



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 TRACCIÓN INDIRECTA
DEL CONCRETO ESTRUCTURAL”**

AUTOR: Ricardo Guillermo Panimbosa Panimbosa

TUTOR: Ing. Mg. Wilson Santiago Medina Robalino

AMBATO-ECUADOR

Enero - 2022

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutor 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 TRACCIÓN INDIRECTA DEL CONCRETO ESTRUCTURAL”**, elaborado por el Sr. Ricardo Guillermo Panimbosa Panimbosa, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 1805118476, 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, enero 2022

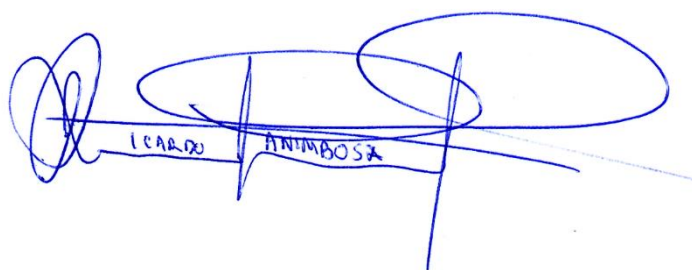
Ing. Mg. Wilson Santiago Medina Robalino

TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, **Ricardo Guillermo Panimbosa Panimbosa**, con C.I. 1805118476 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 TRACCIÓN INDIRECTA DEL CONCRETO ESTRUCTURAL”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, enero 2022



Ricardo Guillermo Panimbosa Panimbosa

C.I: 1805118476

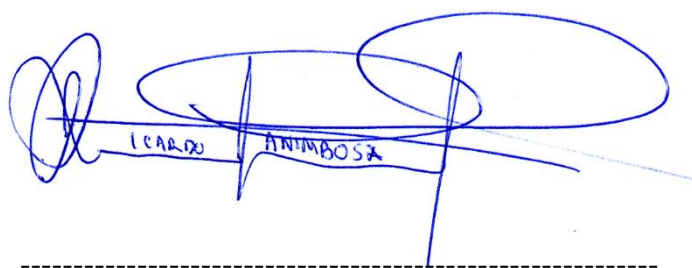
AUTOR

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, enero 2022



Ricardo Guillermo Panimbosa Panimbosa

C.I. 1805118476

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe de Trabajo Experimental, realizado por el estudiante Ricardo Guillermo Panimbosa Panimbosa de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **“EFECTOS DE LA ZEOLITA COMO MATERIAL SUPLEMENTARIO DEL CEMENTO PORTLAND EN LA RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA DEL CONCRETO ESTRUCTURAL”**.

Ambato, enero 2022

Para constancia firman:

PhD. Diana Carolina Coello Fiallos
Miembro Calificador

Ing. MSc. Maritza Elizabeth Ureña Aguirre
Miembro Calificador

DEDICATORIA

A mi madre, Nellia, mi amor eterno, la mujer que me ilumina día a día con su sonrisa, la mujer que entra en lo más profundo de mi razón y restablece el rumbo de mi vida, la mujer que ha puesto su vida por construir un mejor futuro de sus hijos, la mujer que siempre creyó en mí, la mujer que siempre tiene la fortaleza para levantarse día a día, la mujer virtuosa más resiliente que la vida y Dios me ha dado la dicha de tener como madre.

A mi padre, Asdrúbal, el hombre que me ha enseñado la vocación de servicio, humildad, honestidad, dedicación y esfuerzo diario.

A mi hermana, Lisette, y mi familia, quienes me han enseñado a sobreponerme a la adversidad, esfuerzo, perseverancia y trabajo constante por los sueños.

Ricardo Panimbosa

AGRADECIMIENTO

A mis padres, Nellia y Asdrúbal, por su esfuerzo, por la trascendencia en mis sueños, por darme la oportunidad de educarme y dar estudios superiores a sus hijos a través de la profesión más digna del ser humano, la agricultura. Mi gratitud eterna y admiración, a una mujer y un hombre del campo, quienes son mi mayor fuente inagotable de lecciones de vida.

A mi hermana, Lissette, y toda mi familia por apoyarme en el transcurso de mis estudios.

A mis amigos que contribuyeron en mi formación y compartieron sus conocimientos como sus buenas vibras.

A mi compañero tesista Gonzalo Rodríguez, por todo el trabajo en equipo desplegado en la investigación y su amistad brindada desde el colegio.

A los docentes de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Ambato por todos estos años de formación académica como personal.

A mi tutor, Ing. Santiago Medina por todos su conocimientos y experiencia compartida durante esta investigación.

A los docentes PhD. Diana Coello, Ing. Favio Portilla y la Ing. Maritza Ureña por su gestión, conocimientos y aportes en el desarrollo de la investigación.

A la Dirección de Investigación y Desarrollo (DIDE) por medio del grupo de investigación SciTeM de la Facultad de la 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 los técnicos de los Laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato.

