Cemento (Método de Vicat)

La determinación de la consistencia normal de los cementos hidráulicos se basa en la resistencia que opone la pasta de cemento a la penetración de la varilla del aparato de Vicat en un tiempo normalizado [71].

La prueba de consistencia normal permite conocer la cantidad de agua que es necesaria agregar a un peso de cemento (650 g), para obtener una consistencia normal. La determinación de esta consistencia sirve como referencia para la realización de otras pruebas como: determinación de la resistencia a la tensión, tiempos de fraguado, sanidad del cemento, expansión en autoclave, y otras. Los valores típicos de la consistencia normal están entre 23% y 33%. El agua de consistencia normal puede definirse como el agua necesaria para que la aguja de 1 cm de diámetro del aparato Vicat penetre $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ durante 30 segundos en la pasta de cemento, después de haberse iniciado la prueba [72].

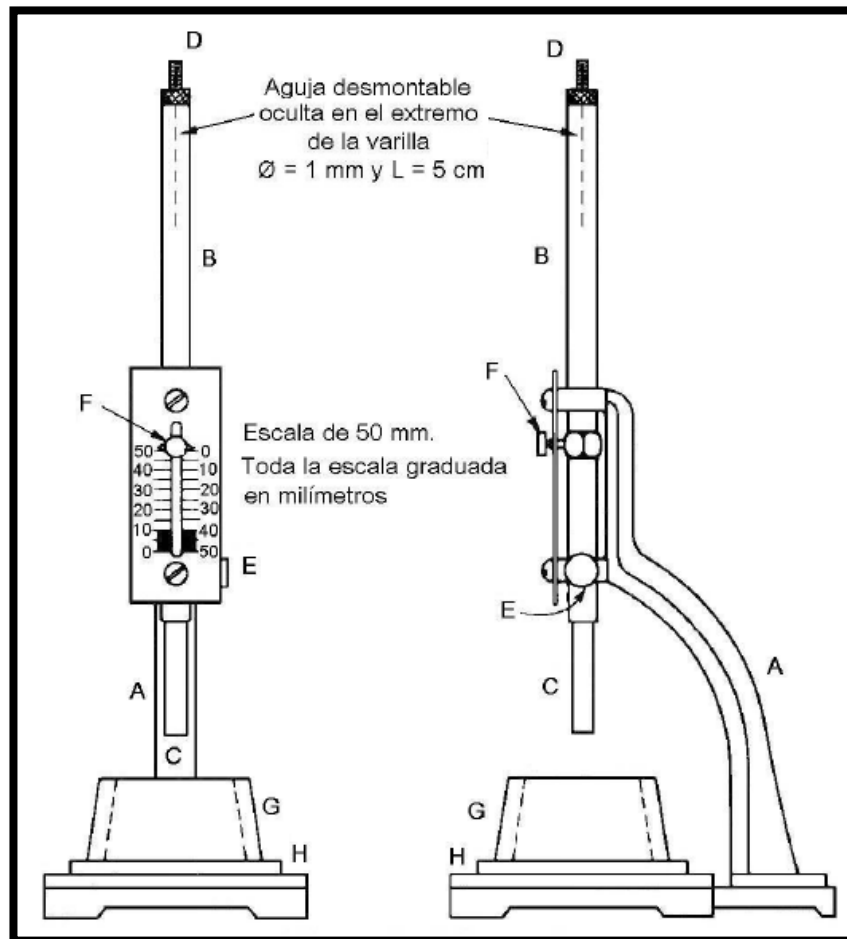


Figura 13. Aparato Manual de Vicat [71].

1.1.3.6.5 Tiempo de Fraguado (Método de Vicat)

El método normalizado para determinar el tiempo de fraguado más utilizado es el de la aguja de Vicat, este método se utiliza para determinar la consistencia estándar y el tiempo de fraguado de cementos comunes, morteros y yeso, y representa uno de los parámetros más importantes para la inspección y verificación de la calidad. La producción y el empleo de nuevos morteros, aditivos y materiales similares en el sector de la investigación han subrayado la necesidad de emplear aparatos sofisticados capaces de ejecutar una variedad de ciclos de ensayo y procedimientos independientes en varias probetas a la vez, véase la figura 15. Se ha probado, desde un punto de vista experimental, que cuando se mezcla un cemento con una cantidad apropiada de agua, la cantidad requerida para la preparación de dicha pasta se determina por medio de sucesivos ensayos de penetración en pastas con diferentes contenidos de agua, de tal modo que se obtenga una consistencia definida (consistencia normal) [73], [74].

El método consiste en hundir la aguja de Vicat, que tiene una masa total de 300 g y un diámetro de 1,13 mm (1 mm^2 de superficie), en una pasta de cemento de consistencia definida, a continuación se produce un aumento brusco de su viscosidad, a la vez que un incremento de la temperatura de la pasta, la aguja se detendrá a una distancia determinada de la placa de apoyo o alcance una profundidad dada de 35 mm, (principio del fraguado) y se detendrá cuando sólo penetra en la masa una cantidad especificada de 5 mm, según el Pliego RC-75 o menos, según otras normas o no penetre y deje en dicha masa una huella apenas perceptible (final del fraguado). El tiempo transcurrido desde el principio hasta el final es la duración del fraguado. En la figura 14 se ha representado la resistencia a la penetración (en mm) de la aguja de Vicat a lo largo del tiempo (en horas) de una pasta fabricada con un cemento portland; en ella se puede apreciar que existen tres zonas perfectamente diferenciadas. La primera zona AB, corresponde al período plástico del sistema cemento-agua; la segunda, zona BC, al período del fraguado y la tercera, a partir del punto C, al período de endurecimiento. Los puntos B y C corresponden al principio y final del fraguado, respectivamente [75].

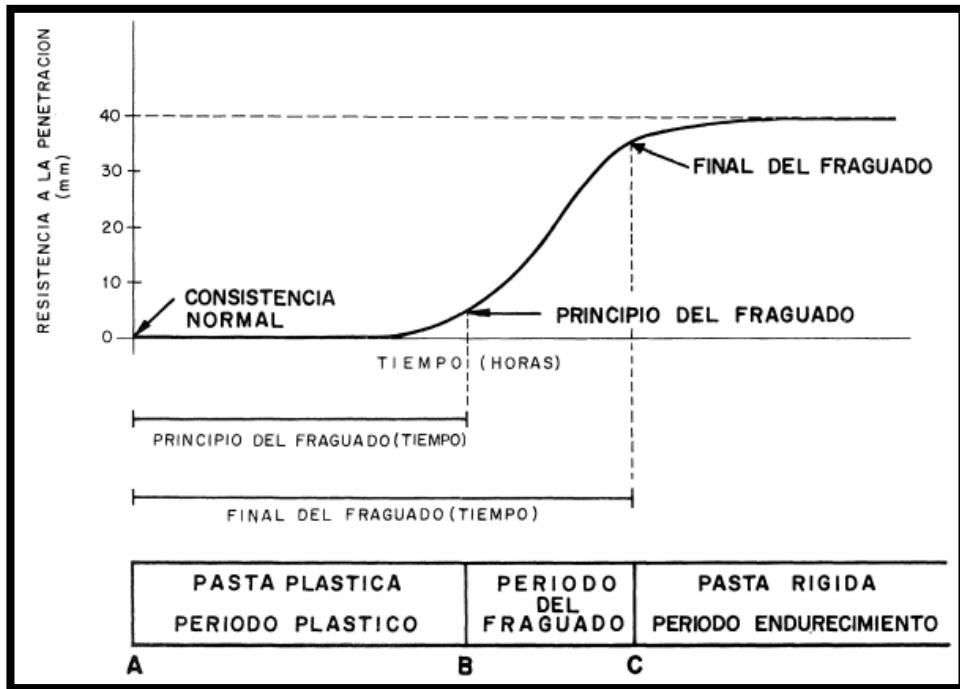


Figura 14. Resistencia a la penetración de una pasta de cemento Portland [75].

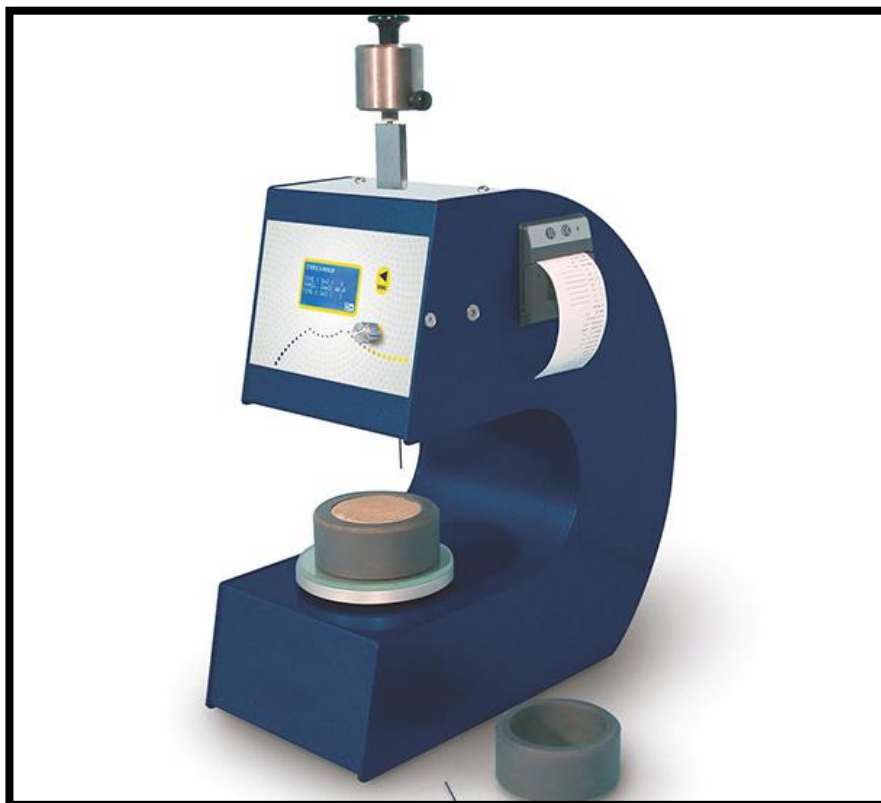


Figura 15. Equipo Automático de Vicat C090/A [74].

1.1.3.6.6 Determinación de la resistencia a compresión de especímenes cilíndricos de hormigón

Esta prueba se basa en la norma técnica ecuatoriana INEN 1573 con el propósito de determinar la resistencia a la compresión de elementos estructurales, este ensayo destructivo consiste en aplicar una carga axial de compresión, mediante una máquina a los cilindros moldeados de cemento hidráulico con las dimensiones y características establecidas en la norma INEN 1576 a una velocidad que se encuentra dentro de un rango definido hasta que ocurra la falla del espécimen.

La resistencia a la compresión de un espécimen se calcula dividiendo la carga máxima alcanzada durante el ensayo para el área de la sección transversal del espécimen. Los resultados del ensayo se utilizan para fines de control de calidad, aceptación del concreto, para programar las operaciones de construcción, evaluar los efectos del curado y/o ensayos de investigación [76].

1.1.4 Hipótesis

La zeolita natural como sustituto parcial del cemento tipo GU mejora las propiedades físicas y mecánicas del concreto estructural.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 General:

Elaborar concreto estructural con zeolita natural de la Cordillera Chongón-Colonche como material cementante suplementario del cemento portland.

1.2.2 Específicos:

- Obtener las propiedades físicas (densidad, finura Blaine y granulometría por hidrómetro) de una muestra de zeolita natural procedente de la cordillera Chongón Colonche.
- Determinar el tiempo de fraguado de la muestra de zeolita natural y el cemento portland en estudio con el equipo automático de Vicat.
- Analizar las resistencias a compresión en muestras cilíndricas de hormigón para 4 edades con 4 porcentajes de sustitución parcial del cemento con zeolita natural, en su dosificación.
- Comparar las propiedades físicas del cemento y la zeolita natural, así como las resistencias a compresión del hormigón (elaborado con cemento y diferentes porcentajes de zeolita).

CAPITULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 MATERIALES

En el desarrollo del presente trabajo experimental se utilizó zeolita verde natural de uso comercial (ZV), cemento hidráulico tipo GU (CGU), Agregado grueso (AG), Agregado fino (AF), Aditivo Plastificante (AP) y Agua (H₂O) para la elaboración especímenes de hormigón con sustitución de cemento por zeolita natural. Gasolina extra (GE) para la determinación de la densidad real de los elementos térreos, mercurio (Hg) en la calibración del aparato Blaine y Tripolifosfato de Sodio (STP) en la elaboración de una solución defloculante para un análisis hidrométrico de la zeolita.

2.1.1 Zeolita Verde Natural de uso comercial (ZV)

Este producto está elaborado con zeolitas seleccionadas y procesadas con equipos especializados para lograr un tamaño de partícula ideal, se caracteriza por tener una gran capacidad para absorber gases como el amonio, por lo que su uso mayoritariamente se centra en la agricultura y camaroneras. En la construcción puede utilizarse en la mezcla para crear hormigón ligero y de alta calidad [88]. Tal como se observa en la Figura 16 se trata de un componente fino cuyo color característico es el verde tendiendo a una tonalidad amarillenta, las especificaciones técnicas de este material son presentadas en la Tabla 5.



Figura 16. Zeolita Verde.

Tabla 5. Especificaciones Técnicas Zeolita Verde Natural ZV [77]

Identificación del producto			
Nombre químico	Aluminosilicatos altamente cristalizados		
Tipo mineral	No metálico		
Nombre Científico	Clinoptilolita		
Nombre Genérico	Zeolita natural		
Nombre Comercial	Mineplus		
Presentación	Polvo		
Envase	Sacos polipropileno laminado con marca		
Empresa	ZEONATEC S.A.		
Dirección	Km 1.8 vía a las Mercedes, cantón Isidro Ayora		
Peso	45 Kg		
Fórmula Química	$\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{H}_2\text{O}$		
Tiempo de Validez	No caduca		
Composición Química			
Óxido de silicio, Óxido de aluminio, Óxido de hierro, Óxido de Magnesio, Óxido de Calcio, Óxido de potasio, Óxido de Sodio			
Parámetro	Unidad	Resultados	Método de Análisis
Óxido de silicio o Sílice (SiO_2)	%	61.88	Gravimetría
Óxido de Aluminio (Al_2O_3)	%	10.85	Absorción Atómica
Óxido de Hierro (Fe_2O_3)	%	3.53	Absorción Atómica
Óxido de Magnesio (MgO)	%	0.77	Absorción Atómica
Humedad	%	5.33	Gravimetría
Plomo	mg/kg	7.55	Absorción Atómica
Cadmio	mg/kg	0.72	Absorción Atómica
Mercurio	mg/kg	0.45	Absorción Atómica
Propiedades Físicas y Químicas			
Estado físico	Polvo fino y granulado		
Color	Verde amarillento		
Olor	Inodoro		
PH solución acuosa al 5%	7.6		
Absorción elementos (N P K)	Rápida		
Selectividad	En su orden N, P, K otros		
Liberación de elementos	Lenta		
Solubilidad en agua (20°C)	< 100 mg/litro		
Densidad aparente	300-400 Kg/m ³ compactada 520 Kg/m ³		
Punto de fusión/reblandecimiento	Estable hasta 1200 grados Celsius/No Aplicable		
Higroscopicidad	El producto es Higroscópico		

2.1.2 Cemento Holcim Fuerte tipo GU (CGU)

Es un cemento hidráulico diseñado para todo tipo de construcción en general, fabricado según las directrices de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2380 equivalente a la Norma ASTM C-1157. Esta norma permite que existan cementos adicionados que minimizan el impacto ambiental y dar como resultado un uso muy eficiente de las materias primas, reciclados y de subproductos de otros materiales, este producto está compuesto por clínker de cemento portland, sulfato de calcio y adición de puzolana natural [78].



Figura 17. Cemento Holcim Tipo GU [78].

El cemento Holcim Fuerte tipo GU posee las siguientes ventajas:

- Excelente resistencia mecánica para todo tipo de construcciones.
- Mejora la trabajabilidad de las mezclas.
- Reduce la segregación y exudación.
- Reduce el calor de hidratación y por consiguiente la tendencia a la fisuración.
- Tiempos de fraguado favorables para la construcción en general.
- Proporciona resistencia química al ataque de sulfatos, difusión de cloruros y reacción álcali-agregado.

- Ahorros significativos en el consumo de cemento por metro cúbico de hormigón [78].

En la Tabla 6 se muestran los requisitos físicos según la norma NTE INEN 2380 que el cemento holcim debe cumplir para ser usado en aplicaciones generales.

Tabla 6. *Requisitos físicos del cemento Holcim Fuerte tipo GU [44], [78].*

	INEN 2380	Valor Referencial
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0.8	-0.06
Tiempo de fraguado inicial, método de Vicat		
No menos de, minutos	45	190
No más de, minutos	420	
Contenido de aire en mortero, volumen %	-	3
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo		
1 día	-	9
3 días	13	17
7 días	20	22
28 días	28	31
Expansión en barras de mortero 14 días, % máx	0.02	0.002

2.1.3 Cemento SRM 114q

Es un material de referencia estándar (SRM) que ha sido bien caracterizado con respecto a su composición química, propiedades físicas o ambas, incluye un certificado de análisis que da la caracterización oficial de las propiedades del material, se utiliza en programas de garantía de calidad, para calibración de equipos de ensayo de finura de acuerdo con los métodos estándar ASTM y para verificar la exactitud de procedimientos experimentales. La unidad SRM consta de un frasco de vidrio con tapas de plástico que contienen 5 gramos de cemento en polvo (cada frasco está contenida en una bolsa de aluminio sellada) [79].



Figura 18. Cemento Estandarizado SRM 114q [79].

2.1.4 Mercurio (Hg)

El mercurio es un elemento químico de aspecto plateado, con el símbolo Hg y número atómico 80, su densidad a 20°C es de 13.55 g/cm³ y es el único elemento metálico líquido en condiciones estándar de laboratorio [80].

La norma NTE INEN 196 establece que debe ser de grado reactivo ACS o mejor, esta denominación significa que el producto cumple el requisito definido por la American Chemical Society en relación con los reactivos analíticos.



Figura 19. Mercurio [80].

2.1.5 Agregado Grueso (AG)

Se trata de ripio obtenido por trituración y graduado hasta obtener un tamaño máximo de partícula de $\frac{3}{4}$ de pulgada, el material proviene de la mina La Playa ubicada en el cantón Salcedo provincia de Cotopaxi.



Figura 20. Ripio 3/4.

2.1.6 Agregado Fino (AF)

Arena, también denominada “polvo de roca”, obtenida por trituración en la mina “La Playa” en el cantón Salcedo provincia de Cotopaxi.



Figura 21. Polvo de roca.

2.1.7 Aditivo Plastificante (AP)

Sikament N-100 es un aditivo líquido, color café, compuesto por resinas sintéticas. Plastificante, reductor de agua de alto poder y economizador de cemento. No contiene cloruros. Consigue fluidificar el concreto o mortero facilitando su colocación y su bombeabilidad en elementos esbeltos densamente armados y en la construcción de estructuras civiles prefabricadas. Permite recuperar el asentamiento del concreto premezclado sin alterar sus tiempos de fraguado ante demoras en la colocación de este [81]. El uso de este aditivo logra mantener las mismas propiedades de la mezcla con zeolita y la de control puesto que la zeolita natural al poseer gran capacidad de absorción reduce el asentamiento y la trabajabilidad del concreto en estado fresco.



Figura 22. Aditivo Sikament N-100.

2.1.8 Agua (H₂O)

El agua de la mezcla debe cumplir con la norma NTE INEN 1108, debe ser clara y de apariencia limpia, libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, álcalis, sales, materiales orgánicos y otras sustancias que puedan ser dañinas para el hormigón [82].

El agua permite que el cemento desarrolle su capacidad ligante y experimente reacciones químicas que le dan la propiedad de fraguar y endurecer para formar un sólido único con los agregados llamado concreto. La cantidad adecuada de agua evita la aparición de grietas por retracción.

2.1.9 Gasolina Extra (GE)

Es un combustible producto de la destilación del petróleo, mezcla de hidrocarburos relativamente volátiles, libres de agua, sedimento y material sólido en suspensión, su composición se basa de butanos y butenos.

La gasolina extra posee 85 octanos unidad que mide la resistencia de detonación en el combustible, su aspecto es de color verde transparente y brillante, su densidad a 15°C es de 0.735 g/cm³ y se la utiliza en la determinación de la densidad real del cemento debido a su incapacidad de reaccionar químicamente con este elemento [83].



Figura 23. Gasolina Extra.

2.1.10 Tripolifosfato de Sodio (STP)

Es una sal de sodio, un compuesto inorgánico de fórmula Na₅P₃O₁₀. Se obtiene a partir de una mezcla estequiométrica del fosfato disódico y el fosfato monosódico bajo

condiciones controladas. Es un polvo blanco de estructura cristalina, inodoro, de alto peso molecular y soluble en agua [84].

Su uso en este proyecto investigativo se dio en la elaboración de una solución defloculante al 40% para el estudio hidrométrico de la zeolita. Los defloculantes actúan en la superficie de las partículas, e inhiben su agregación por las fuerzas de atracción.



Figura 24. Solución defloculante. a) Tripolifosfato de sodio, b) Agua destilada.

2.2 EQUIPOS

2.2.1 Frasco Le Chatelier

Este matraz se utiliza para determinar la densidad real del cemento hidráulico, arena y otros materiales finos. Pesa 500 gr, el cuerpo contiene aproximadamente 250 ml, el bulbo ovalado del cuello tiene una capacidad de 17 ml, el volumen debajo de la bombilla se gradúa de 0 a 1 ml en subdivisiones de 0.1 ml, con una subdivisión adicional de 0.1 por debajo del 0 y por encima de la marca de 1 ml y el cuello está graduado de 18 a 24 ml en subdivisiones de 0.1 ml por encima del bulbo [85].



Figura 25. Frasco Le Chatelier.

2.2.2 Aparato de Permeabilidad al Aire Blaine

Este aparato se utiliza para determinar la finura del cemento Portland en términos de la superficie específica expresada como área de superficie total en centímetros cuadrados por gramo de cemento (cm^2/gr).

La marca del aparato es Mattest el modelo es el E009 KIT, sus dimensiones son: 220x180x470 mm, tiene un peso aproximado de 4 Kg y viene equipado con:

- Manómetro de tubo en forma de U de vidrio con una válvula.
- Soporte de acero.
- Celda de prueba con disco y émbolo en acero inoxidable.
- Pera de aspiración de goma.
- Discos de papel de filtro (1000).
- Líquido manométrico.
- Grasa de vaselina.
- Embudo.
- Cepillo [86].

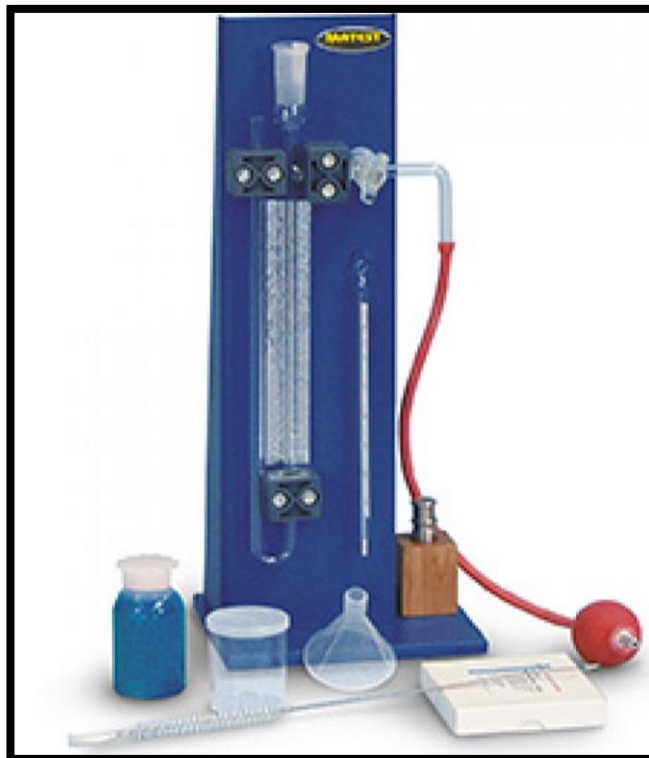


Figura 26. Aparato de Permeabilidad al Aire Blaine [86].

2.2.3 Hidrómetro 152H

Este instrumento se utiliza para medir los sólidos en suspensión en un cilindro de sedimentación durante 24 horas y para la determinación de la distribución del tamaño de partículas de un suelo que pase el tamiz #200.

El hidrómetro tiene una longitud de 11 pulgadas (280 mm) y un peso de 2 libras (0.91 kg), mide en gramos por litro (g / L) de suspensión y tiene un rango de -5 a +60 g / L, en divisiones de 1g / L a 68 ° F (20 ° C) [87].



Figura 27. Hidrómetro 152H.

2.2.4 Aparato Manual de Vicat

El Aparato de Vicat, tiene la función de proporcionarnos la penetración lograda por una de sus agujas en cada una de las muestras utilizadas en la determinación de la consistencia normal de una pasta de cemento. Consiste en un soporte con un vástago móvil que pesa 300g, uno de sus extremos se llama sondeo, tiene 10 mm de diámetro y 50 mm de longitud y el otro una aguja de 1 mm de diámetro y 50 mm de longitud el vástago es reversible y se ajusta a través de un tornillo, tiene un índice ajustable que se mueve sobre una escala graduada en milímetros, rígidamente unida al soporte. El molde en el cual se coloca la pasta debe ser de forma troncocónica y su base mayor debe reposar sobre una placa de vidrio, el molde debe ser de material no absorbente que resista física y químicamente el ataque de la pasta de cemento [88].



Figura 28. Aparato Manual de Vicat.

2.2.5 Aparato Automático de Vicat

El modelo Vicatronic E044N se utiliza para la determinación del tiempo de fraguado inicial y final de cementos o pastas de mortero.

Las dimensiones del equipo son: 400x200x470 mm, tiene un peso de 13 kg. Está equipado con una pantalla LCD para la visualización gráfica en tiempo real de la prueba, una impresora incorporada, dos agujas endurecidas (una de 1 mm de diámetro y otra de 1,13 mm de diámetro), dos moldes cónicos y una placa de vidrio, incluye programas personalizables para pruebas de investigación y es adecuado para operar a través de la unidad de control incorporada o una computadora [89].

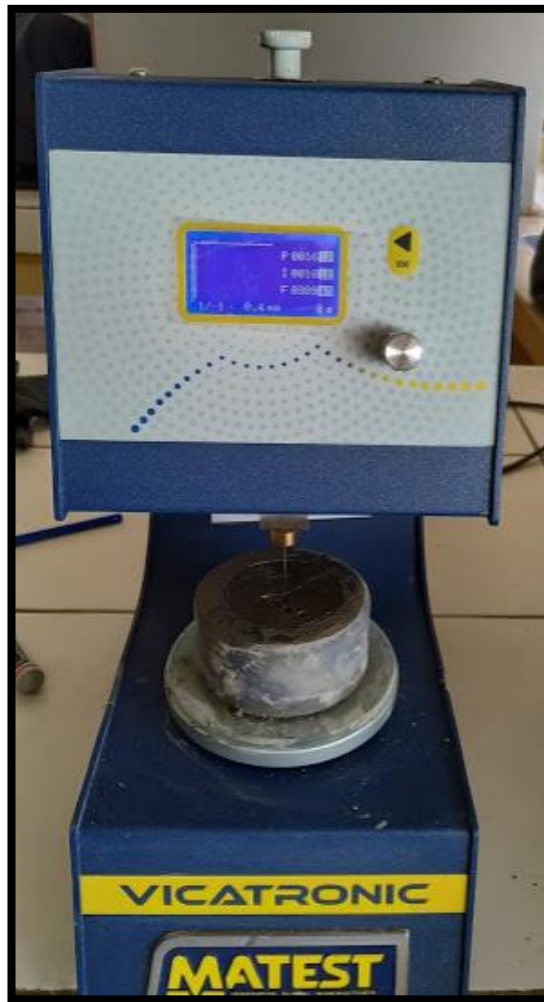


Figura 29. Aparato Automático de Vicat.

2.2.6 Baño María

El equipo es de la marca Humboldt modelo H1390, tiene un volumen de 29.4 litros, posee un microprocesador de control de temperatura y un revestimiento aislado para ayudar a mantener temperaturas constantes, en su interior se pueden acomodar 12 muestras Marshall de 4 "de diámetro o 3 de 6" de diámetro, incluye un estante de acero inoxidable que soporta las muestras permitiendo 2 "de agua circular libres por encima y por debajo de las muestras, el equipo utiliza una barra de agitación magnética para inducir el flujo de agua dentro del baño y asegurar que se mantenga una temperatura uniforme [90].



Figura 30. Baño María.

2.2.7 Tanque de curado

Fabricado en polietileno, robusto y estable, incluye una rejilla metálica de base y utiliza un sistema de calefacción digital por termostato marca Matest modelo (230V 1F 50 / 60Hz 2000W) lo que garantiza una mejor precisión de temperatura, tiene una capacidad de 650 litros, sus dimensiones interiores son: 1040x1040x605 mm y pesa 60 Kg aproximadamente [91].



Figura 31. Tanque de Curado.

2.2.8 Máquina de Compresión

SHIMADZU CONCRETO 2000X es una máquina de ensayo de compresión de hormigón, tiene una capacidad de 40 a 2000 kN en rango de 6 etapas, se utiliza para realizar pruebas de manera segura y eficiente en el concreto sin causar fracturas explosivas. Principalmente es utilizada para realizar ensayos a compresión y determinar el módulo elástico en probetas de hormigón.



Figura 32. Máquina de compresión Shimadzu.