Y como hombre de fe, a mi Dios, a la Virgen del Rosario de Agua Santa.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

A.- PÁGINAS PRELIMINARES

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xiv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT	xvii

B.- CONTENIDO

CAPÍTULO I.....	1
1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	1
1.1.1. Antecedentes	1
1.1.2. Justificación	4
1.1.3. Fundamentación teórica.....	6
1.1.3.1. Cemento.....	6
1.1.3.2. Concreto estructural.....	19
1.1.3.3. Zeolitas.....	25
1.1.3.4. Zeolitas como materiales cementantes suplementarios (SCM).....	29
1.1.4. Hipótesis	40
1.2. OBJETIVOS.....	40
1.2.1. General.....	40
1.2.2. Específicos	40
CAPÍTULO II	41
2.1. MATERIALES.....	41
2.1.1. Zeolita natural comercial ZZ	41
2.1.2. Cemento tipo GU	42

2.1.3. Cemento portland SRM 114q	42
2.1.4. Tripolifosfato de sodio.....	42
2.1.5. Agregados	43
2.1.6. Aditivo plastificante.....	43
2.2. EQUIPOS	44
2.2.1. Frasco Le Chatelier	44
2.2.2. Aparato Blaine de permeabilidad al aire.....	45
2.2.3. Hidrómetro 152 H.....	46
2.2.4. Baño María	46
2.2.5. Aparato manual de Vicat	47
2.2.6. Aparato automático de Vicat	47
2.2.7. Tanque de curado.....	48
2.2.8. Máquina de ensayo	49
2.2.9. Máquina de penetración de agua	50
2.3. MÉTODOS.....	51
2.3.1. Caracterización física.....	51
2.3.1.1. Densidad.....	51
2.3.1.2. Finura	53
2.3.1.3. Tamaño de la partícula	58
2.3.2. Tiempo de fraguado.....	64
2.3.3. Diseño y elaboración de las mezclas de hormigón	67
2.3.3.1. Diseño de la mezcla.....	67
2.3.3.2. Elaboración de las mezclas de hormigón	72
2.3.4. Ensayo de tracción indirecta del hormigón endurecido.....	73
2.3.5. Penetración de agua bajo presión del hormigón endurecido	74
CAPÍTULO III	75
3.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	75
3.1.1. Densidad de la zeolita y cemento tipo GU	76
3.1.2. Finura.....	78
3.1.3. Tamaño de la partícula.....	84
3.1.4. Tiempo de fraguado.....	87
3.1.5. Diseño de la mezcla de hormigón.....	95

3.1.6. Propiedades del hormigón fresco y endurecido.....	98
3.1.6.1. Asentamiento de las mezclas.....	98
3.1.6.2. Densidad del hormigón fresco.....	99
3.1.6.3. Densidad del hormigón endurecido.....	103
3.1.7. Tracción indirecta	107
3.1.8. Penetración de agua bajo presión.....	116
3.2. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS	119
CAPÍTULO IV	120
4.1. CONCLUSIONES.....	120
4.2. RECOMENDACIONES	122
BIBLIOGRAFÍA	124
ANEXOS	130
A.1. LECTURAS DE PENETRACIÓN DEL VICATRONIC PARA LA PASTA DE CEMENTO.....	130
A.2. LECTURAS DE PENETRACIÓN DEL VICATRONIC PARA LA PASTA CON 10% DE SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR ZEOLITA.....	131
A.3. LECTURAS DE PENETRACIÓN DEL VICATRONIC PARA LA PASTA CON 15% DE SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR ZEOLITA.....	132
A.4. LECTURAS DE PENETRACIÓN DEL VICATRONIC PARA LA PASTA CON 20% DE SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR ZEOLITA.....	133
A.5. ENSAYO DE DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO	134
A.6. ENSAYO DE DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO.....	135
A.7. ENSAYOS DE DENSIDAD APARENTE Y DENSIDAD APARENTE COMPACTADA DE LOS AGREGADOS	136
A.8. ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE COMPACTADA DE LA MEZCLA.....	137
A.9. ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS DE LOS AGREGADOS	139
A.10. ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS	141
A.11. MATERIALES.....	142
A.12. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE DENSIDAD.....	143
A.13. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL APARATO DE PERMEABILIDAD AL AIRE.....	144

A.14. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD CON EL APARATO BLAINE	145
A.15. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR HIDRÓMETRO.....	147
A.16. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE CONSISTENCIA NORMAL Y TIEMPO DE FRAGUADO	148
A.17. PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN, MEDICIÓN DEL ASENTAMIENTO Y CURADO DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO.....	150
A.18. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA.....	152
A.19. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN	153
A.20. ESPECÍMENES ENSAYADOS MEDIANTE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN	154