2.2.9 Equipo básico utilizado en la dosificación y elaboración de especímenes de Hormigón

- Concreteira a gasolina de un saco de capacidad.
- Vibrador de hormigón a gasolina.
- Tamizadora eléctrica.
- Horno eléctrico.
- Juego de tamices cuadrados (2", 1½", 1", ¾", ⅜", ½", #4).
- Juego de tamices redondos (#4, #8, #12, #16, #30, #50, #100, y #200 más fuente, tapa).
- Báscula de 30 Kg de capacidad, con precisión de 1g.
- Báscula de 6 Kg de capacidad, con precisión de 1g.
- Báscula análoga de 100 Kg de capacidad.
- Molde metálico de 22 Lt de capacidad.
- Moldes cilíndricos de 10 cm x 20 cm.
- Cono de Abrams.
- Varilla de compactación punta redondeada.
- Canastilla metálica.
- Recipientes metálicos.
- Recipientes plásticos.
- Bandejas metálicas.
- Termómetro analógico.
- Termómetro digital.
- Carretilla.
- Pala de mano.
- Palustre.
- Cepillo de acero.
- Brocha.
- Flexómetro.
- Embudo.

2.3 MÉTODO

Para el alcance de los objetivos planteados en el presente proyecto se utilizaron dos tipos de investigación.

- a) Investigación bibliográfica: Se busca información en artículos científicos referentes a la utilización de zeolita natural en el ámbito constructivo haciendo énfasis en el uso como material suplementario del cemento analizando además su presencia en proyectos investigativos dentro del territorio ecuatoriano.
- b) Investigación experimental: Los dos materiales se estudiarán con los siguientes experimentos:
 - Para las propiedades físicas se estudiarán:
 - La densidad siguiendo la norma NTE INEN 0156 que consiste en establecer la relación entre una masa y el volumen del líquido no reactivo que esta masa desplaza en el frasco de Le Chatelier.
 - La finura aplicando el método del aparato de permeabilidad al aire (Blaine) descrito en la norma NTE INEN 0196.
 - El análisis granulométrico de una muestra de zeolita verde por el método del hidrómetro de acuerdo con la norma ASTM D422.
 - Se determinará el tiempo de fraguado de la pasta de cemento con y sin sustitución de zeolita verde mediante el aparato de Vicat (NTE INEN 0158).
 - Se fabricarán especímenes de hormigón y se hallarán las resistencias a compresión para 4 edades y 4 porcentajes de sustitución de zeolita verde por cemento.

Finalmente se hará una comparación y análisis de las propiedades físicas y mecánicas del cemento y la zeolita verde, así como las resistencias a compresión de los especímenes para establecer si las características de la zeolita son similares a las del cemento portland y cómo las propiedades mecánicas del hormigón se vieron modificadas.

En la Figura 33 se ve representado el proceso metodológico aplicado en el presente proyecto investigativo.

Investigación Bibliográfica

Investigación Experimental

Discusión de Resultados

- Densidad real (Método Le Chatelier)
- Finura (Método Blaine)
- Análisis Hidrométrico.
- Determinación del Tiempo de Fraguado.
- Fabricación y Ensayo de especímenes de hormigón.

EXPERIMENTOS REALIZADOS		
Nombre del ensayo	Material ensayado	Repeticiones realizadas
Densidad Real	Cemento (CGU)	3
	Zeolita Natural (ZV)	3
Finura	Cemento (CGU)	3
	Zeolita Natural (ZV)	3
Análisis Hidrométrico	Zeolita Natural (ZV)	1
Tiempo de Fraguado	Cemento (CGU) + reemplazo 10% Zeolita Natural (ZV)	1
	Cemento (CGU) + reemplazo 15% Zeolita Natural (ZV)	1
	Cemento (CGU) + reemplazo 20% Zeolita Natural (ZV)	1

FABRICACIÓN DE PROBETAS		
Porcentaje de sustitución [%] de Cemento (CGU) por Zeolita Natural (ZV)	Nomenclatura	Número de Probetas fabricadas
0	CEM	12
10	Z10	12
15	Z15	12
20	Z20	12

CANTIDAD DE PROBETAS ENSAYADAS A COMPRESIÓN				
EDAD	Mezcla de control (CEM)	10% sustitución de zeolita (Z10)	15% sustitución de zeolita (Z15)	20% sustitución de zeolita (Z20)
7	3	3	3	3
14	3	3	3	3
28	3	3	3	3
56	3	3	3	3

Figura 33. Proceso Metodológico.

2.3.1 Densidad Real (NTE INEN 156)

Este ensayo se realizará tanto para el cemento como para la zeolita según el siguiente procedimiento:

1. Pesar 64 gr de cemento con una aproximación de 0,05 gr, para la zeolita utilizar 55 gr ya que este material tiende a ocupar un mayor volumen que el cemento y la lectura del volumen desplazado no se podrá realizar correctamente.
2. Llenar el frasco de LeChatelier con gasolina hasta un punto en la parte baja del cuello entre las marcas 0 cm³ y 1 cm³.
3. Pesar el frasco con adición de gasolina [Ma].
4. Sumergir el frasco en un baño de agua a una temperatura constante de 23°C ± 2°C.
5. Registrar la primera lectura en cm³ [Vo].
6. Introducir en pequeños incrementos el cemento o la zeolita previamente pesados
7. Pesar el contenido frasco Le Chatelier con gasolina y el material (cemento o zeolita) [Mtc, Mtz]
8. Colocar el tapón en el frasco, rodarlo en posición inclinada hasta liberar el aire contenido.
9. Sumergir el frasco en un baño de agua a la temperatura establecida en el numeral 4.
10. Registrar la segunda lectura en cm³ [Vf].

Luego de obtenidos los datos se procederá a realizar los cálculos de la siguiente forma:

- **Masa del cemento**

$$Mc = Mtc - Ma$$

En donde:

Mc= Masa del cemento [gr]

Mtc= Masa del frasco Le Chatelier +gasolina+ cemento [gr]

Ma= Masa del frasco Le Chatelier +gasolina [gr]

- **Masa de la zeolita**

$$M_z = M_{tz} - M_a$$

En donde:

M_z = Masa de la zeolita [gr]

M_{tz} = Masa del frasco Le Chatelier +gasolina+ zeolita [gr]

M_a = Masa del frasco Le Chatelier +gasolina [gr]

- **Volumen de gasolina desplazada**

$$V = V_f - V_o$$

En donde:

V = Volumen de gasolina desplazada [cm³]

V_f = Volumen final del frasco Le Chatelier [cm³]

V_o = Volumen inicial del frasco Le Chatelier [cm³]

- **Densidad real del cemento**

$$DRC = M_c/V$$

En donde:

DRC = Densidad real del cemento [g/cm³]

M_c = Masa del cemento [gr]

V = Volumen de gasolina desplazada [cm³]

- **Densidad real de la zeolita**

$$DRZ = M_z/V$$

En donde:

DRC = Densidad real de la zeolita [g/cm³]

M_z = Masa de la zeolita [gr]

V = Volumen de gasolina desplazada [cm³]

Realizar 2 o más ensayos consecutivamente tal como se establece en el numeral 4.7 de la norma NTE INE 156. Reportar el valor promedio de la densidad con 3 decimales.

2.3.2 Finura método de Blaine (NTE INEN 196)

Este ensayo se realizará tanto para el cemento como para la zeolita según el siguiente procedimiento:

a) Calibración del aparato y preparación de la muestra:

1. Sacudir vigorosamente por 2 minutos el cemento SRM 114q en un frasco para esponjar y romper terrones o aglomeraciones.
2. Dejar descansar el frasco tapado por 2 minutos adicionales, luego quitar la tapa y revolver suavemente para distribuir en toda la muestra la fracción fina.
3. Colocar el disco de metal perforado y dos discos de papel filtro en la celda de permeabilidad, en el orden mencionado y registrar su masa.
4. Llenar la celda con mercurio, quitando cualquier burbuja de aire adherida a la pared de la celda.
5. Nivelar el mercurio con el borde superior de la celda presionando ligeramente una pequeña placa de vidrio contra la superficie del mercurio.
6. Pesar la celda con el mercurio y registrar su masa (WA).
7. Retirar de la celda uno de los discos de papel filtro.
8. Pesar una cantidad tentativa de cemento SRM 114q de 2.80 gr y colocar en la celda.
9. Golpear ligeramente el lado de la celda con objeto de nivelar la camada de cemento
10. Colocar un disco de papel filtro sobre el cemento.
11. Añadir mercurio dentro del espacio no llenado y nivelar como se indicó anteriormente.
12. Pesar el mercurio de la celda y registrar la masa (WB).

Luego de obtenidos los datos se procederá a realizar los cálculos de la siguiente forma:

- **Volumen aparente del cemento**

$$V = \frac{WA - WB}{D}$$

En donde:

V= Volumen aparente de la camada compactada de polvo [cm³]

WA= gramos de mercurio requeridos para llenar la celda sin cemento [gr]

WB= gramos de mercurio requerido para llenar la porción de la celda no ocupada por el lecho de cemento en la celda [cm³]

D = densidad del mercurio a la temperatura de ensayo [Mg/m³].

- **Masa de la muestra**

$$W = \rho V(1 - \epsilon)$$

En donde:

W= gramos de muestra requerida [gr]

ρ = densidad de la muestra de ensayo (para cemento portland se debe utilizar un valor de 3.15 Mg/m³ o 3.15 g/cm³)

V= volumen aparente de la camada de cemento [cm³]

ϵ = porosidad deseada de la camada de cemento (0.500 ± 0.005)

b) Ensayo de permeabilidad para el cemento

1. Asentar el disco perforado sobre la base en la celda de permeabilidad.
2. Colocar un disco de papel filtro sobre el disco de metal y presionar los bordes hacia abajo con el émbolo.
3. Pesar los gramos de muestra requerida que ha sido calculada (W).
4. Colocar los gramos de muestra requerida en la celda.
5. Golpear ligeramente el lado de la celda con objeto de nivelar la camada de cemento.
6. Colocar un disco de papel filtro sobre el cemento.
7. Comprimir el cemento con el émbolo hasta que el collarín del émbolo esté en contacto con el borde superior de la celda.
8. Extraer lentamente el émbolo una pequeña distancia, gire alrededor de 90°, volver a presionar.
9. Retirar lentamente el émbolo.
10. Aplicar un poco de grasa ligera (vaselina) a la superficie de la celda.

11. Acoplar la celda de permeabilidad al tubo del manómetro.
12. Evacuar lentamente el aire en el brazo del manómetro de tubo U hasta que el líquido alcance la marca superior.
13. Cerrar la válvula firmemente.
14. Arrancar el cronómetro cuando la base del menisco del líquido del manómetro alcance la segunda marca.
15. Parar el cronómetro cuando la base del menisco del líquido alcance la tercera marca.
16. Anotar el intervalo de tiempo medido y registrarlo en segundos (Ts).
17. Anotar la temperatura del ensayo y registrarla en grados centígrados.

Luego de obtenidos los datos se procederá a realizar los cálculos de la siguiente forma:

- **Ensayo de finura para cemento portland**

$$S = \frac{Ss \sqrt{T}}{\sqrt{Ts}}$$

En donde:

S= Superficie específica de la muestra de ensayo [m²/kg]

Ss= Superficie específica de la muestra normalizada usada en la calibración del aparato [m²/kg]

T= Intervalo de tiempo de la caída del manómetro para la muestra de ensayo [s]

Ts= Intervalo de tiempo medido de la caída del manómetro para la muestra normalizada [s]

c) Determinación de la constante “b” para la zeolita

Cuando se determine la finura de materiales diferentes que el cemento portland, se deberá encontrar el valor de la constante “b” apropiada para la muestra de ensayo en este caso zeolita siguiendo este procedimiento:

1. Asentar el disco perforado sobre la base en la celda de permeabilidad.
2. Colocar un disco de papel filtro sobre el disco de metal y presionar los bordes hacia abajo con el émbolo.

3. Escoger cuatro valores de porosidad (ϵ) de la camada preparada de la muestra de ensayo con una separación máxima de 0.06 entre el primer y último valor.
4. Calcular los gramos de muestra requerida de zeolita en la celda (W) utilizando la densidad de la muestra de ensayo obtenida del ensayo con el frasco de Le Chatelier para cada una de las porosidades.
5. Golpear ligeramente el lado de la celda con objeto de nivelar la camada de cemento.
6. Colocar un disco de papel filtro sobre la zeolita.
7. Comprimir la zeolita con el émbolo hasta que el collarín del émbolo esté en contacto con el borde superior de la celda.
8. Extraer lentamente el émbolo una pequeña distancia, gire alrededor de 90° , volver a presionar.
9. Retirar lentamente el émbolo.
10. Aplicar un poco de grasa ligera (vaselina) a la superficie de la celda.
11. Acoplar la celda de permeabilidad al tubo del manómetro.
12. Evacuar lentamente el aire en el brazo del manómetro de tubo U hasta que el líquido alcance la marca superior.
13. Cerrar la válvula firmemente.
14. Arrancar el cronómetro cuando la base del menisco del líquido del manómetro alcance la segunda marca.
15. Parar el cronómetro cuando la base del menisco del líquido alcance la tercera marca.
16. Anotar el intervalo de tiempo medido y registrarlo en segundos (T).
17. Repetir desde el paso 5 para todas las masas de muestra requerida por cada valor de porosidad.
18. Graficar en un sistema cartesiano la porosidad en el eje (y) y la porosidad al cubo por el tiempo ($\sqrt{\epsilon^3 T}$) en el eje (x), el corte en el eje (y) de la línea de tendencia por regresión lineal marcará el valor de "b".

d) Ensayo de permeabilidad para la zeolita

Luego de encontrado el valor de “b” se procederá con el ensayo de finura para la zeolita, para ello la masa de la muestra debe ser ajustada de manera que se produzca una camada dura y firme por el proceso de compactación, se puede utilizar una de las masas requeridas en la determinación de “b” que haya cumplido con este requerimiento. Se seguirá el mismo procedimiento descrito en el numeral c) para una sola masa de zeolita y se utilizará la fórmula 7 de la norma NTE INE 196 para obtener la superficie específica del material.

$$S = \frac{S_s \rho_s (b_s - \epsilon_s) \sqrt{\epsilon^3} \sqrt{T}}{\rho (b - \epsilon) \sqrt{\epsilon_s^3} \sqrt{T_s}}$$

En donde:

S = superficie específica de la muestra de ensayo [m²/kg]

S_s = superficie específica de la muestra normalizada usada en la calibración del aparato [m /kg]

T = intervalo de tiempo medido, de la caída del manómetro para la muestra de ensayo [s]

T_s = intervalo de tiempo medido, de la caída del manómetro para la muestra normalizada, utilizada en la calibración del aparato [s]

ε = porosidad de la camada preparada de la muestra de ensayo

ε_s = porosidad de la camada preparada de muestra normalizada, usada en la calibración del aparato

ρ = densidad de la muestra de ensayo (zeolita) [g/cm³]

ρ_s = densidad de la muestra normalizada, usada en la calibración del aparato (asumida que es 3.15 Mg/m³ o 3.15 g/cm³)

b = una constante específicamente apropiada para la muestra de ensayo

b_s = 0.9, la constante apropiada para la muestra normalizada

2.3.3 Análisis Hidrométrico (ASTM D422)

Este ensayo se realizará únicamente para la zeolita ya que no se puede utilizar un defloculante con el cemento debido al fraguado que se da al contacto con el agua de la solución mediante el siguiente procedimiento:

1. Pesar 60 gramos de zeolita que pase el tamiz #200.
2. En un recipiente colocar la muestra y agregar 125ml de solución de Tripolifosfato de sodio (40g/l), dejar la muestra en remojo por una noche.
3. Colocar la muestra en una probeta de 1 litro de capacidad y con ayuda de un agitador manual revolver la muestra por 1 minuto.
4. Colocar la probeta en un baño María a una temperatura de 20°C.
5. Llenar la probeta únicamente con agua destilada hasta la marca de 1 litro.
6. Agitar nuevamente el contenido por 1 minuto o 60 repeticiones.
7. Poner en marcha el cronómetro.
8. Introducir el hidrómetro 152 H en la probeta evitando tocar las paredes de esta.
9. Tomar las lecturas en el hidrómetro según los siguientes tiempos (T) 2,5,15,30,60,120,250 y 1440 minutos, anotar la temperatura de la mezcla, retirar el hidrómetro y lavarlo entre cada lectura.
10. Una vez finalizado el ensayo, colocar la mezcla en un recipiente, dejarlo secar al horno y calcular la masa final seca.

Corrección de las lecturas del hidrómetro.

Antes de proceder con los cálculos, las lecturas de hidrómetro deberán ser corregidas por menisco, por temperatura, por defloculante y punto cero.

- a) Corrección por menisco (C_m): viene dada para cada tipo de hidrómetro, el 152 H tiene un $C_m = 1$ g/l.
- b) Corrección por temperatura (C_t): los valores de corrección se obtendrán de la Tabla 7.

Tabla 7. Corrección por temperatura (C_t) para el hidrómetro 152 H [92].

Temp. °C	Concentración (g/l)
10	-2.0
11	-1.9
12	-1.8
13	-1.6
14	-1.4
15	-1.2
16	-1.0
17	-0.8
18	-0.5
19	-0.3
20	0.0
21	0.3
22	0.6
23	0.9
24	1.3
25	1.7
26	2.0
27	2.4
28	2.9
29	3.3
30	3.7

- c) Corrección por agente de dispersión y por desplazamiento del punto cero (C_d): para calcular este factor se utiliza la siguiente ecuación.

$$-C_d = \tau' + C_m \pm C_t$$

donde:

τ' = Lectura del hidrómetro, en agua con defloculante únicamente [g/l].

C_m = Corrección por menisco [g/l].

C_t = Corrección por temperatura, sumada algebraicamente [mm].

Datos adicionales necesarios para el cálculo.

Además de obtener las correcciones de lectura del hidrómetro se deberán conocer los siguientes datos.

- a) Profundidad efectiva del hidrómetro: la profundidad efectiva puede ser obtenida de la Tabla 8.

Tabla 8. Profundidad Efectiva del hidrómetro 152 H [92].

Lectura Actual del hidrómetro R (g/l)	Profundidad Efectiva L (cm)	Lectura Actual del hidrómetro R (g/l)	Profundidad Efectiva L (cm)
0	16.3	31	11.2
1	16.1	32	11.1
2	16	33	10.9
3	15.8	34	10.7
4	15.6	35	10.6
5	15.5	36	10.4
6	15.3	37	10.2
7	15.2	38	10.1
8	15	39	9.9
9	14.8	40	9.7
10	14.7	41	9.6
11	14.5	42	9.4
12	14.3	43	9.2
13	14.2	44	9.1
14	14	45	8.9
15	13.8	46	8.8
16	13.7	47	8.6
17	13.7	48	8.4
18	13.3	49	8.3
19	13.2	50	8.1
20	13	51	7.9
21	12.9	52	7.8
22	12.7	53	7.6
23	12.5	54	7.4
24	12.4	55	7.3
25	12.2	56	7.1
26	12	57	7
27	11.9	58	6.8
28	11.7	59	6.6
29	11.5	60	6.5
30	11.4		

- b) Constante “K” en función de la temperatura de la suspensión y la gravedad específica de las partículas del suelo: se pueden utilizar los valores de la Tabla 3 de la norma ASTM D422 [92] para valores de

gravedad específica de la muestra entre 2.45 y 2.85 g/cm³, para valores fuera del rango se utilizará la siguiente formula:

$$K = \sqrt{\frac{30 \frac{u}{g}}{\tau_s - \tau_w}}$$

En donde:

K = Constante K

u = Coeficiente de viscosidad del agua [Poises]

g = Aceleración gravitacional [cm/s²]

τ_s = Peso unitario de los sólidos del suelo [g/cm³]

τ_w = Peso unitario del agua destilada, a la temperatura T [g/cm³]

- c) Constante “a” que depende de la densidad de la suspensión: este valor se tomará de la Tabla 9.

Tabla 9. Constante “a” en función de la gravedad específica de la muestra de ensayo [92].

Gravedad Específica (g/cm ³)	Constante "a"
2.95	0.94
2.85	0.96
2.75	0.98
2.65	1.00
2.55	1.02
2.45	1.05
2.35	1.08

Una vez obtenidos los datos necesarios se procederá a realizar los siguientes cálculos:

- **Lectura de hidrómetro corregida**

$$R = R' + Cm$$

En donde:

R = Lectura de hidrómetro corregida [g/l]

R' = Lectura de hidrómetro no corregida [g/l]

C_m = Corrección por menisco [g/l]

- **Diámetro de las partículas**

$$D = K \sqrt{\frac{L}{T}}$$

En donde:

D = Diámetro de las partículas [mm]

K = Constante K

T = Tiempo transcurrido [min]

- **Porcentaje más fino**

$$Pasa (\%) = \frac{100 a (R - Cd + Ct)}{W_o}$$

En donde:

Pasa (%) = Porcentaje más fino

a = Constante a

R = Lectura de hidrómetro corregida [g/l]

C_d = Corrección por agente de dispersión y por desplazamiento del punto cero [mm]

C_t = Corrección por temperatura [mm]

2.3.4 Tiempo de Fraguado (NTE INEN 158)

Este ensayo se realizará para cuatro pastas de cemento con diferente porcentaje de sustitución de zeolita (0%,10%,15% y 20%) mediante el siguiente procedimiento:

- a) Determinación de la consistencia normal de la pasta de cemento: previo análisis del tiempo de fraguado se deberá encontrar la consistencia normal, término que hace referencia a la resistencia que opone la pasta a la penetración

de la varilla del aparato manual de Vicat en un tiempo normalizado y se determina cuando la varilla de 10 mm de diámetro penetra $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ bajo la superficie original 30 segundos después de haber sido soltada. Para hallar la consistencia normal de la pasta de cemento se seguirán estos pasos:

1. Pesarse el cemento juntamente con el porcentaje de zeolita para cada caso; la masa total será siempre 650 gramos (cemento + zeolita).
2. En una probeta tomar una cantidad tentativa de agua y registrar su volumen.
3. Colocar toda el agua en el recipiente de mezclado, añadir la masa (cemento + zeolita) y mezclar tal como se describe en NTE INEN 155.
4. Formar una bola con las manos enguantadas y lanzarla una distancia de 15 centímetros entre ambas manos.
5. Introducir la masa en el anillo de Vicat por el extremo más ancho.
6. Colocar el anillo sobre la placa de vidrio dejando libre el extremo menor.
7. Enraizar con una espátula plana la superficie de la pasta sin comprimir la muestra.
8. Centrar la pasta bajo la varilla del aparato manual de Vicat, ajustando la altura para que entre en contacto con la superficie de la muestra y colocar el indicador móvil en cero.
9. Dejar caer la varilla dentro de la mezcla, esperar 30 segundos y registrar la penetración producida en milímetros.
10. Repetir desde el paso 1 hasta obtener una penetración de $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$.

Calcular la consistencia normal de la siguiente manera:

$$C (\%) = \frac{ma \times 100}{mc}$$

En donde:

C (%) = Consistencia normal

ma = Masa del agua [gr]

mc = Masa del cemento [gr]

b) Determinación del tiempo de fraguado: conociendo la consistencia normal para cada porcentaje de sustitución de cemento por zeolita seguir este procedimiento:

1. Preparar la pasta (cemento+ %zeolita) en su estado de consistencia normal tal como se describe en a).
2. Formar una bola con las manos enguantadas y lanzarla una distancia de 15 centímetros entre ambas manos.
3. Introducir la masa en el anillo de Vicat por el extremo más ancho.
4. Colocar el anillo sobre la placa de vidrio dejando libre el extremo menor.
5. Enrazar con una espátula plana la superficie de la pasta sin comprimir la muestra.
6. Centrar la pasta bajo la aguja del aparato automático de Vicat.
7. Iniciar el ensayo previamente configurado en el aparato.

El tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento y el agua y cuando la penetración es de 25 mm se conoce como tiempo de fraguado Vicat o tiempo de fraguado inicial Vicat y se calcula así:

$$\left(\left(\frac{(H - E)}{C - D} \right) \times (C - 25) \right) + E$$

En donde:

E = tiempo en minutos de la última penetración mayor que 25 mm.

H = tiempo en minutos de la primera penetración menor que 25 mm.

C = lectura de penetración al tiempo E.

D = lectura de penetración al tiempo H.

Vicatronic realiza la medición de la penetración desde la placa de vidrio hacia arriba por lo tanto se deberá tomar la lectura de 15 mm como tiempo de fraguado inicial.

La primera medición de la penetración que no marque en la superficie del espécimen una impresión circular completa se denomina tiempo de fraguado final Vicat.

2.3.5 Fabricación de Especímenes de Hormigón (NTE INEN 1576)

Para la fabricación de los especímenes de hormigón se utilizó el método de la densidad óptima desarrollado por la Universidad Central del Ecuador, para ello será necesario obtener las propiedades de los materiales enlistados en la Tabla 10.

Tabla 10. Datos requeridos por el método de la densidad óptima.

Propiedad	Nomenclatura	Norma INEN
Densidad real del cemento	DRC	156
Densidad real de la arena	DRA	856
Densidad real de ripio	DRR	857
Densidad aparente de la arena	DAA	858
Densidad aparente del ripio	DAR	858
Densidad aparente de la arena (compactado)	DAA	858
Densidad aparente del ripio (compactado)	DAR	858
Porcentaje óptimo de arena	POA	858
Módulo de finura de la arena	MFA	696
Porcentaje óptimo de ripio	POR	858
Densidad óptima de la mezcla	DOM	858
Capacidad de absorción de la arena	CAA	856
Capacidad de absorción del ripio	CAR	857
Contenido de humedad de la arena	CHA	856
Contenido de humedad del ripio	CHR	867

Luego de ensayados los materiales y obtenidos los datos necesarios, aplicar el siguiente procedimiento:

1. Seleccionar la relación agua/cemento utilizando la Tabla 11 de acuerdo con la resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días requerida.

Tabla 11. Resistencia a la compresión en función de la relación agua/cemento [57].

f'c (MPa)	Relación agua/cemento (W/C)
45	0.37
42	0.40
40	0.42
35	0.46
32	0.50
30	0.51
28	0.52
25	0.55

24	0.56
21	0.58
18	0.60

2. Calcular la densidad real de la mezcla de los agregados.

$$DRM = \frac{DRA \times POA + DRR \times POR}{100}$$

3. Calcular el porcentaje óptimo de vacíos.

$$POV = \frac{DRM - DOM}{DRM} \times 100$$

4. Calcular la cantidad de pasta de cemento de acuerdo con la Tabla 12.

Tabla 12. Cantidad de pasta según el asentamiento requerido [57].

ASENTAMIENTO (cm)	CANTIDAD DE PASTA (%)
0 - 3	POV + 2% + 3%(POV)
3 - 6	POV + 2% + 6%(POV)
6 - 9	POV + 2% + 8%(POV)
9 - 12	POV + 2% + 11%(POV)
12 - 15	POV + 2% + 13%(POV)

5. Calcular las cantidades en kilogramos de cemento, agua, arena y ripio para 1 m³ de hormigón según las siguientes fórmulas.

- **Cemento (C)**

$$C = \frac{CP}{\frac{W}{C} + \frac{1}{DRC}}$$

- **Agua (W)**

$$W = \frac{W}{C} \times C$$

- **Arena (A)**

$$A = (1000 - CP) \times DRA \times \frac{POA}{100}$$

- **Ripio (R)**

$$R = (1000 - CP) \times DRR \times \frac{POR}{100}$$

Luego de fabricados los especímenes de hormigón se desmoldan y se trasladan al tanque de curado donde permanecen a una temperatura constante de 21° C tal como señala la norma NTE INEN 1576, luego de cumplido el tiempo necesario para cada muestra (edad del hormigón) se procede al ensayo a compresión según NTE INEN 1573, finalmente se tabulan y analizan los resultados en base a los objetivos e hipótesis.

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Luego de realizados los ensayos al cemento CGU y a la zeolita se detalla a continuación un resumen de los resultados obtenidos para cada una de las propiedades físicas como densidad, finura, análisis granulométrico, tiempo de fraguado y resistencia a la compresión de especímenes de hormigón.

En los ensayos de densidad el cemento obtuvo un valor de 2.892 g/cm^3 y la zeolita 2.404 g/cm^3 que como se analizará en los próximos apartados ambos resultados se encuentra dentro de los rangos típicos de cada material.

En los ensayos de finura con el aparato de permeabilidad al aire, se encontró que para el cemento la superficie específica es $476 \text{ m}^2/\text{Kg}$, mientras que para la zeolita este valor sube hasta $569 \text{ m}^2/\text{Kg}$ demostrando que este último material es más fino que el cemento.

En el análisis granulométrico por medio del hidrómetro, se puede graficar la curva granulométrica que muestra la distribución de los diferentes tamaños de partículas en la zeolita, además hallándose que el tamaño promedio de las partículas es de $3.54 \mu\text{m}$.

En el ensayo para la determinación del tiempo de fraguado, se encontró que la zeolita además de requerir una mayor cantidad de agua para entrar en su estado de consistencia normal retarda el proceso de endurecimiento de la pasta de cemento alrededor de 10 minutos en el fraguado inicial por cada 5% de adición de zeolita en comparación con la muestra de control y de 25 a 50 minutos el tiempo de fraguado final bajo las consideraciones antes señaladas.

Los especímenes de hormigón de la muestra patrón (sin zeolita) lograron superar la resistencia de diseño, mientras que las mezclas con sustitución de cemento por zeolita no lograron alcanzar la resistencia mínima requerida para un hormigón de 24 MPa, el análisis a detalle de los resultados se encuentra más adelante.

3.1.1 Densidad Real

Este ensayo se realizó en el laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica para una muestra de cemento tipo CGU y una porción de zeolita verde ZV siguiendo el procedimiento y las recomendaciones de la norma NTE INEN 156. Se realizó el promedio de 3 ensayos realizados consecutivamente por un solo operador para obtener la densidad real de cada material.

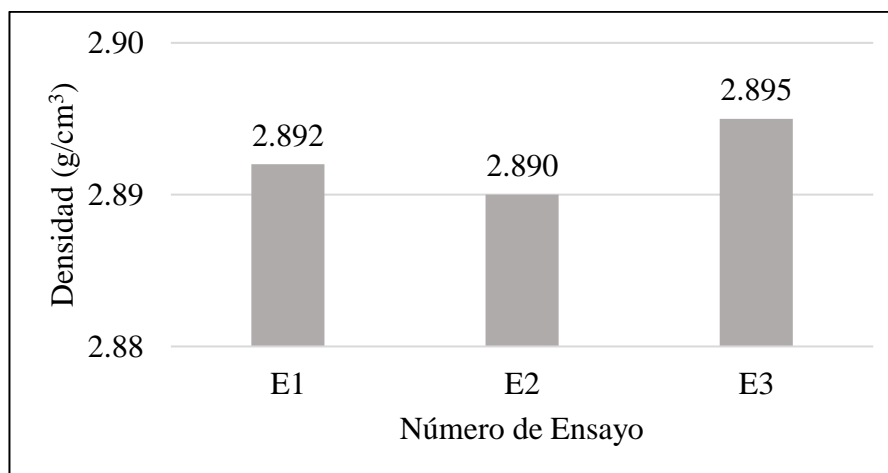
3.1.1.1 Densidad Real del Cemento CGU

Los resultados de las pruebas realizadas al cemento tipo GU se muestran en la Tabla 13 y se comparan en el Gráfico 1.

Tabla 13. Densidad Real del Cemento CGU.

DATOS	DENOMINACIÓN	UNIDAD	E1	E2	E3
Ma	Masa del frasco Le Chatelier +gasolina	g	308.88	301.29	300.69
To	Temperatura inicial en baño de agua	°C	24.9	24.8	24.7
Vo	Volumen inicial del frasco Le Chatelier	cm ³	0.1	0.3	0.0
Mtc	Masa del frasco Le Chatelier +gasolina+ cemento	g	372.21	364.58	364.09
Tf	Temperatura final en baño de agua	°C	24.8	24.8	24.7
Vf	Volumen final del frasco Le Chatelier	cm ³	22.0	22.2	21.9
Mc=Mtc-Ma	Masa del cemento	g	63.33	63.29	63.40
V=Vf-Vo	Volumen de gasolina desplazada	cm ³	21.9	21.9	21.9
DRC=Mc/V	Densidad real del cemento	g/cm ³	2.892	2.890	2.895
DRC \bar{X}	Densidad real promedio	g/cm ³	2.892		

Gráfico 1. Esquema comparativo de los ensayos de densidad real del cemento CGU



Los ensayos realizados con el frasco Le Chatelier arrojaron los resultados de 2.892 g/cm³, 2.890 g/cm³ y 2.895 g/cm³, con una variación que no supera 0.03 g/cm³ entre ensayos tal como nos indica la norma, tomándose un valor promedio de 2.892 g/cm³ como la densidad real del cemento.

La densidad del cemento Portland (tipo GU) típicamente oscila entre 2.90 g/cm³ a 3.15 g/cm³, sin embargo se estableció la validez de este material como cemento de uso general a pesar de obtenerse un valor de 2.892 g/cm³ debido a la irrelevante diferencia de 0.008 g/cm³ y que típicamente en ensayos anteriormente realizados por varias investigaciones en la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato las densidades calculadas para este material oscilan entre 2.85 g/cm³ y 3.10 g/cm³ ya que dependerá del lugar de origen de las materias primas notándose variación incluso entre cementos de la misma marca fabricados en diferentes lugares.

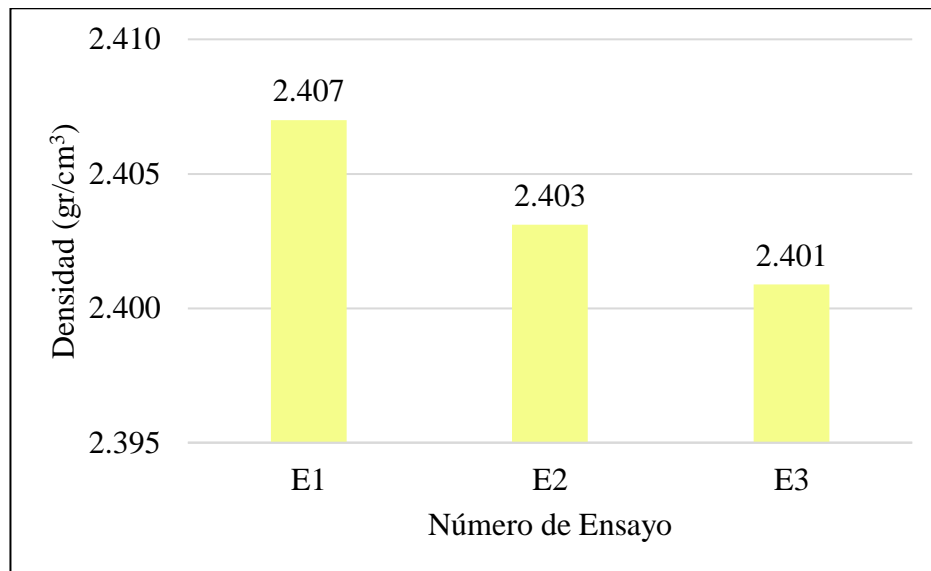
3.1.1.2 Densidad Real de la Zeolita ZV

Los resultados de las pruebas realizadas a la Zeolita Verde tipo Clinoptilolita se muestran en la Tabla 14 y se comparan en el Gráfico 2.

Tabla 14. Densidad Real de la Zeolita ZV.

DATOS	DENOMINACIÓN	UNIDAD	E1	E2	E3
Ma	Masa del frasco Le Chatelier +gasolina	g	319.89	301.21	319.60
To	Temperatura inicial en baño de agua	°C	24.6	24.6	24.7
Vo	Volumen inicial del frasco Le Chatelier	cm ³	0.2	0.3	0.2
Mtz	Masa del frasco Le Chatelier +gasolina+ zeolita	g	374.05	355.52	374.10
Tf	Temperatura final en baño de agua	°C	24.7	24.7	24.7
Vf	Volumen final del frasco Le Chatelier	cm ³	22.7	22.9	22.9
Mz=Mt-Ma	Masa de la zeolita	g	54.16	54.31	54.50
V=Vf-Vo	Volumen de gasolina desplazada	cm ³	22.5	22.6	22.7
DRZ=Mz/V	Densidad real de la zeolita	g/cm ³	2.407	2.403	2.401
DRZ \bar{X}	Densidad real promedio	g/cm ³		2.404	

Gráfico 2. Esquema comparativo de los ensayos de densidad real de la zeolita ZV.

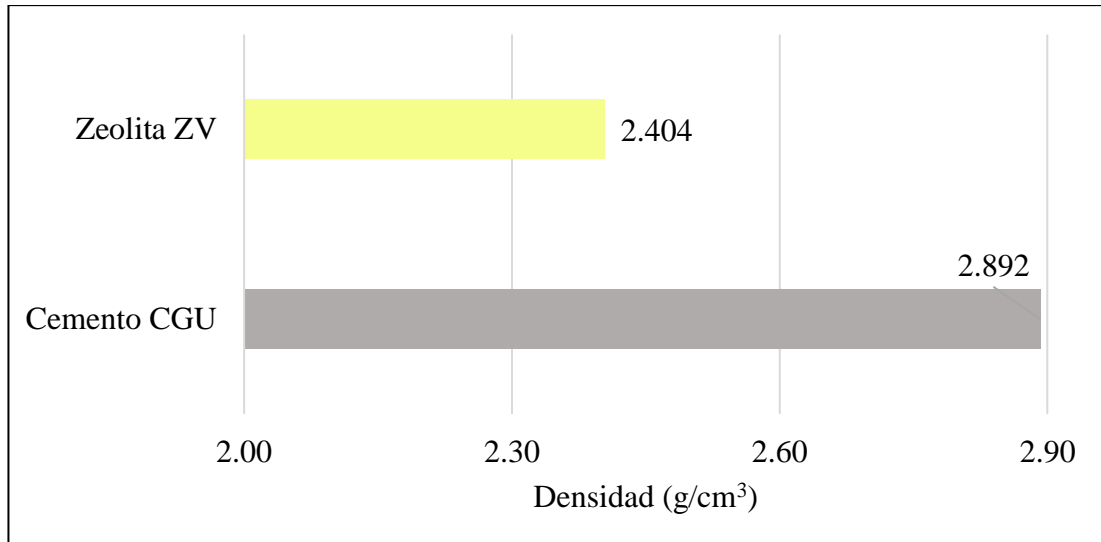


Los ensayos realizados con el frasco Le Chatelier arrojaron los resultados de 2.407 g/cm³, 2.403 g/cm³ y 2.401 g/cm³, con una variación que no supera 0.03 g/cm³ entre ensayos tal como nos indica la norma, tomándose un valor promedio de 2.404 g/cm³ como la densidad real de la zeolita ZV.

Según Breck [60] una de las propiedades de las zeolitas es su baja densidad y gran volumen de vacíos cuando están deshidratadas. En el estudio realizado por Torres [93] el rango de la densidad real de la zeolita natural tipo Clinoptilolita se estableció en 1.90 g/cm³ - 2.80 g/cm³. por tanto, al obtener una densidad de 2.404 g/cm³ se verificó la validez de esta propiedad, señalando además que este dato no se utilizará en el cálculo de la dosificación del concreto.

3.1.1.3 Análisis de Densidades

Gráfico 3. Esquema comparativo de la densidad real del cemento CGU y la zeolita ZV.



Tal como se aprecia en el Gráfico 3 la densidad promedio de la zeolita ZV (2.404 g/cm^3) es menor a la del cemento CGU (2.892 g/cm^3) con una diferencia de 0.488 g/cm^3 lo que representa un 16.87%, esto se debe a que ZV al ser un material más fino en comparación con CGU desplazará un mayor volumen del líquido no reactivo para una misma cantidad de masa o lo que es lo mismo la zeolita necesitará una mayor masa para desplazar un mismo volumen que el cemento.

En este trabajo investigativo se tomarán como adecuados los resultados antes presentados y se continuará el estudio de la zeolita como reemplazo parcial del cemento en la fabricación de concreto estructural ya que la densidad de ambos materiales se encuentra dentro de su rango típico.

3.1.2 Finura método de Blaine

Este ensayo se realizó en el laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica para una muestra de cemento tipo CGU y una porción de zeolita verde ZV siguiendo el procedimiento y las recomendaciones de la norma NTE INEN 196. Se realizó el promedio de 3 ensayos realizados consecutivamente por un solo operador para obtener la finura en términos de superficie específica de cada material.

3.1.2.1 Calibración del aparato de permeabilidad al aire Blaine

Para obtener la finura del cemento primero se realizó la calibración del aparato que consiste en determinar el volumen aparente y la masa requerida de la camada compactada para una muestra de cemento estandarizado SRM 114q, los resultados se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15. Calibración del aparato y preparación de la masa de la muestra.

Tipo y marca de la muestra	Cemento Portland SRM 114q	
Volumen aparente de la camada compactada de polvo		
Número de determinaciones del volumen aparente del cemento	1	2
Temperatura al momento del ensayo [°C]	18	18
WA: Gramos de mercurio requeridos para llenar la celda sin cemento [g]	85.3399	85.3090
WB: Gramos de mercurio requerido para llenar la porción de la celda no ocupada por el lecho de cemento en la celda [g]	60.1168	60.1219
D: Densidad del mercurio a la temperatura del ensayo (Mg/m ³ o g/cm ³)	13.5500	13.5500
V: Volumen aparente del cemento [cm ³]	1.8615	1.8588
V: Promedio del volumen aparente del cemento (fórmula 1 NTE INEN 196) [cm ³]	1.8602	
Masa de la muestra		

D: densidad de la muestra de ensayo (para cemento portland se debe utilizar un valor de 3,15 Mg/m ³ o 3,15 g/cm ³)	3.1500
V: Volumen aparente del cemento [cm ³]	1.8602
Є: porosidad deseada de la camada de cemento (0,500 ± 0,005)	0.5000
W: gramos de muestra requerida (fórmula 2 NTE INEN 196) [g]	2.9297

Luego se realiza el ensayo de permeabilidad para obtener el promedio del intervalo de tiempo medio para una muestra de cemento estandarizado SRM 114q, tal cómo se muestra en la Tabla 16. Este dato nos servirá posteriormente para calcular la finura del cemento CGU y la zeolita ZV.

Tabla 16. *Ensayo de calibración del aparato de permeabilidad al aire (Blaine).*

Tipo y marca de la muestra	Cemento Portland SRM 114q		
Número de determinaciones del tiempo de flujo	1	2	3
T: Temperatura al momento del ensayo [°C]	18	18	18
Ts: Intervalo de tiempo medido [s]	77.38	79.20	78.41
Ts: Promedio del intervalo de tiempo medido [s]	78.33		

3.1.2.2 Finura del Cemento CGU

Para calcular la masa requerida del cemento CGU se utilizará la fórmula 2 de la norma NTE INE 196, tal como se detalla a continuación:

$$W = \rho V(1 - \epsilon)$$

$$W = 3.15 \frac{gr}{cm^3} * 1.8602 cm^3 (1 - 0.53)$$

$$W = 2.7540 gr$$

Para calcular la finura del cemento CGU en términos de superficie específica se utilizará la fórmula 3 de la norma NTE INEN 196 de la siguiente manera:

$$S = \frac{S_s \sqrt{T}}{\sqrt{T_s}}$$

$$S = \frac{381.8 \frac{\text{m}^2}{\text{Kg}} \sqrt{121.41}}{\sqrt{78.33}}$$

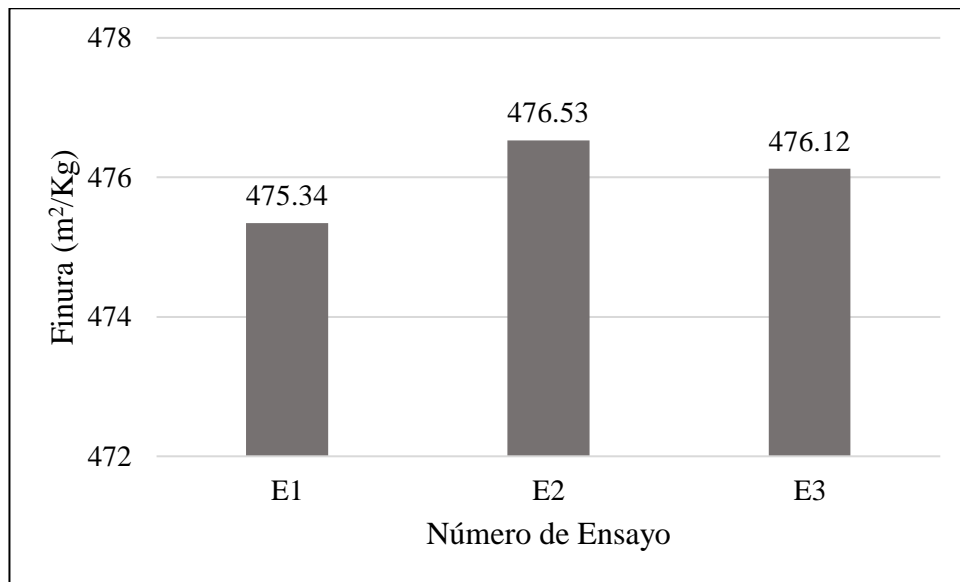
$$S = 475.34 \frac{\text{m}^2}{\text{Kg}}$$

El promedio de los resultados de finura del cemento CGU se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Finura del cemento CGU con el aparato de permeabilidad al aire (Blaine)

Ss: Superficie específica de la muestra normalizada [m ² /kg]	381.8		
Ts: Intervalo de tiempo medido para la muestra normalizada [s]	78.33		
Número de determinaciones del tiempo de flujo	1	2	3
Temperatura al momento del ensayo [°C]	19	19	19
T: Intervalo de tiempo medido para la muestra de ensayo [s]	121.41	122.02	121.81
S: Superficie específica de la muestra de ensayo (fórmula 3 NTE INEN 196) [m ² /kg]	475.34	476.53	476.12
S: Promedio de la superficie específica de la muestra de ensayo [m ² /kg]	476.00		

Gráfico 4. Esquema comparativo de los ensayos de finura del cemento CGU.



Los tres ensayos realizados con el aparato de permeabilidad al aire Blaine arrojaron los siguientes resultados 475.34 m²/Kg, 476.53 m²/Kg y 476.12 m²/Kg, tomándose un valor promedio de 476.00 m²/Kg como la finura en términos de superficie específica del cemento CGU. Según la norma NTE INEN 196 para que los resultados obtenidos por un mismo operador se consideren adecuados no deben diferir en más que 3.4% de su promedio, el coeficiente de variación entre cada ensayo y el promedio resultó respectivamente en 0.14%, 0.11% y 0.025%, por lo tanto, se da una validez al resultado obtenido.

El valor de finura obtenido para el cemento CGU fue de 476 m²/Kg, este valor está dentro del rango que maneja la norma NTE INEN 152 que especifica valores mínimos de finura de 260 m²/kg para cementos tipo: I, IA, II, IIA, y V, motivo por el cual se considera que el ensayo se realizó adecuadamente ya que el resultado obtenido es lógico.

El cemento CGU al tener partículas muy finas gracias a la incorporación de adiciones con un tamaño menor a las partículas de Clinker y yeso molido dispone de un aumento del calor de hidratación (visible principalmente durante el primer periodo de hidratación con una mayor resistencia inicial), menor exudación, mayor docilidad de la mezcla, menor resistencia al ataque de aguas agresivas y una mayor susceptibilidad a la meteorización a causa del almacenaje a largo plazo.

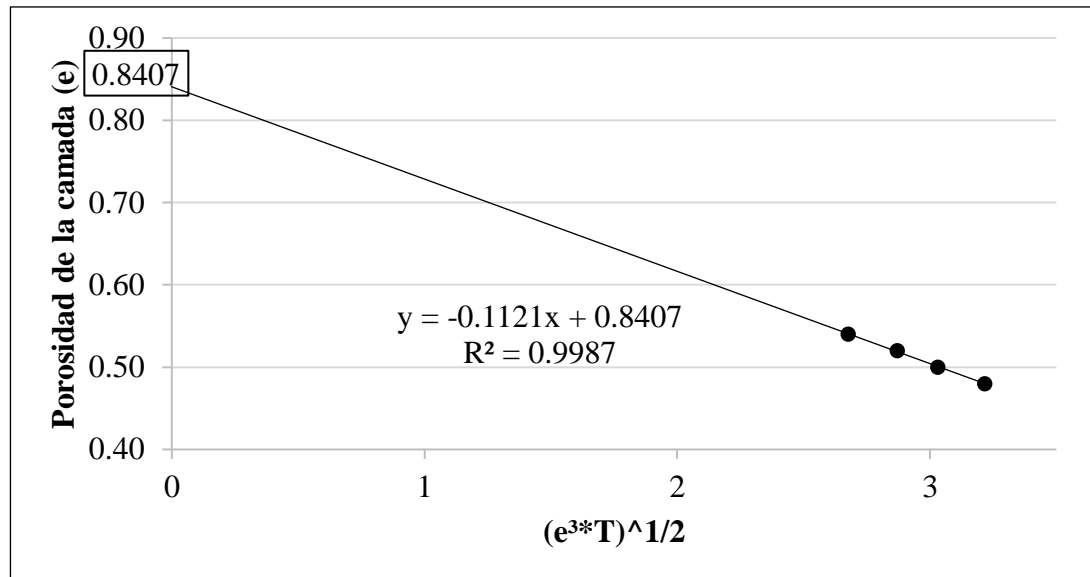
3.1.2.3 Finura de la Zeolita ZV

Para determinar el valor de la constante b , la norma NTE INEN 196 nos recomienda tomar mínimo 3 valores de porosidad en la determinación del tiempo medido de cada muestra, estos resultados se muestran en la Tabla 18 y el cálculo de “ b ” se visualiza en el Gráfico 5.

Tabla 18. Determinación de la constante “ b ” para la Zeolita ZV.

D: densidad de la muestra de ensayo [g/cm ³]		V: Volumen aparente [cm ³]			
2.404		1.8602			
e	W [g]	T [s]			$(e^3 \cdot T)^{1/2}$
		T1	T2	T3	
0.54	2.0567	45.34	45.96	45.25	2.68
0.52	2.1461	58.94	58.66	58.35	2.87
0.50	2.2359	73.60	73.37	73.50	3.03
0.48	2.3250	93.60	94.12	93.18	3.22

Gráfico 5. Constante b para la muestra de Zeolita ZV.



El valor de “ b ” obtenido para la muestra de zeolita ZV es 0.8407 y nos servirá en el cálculo de su superficie específica ya que al tratarse de un material diferente al cemento se utilizará la fórmula 7 de la norma NTE INE 196 tal cómo se señaló en el capítulo anterior. Este dato es lógico teniendo en cuenta que el valor sugerido para cementos Portland es de 0.9 y está relacionado directamente con la densidad de cada material, motivo por el cual se tomará “ b ” como correcto.

Para calcular la masa requerida de zeolita ZV se utilizará la fórmula 2 de la norma NTE INE 196, tal como se detalla a continuación:

$$W = \rho V(1 - \epsilon)$$

$$W = 2.404 \frac{gr}{cm^3} * 1.8602 cm^3 (1 - 0.50)$$

$$W = 2.2359 gr$$

Para calcular la finura de la zeolita ZV en términos de superficie específica se utilizará la fórmula 7 de la norma NTE INEN 196 de la siguiente manera:

$$S = \frac{S_s \rho_s (b_s - \epsilon_s) \sqrt{\epsilon^3} \sqrt{T}}{\rho (b - \epsilon) \sqrt{\epsilon_s^3} \sqrt{T_s}}$$

$$S = \frac{381.8 * 3.15 * (0.9 - 0.5) * \sqrt{0.5^3} * \sqrt{73.6}}{2.404(0.8407 - 0.5) \sqrt{0.5^3} \sqrt{78.33}}$$

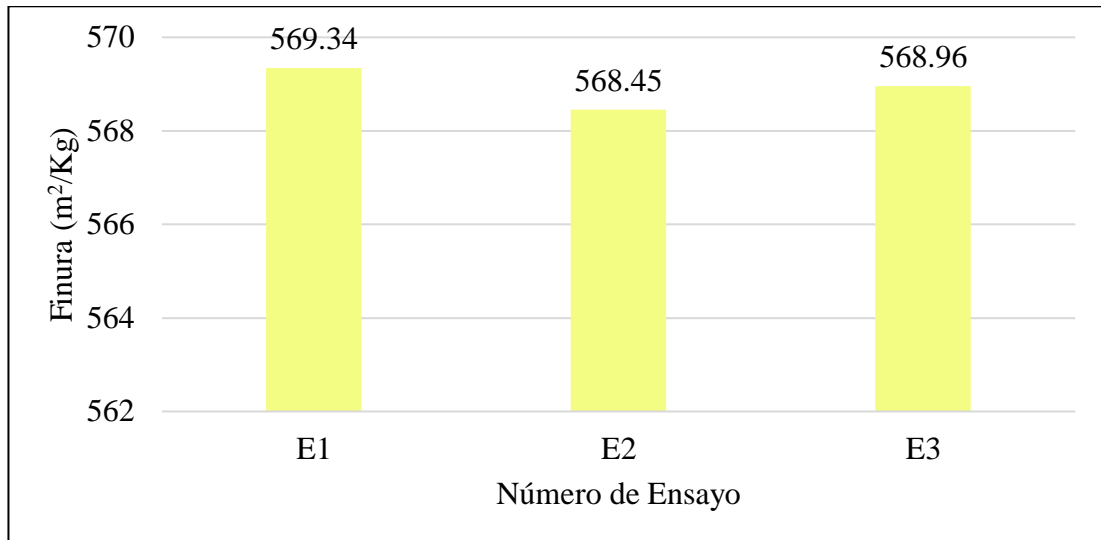
$$S = 569.34 \frac{m^2}{Kg}$$

El promedio de los resultados de finura de la zeolita ZV se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Finura de la zeolita ZV con el aparato de permeabilidad al aire (Blaine)

Ss: Superficie específica de la muestra normalizada, m ² /kg	381.8		
Ts: Intervalo de tiempo medido para la muestra normalizada [s]	78.33		
Número de determinaciones del tiempo de flujo	1	2	3
Temperatura al momento del ensayo [°C]	18	18	18
T: Intervalo de tiempo medido para la muestra de ensayo [s]	73.6	73.37	73.5
S: Superficie específica de la muestra de ensayo (fórmula 7 NTE INEN 196) [m ² /kg]	569.34	568.45	568.96
S: Promedio de la superficie específica de la muestra de ensayo [m ² /kg]	568.92		

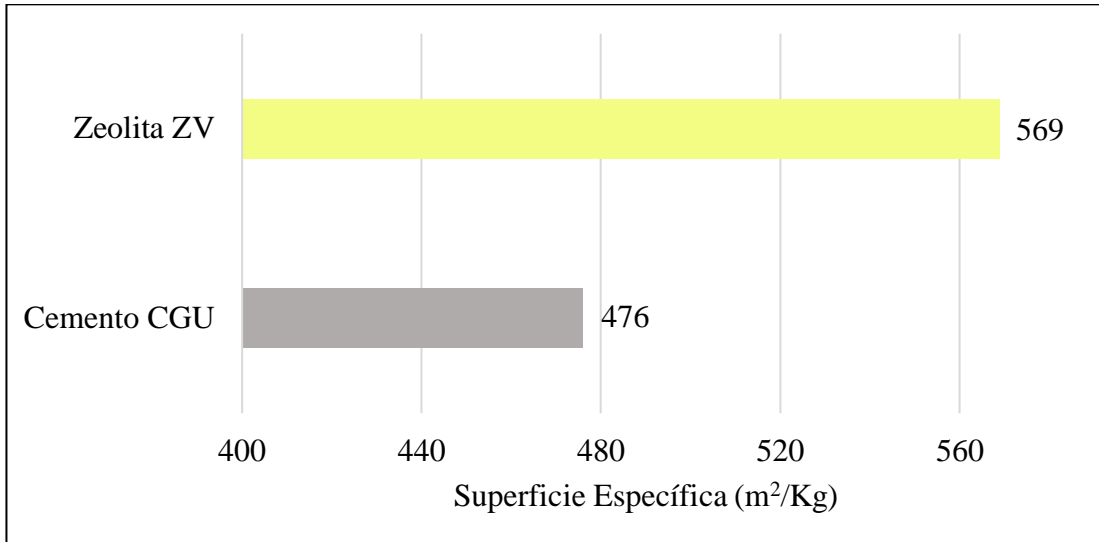
Gráfico 6. Esquema comparativo de los ensayos de finura de la zeolita ZV.



Los tres ensayos realizados para determinar la finura en términos de superficie específica de la zeolita ZV con el aparato de permeabilidad al aire Blaine arrojaron los siguientes resultados $569.34 \text{ m}^2/\text{Kg}$, $568.45 \text{ m}^2/\text{Kg}$ y $568.96 \text{ m}^2/\text{Kg}$, tomándose un valor promedio de $568.92 \text{ m}^2/\text{Kg}$ y redondeándolo a $569.00 \text{ m}^2/\text{Kg}$ tal como se explica en el punto 4.8 de la norma NTE INEN 196 como. En el apartado 4.9 de la norma ya señalada se establece que los resultados obtenidos por un mismo operador se consideran adecuados cuando no difieren en más que 3.4% de su promedio, el coeficiente de variación entre cada ensayo y el promedio resultó respectivamente en 0.07%, 0.08% y 0.07%, por lo tanto, se da una validez al resultado obtenido.

3.1.2.4 Análisis de Finuras

Gráfico 7. Esquema comparativo de la finura del cemento CGU y la zeolita ZV.



Tal como se aprecia en el Gráfico 7 la finura promedio de la zeolita ZV (569 m²/Kg) es mayor a la del cemento CGU (476 m²/Kg) con una diferencia de 93 m²/Kg lo que representa un 16.34%. En los materiales cementantes suplementarios una mayor finura típicamente se traduce en un aumento de la cohesión de la pasta y reducción del agua de sangrado con lo que se evitan defectos dentro del concreto en las interfaces entre los agregados gruesos y la pasta.

3.1.3 Ensayo hidrométrico

Este ensayo se realizó únicamente a la zeolita ZV obteniéndose los resultados de la Tabla 20 y el Gráfico 8.

La nomenclatura utilizada en este ensayo es la siguiente:

T: Tiempo [min]

R': Lectura Hidrómetro [g/litro]

Temp: Temperatura [°C]

Cm: Corrección por Menisco [g/litro]

r': Lectura del hidrómetro, en agua con defloculante únicamente

Ct: Corrección por temperatura [mm]

Cd: Corrección por defloculante y punto cero [mm]

R: Lectura Hidrómetro Corregida por menisco [g/litro]

L: Profundidad Efectiva [cm]

n: Coeficiente Viscosidad del agua [Poises]

K: Constante K

D: Diámetro Máximo [mm]

a: Constante a

Pasa: Porcentaje más fino [%]

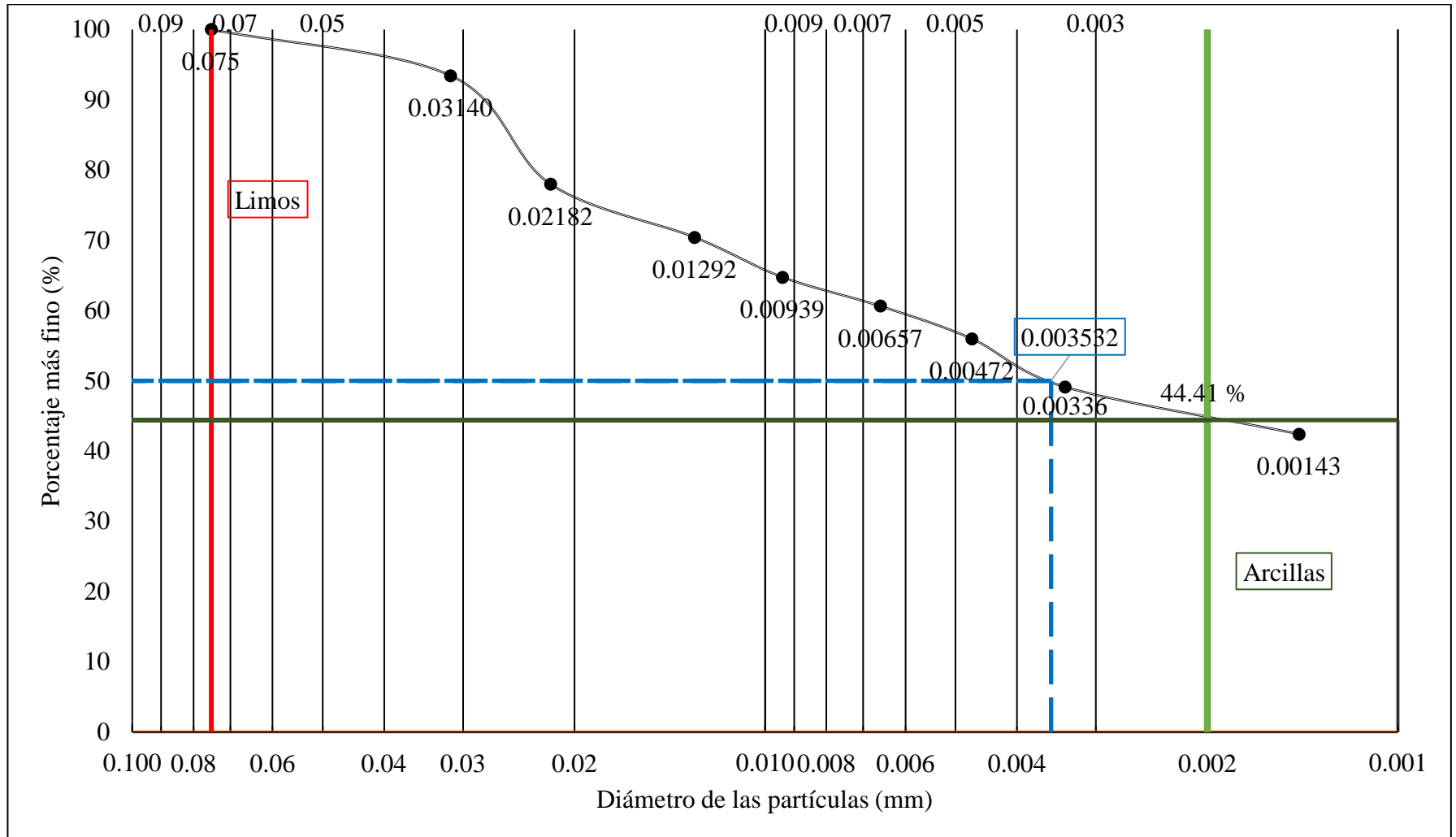
Tabla 20. Análisis granulométrico de la zeolita ZV por hidrómetro.

Hidrómetro	152H	Cilindro	1000ml	Recipiente	S/N	#
Defloculante	Tripolifosfato de sodio	Cm (g/l)	1	Peso recipiente	247.6	g
Fecha preparada	15/4/2021	a	1.065	Peso recipiente + suelo seco	309.6	g
Solución	125 ml	Gs (g/cm³)	2.403	Peso suelo seco	62	g

-

Fecha	Hora	T (min)	R' (g/l)	Temp (°C)	r' (g/l)	Ct (mm)	Cd (mm)	R (g/l)	R-Cd+Ct	L (cm)	n (Poises)	K	D (mm)	Pasa (%)
20/4/2021	8:41	2	45	19.0	8.0	-0.30	-8.70	46.00	54.40	8.8	0.01028	0.01497	0.03140	93.45
20/4/2021	8:45	5	37	17.0	8.0	-0.80	-8.20	38.00	45.40	10.1	0.01081	0.01535	0.02182	77.99
20/4/2021	8:55	15	32	18.0	8.0	-0.50	-8.50	33.00	41.00	10.9	0.01054	0.01516	0.01292	70.43
20/4/2021	9:10	30	28	19.5	8.0	-0.15	-8.85	29.00	37.70	11.5	0.010545	0.01516	0.00939	64.76
20/4/2021	9:40	60	25	20.5	8.0	0.15	-9.15	26.00	35.30	12	0.00991	0.01470	0.00657	60.64
20/4/2021	10:40	120	22	21.0	8.0	0.30	-9.30	23.00	32.60	12.5	0.00979	0.01461	0.00472	56.00
20/4/2021	12:50	250	18	21.0	8.0	0.30	-9.30	19.00	28.60	13.2	0.00979	0.01461	0.00336	49.13
21/4/2021	8:40	1440	15	20.5	8.0	-0.15	-8.85	16.00	24.70	13.7	0.00991	0.01470	0.00143	42.43

Gráfico 8. Análisis granulométrico de la zeolita ZV por medio del hidrómetro.



Teniendo como punto de partida los resultados de la Granulometría la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) nos indica que se trata de un material limo-arcilloso ya que más del 35% pasa el tamiz #200, En el Gráfico 8 se muestra una línea continua de color rojo para indicar el diámetro teórico de 0.075 mm desde el cual se considera la presencia de limos, hasta un diámetro teórico de 0.002 mm, que se indica con una línea continua de color verde, a partir de la cual se considera la presencia de arcillas, notándose que el 44.41% de las partículas son arcillas, las cuales son las que dan la plasticidad al material. En cuanto a los tamaños de las partículas se puede apreciar que el 93.45% de estas son menores a 0.03140 mm lectura que se consigue al primer minuto de iniciado el ensayo, el 42.43% del total de partículas son menores a 0.00143 mm valor que se consigue de la última lectura hecha con el hidrómetro a las 24 horas de iniciado el ensayo finalmente con la curva granulométrica se puede determinar que el diámetro medio de la muestra D50 es 0.003532 mm o 3.53 μm .

3.1.3.1 Análisis entre los diámetros de las partículas del cemento y la zeolita.

La determinación de la distribución del tamaño de partículas es uno de los más análisis más importantes dentro del estudio de suelos, existen varios métodos los cuales se identifican generalmente por el medio, entre ellos tenemos: hidrómetro, pipeta, sensor de presión, rayos x, y el de difracción de rayos láser.

En su tesis, Salcedo [94] realiza la caracterización morfológica mediante el microscopio electrónico de barrido a 15 keV con una magnificación de 2000X. a una muestra de cemento Holcim GU, mismo material que se está usando en la presente investigación, la Figura 34 muestra la morfología del cemento CGU donde se observan partículas en forma de láminas planas, sueltas e irregulares con aristas en parte agudas y otras sutilmente redondeadas, de lo cual se obtuvo un tamaño promedio de las partículas de 3.97 μm .

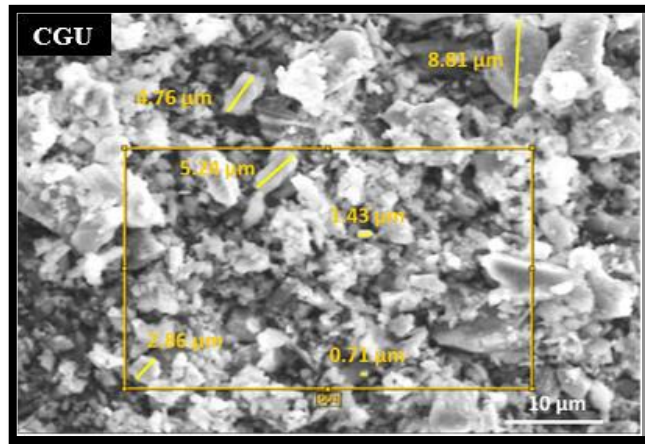
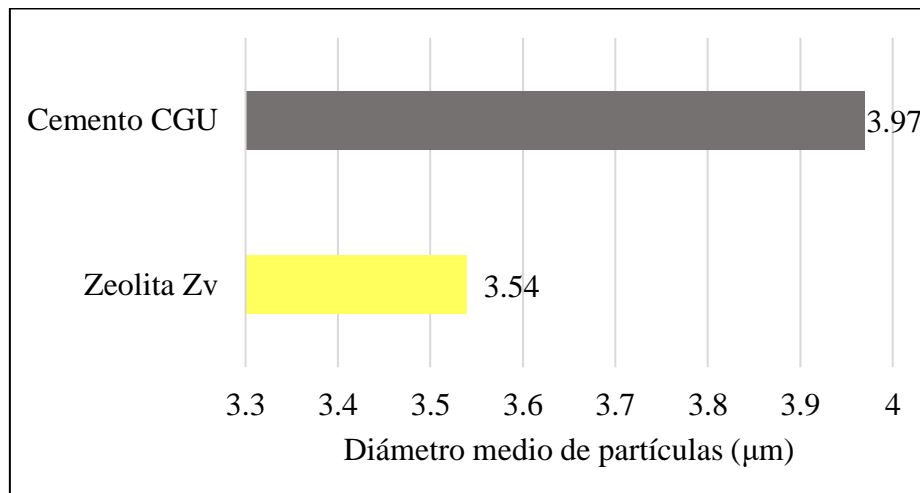


Figura 34. Micrografía SEM Cemento CGU [94].

Como se explicó en el apartado 3.1.3 de este proyecto investigativo, la muestra de zeolita ZV se estudió mediante un ensayo hidrométrico obteniéndose un diámetro medio de la muestra de 3.54 μm, en comparación al análisis del cemento en [94] que arrojó un tamaño medio de 3.97 μm, en el Gráfico 9 se realiza un cotejo entre ambos materiales.

Gráfico 9. Análisis entre los diámetros de las partículas del cemento y la zeolita.



Es evidente que las partículas de la zeolita son más pequeñas que las del cemento en concreto un 11.08 %, además como ya se indicó en el apartado 3.1.2 mediante el aparato de permeabilidad al aire Blaine se pudo determinar que la zeolita es un 16.34 % más fino que el cemento, con esta comparación ambos estudios quedarían validados.

3.1.4 Tiempo de Fraguado

Este ensayo se realizó en el laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica para una muestra de cemento tipo CGU y tres mezclas de cemento con el 10%, 15% y 20% de sustitución de zeolita ZV siguiendo el procedimiento y las recomendaciones de la norma NTE INEN 158. Previa realización del ensayo la pasta de cemento con y sin sustitución de zeolita debe encontrarse en consistencia normal (penetración de 10mm \pm 1mm aguja de Vicat), los resultados de este parámetro se encuentran en la Tabla 21. La diferencia entre los valores de consistencia de las pastas fabricadas sólo con cemento Pórtland y los elaborados con sustituciones de zeolita, hace que la trabajabilidad de estos últimos sea más alta con una fluidez muy baja lo que se verá reflejado al momento del mezclado del hormigón.

Tabla 21. *Consistencia normal del cemento y porcentajes de sustitución de zeolita.*

Sustitución (%)	Masa del cemento (g)	Masa de zeolita (g)	Masa del agua (g)	Penetración (mm)	Consistencia normal (%)
0	650	0	200	9	30.77
10	585.0	65.0	205	9	31.54
15	552.5	97.5	208	9	32.00
20	520.0	130.0	211	10	32.46

Para las pastas modificadas como se observa en la Tabla 21 a medida que se incrementaba el porcentaje de sustitución se incrementaba la demanda de agua, esto debido a la finura, estructura porosa y capacidad de absorción de la zeolita, y como se verá posteriormente los tiempos de fraguado iniciales y finales aumentaron.

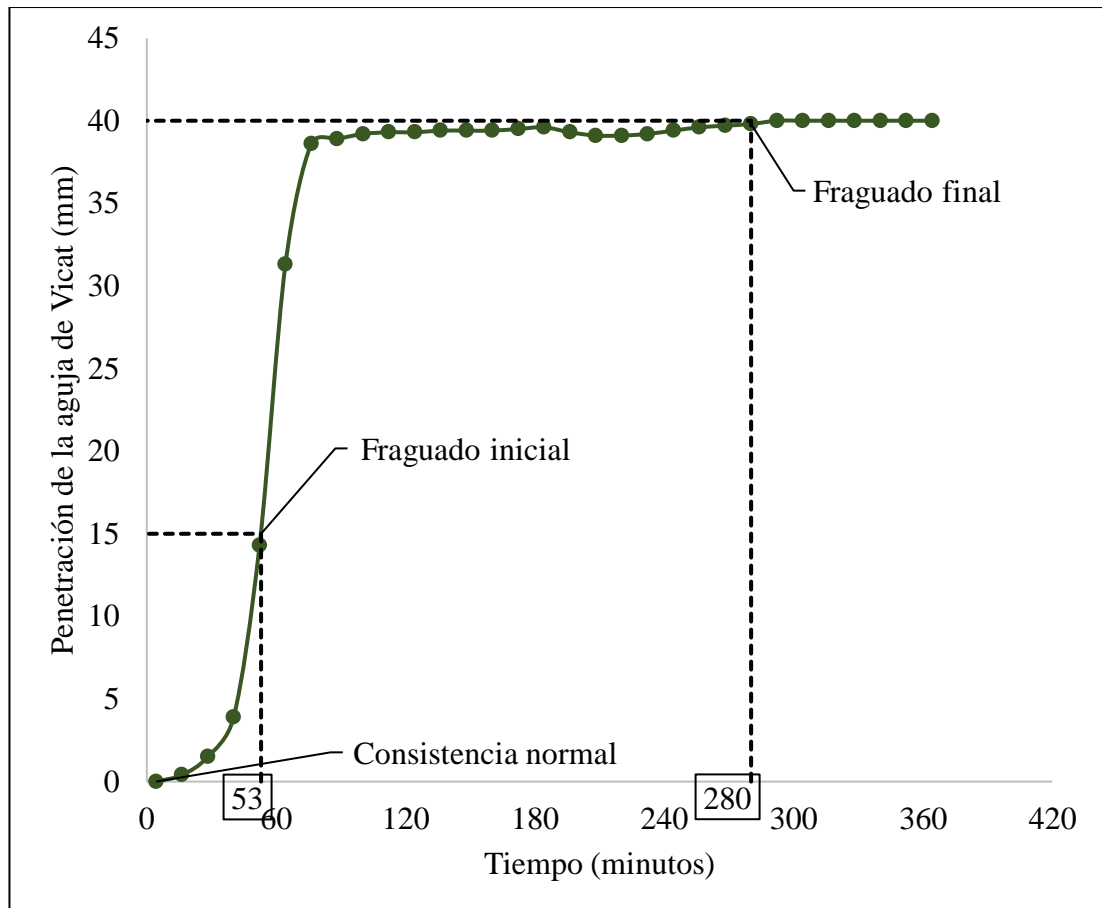
3.1.4.1 Tiempo de fraguado de la pasta de cemento.

El registro de las lecturas completas se encuentra en el Anexo A8.

Tabla 22. Lecturas del aparato automático de Vicat para la muestra de cemento.

Cemento (g) = 650			
Zeolita (g) = 0			
Agua (g) = 200			
Consistencia (%) = 30.77			
Lectura de primera penetración > 25mm C	25.7	Tiempo de la primera penetración > 25mm [min] E	52.3
Lectura de la última penetración < 25mm D	8.7	Tiempo última penetración < 25mm [min] H	64.3
Tiempo de fraguado inicial [min]	53	Tiempo de fraguado final [min]	280

Gráfico 10. Tiempo de fraguado de la pasta de cemento.



El gráfico 10 representa la penetración de la aguja de Vicat en la pasta de cemento a lo largo del tiempo, el fraguado inicial se da cuando la aguja penetra 25 mm medido desde la superficie libre o 15 mm medido desde la placa de vidrio hacia arriba (Vicatronic), para este caso dicha medida se obtuvo a los 53 minutos luego del contacto entre la mezcla y el agua. El fraguado final se dio a los 280 minutos (4 horas y 40 minutos) y se obtiene cuando la aguja de Vicat no deja huella en la superficie de la mezcla, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los parámetros recomendados por la NTE INEN 2380 que establece un tiempo de fraguado inicial no menor a 45 minutos y no más de 420 minutos.

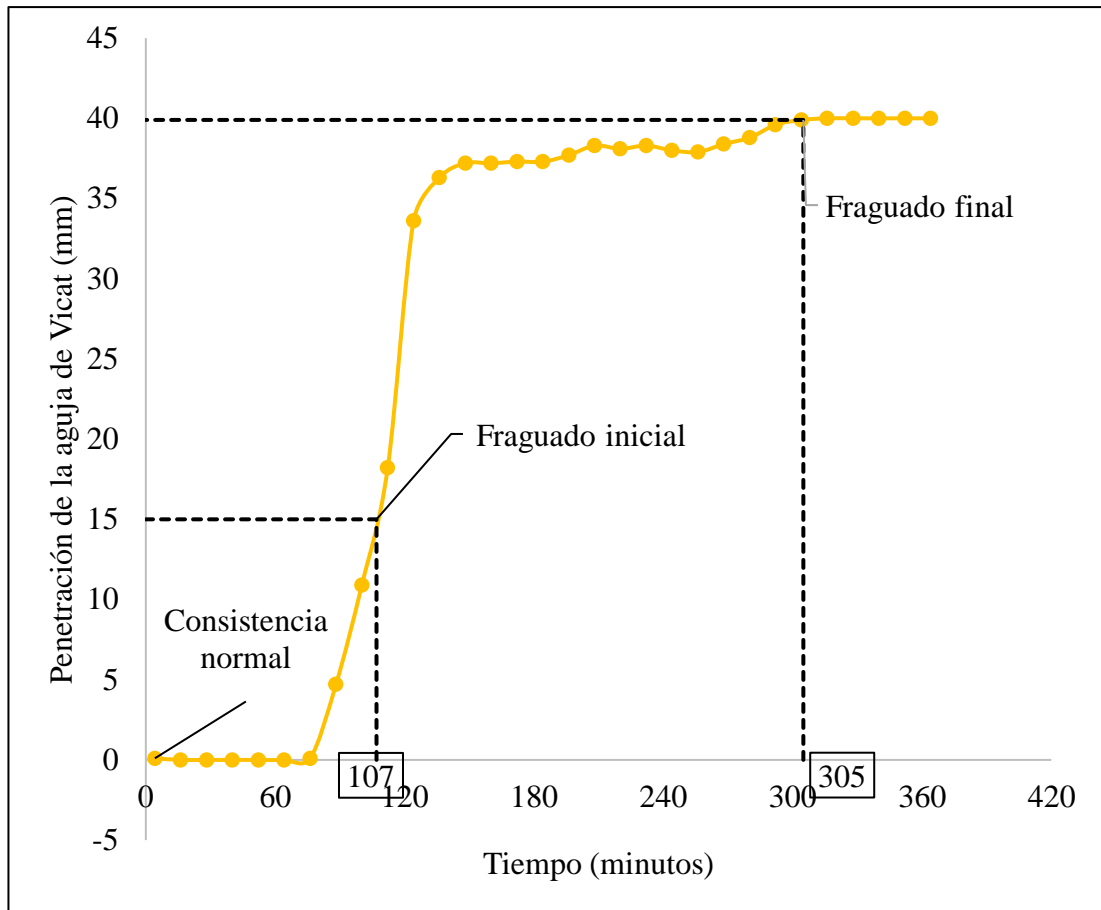
3.1.4.2 Tiempo de fraguado de la pasta de cemento con 10% de sustitución por zeolita.

El registro de las lecturas completas se encuentra en el Anexo A9.

Tabla 23. Lecturas del aparato automático de Vicat para la mezcla Z10.

Cemento (g) = 585			
Zeolita (g) = 65			
Agua (g) = 205			
Consistencia (%) = 31.54			
Lectura de primera penetración > 25mm C	29.1	Tiempo de la primera penetración > 25mm [min] E	100.2
Lectura de la última penetración < 25mm D	21.8	Tiempo última penetración < 25mm [min] H	112.2
Tiempo de fraguado inicial [min]	107	Tiempo de fraguado final [min]	305

Gráfico 11. Tiempo de fraguado de la pasta del cemento con 10% de sustitución por zeolita.



El Gráfico 11 representa la penetración de la aguja de Vicat en la pasta de cemento con 10% de sustitución por zeolita a lo largo del tiempo, el fraguado inicial se da cuando la aguja penetra 25 mm medido desde la superficie libre o 15 mm medido desde la placa de vidrio hacia arriba (Vicatrónica), para este caso dicha medida se obtuvo a los 107 minutos (1 hora y 47 minutos) luego del contacto entre la mezcla y el agua. El fraguado final se dio a los 305 minutos (5 horas y 5 minutos) y se obtuvo cuando la aguja de Vicat no deja huella en la superficie de la mezcla, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los parámetros recomendados por la NTE INEN 2380 que establece un tiempo de fraguado inicial no menor a 45 minutos y no más de 420 minutos.

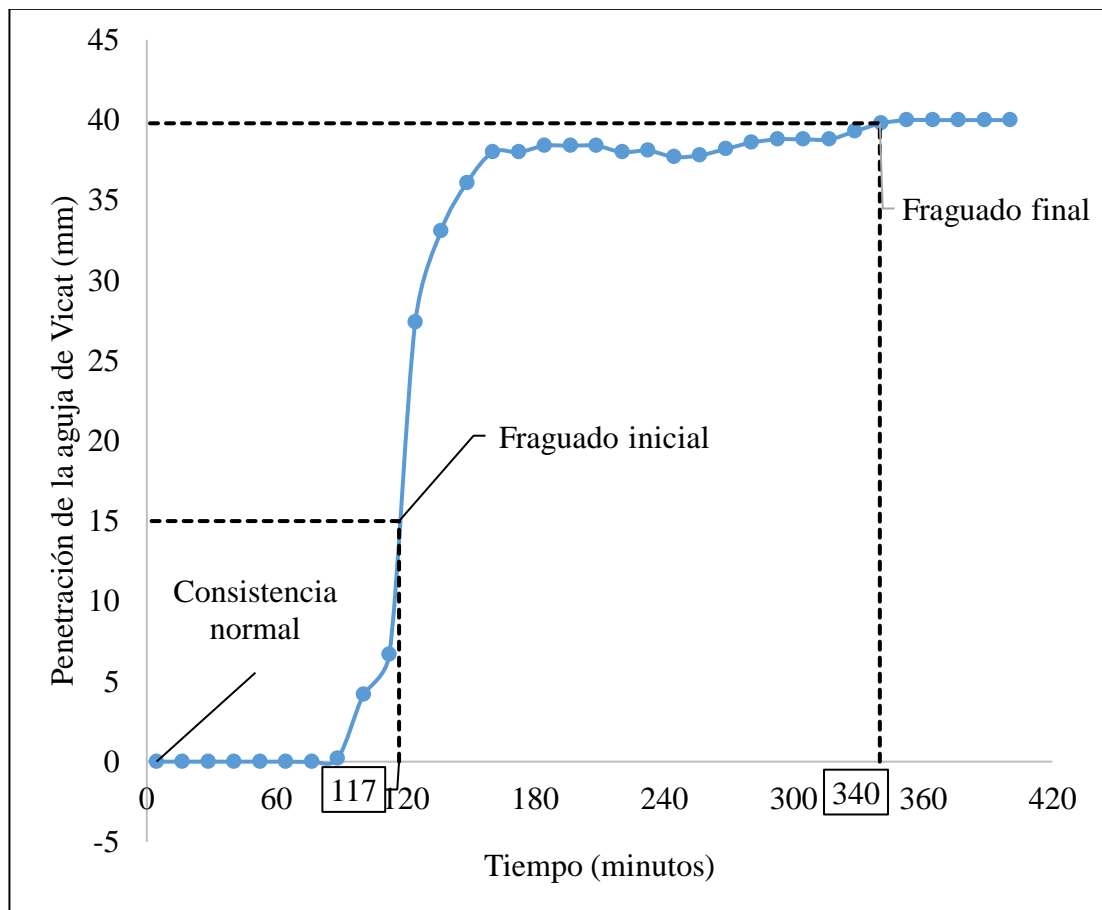
3.1.4.3 Tiempo de fraguado de la pasta de cemento con 15% de sustitución por zeolita.

El registro de las lecturas completas se encuentra en el Anexo A10.

Tabla 24. Lecturas del aparato automático de Vicat para la mezcla Z15.

Cemento (g) = 552.50			
Zeolita (g) = 97.5			
Agua (g) = 208			
Consistencia (%) = 32.00			
Lectura de primera penetración > 25mm C	33.3	Tiempo de la primera penetración > 25mm [min] E	112.52
Lectura de la última penetración < 25mm D	12.6	Tiempo última penetración < 25mm [min] H	124.52
Tiempo de fraguado inicial [min]	117	Tiempo de fraguado final [min]	340

Gráfico 12. Tiempo de fraguado de la pasta de cemento con 15% de sustitución por zeolita.



El gráfico 12 representa la penetración de la aguja de Vicat en la pasta de cemento con 15% de sustitución por zeolita a lo largo del tiempo, el fraguado inicial se da cuando la aguja penetra 25 mm medido desde la superficie libre o 15 mm medido desde la placa de vidrio hacia arriba (Vicatronic), para este caso dicha medida se obtuvo a los 117 minutos (1 hora y 57 minutos) luego del contacto entre la mezcla y el agua. El fraguado final se dio a los 340 minutos (5 horas y 40 minutos) y se obtiene cuando la aguja de Vicat no deja huella en la superficie de la mezcla, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los parámetros recomendados por la NTE INEN 2380 que establece un tiempo de fraguado inicial no menor a 45 minutos y no más de 420 minutos.

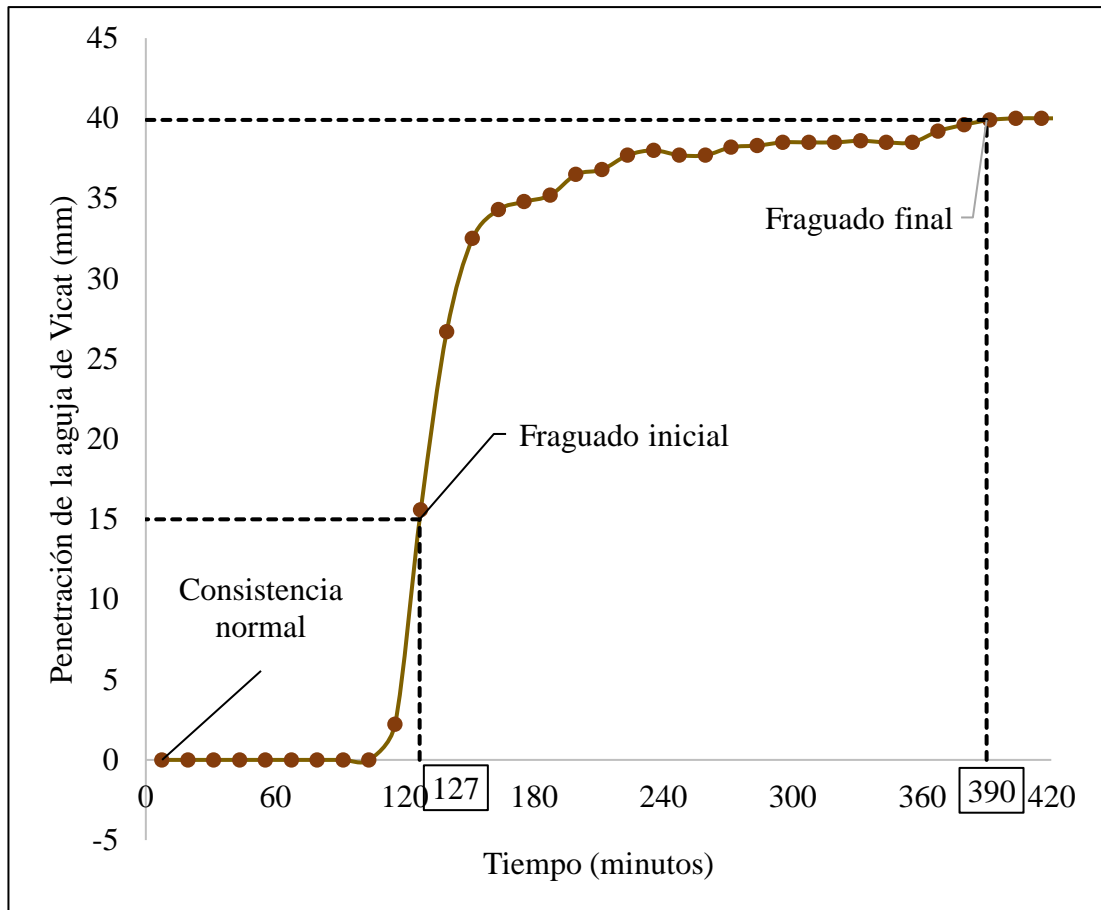
3.1.4.4 Tiempo de fraguado de la pasta de cemento con 20% de sustitución por zeolita.

El registro de las lecturas completas se encuentra en el Anexo A11.

Tabla 25. Lecturas del aparato automático de Vicat para la mezcla Z20

Cemento (g) = 520			
Zeolita (g) = 130			
Agua (g) = 211			
Consistencia (%) = 32.46			
Lectura de primera penetración > 25mm C	37.8	Tiempo de la primera penetración > 25mm [min] E	115.56
Lectura de la última penetración < 25mm D	24.4	Tiempo última penetración < 25mm [min] H	127.56
Tiempo de fraguado inicial [min]	127	Tiempo de fraguado final [min]	390

Gráfico 13. Tiempo de fraguado de la pasta de cemento con 20% de sustitución por zeolita.



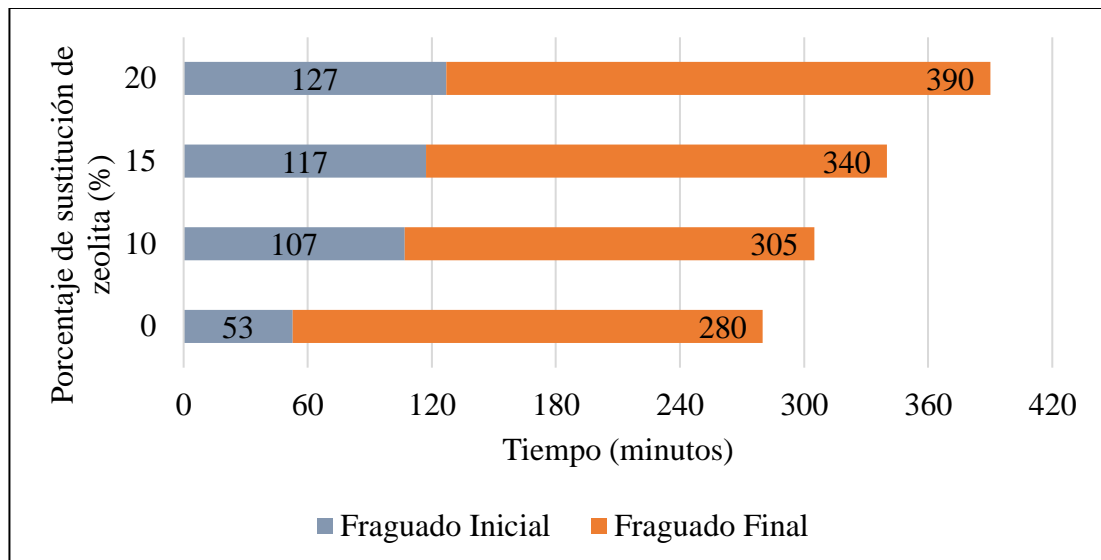
El gráfico 13 representa la penetración de la aguja de Vicat en la pasta de cemento con 20% de sustitución por zeolita a lo largo del tiempo, el fraguado inicial se da cuando la aguja penetra 25 mm medido desde la superficie libre o 15 mm medido desde la placa de vidrio hacia arriba (Vicatron), para este caso dicha medida se obtuvo a los 127 minutos (2 horas y 7 minutos) luego del contacto entre la mezcla y el agua. El fraguado final se dio a los 390 minutos (6 horas y 30 minutos) y se obtiene cuando la aguja de Vicat no deja huella en la superficie de la mezcla, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los parámetros recomendados por la NTE INEN 2380 que establece un tiempo de fraguado inicial no menor a 45 minutos y no más de 420 minutos.

3.1.4.5 Comparación del tiempo de fraguado del cemento y porcentajes de sustitución de zeolita.

Tabla 26. Tiempo de fraguado diferentes mezclas.

Sustitución (%)	Consistencia (%)	Tiempo de fraguado inicial (min)	Tiempo de fraguado final (min)
0	30.77	53	280
10	31.54	107	305
15	32.00	117	340
20	32.46	127	390

Gráfico 14. Análisis de los tiempos de fraguado.



En el Gráfico 14 se puede constatar que la pasta de cemento sin zeolita logra su fraguado inicial a los 53 minutos y su fraguado final a los 280 minutos en comparación a las mezclas que contenían zeolita que claramente muestran una tendencia al alza. Se puede notar que a medida que se aumenta 5% zeolita (10, 15 Y 20%) se suman 10 minutos al fraguado inicial y para el fraguado final el mismo porcentaje aumenta en promedio 30 minutos, sin embargo, todas las muestras se encuentran dentro de los parámetros recomendados por la NTE INEN 2380 lo que hace intuir que la sustitución parcial de zeolita por cemento hasta un 20% no impide el fraguado de la mezcla solo lo retrasa obteniéndose mayores tiempos de manejabilidad y por ende una mejor colocación del concreto.

3.1.5 Diseño de la mezcla método de la densidad óptima

Los resultados de los ensayos necesarios para la utilización de este método se describen en la Tabla 27.

Tabla 27. Resultados de los ensayos para la dosificación del hormigón.

Propiedad	Nomenclatura	Valor	Unidad	Anexos
Densidad real del cemento	DRC	2.892	kg/dm ³	Tabla 13
Densidad real de la arena	DRA	2.597	kg/dm ³	A1
Densidad real de ripio	DRR	2.641	kg/dm ³	A2
Densidad aparente de la arena	DAA	1.579	kg/dm ³	A3
Densidad aparente del ripio	DAR	1.292	kg/dm ³	A3
Densidad aparente de la arena (compactado)	DAA	1.755	kg/dm ³	A4
Densidad aparente del ripio (compactado)	DAR	1.431	kg/dm ³	A4
Porcentaje óptimo de arena	POA	48.00	%	A5
Módulo de finura de la arena	MFA	2.765	%	A6
Porcentaje óptimo de ripio	POR	52.00	%	A5
Densidad óptima de la mezcla	DOM	1.933	kg/dm ³	A5
Capacidad de absorción de la arena	CAA	1.864	%	A1
Capacidad de absorción del ripio	CAR	3.172	%	A2
Contenido de humedad de la arena	CHA	0.978	%	A7
Contenido de humedad del ripio	CHR	0.682	%	A7

La resistencia f'_c buscada para el hormigón de diseño es 24 MPa, el siguiente procedimiento fue utilizado para su dosificación:

1. Seleccionar la relación agua/cemento utilizando la Tabla 11 de acuerdo con la resistencia a la compresión del hormigón a los 28 días requerida.

$$W/C = 0.56$$

2. Calcular la densidad real de la mezcla de los agregados.

$$DRM = \frac{DRA \times POA + DRR \times POR}{100}$$

$$DRM = \frac{2.597 \text{ kg/dm}^3 \times 48 + 2.641 \text{ kg/dm}^3 \times 52}{100}$$

$$DRM = 2.620 \text{ kg/dm}^3$$

3. Calcular el porcentaje óptimo de vacíos.

$$POV = \frac{DRM - DOM}{DRM} \times 100$$

$$POV = \frac{2.620\text{kg/dm}^3 - 1.933\text{kg/dm}^3}{2.620\text{kg/dm}^3} \times 100$$

$$POV = 26.22\%$$

4. Calcular la cantidad de pasta de cemento de acuerdo con la Tabla 12. Se escogió un asentamiento de 6 a 9 cm por tanto la formula será:

$$CP = POV + 2\% + 8\%(POV)$$

$$CP = 26.22 + 2 + 8\%(26.22)$$

$$CP = 30.301\%$$

$$CP = 303.01 \text{ dm}^3$$

5. Calcular las cantidades en kilogramos de cemento, agua, arena y ripio para 1 m³ de hormigón según las siguientes fórmulas:

Dosificación por Volumen:

- **Cemento (C)**

$$C = \frac{CP}{\frac{W}{C} + \frac{1}{DRC}}$$

$$C = \frac{303.01 \text{ dm}^3}{0.56 + \frac{1}{2.892\text{kg/dm}^3}}$$

$$C = 334.55 \text{ Kg}$$

- **Agua (W)**

$$W = \frac{W}{C} \times C$$

$$W = 0.56 \times 334.55 \text{ Kg}$$

$$W = 187.35 \text{ Kg}$$

- **Arena (A)**

$$A = (1000 - CP) \times DRA \times \frac{POA}{100}$$

$$A = (1000 - 303.01 \text{ dm}^3) \times 2.597 \text{ kg/dm}^3 \times \frac{48}{100}$$

$$A = 868.82 \text{ Kg}$$

- **Ripio (R)**

$$R = (1000 - CP) \times DRR \times \frac{POR}{100}$$

$$R = (1000 - 303.01 \text{ dm}^3) \times 2.641 \text{ kg/dm}^3 \times \frac{52}{100}$$

$$R = 957.24 \text{ Kg}$$

3.1.5.1 Dosificación para los especímenes de Hormigón

Este estudio analizará la influencia al sustituir tres porcentajes (10%, 15%, 20%) de zeolita ZV por el cemento CGU en la dosificación del concreto y se realizarán ensayos de compresión a cuatro edades (7 días, 14 días, 28 días, 56 días), por lo tanto, se necesitarán fabricar 12 especímenes por cada porcentaje, adicionalmente se utilizará una muestra de control sin sustitución de zeolita obteniéndose un total de 48 probetas.

Se utilizarán moldes de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, se busca obtener un espécimen como se muestra en la Figura 35.

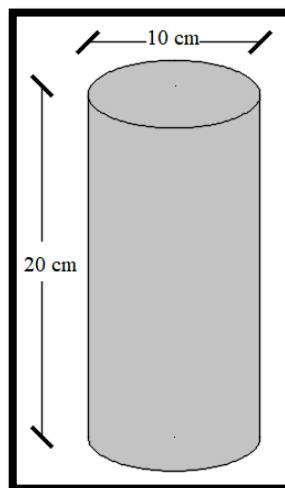


Figura 35. *Especimen de hormigón.*

Para calcular el rendimiento de la mezcla se utilizará la siguiente fórmula:

$$R = \frac{1000}{W + VAC + VAA + VAR} \times 100$$

Dónde:

R= Rendimiento [%]

W= Cantidad de Agua [Kg]

VAC= Volumen aparente de Cemento [dm³]

VAA= Volumen aparente de Arena [dm³]

VAR= Volumen aparente de Ripio [dm³]

$$VAC = \frac{C}{DAC}$$

$$VAC = \frac{334.55 \text{ Kg}}{1.5 \text{ Kg/ dm}^3}$$

$$VAC = 223.04 \text{ dm}^3$$

Dónde:

C= Cantidad de Cemento [Kg]

DAC= Densidad Aparente del Cemento (1.5 recomendado) [Kg/ dm³]

$$VAA = \frac{A}{DAA}$$

$$VAA = \frac{868.82 \text{ Kg}}{1.579 \text{ Kg/ dm}^3}$$

$$VAA = 550.08 \text{ dm}^3$$

Dónde:

A= Cantidad de Arena [Kg]

DAA= Densidad Aparente de la Arena [Kg/ dm³]

$$VAR = \frac{R}{DAR}$$

$$VAR = \frac{957.24 \text{ Kg}}{1.292 \text{ Kg/ dm}^3}$$

$$VAR = 740.92 \text{ dm}^3$$

Dónde:

R= Cantidad de Ripio [Kg]

DAR= Densidad Aparente del Ripio [Kg/ dm³]

$$R = \frac{1000}{187.35 \text{ dm}^3 + 223.04 \text{ dm}^3 + 550.08 \text{ dm}^3 + 740.92 \text{ dm}^3} \times 100$$

$$R = 58.78 \%$$

El cálculo de la dosificación para cada porcentaje de sustitución será el siguiente:

$$VHc\% = \left(\pi * \frac{D^2}{4} * H \right) * \# \text{ Especímenes}$$

Dónde:

VHc%= Volumen de Hormigón necesario para cada porcentaje

D= Diámetro del molde

H= Altura del molde

$$VHc\% = \left(\pi * \frac{0.1m^2}{4} * 0.2m \right) * 12$$

$$VHc\% = 0.01885 \text{ m}^3$$

Considerando el rendimiento de la mezcla el volumen final requerido por cada porcentaje será:

$$VH^o = VHc\% \times (1 + (1 - R))$$

$$VH^\circ = 0.01885 \text{ m}^3 \times (1 + (1 - 0.5878))$$

$$VH^\circ = 0.02662 \text{ m}^3$$

La dosificación de Hormigón para volumen final requerido será:

$$DH^\circ = \text{Dosificación por volumen} * VH^\circ$$

Tabla 28. Dosificación para la mezcla de control.

Mezcla Id.	Sustitución parcial (%)	Cantidad en kg por cada m ³ de hormigón			
		Agua (kg/m ³)	Cemento (kg/m ³)	Arena (kg/m ³)	Grava (kg/m ³)
CEM	0	187.35	334.55	868.82	957.24

Tabla 29. Dosificación de la mezcla de control para 12 especímenes sin corrección por humedad.

Agua (lt)	Cemento (kg)	Zeolita (kg)	Arena (kg/m ³)	Grava (kg/m ³)
4.99	8.91	0	23.13	25.48

Se debe considerar que las cantidades de material obtenidos anteriormente son aplicables cuando los agregados se encuentran en condiciones de saturada superficie seca (SSS) sin embargo, en obra es muy difícil tener esas condiciones, por tanto, se requiere realizar la corrección de la dosificación por humedad. Para esto es necesario determinar el contenido de humedad que presentan los agregados fino y grueso un día antes de hacer la mezcla y se utilizarán las siguientes fórmulas [58]:

Corrección de la cantidad de arena en la dosificación.

$$CArena = Masa(arena) * \frac{100 + \%humedad(arena)}{100 + \%absorción(arena)}$$

$$CArena = 23.13 \text{ Kg} * \frac{100 + 0.978}{100 + 1.864}$$

$$CArena = 22.92 \text{ Kg}$$

Corrección de la cantidad de ripio en la dosificación.

$$CRipio = Masa(ripió) * \frac{100 + \%humedad(ripió)}{100 + \%absorción(ripió)}$$

$$CRipio = 25.48 Kg * \frac{100 + 0.68}{100 + 3.17}$$

$$CRipio = 24.85 Kg$$

En la muestra de control (CEM) se utilizó 0.84 litros de agua adicional y en las muestras con sustitución de zeolita (Z10, Z15, Z20) a más del agua adicional se utilizó 0.5% de plastificante por masa de “cemento” (cemento + zeolita) para conseguir el asentamiento. Para la elaboración de los especímenes se utilizó vibrador mecánico en todos los casos.

En la Tabla 30 se muestra la dosificación para cada porcentaje de sustitución.

Tabla 30. Resumen de la dosificación por cada porcentaje de sustitución de zeolita.

Mezcla Id.	Sustitución parcial (%)	Agua (lt)	Cemento (kg)	Zeolita (kg)	Arena (kg/m ³)	Grava (kg/m ³)	Plastificante (ml)
CEM	0	5.83	8.91	0.00	22.92	24.85	0
Z10	10	5.83	8.02	0.89	22.92	24.85	44.55
Z15	15	5.83	7.57	1.34	22.92	24.85	44.55
Z20	20	5.83	7.12	1.78	22.92	24.85	44.55

3.1.6 Propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido

3.1.6.1 Mezcla de Control

Tabla 31. Propiedades del hormigón fresco para la mezcla de control.

Sustitución por zeolita natural (%)	Asentamiento (cm)	Trabajabilidad	Homogeneidad
0.00	5.00	Buena	Buena

Tabla 32. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla CEM a los 7 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
CEM-7A	0.100	0.200	0.0016	7.732	11.442	2361.86		3.663	2331.94	
CEM-7B	0.100	0.200	0.0016	7.720	11.431	2362.50	2361.65	3.669	2335.76	2334.70
CEM-7C	0.100	0.200	0.0016	7.730	11.438	2360.59		3.670	2336.39	

Tabla 33. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla CEM a los 14 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
CEM-14B	0.100	0.200	0.0016	7.727	11.437	2361.86		3.672	2337.67	
CEM-14C	0.100	0.200	0.0016	7.732	11.443	2362.50	2362.07	3.676	2340.21	2337.88
CEM-14D	0.100	0.200	0.0016	7.720	11.430	2361.86		3.669	2335.76	

Tabla 34. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla CEM a los 28 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
CEM-28A	0.100	0.200	0.0016	7.748	11.457	2361.22		3.681	2343.40	
CEM-28C	0.100	0.200	0.0016	7.727	11.438	2362.50	2362.26	3.676	2340.21	2342.52
CEM-28E	0.100	0.200	0.0016	7.732	11.442	2363.06		3.680	2343.95	

Tabla 35. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla CEM a los 56 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
CEM-56A	0.100	0.200	0.0016	7.746	11.458	2363.13		3.688	2347.85	
CEM-56B	0.100	0.200	0.0016	7.731	11.437	2359.31	2361.86	3.686	2346.58	2346.16
CEM-56C	0.100	0.200	0.0016	7.735	11.447	2363.13		3.682	2344.03	

3.1.6.2 Sustitución del 10% de zeolita ZV por cemento CGU

Tabla 36. *Propiedades del hormigón fresco de la mezcla Z10*

Sustitución por zeolita natural (%)	Asentamiento (cm)	Trabajabilidad	Homogeneidad
10.00	4.00	Buena	Buena

Tabla 37. *Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla Z10 a los 7 días.*

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Z10-7A	0.100	0.200	0.0016	7.732	11.431	2354.86		3.652	2324.94	
Z10-7C	0.100	0.200	0.0016	7.730	11.428	2354.22	2354.86	3.651	2324.30	2324.94
Z10-7F	0.100	0.200	0.0016	7.730	11.430	2355.49		3.653	2325.57	

Tabla 38. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla Z10 a los 14 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Z10-14B	0.100	0.200	0.0016	7.730	11.429	2354.86		3.656	2327.48	
Z10-14D	0.100	0.200	0.0016	7.724	11.426	2356.77	2355.07	3.653	2325.57	2326.85
Z10-14E	0.100	0.200	0.0016	7.728	11.425	2353.58		3.656	2327.48	

Tabla 39. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla Z10 a los 28 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Z10-28B	0.100	0.200	0.0016	7.716	11.417	2356.13		3.655	2326.85	
Z10-28D	0.100	0.200	0.0016	7.721	11.420	2354.86	2355.71	3.665	2333.21	2331.94
Z10-28F	0.100	0.200	0.0016	7.719	11.420	2356.13		3.669	2335.76	

Tabla 40. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla Z10 a los 56 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Z10-56B	0.100	0.200	0.0016	7.728	11.427	2354.86		3.663	2331.94	
Z10-56D	0.100	0.200	0.0016	7.730	11.428	2354.22	2354.43	3.665	2333.21	2335.55
Z10-56F	0.100	0.200	0.0016	7.732	11.430	2354.22		3.678	2341.49	

3.1.6.3 Sustitución del 15% de zeolita ZV por cemento CGU

Tabla 41. *Propiedades del hormigón fresco de la mezcla Z15.*

Sustitución por zeolita natural (%)	Asentamiento (cm)	Trabajabilidad	Homogeneidad
15.00	3.00	Buena	Buena

Tabla 42. *Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla Z15 a los 7 días.*

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Z15-7B	0.100	0.200	0.0016	7.722	11.415	2351.04		3.651	2324.30	
Z15-7E	0.100	0.200	0.0016	7.717	11.410	2351.04	2351.46	3.647	2321.75	2321.75
Z15-7F	0.100	0.200	0.0016	7.708	11.403	2352.31		3.643	2319.21	

Tabla 43. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla Z15 a los 14 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Z15-14B	0.100	0.200	0.0016	7.712	11.405	2351.04		3.647	2321.75	
Z15-14D	0.100	0.200	0.0016	7.720	11.412	2350.40	2350.61	3.651	2324.30	2322.60
Z15-14F	0.100	0.200	0.0016	7.708	11.400	2350.40		3.647	2321.75	

Tabla 44. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla Z15 a los 28 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Z15-28B	0.100	0.200	0.0016	7.714	11.403	2348.49		3.655	2326.85	
Z15-28D	0.100	0.200	0.0016	7.722	11.417	2352.31	2351.25	3.658	2328.76	2328.33
Z15-28F	0.100	0.200	0.0016	7.719	11.415	2352.95		3.659	2329.39	

Tabla 45. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla Z15 a los 56 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Z15-56B	0.100	0.200	0.0016	7.713	11.400	2347.22		3.663	2331.94	
Z15-56D	0.100	0.200	0.0016	7.721	11.420	2354.86	2351.89	3.664	2332.57	2331.94
Z15-56F	0.100	0.200	0.0016	7.718	11.415	2353.58		3.662	2331.30	

3.1.6.4 Sustitución del 20% de zeolita ZV por cemento CGU

Tabla 46. *Propiedades del hormigón fresco de la mezcla Z20*

Sustitución por zeolita natural (%)	Asentamiento (cm)	Trabajabilidad	Homogeneidad
20.00	3.00	Buena	Buena

Tabla 47. *Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla Z20 a los 7 días.*

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Z20-7B	0.100	0.200	0.0016	7.720	11.409	2348.49		3.640	2317.30	
Z20-7D	0.100	0.200	0.0016	7.709	11.400	2349.76	2348.91	3.635	2314.11	2316.23
Z20-7F	0.100	0.200	0.0016	7.712	11.401	2348.49		3.640	2317.30	

Tabla 48. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla Z20 a los 14 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Z20-14B	0.100	0.200	0.0016	7.704	11.395	2349.76		3.643	2319.21	
Z20-14D	0.100	0.200	0.0016	7.720	11.406	2346.58	2348.70	3.648	2322.39	2320.05
Z20-14F	0.100	0.200	0.0016	7.708	11.399	2349.76		3.642	2318.57	

Tabla 49. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla Z20 a los 28 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Z20-28B	0.100	0.200	0.0016	7.706	11.392	2346.58		3.651	2324.30	
Z20-28D	0.100	0.200	0.0016	7.722	11.409	2347.22	2347.64	3.655	2326.85	2325.57
Z20-28F	0.100	0.200	0.0016	7.707	11.397	2349.13		3.653	2325.57	

Tabla 50. Propiedades del hormigón fresco y endurecido para la mezcla Z20 a los 56 días.

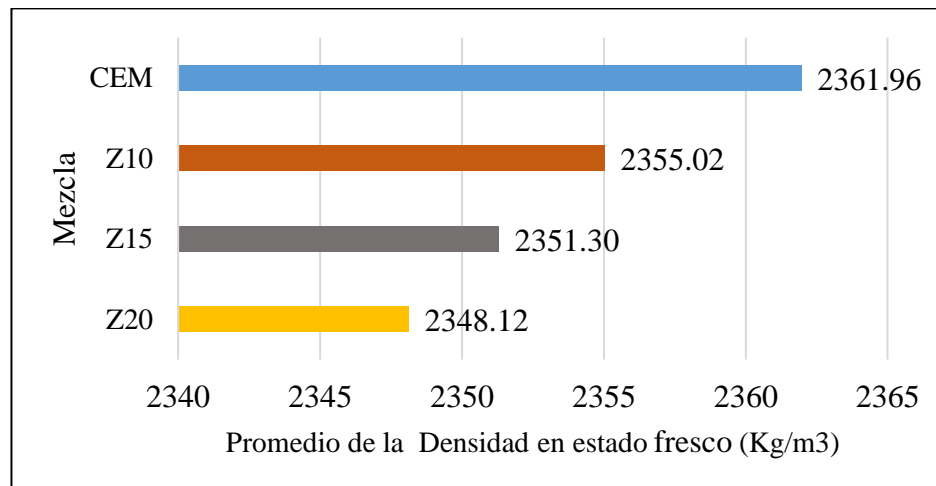
ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Volumen (m ³)	Hormigón fresco				Hormigón endurecido		
				Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad Promedio (kg/m ³)
Z15-56B	0.100	0.200	0.0016	7.713	11.400	2347.22		3.659	2329.39	
Z15-56D	0.100	0.200	0.0016	7.721	11.410	2348.49	2347.22	3.663	2331.94	2330.45
Z15-56F	0.100	0.200	0.0016	7.718	11.403	2345.94		3.660	2330.03	

3.1.6.5 Análisis de la densidad del hormigón en estado fresco

Tabla 51. Densidad Promedio en estado fresco (kg/m^3)

Edad (días)	CEM	Z10	Z15	Z20
7	2361.65	2354.86	2351.46	2348.91
14	2362.07	2355.07	2350.61	2348.70
28	2362.26	2355.71	2351.25	2347.64
56	2361.86	2354.43	2351.89	2347.22
Promedio	2361.96	2355.02	2351.30	2348.12

Gráfico 15. Densidad promedio en estado fresco.



Tal como se muestra en el Gráfico 15 la mezcla de control CEM ha obtenido la mayor densidad en estado fresco con 2361.96 Kg/m^3 , las mezclas Z10, Z15 y Z20 muestran una clara tendencia a la baja según aumenta el porcentaje de sustitución de la zeolita ZV por el cemento CGU registrándose los valores de 2355.02 Kg/m^3 , 2351.30 Kg/m^3 y 2348.12 Kg/m^3 respectivamente. Este fenómeno se explica porque la dosificación utilizada mantiene una misma cantidad de masa de los componentes (agua, agregados, cemento) sin tomar en cuenta la sustitución de zeolita, es decir la masa de cemento para la mezcla CEM será igual a la suma de la masa del cemento-zeolita en las mezclas Z10, Z15 y Z20 tal como se muestra en la Tabla 30. La densidad de la zeolita (2404 Kg/m^3) al ser menor que la del cemento (2892 Kg/m^3), producirá una mayor ocupación de volumen de mezcla y por consiguiente una reducción de la densidad a medida que aumente el porcentaje de sustitución.

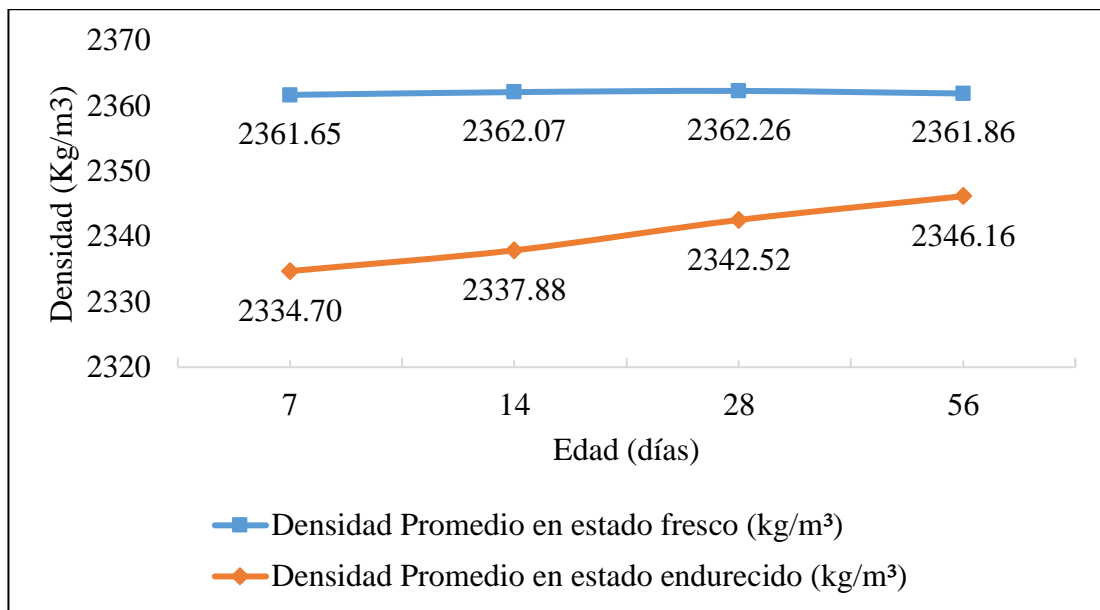
3.1.6.6 Análisis de la densidad en estado fresco y endurecido del hormigón

3.1.6.6.1 Densidades mezcla de control (CEM)

Tabla 52. Densidad promedio de la mezcla de control (CEM).

Edad (días)	Densidad Promedio en estado fresco (kg/m ³)	Densidad Promedio en estado endurecido (kg/m ³)
7	2361.65	2334.70
14	2362.07	2337.88
28	2362.26	2342.52
56	2361.86	2346.16

Gráfico 16. Densidad promedio de la mezcla de control (CEM).



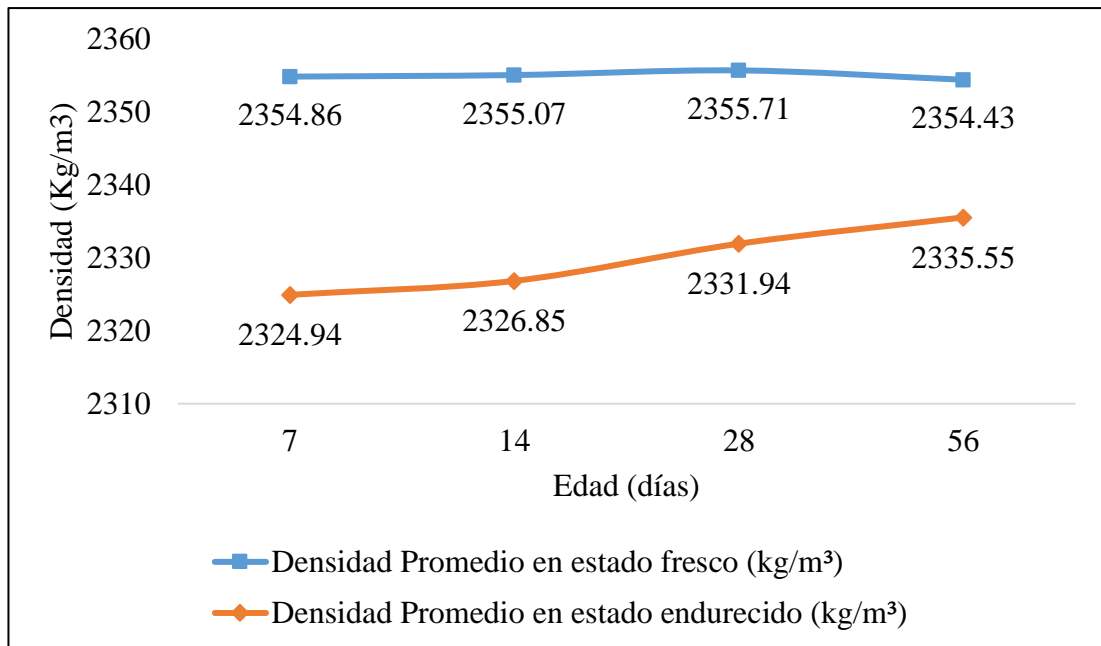
Tal como se puede observar en el Gráfico 16, la densidad en estado fresco de la mezcla de control (CEM) se mantiene en un rango de 2361.65 Kg/m³ a 2362.26 Kg/m³, con un valor promedio de 2361.96 Kg/m³, este fenómeno es correcto debido a la utilización de moldes con iguales características (volumen, peso) y que la mezcla utilizada en la determinación de esta propiedad es la misma para todos los especímenes CEM tomada inmediatamente luego de su fabricación. Por otra parte, la densidad en estado endurecido muestra un crecimiento a lo largo de las distintas edades y va desde un valor inicial de 2334.70 Kg/m³ a los 7 días hasta un máximo de 2346.16 Kg/m³ al finalizar el estudio en 56 días, este crecimiento de la densidad en estado endurecido se traducirá en una ganancia paulatina de la resistencia tal como se verá en el apartado 3.1.7 de este proyecto investigativo.

3.1.6.6.2 Densidades de la muestra con 10% de sustitución (Z10)

Tabla 53. Densidad promedio de la muestra con 10% de sustitución (Z10).

Edad (días)	Densidad Promedio en estado fresco (kg/m ³)	Densidad Promedio en estado endurecido (kg/m ³)
7	2354.86	2324.94
14	2355.07	2326.85
28	2355.71	2331.94
56	2354.43	2335.55

Gráfico 17. Densidad promedio de la muestra con 10% de sustitución (Z10).



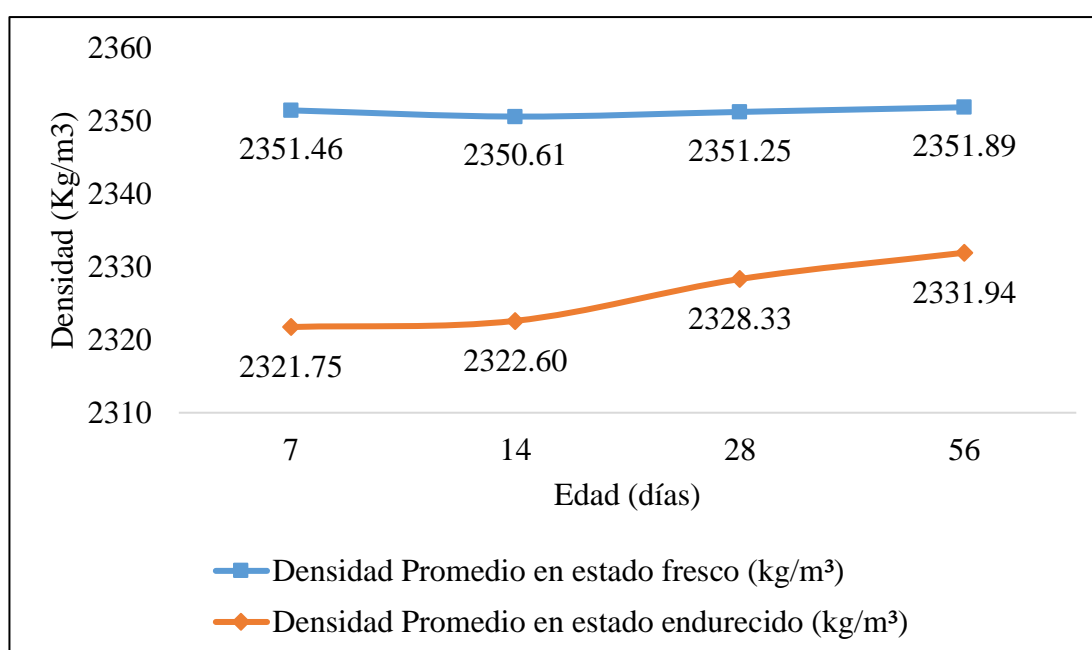
Tal como se puede observar en el Gráfico 17, la densidad en estado fresco de la mezcla con sustitución del 10% de zeolita por cemento (Z10) se mantiene en un rango de 2354.43 Kg/m³ a 2355.71 Kg/m³, con un valor promedio de 2355.02 Kg/m³, este fenómeno es correcto debido a la utilización de moldes con iguales características (volumen, peso) y que la mezcla utilizada en la determinación de esta propiedad es la misma para todos los especímenes Z10 tomada inmediatamente luego de su fabricación. Por otra parte, la densidad en estado endurecido muestra un crecimiento a lo largo de las distintas edades y va desde un valor inicial de 2324.94 Kg/m³ a los 7 días hasta un máximo de 2335.55 Kg/m³ al finalizar el estudio en 56 días, este crecimiento de la densidad en estado endurecido se traducirá en una ganancia paulatina de la resistencia tal como se verá en el apartado 3.1.7 de este proyecto investigativo.

3.1.6.6.3 Densidades de la muestra con 15% de sustitución (Z15)

Tabla 54. Densidad promedio de la muestra con 15% de sustitución (Z15).

Edad (días)	Densidad Promedio en estado fresco (kg/m ³)	Densidad Promedio en estado endurecido (kg/m ³)
7	2351.46	2321.75
14	2350.61	2322.60
28	2351.25	2328.33
56	2351.89	2331.94

Gráfico 18. Densidad promedio de la muestra con 15% de sustitución (Z15).



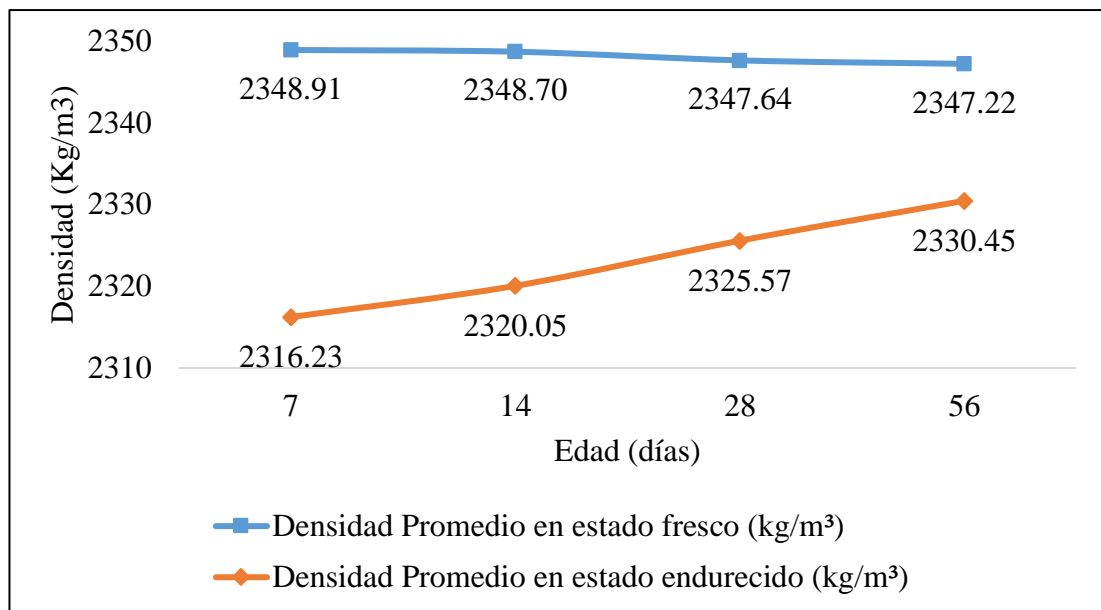
Tal como se puede observar en el Gráfico 18, la densidad en estado fresco de la mezcla con sustitución del 15% de zeolita por cemento (Z15) se mantiene en un rango de 2351.476 Kg/m³ a 2351.89 Kg/m³, con un valor promedio de 2351.30 Kg/m³, este fenómeno es correcto debido a la utilización de moldes con iguales características (volumen, peso) y que la mezcla utilizada en la determinación de esta propiedad es la misma para todos los especímenes Z15 tomada inmediatamente luego de su fabricación. Por otra parte, la densidad en estado endurecido muestra un crecimiento a lo largo de las distintas edades y va desde un valor inicial de 2321.75 Kg/m³ a los 7 días hasta un máximo de 2331.94 Kg/m³ al finalizar el estudio en 56 días, este crecimiento de la densidad en estado endurecido se traducirá en una ganancia paulatina de la resistencia tal como se verá en el apartado 3.1.7 de este proyecto investigativo.

3.1.6.6.4 Densidades de la muestra con 20% de sustitución (Z20)

Tabla 55. Densidad promedio de la muestra con 20% de sustitución (Z20)

Edad (días)	Densidad Promedio en estado fresco (kg/m ³)	Densidad Promedio en estado endurecido (kg/m ³)
7	2348.91	2316.23
14	2348.70	2320.05
28	2347.64	2325.57
56	2347.22	2330.45

Gráfico 19. Densidad promedio de la muestra con 20% de sustitución (Z20).



Tal como se puede observar en el Gráfico 19, la densidad en estado fresco de la mezcla con sustitución del 20% de zeolita por cemento (Z20) se mantiene en un rango de 2347.22 Kg/m³ a 2348.91 Kg/m³, con un valor promedio de 2348.12 Kg/m³, este fenómeno es correcto debido a la utilización de moldes con iguales características (volumen, peso) y que la mezcla utilizada en la determinación de esta propiedad es la misma para todos los especímenes Z20 tomada inmediatamente luego de su fabricación. Por otra parte, la densidad en estado endurecido muestra un crecimiento a lo largo de las distintas edades y va desde un valor inicial de 2316.13 Kg/m³ a los 7 días hasta un máximo de 2330.45 Kg/m³ al finalizar el estudio en 56 días, este crecimiento de la densidad en estado endurecido se traducirá en una ganancia paulatina de la resistencia tal como se verá en el apartado 3.1.7 de este proyecto investigativo.

En conclusión, se puede observar que para todas las mezclas (CEM, Z10, Z15, Z20) y para todas las edades (7, 14, 28, 56 días) los especímenes muestran una disminución de su densidad en estado endurecido con respecto a su estado fresco. Como se constató en los Gráficos [16-19], es evidente el crecimiento de la densidad en estado endurecido a medida que transcurre el tiempo, fenómeno que se explica debido al endurecimiento y pérdida de plasticidad del hormigón (fraguado), producido por la desecación y recristalización de los hidróxidos metálicos procedentes de la reacción química del agua de amasado con los óxidos metálicos presentes en el Clinker del cemento.

3.1.7 Ensayo a compresión de los especímenes de hormigón

3.1.7.1 Mezcla de control

Tabla 56. Resistencia a la compresión de la mezcla CEM a los 7 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
CEM-7A	0.1	0.2	0.0079	131.00	16.7	
CEM-7B	0.1	0.2	0.0079	130.00	16.6	16.8
CEM-7C	0.1	0.2	0.0079	134.00	17.1	

Tabla 57. Resistencia a la compresión de la mezcla CEM a los 14 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
CEM-14B	0.1	0.2	0.0079	184.00	22.5	
CEM-14C	0.1	0.2	0.0079	172.00	21.9	21.7
CEM-14D	0.1	0.2	0.0079	163.00	20.8	

Tabla 58. Resistencia a la compresión de la mezcla CEM a los 28 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
CEM-28A	0.1	0.2	0.0079	221.00	28.1	
CEM-28C	0.1	0.2	0.0079	223.00	28.4	28.9
CEM-28E	0.1	0.2	0.0079	249.00	30.2	

Tabla 59. Resistencia a la compresión de la mezcla CEM a los 56 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
CEM-56A	0.1	0.2	0.0079	240.00	30.6	
CEM-56B	0.1	0.2	0.0079	248.00	31.6	31.2
CEM-56C	0.1	0.2	0.0079	247.00	31.4	

3.1.7.2 Sustitución del 10% de zeolita ZV por cemento CGU

Tabla 60. Resistencia a la compresión de la mezcla Z10 a los 7 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
Z10-7A	0.1	0.2	0.0079	91.60	11.7	
Z10-7C	0.1	0.2	0.0079	97.70	11.8	11.8
Z10-7F	0.1	0.2	0.0079	93.90	12.0	

Tabla 61. Resistencia a la compresión de la mezcla Z10 a los 14 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
Z10-14B	0.1	0.2	0.0079	132.00	16.2	
Z10-14D	0.1	0.2	0.0079	126.00	16.0	16.3
Z10-14E	0.1	0.2	0.0079	136.00	16.6	

Tabla 62. Resistencia a la compresión de la mezcla Z10 a los 28 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
Z10-28B	0.1	0.2	0.0079	152.00	19.4	
Z10-28D	0.1	0.2	0.0079	157.00	20.0	19.5
Z10-28F	0.1	0.2	0.0079	150.00	19.2	

Tabla 63. Resistencia a la compresión de la mezcla Z10 a los 56 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
Z10-56B	0.1	0.2	0.0079	188.00	23.9	
Z10-56D	0.1	0.2	0.0079	180.00	22.9	23.3
Z10-56F	0.1	0.2	0.0079	181.00	23.0	

3.1.7.3 Sustitución del 15% de zeolita ZV por cemento CGU

Tabla 64. Resistencia a la compresión de la mezcla Z15 a los 7 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
Z15-7B	0.1	0.2	0.0079	95.50	11.7	
Z15-7E	0.1	0.2	0.0079	92.90	11.4	11.6
Z15-7F	0.1	0.2	0.0079	95.90	11.6	

Tabla 65. Resistencia a la compresión de la mezcla Z15 a los 14 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
Z15-14B	0.1	0.2	0.0079	127.00	15.2	
Z15-14D	0.1	0.2	0.0079	117.00	14.9	15.0
Z15-14F	0.1	0.2	0.0079	118.00	15	

Tabla 66. Resistencia a la compresión de la mezcla Z15 a los 28 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
Z15-28B	0.1	0.2	0.0079	146.00	18.6	
Z15-28D	0.1	0.2	0.0079	147.00	18.7	18.6
Z15-28F	0.1	0.2	0.0079	145.00	18.5	

Tabla 67. Resistencia a la compresión de la mezcla Z15 a los 56 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
Z15-56B	0.1	0.2	0.0079	166.00	21.1	
Z15-56D	0.1	0.2	0.0079	151.00	19.2	20.3
Z15-56F	0.1	0.2	0.0079	162.00	20.6	

3.1.7.4 Sustitución del 20% de zeolita ZV por cemento CGU

Tabla 68. Resistencia a la compresión de la mezcla Z20 a los 7 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
Z20-7B	0.1	0.2	0.0079	87.70	11.2	
Z20-7D	0.1	0.2	0.0079	88.50	11.3	11.4
Z20-7F	0.1	0.2	0.0079	95.90	11.6	

Tabla 69. Resistencia a la compresión de la mezcla Z20 a los 14 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
Z20-14B	0.1	0.2	0.0079	131.00	15.7	
Z20-14D	0.1	0.2	0.0079	119.00	15.2	15.0
Z20-14F	0.1	0.2	0.0079	110.00	14	

Tabla 70. Resistencia a la compresión de la mezcla Z20 a los 28 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
Z20-28B	0.1	0.2	0.0079	142.00	18.1	
Z20-28D	0.1	0.2	0.0079	166.00	21.1	19.5
Z20-28F	0.1	0.2	0.0079	152.00	19.4	

Tabla 71. Resistencia a la compresión de la mezcla Z20 a los 56 días.

ID.	Diámetro (m) promedio de 3 lecturas	Altura Longitud (m) Promedio de 2 lecturas	Área de carga (m ²)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
Z20-56B	0.1	0.2	0.0079	174	22.2	
Z20-56D	0.1	0.2	0.0079	167	21.3	21.7
Z20-56F	0.1	0.2	0.0079	170	21.6	

3.1.7.5 Análisis de la resistencia a compresión del hormigón

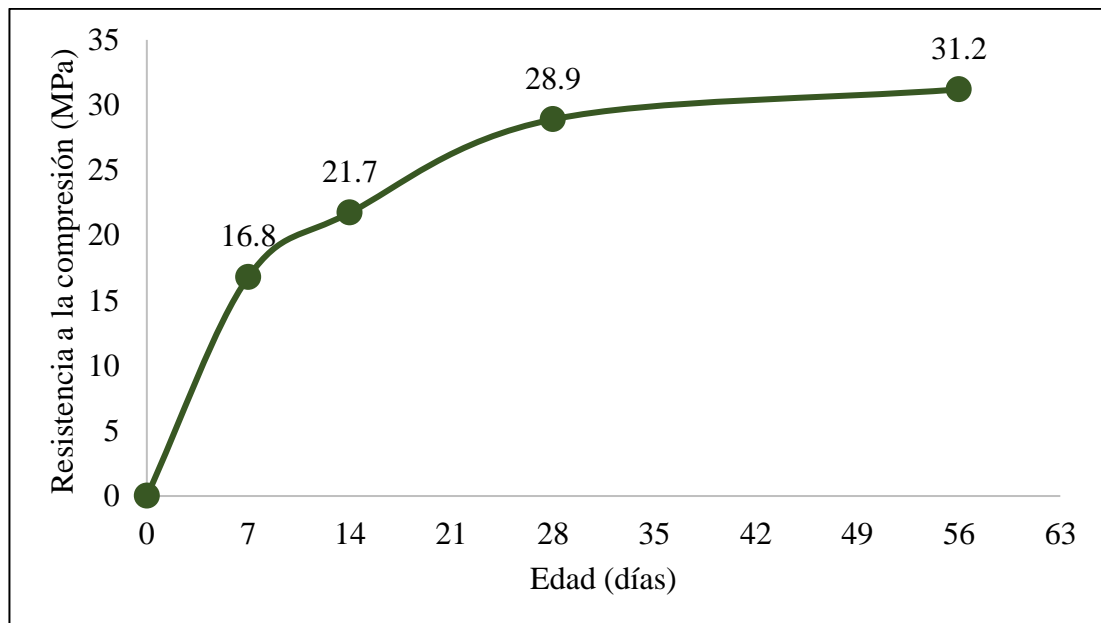
En este apartado se detallarán gráficamente los resultados obtenidos durante los ensayos a compresión simple de los especímenes de hormigón.

3.1.7.5.1 Resistencia a la compresión de la mezcla de control (CEM)

Tabla 72. Resistencia a compresión de la mezcla de control (CEM)

Edad (días)	Promedio de la carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
7	131.67	16.8
14	173.00	21.7
28	231.00	28.9
56	245.00	31.2

Gráfico 20. Resistencia a la compresión (CEM).



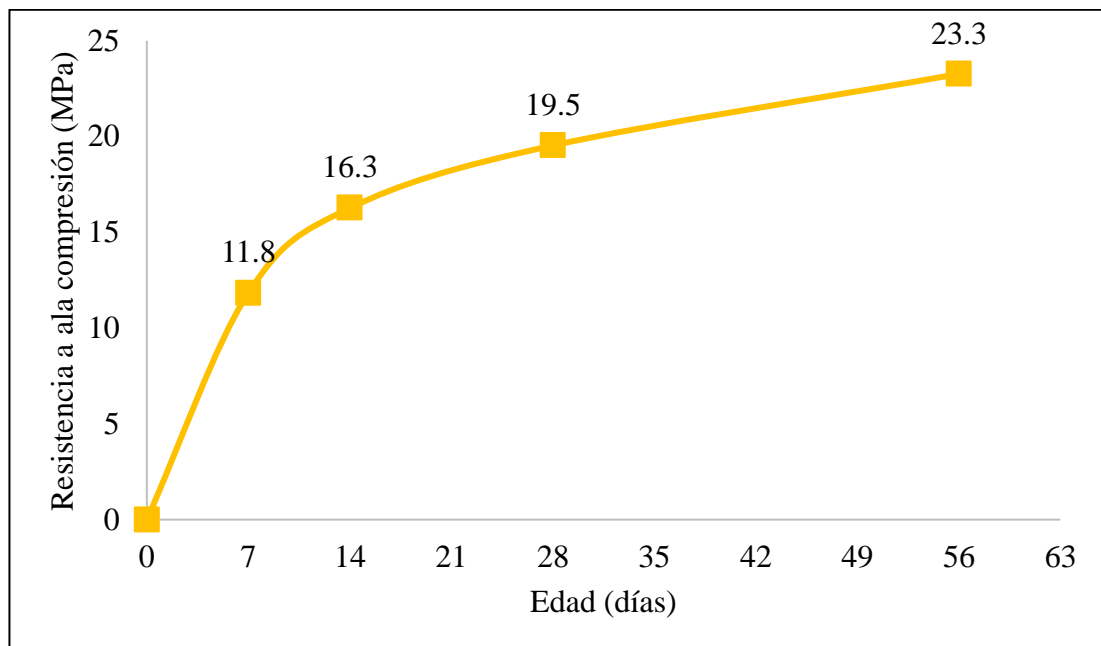
El Gráfico 20 representa el comportamiento de los especímenes de hormigón de la mezcla de control (CEM) al ser ensayados a compresión, el esfuerzo máximo promedio resultó luego ensayar 3 especímenes de hormigón por cada edad (Tabla 56-59) como señala la norma NTE INEN 1573, los resultados para 7, 14, 28 y 56 días fueron 16.8, 21.7, 28.9 y 31.2 MPa respectivamente, como se puede notar es evidente que al paso del tiempo el hormigón gana resistencia y se puede comprobar el comportamiento típico de este material.

3.1.7.5.2 Resistencia a la compresión de la mezcla con 10% de sustitución de zeolita (Z10)

Tabla 73. Resistencia a compresión de la mezcla con 10% de sustitución (Z10)

Edad (días)	Promedio de la carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
7	94.40	11.8
14	131.33	16.3
28	153.00	19.5
56	183.00	23.3

Gráfico 21. Resistencia a la compresión (Z10).



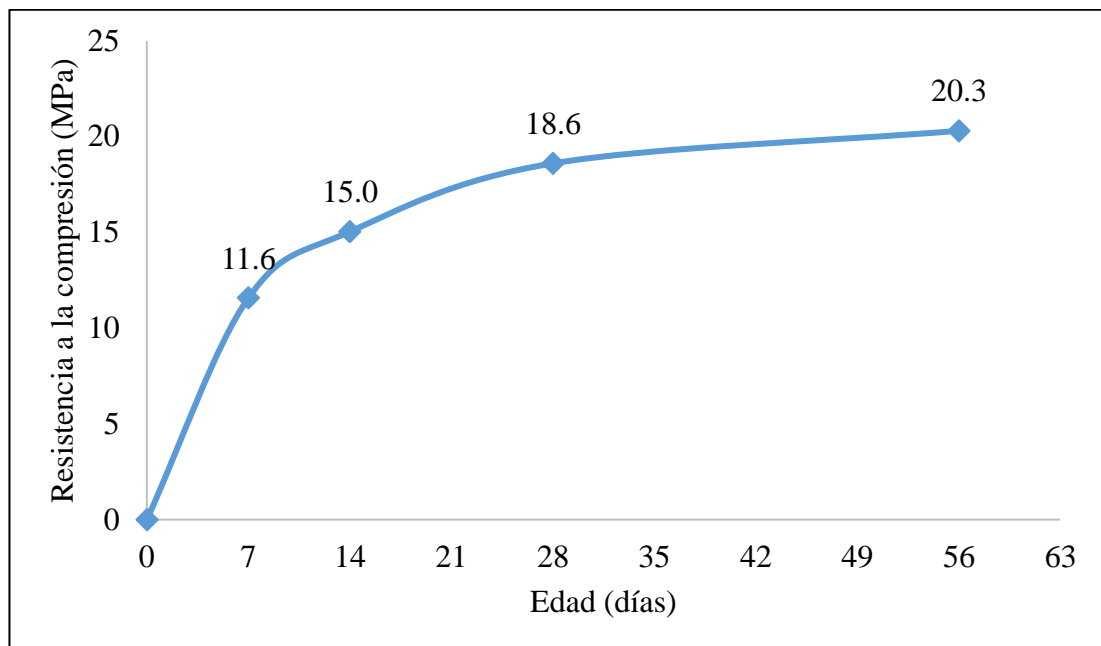
El Gráfico 21 representa el comportamiento de los especímenes de hormigón de la mezcla con 10% de sustitución de zeolita ZV por cemento CGU al ser ensayados a compresión, el esfuerzo máximo promedio resultó luego ensayar 3 especímenes de hormigón por cada edad (Tabla 60-63) como señala la norma NTE INEN 1573, los resultados para 7, 14, 28 y 56 días fueron 11.8, 16.3, 19.5 y 23.3 MPa respectivamente, como se puede notar la sustitución de zeolita en un 10% no produjo alteraciones en el comportamiento típico del hormigón y la tendencia a ganar resistencia al paso del tiempo continúa.

3.1.7.5.3 Resistencia a la compresión de la mezcla con 15% de sustitución de zeolita (Z15)

Tabla 74. Resistencia a compresión mezcla con 15% de sustitución (Z15)

Edad (días)	Promedio de la carga máxima (KN)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
7	94.77	11.6
14	120.67	15.0
28	146.00	18.6
56	159.67	20.3

Gráfico 22. Resistencia a la compresión (Z15).



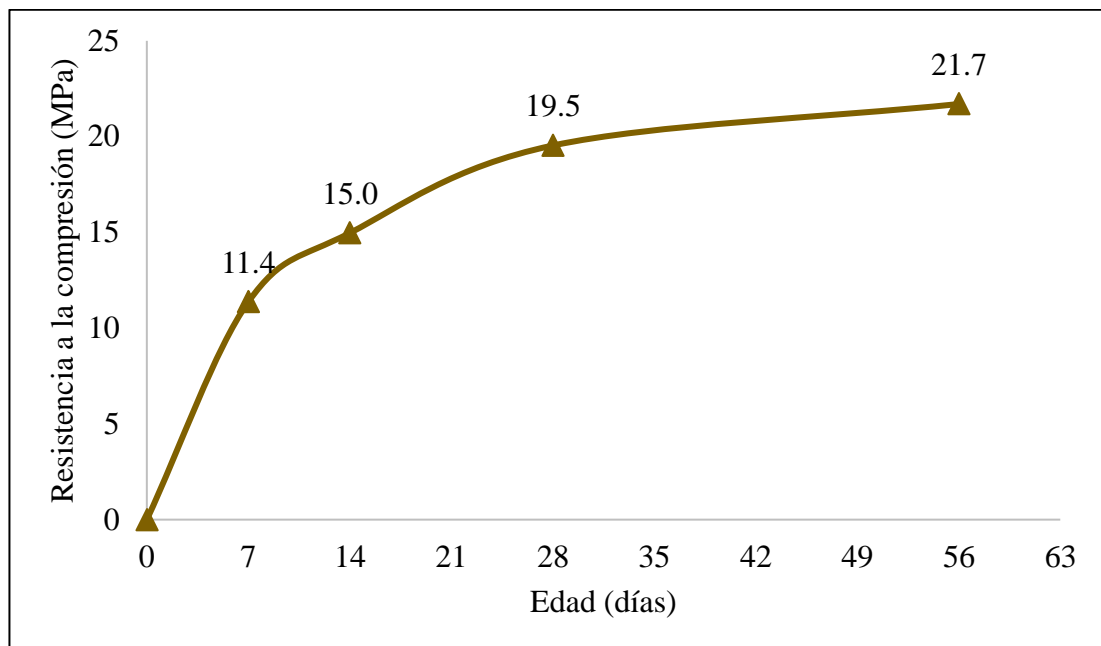
El Gráfico 22 representa el comportamiento de los especímenes de hormigón de la mezcla con 15% de sustitución de zeolita ZV por cemento CGU al ser ensayados a compresión, el esfuerzo máximo promedio resultó luego ensayar 3 especímenes de hormigón por cada edad (Tabla 64-67) como señala la norma NTE INEN 1573, los resultados para 7, 14, 28 y 56 días fueron 11.6, 15.0, 18.6 y 20.3 MPa respectivamente, como se puede notar la sustitución de zeolita en un 15% no produjo alteraciones en el comportamiento típico del hormigón y la tendencia a ganar resistencia al paso del tiempo continúa.

3.1.7.5.4 Resistencia a la compresión de la mezcla con 20% de sustitución de zeolita (Z20)

Tabla 75. Resistencia a compresión mezcla con 20% de sustitución (Z20)

Edad (días)	Promedio de la carga máxima aplicada (KN)	Resistencia a compresión Promedio (MPa)
7	90.70	11.4
14	120.00	15.0
28	153.33	19.5
56	170.33	21.7

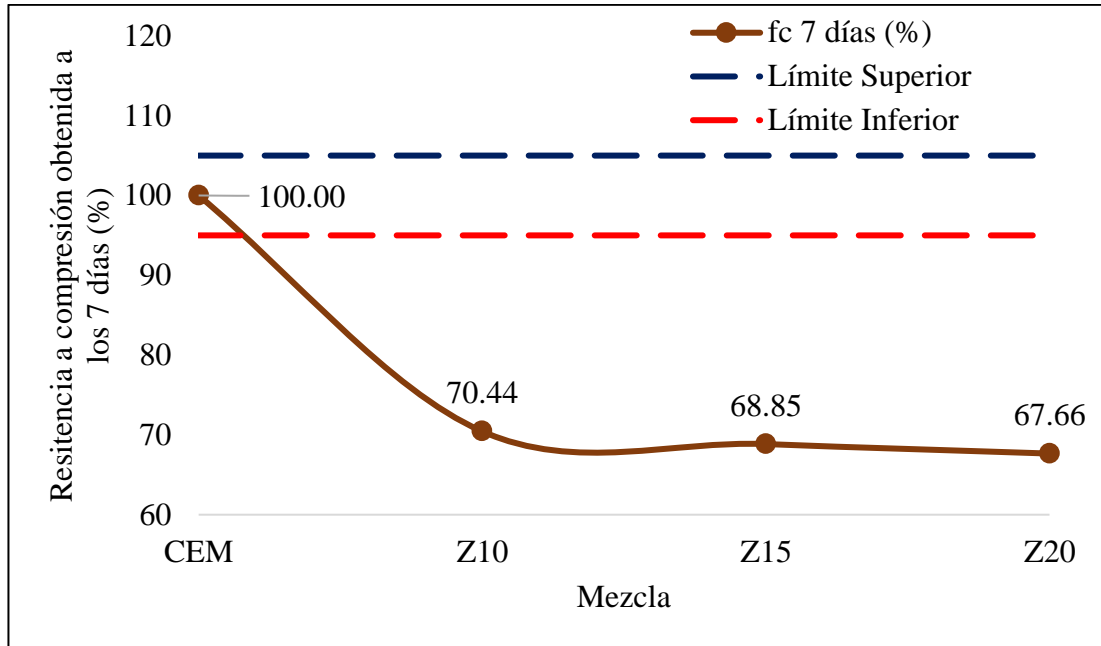
Gráfico 23. Resistencia a la compresión (Z20).



El Gráfico 23 representa el comportamiento de los especímenes de hormigón de la mezcla con 20% de sustitución de zeolita ZV por cemento CGU al ser ensayados a compresión, el esfuerzo máximo promedio resultó luego ensayar 3 especímenes de hormigón por cada edad (Tabla 68-71) como señala la norma NTE INEN 1573, los resultados para 7, 14, 28 y 56 días fueron 11.4, 15.0, 19.5 y 21.7 MPa respectivamente, como se puede notar la sustitución de zeolita en un 20% no produjo alteraciones en el comportamiento típico del hormigón y la tendencia a ganar resistencia al paso del tiempo continúa.

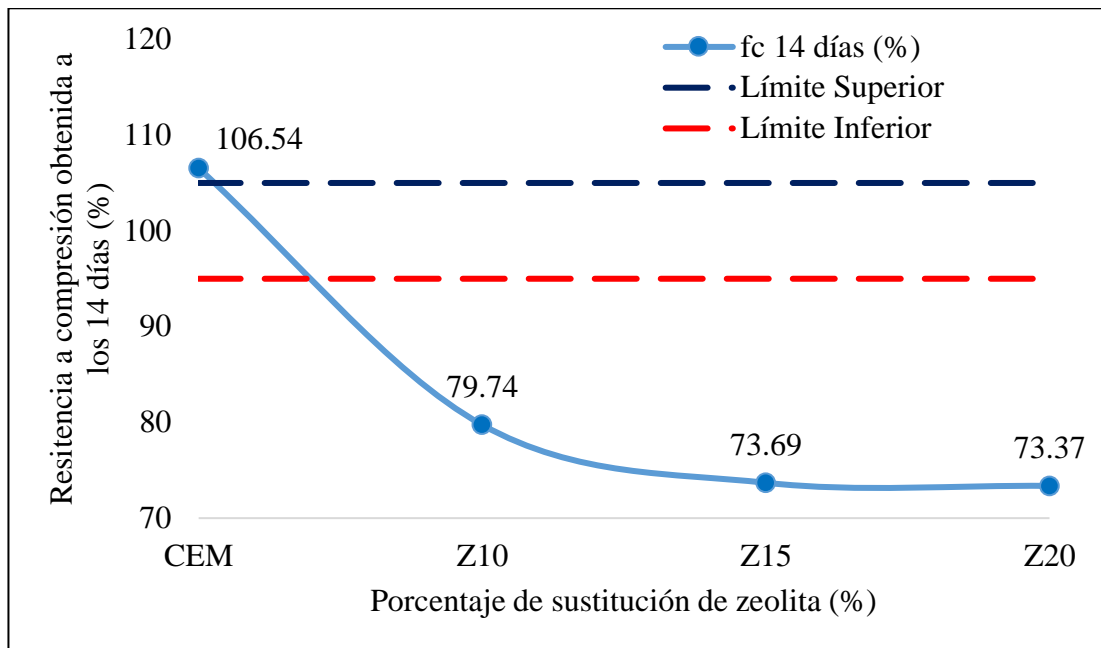
3.1.7.6 Análisis y resumen de las resistencias a compresión

Gráfico 24. Comparación de la resistencia a compresión a los 7 días.



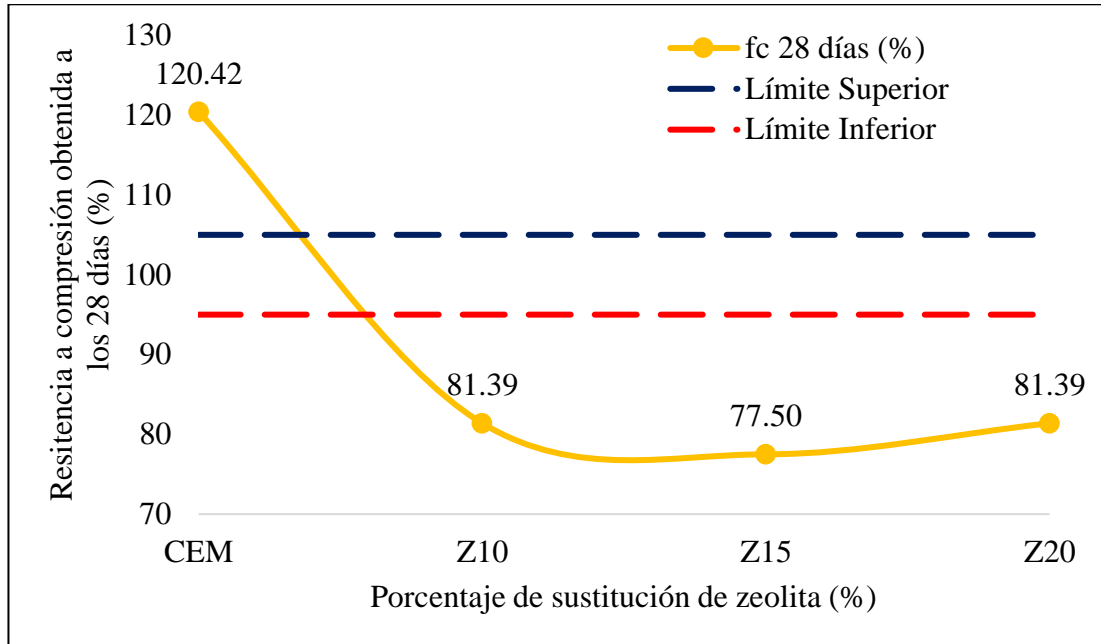
El Gráfico 24 representa el porcentaje de la resistencia a compresión de los especímenes CEM, Z10, Z15 y Z20 a la edad de 7 días, la línea azul entrecortada indica el límite superior (105%), la línea roja entrecortada (95%) el límite inferior del esfuerzo a compresión que debería alcanzar el hormigón, como se puede observar la mezcla de control (CEM) se encuentra dentro de los límites y alcanza el 100% de la resistencia esperada mientras que las mezclas con sustitución de zeolita por cemento Z10, Z15 y Z20 alcanzaron 70.44%, 68.85% y 67.66% respectivamente, además es evidente que a mayor porcentaje de sustitución menor es la resistencia alcanzada, estos porcentajes se encuentran bajo el límite inferior indicando que los porcentajes de resistencia alcanzados con las probetas modificadas son menores que las resistencias del hormigón de 24 MPa.

Gráfico 25. Comparación de la resistencia a compresión a los 14 días.



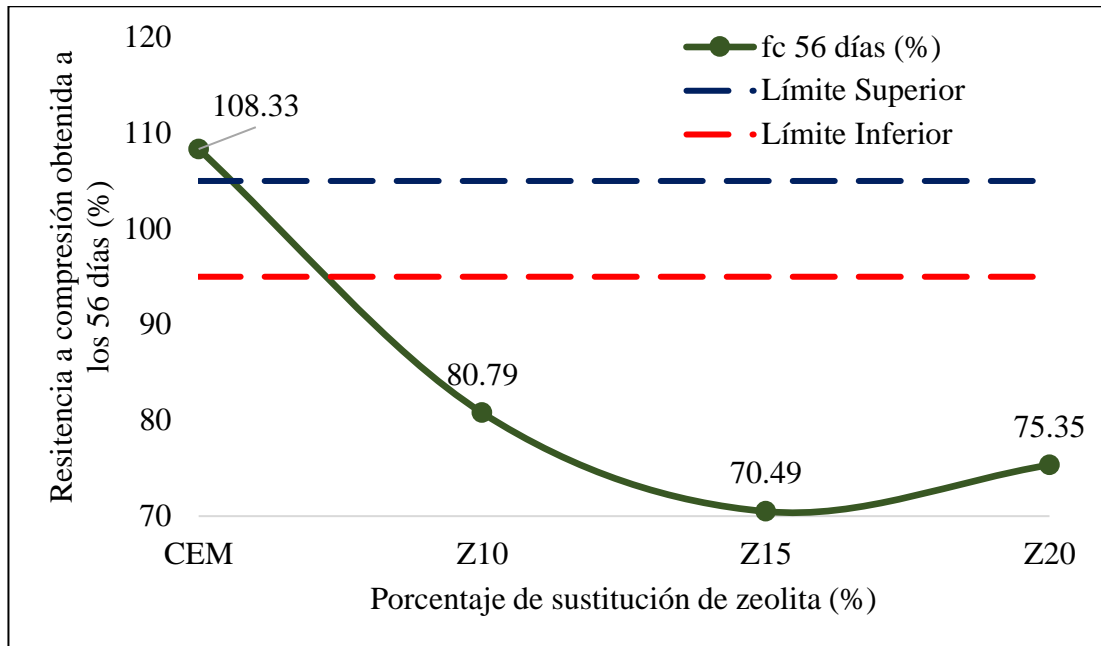
El Gráfico 25 representa el porcentaje de la resistencia a compresión de los especímenes CEM, Z10, Z15 y Z20 a la edad de 14 días, la línea azul entrecortada indica el límite superior (105%), la línea roja entrecortada (95%) el límite inferior del esfuerzo a compresión que debería alcanzar el hormigón, como se puede observar la mezcla de control (CEM) se encuentra dentro de los límites y alcanza el 106.54% de la resistencia esperada mientras que las mezclas con sustitución de zeolita por cemento Z10, Z15 y Z20 alcanzaron 79.74%, 73.69% y 73.37% respectivamente, además es evidente que a mayor porcentaje de sustitución menor es la resistencia alcanzada, estos porcentajes se encuentran bajo el límite inferior indicando que los porcentajes de resistencia alcanzados con las probetas modificadas son menores que las resistencias del hormigón de 24 MPa.

Gráfico 26. Comparación de la resistencia a compresión a los 28 días.



El Gráfico 26 representa el porcentaje de la resistencia a compresión de los especímenes CEM, Z10, Z15 y Z20 a la edad de 28 días, la línea azul entrecortada indica el límite superior (105%), la línea roja entrecortada (95%) el límite inferior del esfuerzo a compresión que debería alcanzar el hormigón, como se puede observar la mezcla de control (CEM) se encuentra dentro de los límites y alcanza el 120.42% de la resistencia esperada mientras que las mezclas con sustitución de zeolita por cemento Z10, Z15 y Z20 alcanzaron 81.39%, 77.50% y 81.39% respectivamente, la tendencia que se veía a los 7 y 14 días cambia ya que la mezcla Z20 supera la resistencia de Z15 sin embargo, estos porcentajes se encuentran bajo el límite inferior indicando que los porcentajes de resistencia alcanzados con las probetas modificadas son menores que las resistencias del hormigón de 24 MPa.

Gráfico 27. Comparación de la resistencia a compresión a los 56 días.

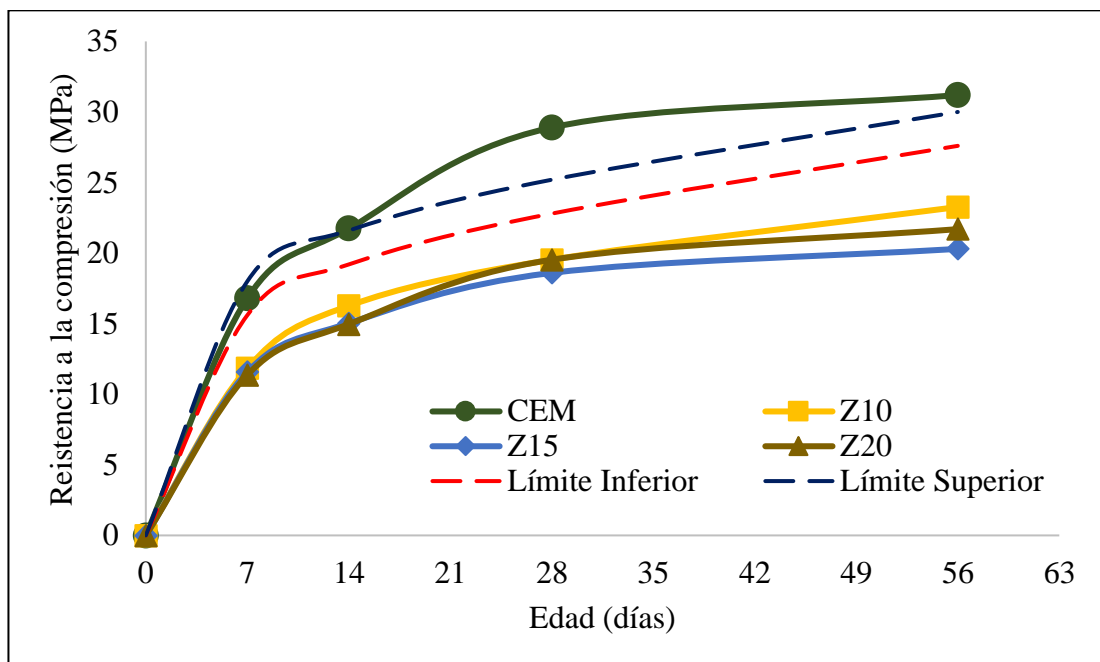


El Gráfico 27 representa el porcentaje de la resistencia a compresión de los especímenes CEM, Z10, Z15 y Z20 a la edad de 56 días, la línea azul entrecortada indica el límite superior (105%), la línea roja entrecortada (95%) el límite inferior del esfuerzo a compresión que debería alcanzar el hormigón, como se puede observar la mezcla de control (CEM) se encuentra dentro de los límites y alcanza el 108.33% de la resistencia esperada mientras que las mezclas con sustitución de zeolita por cemento Z10, Z15 y Z20 alcanzaron 80.79%, 70.49% y 75.35% respectivamente, la tendencia que se veía a los 7 y 14 días cambia ya que la mezcla Z20 supera la resistencia de Z15 sin embargo, estos porcentajes se encuentran bajo el límite inferior indicando que los porcentajes de resistencia alcanzados con las probetas modificadas son menores que las resistencias del hormigón de 24 MPa.

Tabla 76. Resumen de la resistencia a compresión de las mezclas para 24 MPa

Edad (días)	Resistencia a compresión experimental (MPa)				Resistencia promedio a compresión esperada (MPa)
	Mezcla de control CEM	10% sustitución Z10	15% sustitución Z15	20% sustitución Z20	
7	16.8	11.8	11.6	11.4	16.8
14	21.7	16.3	15.0	15.0	20.4
28	28.9	19.5	18.6	19.5	24.0
56	31.2	23.3	20.3	21.7	28.8

Gráfico 28. Comparación del comportamiento a compresión de todas las mezclas.



El Gráfico 28 representa el comportamiento a compresión de los especímenes CEM, Z10, Z15 y Z20 durante un periodo de ensayo de 7 a 56 días, las líneas entrecortadas azul y roja indican los límites superior e inferior del esfuerzo a compresión de un hormigón de 24 MPa, como se puede observar la mezcla de control CEM se encuentra dentro del rango común llegando a superar el límite en los 28 y 56 días, mientras que las mezclas con sustitución de zeolita Z10, Z15 y Z20 no alcanzan la resistencia y se ubican por debajo del mínimo requerido para un hormigón de 24 MPa.

3.2 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Realizados los ensayos de laboratorio a los materiales y elaboradas las probetas de hormigón con sustitución de cemento por zeolita, se comprueba que la resistencia a la compresión a los 28 días de edad por el concreto modificado, no alcanza los esfuerzos máximos de una mezcla tradicional de 24 MPa. Mediante los resultados obtenidos por los especímenes ensayados no se pudo demostrar la hipótesis, y el hormigón elaborado con zeolita no alcanza una resistencia superior a un concreto estructural común alcanzando en el mejor caso el 81.39 % de la capacidad de diseño con una sustitución del 10%.

Por lo tanto se rechaza la hipótesis afirmativa y se acepta la hipótesis nula que dice, “La zeolita no puede reemplazar al cemento en proporciones entre un 10 % y 20 % en la dosificación de un concreto estructural de 24 MPa, de tal manera que si se reemplaza zeolita por cemento en las proporciones especificadas, su esfuerzo máximo a compresión a los 28 días de edad no podrá ser alcanzado, y las propiedades mecánicas del hormigón no serán las adecuadas”, sin embargo con los tres porcentajes de sustitución de cemento por zeolita a la edad de 28 días se alcanzaron resistencias a la compresión superiores a los 18 MPa, lo que permite usar este hormigón en aplicaciones con menores requerimientos de resistencia como pueden ser bloques de anclaje, collarines de contención, replantillos, contrapisos, pavimentos, bordillos, aceras, etc., con el añadido de ser una propuesta ecológicamente amigable.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- 1 Se concluyó mediante el ensayo de densidad real según la norma NTE INEN 156, que el valor de densidad dado para CGU es de 2.892 g/cm^3 y que la zeolita ZV obtuvo una densidad de 2.404 g/cm^3 que al igual que el cemento se ubica en un rango común de densidades para cada tipo de material. La zeolita al poseer un valor relativamente más bajo que el cemento CGU, evita sobrepasar los niveles de densidad de ciertos tipos de cementos establecidas por norma, propiedad fundamental en el diseño de mezclas.
- 2 Se determinó que mediante el ensayo de finura con el aparato de permeabilidad al aire según la norma NTE INEN 196, el cemento CGU tiene una superficie específica de $476 \text{ m}^2/\text{Kg}$ cumpliendo el requisito de la norma NTE INEN 152 que especifica valores mínimos de finura de $260 \text{ m}^2/\text{kg}$ para cementos tipo: I, IA, II, IIA, y V. Por otra parte, la zeolita ZV muestra un valor de superficie específica de $569 \text{ m}^2/\text{Kg}$ superando así al cemento y demostrando la factibilidad de su uso como material “filler” o de relleno para el hormigón.
- 3 Se comprobó mediante el análisis granulométrico por medio del hidrómetro según la norma ASTM D422, que el tamaño promedio de las partículas de zeolita es de $3.54 \mu\text{m}$, siendo menor al tamaño promedio de partículas del cemento de $3.97 \mu\text{m}$ tal como se expuso en 3.1.3.1. El uso de un material con un tamaño de partículas de estas proporciones se sustenta en el relleno de los espacios vacíos en la pasta cementante obteniendo mejores características adherentes, una alta compacidad y trabajabilidad lo que provoca una reducción de la permeabilidad en el hormigón.
- 4 Se determinó que mediante el ensayo del tiempo de fraguado según la norma NTE INEN 158, la zeolita retrasa el proceso de endurecimiento y pérdida de plasticidad del hormigón en proporción directa al porcentaje de sustitución, obteniéndose que

para una pasta de cemento el tiempo en el que la aguja de Vicat no deja huella sobre su superficie (fraguado final) es de 280 minutos, mientras que para una pasta con una sustitución del 10, 15 y 20% de cemento por zeolita resulta en 305, 340 y 390 minutos respectivamente, este comportamiento brinda mayores tiempos de manejabilidad permitiendo una colocación adecuada del concreto y reduciendo la posibilidad de juntas frías. Todos los tiempos obtenidos en los ensayos cumplen con los requisitos de desempeño para cementos hidráulicos establecidos en la norma NTE INEN 2380 que dicta un tiempo de fraguado entre 45 y 420 minutos.

- 5 Se realizó el diseño de las mezclas de hormigón para especímenes con y sin sustitución de cemento por zeolita natural para resistencias a compresión a los 28 días de edad de: 24 MPa, empleando el método de la densidad máxima.
- 6 Durante el proceso de amasado tanto en la elaboración de la pasta de cemento en el ensayo del tiempo de fraguado, como en la fabricación de los especímenes de hormigón se constató la gran capacidad de absorción propia de las zeolitas ya que mientras mayor era el porcentaje de zeolita, mayor era la demanda de agua debido a que las partículas por su propia composición química y su elevada finura retenían una mayor cantidad de líquido.
- 7 Se evidenció que todas las mezclas con sustitución de cemento por zeolita presentaban una buena trabajabilidad durante su amasado, a pesar de mostrar una disminución en el asentamiento a medida que se incrementa la porción del aluminosilicato.
- 8 Se observaron cambios físicos en los especímenes fabricados con un porcentaje de zeolita, el color en comparación a la muestra de control mostraba un tono amarillento muy difuminado en su estado fresco, mientras que en su estado endurecido era evidente una coloración oscura posiblemente por la capacidad de retención de agua que posee la zeolita. Además, las probetas presentaban rugosidades en toda su superficie debido a la presencia de pequeñas partículas sueltas que se mostraban luego del curado.

- 9 Se determinó que la densidad del hormigón en estado fresco disminuye a medida que se aumenta la cantidad de zeolita en la mezcla, debido a que este material ocupa un mayor volumen dentro de la mezcla dada a su baja densidad en comparación al cemento.
- 10 Se constató que la densidad en estado endurecido de las mezclas con y sin sustitución de zeolita aumenta a lo largo del tiempo, desde valores mínimos a los 7 días hasta sus máximos a los 56 días, notándose además que los especímenes de control (sin zeolita) poseían las densidades más altas durante todas las edades de ensayo y que un mayor contenido de zeolita produce una disminución en esta propiedad.
- 11 Los especímenes de hormigón sin sustitución de cemento por zeolita superaron la resistencia de diseño a los 28 días con un esfuerzo a la compresión promedio de 28.9 MPa.
- 12 Los especímenes de hormigón fabricados con un porcentaje de sustitución de cemento por zeolita vieron disminuida su resistencia a la compresión durante todas las edades de ensayo y a los 28 días alcanzaron entre un 77.50 % a 81.39 % de la resistencia diseñada, sin embargo, a pesar de utilizar un porcentaje elevado de sustitución como es un 20%, la resistencia no se vio disminuida de forma drástica y su carácter amigable con el medio ambiente no queda totalmente excluido ya que el hormigón aún puede ser utilizado en aplicaciones de menores requerimientos.
- 13 Se verificó que los especímenes modificados con una sustitución de cemento por zeolita muestran un incremento constante de resistencia a la compresión a lo largo del tiempo tal como se puede constatar en el Gráfico 28, este efecto se atribuye a las reacciones puzolánicas entre los compuestos del cemento y la zeolita. En investigaciones como la de Lekha en 2017 [2] se ha visto que la ganancia de resistencia se da de forma lenta y paulatina indicándose que luego de 180 días el esfuerzo máximo a compresión del hormigón que contenía zeolita excedía al hormigón sin zeolita.

- 14 Se evaluó que las diversas aplicaciones que tienen las zeolitas naturales en campos tan variados como la agricultura, ganadería, minería, farmacéutica, entre otras lo convierte en un material multipropósito y que los estudios dentro de la construcción apenas están iniciando con la búsqueda de materiales compuestos, que posean características de resistencia y durabilidad iguales o superiores al hormigón tradicional, con el añadido de ser una alternativa ecológica que puede reducir el daño ambiental provocado por las emisiones en los procesos de fabricación de materiales como el cemento.

4.2 RECOMENDACIONES

- 1 Se recomienda continuar con estudios y análisis relacionados a la fabricación de hormigones amigables con el ambiente buscando una correcta compatibilidad entre los diferentes tipos de zeolitas y cementos disponibles en el país.
- 2 Se recomienda ampliar los periodos de tiempo para el estudio de las propiedades mecánicas de los hormigones elaborados con sustitución de cemento por zeolita natural, además de analizar la durabilidad de estas mezclas, propiedad que no se trató en este proyecto investigativo.
- 3 Luego de analizados los resultados se recomienda que, a más de estudiar el comportamiento de la zeolita en el hormigón, se elaboren morteros con porcentajes bajos de este componente, debido a que en estudios como los de Costafreda [35] indican que, en morteros, la resistencia alcanzada es muy cercana a la resistencia de diseño en edades tempranas.
- 4 Para futuras investigaciones se recomienda realizar un estudio más exhaustivo de la finura de la zeolita ya que esta característica juega un papel muy importante en la ganancia de resistencia en edades tempranas, buscar el tamaño de partícula óptimo para un buen diseño de mezcla mediante procesos de molienda adicional y/o probando con diferentes zeolitas.

- 5 Para el almacenamiento del cemento y la zeolita se recomienda un lugar fresco y seco ya que factores como la humedad provocan que el cemento se aglutine formando grumos que impiden su correcta hidratación y en la zeolita provocan cambios de volumen debido a su capacidad de absorción e impiden el correcto análisis de sus propiedades como tamaño de partículas, además de evitar el riesgo de contaminación con otros elementos.

- 6 Se recomienda buscar un lugar idóneo con la menor variación en temperatura y humedad para la realización de los ensayos de densidad, finura, hidrométrico, consistencia normal y tiempo de fraguado (23°C), ya que la variación de estos parámetros ambientales influye directamente en la obtención de los resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Price, E. Worrell y D. Phylipsen, "Energy Use and Carbon Dioxide Emissions in Energy-Intensive Industries in Key developing Countries", *Earth Technologies Forum*, Washington, DC, September 27-29, 1999.
- [2] K. Lekha y A. J. Vanreyk, "Zeolite Addition on Concrete Sustainability-a Review", *Int. J. Adv. Res. Innov. Ideas Educ.*, vol. 3, n.o 2, pp. 5578-5582, 2017.
- [3] A. M. Jacob y L. G. Das, "Ecofriendly Concrete by Partial Replacement of Cement by Zeolite", *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, n.o 5, pp. 8194-8200, 2017.
- [4] T. Markiv, K. Sobol, M. Franus, y W. Franus, "Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite", *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 16, n.o 4, pp. 554-562, 2016.
- [5] J. Costafreda, J. Díaz, y B. Calvo, "Propiedades Físicas, Mecánicas Y Químicas De Algunas Zeolitas Naturales Procedentes De México, Cuba Y España", *Arch. Digit. UPM- E-cienciaDatos*, vol. 2010, n.o 1, pp. 1-9, 2018.
- [6] M. Najimi, J. Sobhani, B. Ahmadi, y M. Shekarchi, "An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan", *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, n.o 4, pp. 1023-1033, 2012.
- [7] C. Jarre, J. Howland, M. Guerrero, y S. Brito, "Impacto de la utilización de puzolanas naturales ecuatorianas", Universidad Técnica de Manabí, Ecuador, *Revista Riemat*, pp. 1-2, 2017.
- [8] A. Joshaghani, "The Effects of Zeolite as Supplementary Cement Material on Pervious Concrete", *International Concrete Sustainability Conference Washington DC*, pp. 1-2, 2016.
- [9] J. Dopico y J. Martirena, "Efecto del ligante de cal-zeolita sobre la resistencia a la compresión y las propiedades de durabilidad del hormigón.", Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Cuba, 2009.
- [10] Comisión Europea, Centro común de investigación, Oficina Europea de Prevención y Control Integrados de la Contaminación. "Documento referente sobre las mejores técnicas disponibles en la industria de fabricación de cemento, cal y óxido de magnesio", España, 2010.
- [11] J. Howland, "La Innovación Tecnológica y la Protección del Medio Ambiente en la Producción del Hormigón. Tecnologías Industriales para la Construcción". La Habana, Cuba, 2011.
- [12] J. Dopico, F. Martirena, R. Day, B. Middendorf, M. Gehrke y L. Martinez, "Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario", Universidad Central Marta Abreu de las Villas, Cuba, University of Calgary, Canadá, University of Kassel, Alemania, 2020.
- [13] Oficemen, Agrupación de fabricantes de cemento de España, "Historia del cemento" [En línea]. Disponible: <https://www.oficemen.com/el-cemento/historia-del-cemento>, 2017.
- [14] CEHOPU, Centro de Estudios Históricos de Obras Públicas y Urbanismo, "Hormigón", 2010. [En línea]. Disponible: http://www.cehopu.cedex.es/hormigon/temas/C32.php?id_tema=75.
- [15] J. Hidalgo, "Componentes Y Procesos Químicos Del Cemento", *Innovación y Exp. Educ.*, vol. 18, n.o 45, pp. 8, 2009.

- [16] A. Giraldo y J. Tobón, "Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación ", *Dyna*, vol. 73, n.o 148, pp. 69-81, 2006.
- [17] CANACEM, Cámara Nacional del Cemento, "Historia del cemento en México", [En línea]. Disponible: <https://canacem.org.mx/historia-del-cemento-en-mexico/>.
- [18] H. Taylor, "La química de los Cementos", Edit. URMO, México, 1979 [En línea]. Disponible: <http://www.onncce.org.mx/pdf/NMX-C-141-ONNCCE-20045.pdf>.
- [19] S. Navarro, "Cemento", 2008, [En línea]. Disponible: <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/09/def-y-elaboracion-cemento.pdf>.
- [20] Holcim, "Nuestros procesos de producción cemento, hormigón y agregados" Latacunga, 2011. [En línea]. Disponible: <http://holcimecuador.com/sites/default/files/NuestrosProcesosDeProduccion.pdf>.
- [21] Flacema, "Proceso de Fabricación del cemento", 2013, [En línea]. Disponible: <http://www.flacema.org/el-cemento/proceso-de-fabricacion>.
- [22] A. Hernández, "Proceso de fabricación del Cemento", 2011, [En línea]. Disponible: <http://concretoulsacancunadrianohernandez.blogspot.com/2011/08/proceso-de-fabricacion-del-cemento.html>.
- [23] CEMA, Fundación laboral del cemento y medio ambiente, "Fabricación del cemento", [En línea]. Disponible: <https://www.fundacioncema.org/proceso-de-fabricacion/>.
- [24] P. Robalino, H. Eguez, "El uso de la zeolita como una adición mineral para producir cemento puzolánico", ESPOL, Ecuador, 2004.
- [25] L. B. Sand and F. A. Mumpton, "Natural zeolites occurrence, properties, use", Oxford, 1978.
- [26] Zeogroup, «Zeogroup.net,» [En línea]. Disponible: <https://zeogroup.net/0/es/company/#:~:text=Las%20zeolitas%20fueron%20de%20scubiertas%20en,burbujear%20cuando%20inmerso%20en%20agua>.
- [27] G. Kerr, " Zeolitas Sintéticas", Investigación y ciencia N °156, *Science*, 1989.
- [28] M. Cárdenas, "Utilización de las zeolitas naturales como promotor de crecimiento en pollos de engorde", Unisalle, 1992, pp. 15.
- [29] H. Collazos, "La aplicación de zeolita en la producción avícola", *Revista de investigación agraria y ambiental*, <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/904> , 2010, pp. 17-23.
- [30] Chemtech, The American Chemical Society, "Boletín técnico: Zeolita un adsorbente versátil de contaminantes del aire", 1999, [En línea]. Disponible: <https://www3.epa.gov/ttn/catc1/cica/files/zeolits2.pdf>.
- [31] A. Curi, W. Granda, J. Lima, M. Hernani and W. Sousa, "Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros", https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642006000600017&lng=en&nrm=iso&tlng=en , 2006, pp. 111-118.
- [32] I. Anghel, A. Grumezesc, G. Anghel, I. Chireac, L. Marutescu, D. Mihaiescu and M. Chifiriuc, "Antibiotic potentiator effect of the natural and synthetic zeolites with well defined nanopores with possible ent clinical applications", *Farmacia*, 2012, pp. 688-695.

- [33] M. Nuñez, “Uso de la zeolita en cultivos de importancia económica”, Infomin, vol. 10, no. 1, <http://www.infomin.co.cu/index.php/i/article/view/6>, pp. 46–56, 2018.
- [34] P. Loren, L. Mardones, G. Valdes, A. Calabi, and E. Sanchez, “Evaluación de la durabilidad a fatiga de mezclas semi calientes con adición de zeolita natural y Rap” *Rev. Ing. Obras Civiles*, vol. 8, no. 2, pp. 1–16, 2018.
- [35] J. Costafreda y B. Calvo, "Calidad de las rocas zeolitizadas de Cabo de Gata como agregados activos en cementos puzolánicos resistentes a los sulfatos y al agua de mar". *V Jornadas Iberoamericanas de Materiales de Construcción*, Panamá, 2007.
- [36] J. Costafreda, "Caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería)", tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
- [37] J. Costafreda, J. Díaz y B. Calvo, "Propiedades físicas, mecánicas y químicas de algunas zeolitas naturales procedentes de México, Cuba y España", *IV Convención Cubana de Ciencias de la Tierra*, La Habana, Cuba, 2011.
- [38] J. Costafreda, B. Calvo y J. Parra, "Contribución de la zeolita natural a las resistencias mecánicas de cementos, morteros y hormigones", Escuela técnica superior de ingenieros de minas, Madrid, España, 2011.
- [39] F. Morante, B. Perez y L. Canoira, “Las Zeolitas de la costa de Ecuador (Guayaquil): geología, caracterización y aplicaciones”, tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2004.
- [40] R. Ochoa y E. Flores, “Química del cemento parte I,” *Rev. Química*, vol. 8, no. 2, pp. 207–214, 1994.
- [41] “El cemento”, Wikipedia, [En línea]. Disponible: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cemento>.
- [42] Norma Mexicana del Cemento, NMX-C-414, [En línea]. Disponible: <http://www.onncce.org.mx/pdf/NMX-C-141-ONNCCE-20045.pdf>.
- [43] E. Galicia “Influencia de la composición mineralógica del cemento en la difusión de especies químicas”, trabajo de fin de grado, Universidad autónoma del estado de México, Toluca, 2015.
- [44] *Cementos hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*, Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 2380, Ecuador, 2011.
- [45] Z. Makhloufi, M. Chettih, M. Bederina, E. Hadjkadric and M. Bouhichaa “Effect of quaternary cementitious systems containing limestone, blast furnace slag and natural pozzolan on mechanical behavior of limestone mortars”, 2015, pp. 648.
- [46] Petrofísica Ibérica “La Puzolana”, [En línea]. Disponible: <https://www.petrofisicaiberica.com/la-puzolana/>.
- [47] M. Mamlouk y J. Zaniewski, “Materiales para ingeniería civil”, vol. II, Madrid: Pearson Education, 2009
- [48] A. Bernal, “Cementos y hormigones”, 2012, [En línea]. Disponible: <https://sites.google.com/site/cemyhor/-que-es-el-hormigon/los-aridos-y-su-influencia-en-el-concreto>.
- [49] C. Luaces, “Arquitectura y construcción, Anefa, 2010, [En línea]. Disponible: <https://www.interempresas.net/Construccion/Articulos/37082-Los-aridos.html>.
- [50] M. Sanhueza, “Introducción al curso de hormigón”, Dirección de vialidad Gobierno de Chile, 2017, [En línea]. Disponible:

- <http://www.vialidad.cl/areasdevialidad/laboratorionacional/MaterialCursos/introduccionhormigon.pdf>.
- [51] N. Prado, “Química del cemento”, ANCAP Administración Nacional de Combustibles Alcohol y Portland, Uruguay, 2007, [En línea]. Disponible: [https://llamados.ancap.com.uy/docs_concursos/archivos/2%20llamados%20finalizados/2011/ref%2029_2011%20%20%20fiscal%20planta%20\(minas\)/material%20de%20estudio/curso%20abril%202007-2.pdf](https://llamados.ancap.com.uy/docs_concursos/archivos/2%20llamados%20finalizados/2011/ref%2029_2011%20%20%20fiscal%20planta%20(minas)/material%20de%20estudio/curso%20abril%202007-2.pdf)
- [52] Construmática, “Hormigón propiedades”, [En línea]. Disponible: https://www.construmatica.com/construpedia/Hormig%C3%B3n:_Propiedades.
- [53] M. Frederick, *Manual del ingeniero civil*, tomo II, 3ª. Edición, McGraw-Hill, 1992.
- [54] Clase Construcción y Estructura Náutica 2015, “El Hormigón”, [En línea]. Disponible: https://wiki.ead.pucv.cl/images/5/5a/Clase_2_construcci%C3%B3n_1_n%C3%A1utica_2015_Hormig%C3%B3n.pdf, 2015.
- [55] Unican, “Dosificación de hormigones”, [En línea]. Disponible: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/811/course/section/869/Dosificacion%20de%20Hormigones.pdf>.
- [56] Universidad Nacional del Litoral, “Dosificación de hormigones - Método del Nisnovich”, [En línea]. Disponible: http://www.eis.unl.edu.ar/z/adjuntos/1385/Dosificaci%C3%B3n_de_hormigones_-_M%C3%A9todo_del_Nisnovich.pdf.
- [57] M. Garzón, «Seminario de investigación sobre el módulo de elasticidad del hormigón.» Universidad Central del Ecuador, Quito, 2010.
- [58] S. Medina, *Ensayo de Materiales II*, Ambato, Ecuador, 2014.
- [59] L. Smart y E. Moore “Química del estado sólido”, México: Addison-Wesley Iberoamericana S.A, 1995.
- [60] D. Breck, *Zeolite Molecular Sieves*, New York: John-Sons, 1974.
- [61] P. Giannetto, R. Montes, I. Rodríguez “Zeolitas: Características, propiedades y aplicaciones industriales”, Caracas, Venezuela: Editorial Innovación Tecnológica, 1990.
- [62] ZeoCat, Soluciones Ecológicas con Zeolita Natural, 2008. [En línea]. Disponible: <https://www.zecat.es/spanish/construccion.htm>.
- [63] *Cemento Hidráulico: Determinación de la Densidad*, Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 156, Ecuador, 2009.
- [64] *Método de Ensayo para determinar la Densidad del Cemento Hidráulico*, Norma Técnica Colombiana, NTC221, Colombia, 1999.
- [65] A. Neville, *Tecnología del Concreto*, 1era Edición, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, México, 1999.
- [66] *Finura del Cemento Portland Método del Aparato Blaine*, Instituto Nacional de Vías, I.N.V. E - 302 1, Colombia, 2007.
- [67] *Cemento Hidráulico: Determinación de la Finura mediante el aparato de permeabilidad al aire*, Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 196, Ecuador, 2016.
- [68] S. Jiménez, “Granulometría-Método del hidrómetro: fundamentos teóricos, aplicaciones”, [En línea]. Disponible: <https://www.hidraulicafacil.com/2016/06/granulometria-metodo-del-hidrometro.html>.

- [69] J. Torres, “Análisis granulométrico mediante el método del hidrómetro”, [En línea]. Disponible: <https://revistas.utp.ac.pa/index.php/mente-y-materia/article/download/359/pdf/#:~:text=Dentro%20de%20los%20ensayos%20que,los%20suelos%20que%20pasan%20el>.
- [70] *Análisis granulométrico por medio del hidrómetro*, Instituto Nacional de Vías, I.N.V. E - 124, Colombia.
- [71] *Cemento hidráulico determinación la consistencia normal método de Vicat*, Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 157, Ecuador, 2009.
- [72] J. Cañas, “Materiales de construcción determinación de la consistencia normal del cemento portland”, Universidad Centroamericana, El Salvador, [En línea]. Disponible: <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialescostruccion/guiaslab/ensayocemento/consistencia%20normal%20del%20cemento%20portland.pdf>.
- [73] *Métodos de ensayo de cementos parte 3: Determinación del tiempo de fraguado y de la Estabilidad de Volumen*, Normalización Española, UNE-EN 196-3, España, 2017.
- [74] LABTOP, Equipos de Entrenamiento Médico e Ingeniería, "Equipo Automático Vicat C-090/A", [En línea]. Disponible: <https://www.labtop.pe/productos/materiales/infraestructura/cemento/equipo-automatico-vicat-c090a-detail>.
- [75] D.Tebar, "Normalización del cemento Tiempo de fraguado: algunos comentarios sobre el método de ensayo", Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España, 2012.
- [76] *Hormigón de cemento hidráulico determinación de la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico*, Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 1573, Ecuador, 2010.
- [77] Zeonatec, “Mineplus”, [En línea]. Disponible: <https://www.zeonatec.com/mineplus>.
- [78] Holcim, “Cemento hidráulico Tipo GU para la construcción en general” Guayaquil, 2015.
- [79] Cotecno “Cemento Portland de finura estandar SRM 114q”, [En línea]. Disponible: <https://www.cotecno.cl/nuestros-productos/srm-114q-cemento-portland-de-finura-estandar-h-3817/>.
- [80] “Mercurio”, Wikipedia, [En línea]. Disponible: [https://es.wikipedia.org/wiki/Mercurio_\(elemento\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Mercurio_(elemento)).
- [81] “Sikament N-100”, Sika, [En línea]. Disponible: <https://ecu.sika.com/es/construccion/concreto/plasticantes-reductoresdeagua/reductores-de-aguadealtorango/sikament-n-100.html>.
- [82] *Agua para consumo humano requisitos*, Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 1108, Ecuador, 2020
- [83] *Productos derivados del petróleo: gasolina requisitos*, Norma Técnica Ecuatoriana, NTE INEN 935, Ecuador, 2020
- [84] Qualicer, “Técnicas de control del tripolifosfato sódico en las suspensiones cerámicas”, [En línea]. Disponible: <https://www.qualicer.org/recopilatorio/ponencias/pdfs/0232420s.pdf>.
- [85] Humboldt, “Specific Gravity Flask (Le Chatelier)”, [En línea]. Disponible: <https://www.humboldtmg.com/specific-gravity-flask-le-chatelier.html>.

- [86] Matest, “Blaine air permeability apparatus”, [En línea]. Disponible: <https://www.matest.com/es/producto/e009-kit-blaine-air-permeability-apparatus>.
- [87] JMR Equipos, “Hidrómetro para suelos ASTM 152H”, [En línea]. Disponible: <https://www.jmrequipos.com/tienda/hidrometro-para-suelo-astm-152h-de-5-a-60-g-l-gilson/>.
- [88] J. Blaur, “Método de ensayo para determinar la consistencia normal del cemento hidráulico”, [En línea]. Disponible: <http://ingevil.blogspot.com/2008/10/mtodo-de-ensayo-para-determinar-la.html>.
- [89] Matest, “Vicatronc, automatic vicat apparatus”, [En línea]. Disponible: <https://www.matest.com/en/product/e044n-vicatronic-automatic-computerized-tropicalized-vicat-recording-apparatus>.
- [90] Humboldt, “Humboldt Water Baths”, [En línea]. Disponible: https://www.humboldtmfg.com/datasheets/Water_Baths.pdf.
- [91] Matest, “KIT C302 Tanques de curado, plástico pesado”, [En línea]. Disponible: <https://www.matest.com/es/producto/c302-kit-curing-tanks-heavy-plastic>.
- [92] J. E. Bowles, ASTM D-422, AASHTO T88, (Experimento N° 6).
- [93] R. Torres, “Uso de zeolita y humus en el cultivo de zanahoria amarilla (*Daucus carota* L.)”, trabajo de fin de grado, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador 2015.
- [94] V. Salcedo, “Estudio de las propiedades físicas de zeolita natural (aluminosilicato) de tipo clinoptilolita para remplazo parcial del cemento portland”, trabajo de fin de grado, Universidad Técnica de Ambato, Ecuador, 2021.

ANEXOS

A1. DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO

ORIGEN:	Cantera La Playa-Salcedo		
ENSAYADO POR:	GRV-RCP	FECHA:	10/feb/2021
NORMA:	NTE INEN 856		
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL			
DATOS	DENOMINACIÓN	UNIDAD	VALOR
M1	Masa del picnómetro	gr	163.00
M2	Masa del picnómetro+ muestra SSS	gr	543.60
M3	Masa del picnómetro+ muestra SSS+agua	gr	895.70
M4=M3-M2	Masa agua añadida	gr	352.10
M5	Masa del picnómetro + 500 cc de agua	gr	661.10
M6=M5-M1	Masa de 500 cc de agua	gr	498.10
DA=M6/500cm ³	Densidad del agua	gr	1.00
M7=M6-M4	Masa del agua desalojada por la muestra	gr	146.00
Msss=M2-M1	Masa del agregado	gr	380.60
Vsss=M7/DA	Volumen del agua desalojada	cm ³	146.56
DRA=Msss/Vsss	Densidad real de la arena	g/cm ³	2.597
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN			
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR
M7	Masa del recipiente	gr	31.90 30.60
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	155.0 148.3 0 0
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	123.1 117.7 0 0
M10	Masa del recipiente+muestra seca	gr	152.9 146.0 0 0
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	121.0 115.4 0 0
CA=((M9-M11)/M11)*100	Capacidad absorción	%	1.74 1.99
P2=(CA1+CA2)/2	Capacidad absorción promedio	%	1.86

A2. DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO

ORIGEN:	Cantera La Playa-Salcedo		
ENSAYADO POR:	GRV-RCP	Fecha:	19/feb/2021
NORMA:	NTE INEN 857		
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL			
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR
M1	Masa canastilla en el aire	gr	1244.00
M2	Masa canastilla en el agua	gr	1077.00
M3	Masa canastilla + Agregado SSS en el aire	gr	3246.00
M4	Masa canastilla + Agregado SSS en el agua	gr	2321.00
DA	Densidad real del agua	g/cm ³	1.00
B=M5=M3-M1	Masa de la muestra SSS en el aire	gr	2002.00
C=M6=M4-M2	Masa de la muestra SSS en el agua	gr	1244.00
VR=(M5-M6)/DA	Volumen real de la muestra	cm ³	758.000
DR=M5/VR	Densidad real	g/cm ³	2.641
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN			
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR
M7	Masa del recipiente	gr	33.30 32.20
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	264.20 242.20
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	257.70 235.20
M10	Masa del recipiente+muestra seca	gr	230.90 210.00
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	224.40 203.00
CA=((M9-M11)/M11)*100	Capacidad absorción	%	2.90 3.45
P2=(CA1+CA2)/2	Capacidad absorción promedio	%	3.17

A3. DENSIDAD APARENTE SUELTA DEL AGREGADO FINO Y GRUESO

ORIGEN:	Cantera La Playa-Salcedo			
MASA RECIPIENTE (kg)	9.70			
ENSAYADO POR:	GRV-RCP	FECHA:	17/feb/2021	
VOLUMEN RECIPIENTE (dm³)	20.64			
NORMA:	NTE INEN 858:2010			
AGREGADO	Agregado + Recipiente (kg)	Agregado (kg)	Peso Unitario (kg/dm³)	Promedio (kg/dm³)
GRUESO	36.40	26.70	1.294	1.292
	36.20	26.50	1.284	
	36.50	26.80	1.298	
FINO	42.20	32.50	1.575	1.579
	42.50	32.80	1.589	
	42.20	32.50	1.575	

A4. DENSIDAD APARENTE COMPACTADA DEL AGREGADO FINO Y GRUESO

ORIGEN:	Cantera La Playa-Salcedo			
MASA RECIPIENTE (kg)	9.70			
ENSAYADO POR:	GRV-RCP	FECHA:	17/feb/2021	
VOLUMEN RECIPIENTE (dm³)	20.64			
NORMA:	NTE INEN 858:2010			
AGREGADO	Agregado + Recipiente (kg)	Agregado (kg)	Peso Unitario (kg/dm³)	Promedio (kg/dm³)
GRUESO	39.20	29.50	1.429	1.431
	39.30	29.60	1.434	
	39.20	29.50	1.429	
FINO	46.00	36.30	1.759	1.755
	45.80	36.10	1.749	
	46.00	36.30	1.759	

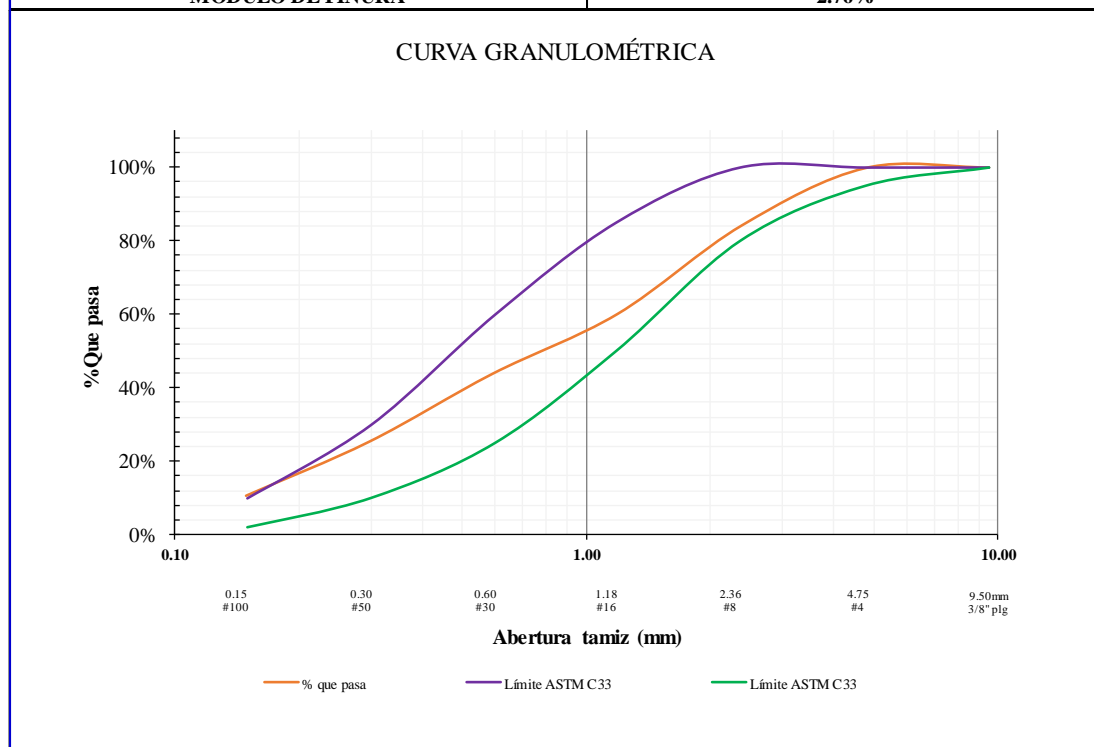
A5. DENSIDAD APARENTE COMPACTADA DE LA MEZCLA

ORIGEN:		Cantera La Playa-Salcedo						
MASA RECIPIENTE (kg)		9.70						
ENSAYADO POR:		GRV-RCP					FECHA:	02/mar/2021
VOLUMEN RECIPIENTE (dm³)		20.64						
NORMA:		NTE INEN 858:2010						
% Mezcla		Cantidad (kg)		Fino añadido (kg)	Agregado + Recipiente (kg)	Agregado (kg)	Peso unitario mezcla (kg/dm ³)	Peso unitario promedio (kg/dm ³)
GRUESO	FINO	GRUESO	FINO	FINO	AGREGADO FINO + GRUESO			
100%	0%	40.00	0.00	0.00	40.20	30.50	1.478	1.470
					39.90	30.20	1.463	
90%	10%	40.00	4.44	4.44	42.80	33.10	1.604	1.609
					43.00	33.30	1.613	
80%	20%	40.00	10.00	5.56	45.70	36.00	1.744	1.739
					45.50	35.80	1.734	
70%	30%	40.00	17.14	7.14	48.20	38.50	1.865	1.863
					48.10	38.40	1.860	
60%	40%	40.00	26.67	9.53	49.60	39.90	1.933	1.931
					49.50	39.80	1.928	
50%	50%	40.00	40.00	13.33	49.40	39.70	1.923	1.926
					49.50	39.80	1.928	
40%	60%	40.00	60.00	20.00	49.40	39.70	1.923	1.921
					49.30	39.60	1.919	

PORCENTAJE ÓPTIMO DE LA MEZCLA VS. DENSIDAD APARENTE PROMEDIO	
<p> $y = -1.7909x^2 + 1.8523x + 1.4569$ </p> <p> Densidad aparente promedio (kg/dm³) vs. Porcentaje óptimo de la mezcla % </p> <p> - % ÓPTIMO (línea vertical morada) - % MÁXIMO (línea vertical naranja) </p>	<p> Porcentaje máximo de agregado fino (%) 52% </p> <p> Porcentaje máximo de agregado grueso (%) 48% </p> <p> Porcentaje óptimo de agregado fino (%) 48% </p> <p> Porcentaje óptimo de agregado grueso (%) 52% </p> <p> Peso unitario máximo (gr/cm³) 1.936 </p> <p> Peso unitario óptimo (gr/cm³) 1.933 </p>

A6. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO FINO

ORIGEN:		Cantera La Playa-Sacedo				
PESO MUESTRA (gr):		1000		PÉRDIDA DE MUESTRA (%)		0.02
ENSAYADO POR:		GRV-RCP		FECHA:		10/feb/2021
NORMA:		NTE INEN 696				
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (gr)	Retenido acumulado (gr)	% Retenido acumulado	% que pasa	Límites ASTM % que pasa
3/8"	9.5	0.0	0.0	0.00%	100.00%	100
# 4	4.76	1.5	1.5	0.15%	99.85%	95 --- 100
# 8	2.38	156.9	158.4	15.84%	84.16%	80 --- 100
# 16	1.19	240.8	399.2	39.93%	60.07%	50 --- 85
# 30	0.59	163.7	562.9	56.30%	43.70%	25 --- 60
# 50	0.297	184.4	747.3	74.74%	25.26%	10 --- 30
# 100	0.149	147.5	894.8	89.50%	10.50%	2 --- 10
# 200	0.075	58.6	953.4	95.36%	4.64%	-
BANDEJA		46.40	999.8	100.00%	0.00%	
MÓDULO DE FINURA				2.76%		



A7. CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS ÁRIDOS

ORIGEN:	Cantera La Playa-Salcedo		
ENSAYADO POR:	GRV-RCP	FECHA	02/mar/2021
NORMA:	NTE INEN 856		
CÁLCULO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL ARIDO FINO			
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR
M7	Masa del recipiente	gr	32.60 32.30
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	154.60 126.70
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	122.00 94.40
M10	Masa del recipiente+muestra seca	gr	153.40 125.80
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	120.80 93.50
CA=((M9-M11)/M11)*100	Contenido de humedad	%	0.99 0.96
P2=(CA1+CA2)/2	Contenido de humedad promedio	%	0.978
CÁLCULO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL ARIDO GRUESO			
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR
M7	Masa del recipiente	gr	31.90 30.10
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	gr	152.20 159.60
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	gr	120.30 129.50
M10	Masa del recipiente+muestra seca	gr	151.50 158.60
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	gr	119.60 128.50
CA=((M9-M11)/M11)*100	Contenido de humedad	%	0.59 0.78
P2=(CA1+CA2)/2	Contenido de humedad promedio	%	0.682

A8. LECTURAS DEL APARATO AUTOMÁTICO DE VICAT PARA LA PASTA DE CEMENTO

ID.	Penetración (mm)	Tiempo (m.s)
1	0	4.3
2	0.4	16.3
3	1.5	28.3
4	3.9	40.3
5	14.3	52.3
6	31.3	64.3
7	38.6	76.3
8	38.9	88.3
9	39.2	100.3
10	39.3	112.3
11	39.3	124.3
12	39.4	136.3
13	39.4	148.3
14	39.4	160.3
15	39.5	172.3
16	39.6	184.3
17	39.3	196.3
18	39.1	208.3
19	39.1	220.3
20	39.2	232.3
21	39.4	244.3
22	39.6	256.3
23	39.7	268.3
24	39.8	280.3
25	40	292.3
26	40	304.3
27	40	316.3

A9. LECTURAS DEL APARATO AUTOMÁTICO DE VICAT PARA LA PASTA DE CEMENTO CON 10% DE SUSTITUCIÓN DE ZEOLITA

ID.	Penetración (mm)	Tiempo (m.s)
1	0.1	4.2
2	0	16.2
3	0	28.2
4	0	40.2
5	0	52.2
6	0	64.2
7	0.1	76.2
8	4.7	88.2
9	10.9	100.2
10	18.2	112.2
11	33.6	124.2
12	36.3	136.2
13	37.2	148.2
14	37.2	160.2
15	37.3	172.2
16	37.3	184.2
17	37.7	196.2
18	38.3	208.2
19	38.1	220.2
20	38.3	232.2
21	38	244.2
22	37.9	256.2
23	38.4	268.2
24	38.8	280.2
25	39.6	292.2
26	39.9	304.2
27	40	316.2
28	40	328.2
29	40	340.2

A10. LECTURAS DEL APARATO AUTOMÁTICO DE VICAT PARA LA PASTA DE CEMENTO CON 15% DE SUSTITUCIÓN DE ZEOLITA

ID.	Penetración (mm)	Tiempo (m.s)
1	0	4.52
2	0	16.52
3	0	28.52
4	0	40.52
5	0	52.52
6	0	64.52
7	0	76.52
8	0.2	88.52
9	4.2	100.52
10	6.7	112.52
11	27.4	124.52
12	33.1	136.52
13	36.1	148.52
14	38	160.52
15	38	172.52
16	38.4	184.52
17	38.4	196.52
18	38.4	208.52
19	38	220.52
20	38.1	232.52
21	37.7	244.52
22	37.8	256.52
23	38.2	268.52
24	38.6	280.52
25	38.8	292.52
26	38.8	304.52
27	38.8	316.52
28	39.3	328.52
29	39.8	340.52
30	40	352.52
31	40	364.52
32	40	376.52

A11. LECTURAS DEL APARATO AUTOMÁTICO DE VICAT PARA LA PASTA DE CEMENTO CON 20% DE SUSTITUCIÓN DE ZEOLITA

ID.	Penetración (mm)	Tiempo (m.s)
1	0	7.56
2	0	19.56
3	0	31.56
4	0	43.56
5	0	55.56
6	0	67.56
7	0	79.56
8	0	91.56
9	0	103.56
10	2.2	115.56
11	15.6	127.56
12	26.7	139.56
13	32.5	151.56
14	34.3	163.56
15	34.8	175.56
16	35.2	187.56
17	36.5	199.56
18	36.8	211.56
19	37.7	223.56
20	38.0	235.56
21	37.7	247.56
22	37.7	259.56
23	38.2	271.56
24	38.3	283.56
25	38.5	295.56
26	38.5	307.56
27	38.5	319.56
28	38.6	331.56
29	38.5	343.56
30	38.5	355.56
31	39.2	367.56
32	39.6	379.56
33	39.9	391.56
34	40	403.56
35	40	415.56
36	40	427.56

A12. FOTOGRAFÍAS



Figura 36. *Recolección de los agregados.*



Figura 37. *Ensayos de los agregados para la dosificación del hormigón.*



Figura 38. *Determinación de la densidad real, Método de Le Chatelier.*



Figura 39. *Determinación de la finura, Método del aparato de permeabilidad al aire Blaine.*



Figura 40. Análisis hidrométrico de la zeolita ZV.



Figura 41. Determinación de la consistencia normal (Aparato de Vicat Manual).



Figura 42. Determinación del tiempo de fraguado (Aparato de Vicat Automático).



Figura 43. Elaboración de los especímenes de hormigón.



Figura 44. Vibrado del hormigón.



Figura 45. Especímenes de hormigón



Figura 46. Curado del hormigón.



Figura 47. Ensayo a compresión de los especímenes de hormigón.