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Fuentes de las materias primas usadas en la fabricación del cemento portland[29]	8
Tabla 2 Notación usada en la química del cemento[31]	14
Tabla 3 Diversos términos utilizados para los minerales de cemento[31]	15
Tabla 4 Clasificación de los agregados[38]	21
Tabla 5 Efectos de los beneficios de diferentes tipos de aditivos sobre las propiedades del hormigón[38]	23
Tabla 6 Clasificación del hormigón según la densidad aparente y resistencia[38]	24
Tabla 7 Composición química de muestras de zeolita de la cordillera Chongón-Colonche	27
Tabla 8 Composición química de muestras de zeolitas de la cordillera Chongón-Colonche	31
Tabla 9 Categoría y clases de exposición para la durabilidad del hormigón[65], [66]	38
Tabla 10 Composición química de la zeolita natural	41
Tabla 11 Composición química y componentes del cemento portland SRM 114q[69]	42
Tabla 12 Propiedades físicas de los agregados	43
Tabla 13 Densidad del mercurio a temperatura ambiente[76]	54
Tabla 14 Valores de Ct para la corrección por temperatura del hidrómetro tipo 152-H[77]	60
Tabla 15 Valores del factor a, para diferentes gravedades específicas[61], [78]	61
Tabla 16 Valores de profundidad efectiva, L, para el hidrómetro 152-H[61], [78]	62
Tabla 17 Coeficiente de viscosidad del agua a varias temperaturas[79]	63
Tabla 18 Normas usadas en la determinación de las propiedades del cemento y agregados	68
Tabla 19 Resistencia a compresión en base a la relación agua/cemento[41]	69
Tabla 20 Clasificación de las consistencias según su asentamiento medido en el cono de Abrams[41]	70
Tabla 21 Cantidad de pasta en función del asentamiento de requerido, CP	70
Tabla 22 Densidad de la zeolita natural comercial	76
Tabla 23 Densidad del cemento tipo GU	76
Tabla 24 Comparación de gravedades específicas de zeolitas y cementos	77
Tabla 25 Volumen aparente de la camada compactada y masa de la muestra	79
Tabla 26 Tiempo de la muestra normalizada (Cemento SRM 114q)	80
Tabla 27 Masa para muestras de cemento tipo GU	80
Tabla 28 Superficie específica del cemento tipo GU	81
Tabla 29 Valores para la determinación de la constante b de la zeolita	82
Tabla 30 Superficie específica de la zeolita natural	83
Tabla 31 Análisis granulométrico de la zeolita natural comercial, ZZ, por hidrómetro	85
Tabla 32 Constante K en función de la densidad de la zeolita y temperatura de ensayo	86
Tabla 33 Consistencia normal de las pastas de cemento y cemento-zeolita	87

Tabla 34 Tiempos de fraguado de la pasta de cemento	88
Tabla 35 Tiempos de fraguado de la pasta con 10% de sustitución de cemento por zeolita	89
Tabla 36 Tiempos de fraguado de pasta con 15% de sustitución de cemento por zeolita	90
Tabla 37 Tiempos de fraguado de pasta con 20% de sustitución de cemento por zeolita	91
Tabla 38 Tiempo de fraguado de las pastas de cemento y cemento-zeolita	92
Tabla 39 Propiedades de los agregados requeridos para el diseño de la mezcla	95
Tabla 40 Condiciones de diseño y cálculos para la dosificación de los componentes del hormigón	96
Tabla 41 Dosificación de las mezclas de hormigón.....	96
Tabla 42 Dosificación al volumen para la mezcla de control, CEM	97
Tabla 43 Dosificación al volumen de las mezclas	97
Tabla 44 Asentamiento de las mezclas medidos por el cono de Abrams	98
Tabla 45 Densidad de la mezcla de control en estado fresco.....	100
Tabla 46 Densidad de la mezcla con el 10% de sustitución de cemento por zeolita en estado fresco.....	100
Tabla 47 Densidad de la mezcla con el 15% de sustitución de cemento por zeolita en estado fresco.....	101
Tabla 48 Densidad de la mezcla con el 20% de sustitución de cemento por zeolita en estado fresco.....	101
Tabla 49 Densidad promedio de las mezclas del hormigón fresco.....	102
Tabla 50 Densidad del hormigón endurecido con la mezcla de control, CEM	103
Tabla 51 Densidad del hormigón endurecido con el 10% de sustitución, Z10.....	104
Tabla 52 Densidad del hormigón endurecido con el 15% de sustitución, Z15.....	104
Tabla 53 Densidad del hormigón endurecido con el 20% de sustitución, Z20.....	105
Tabla 54 Densidad promedio del hormigón endurecido por edades.....	105
Tabla 55 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón de control, CEM.....	107
Tabla 56 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón con el 10% de sustitución, Z10	109
Tabla 57 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón con el 15% de sustitución, Z10	110
Tabla 58 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón con el 20% de sustitución, Z20	112
Tabla 59 Resultados de tracción indirecta y comparación con el hormigón de control	113
Tabla 60 Dimensión, tracción indirecta, penetración máxima y promedio de los especímenes de ensayo.....	116
Tabla 61 Resultados de penetración de los hormigones estudiados	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 1 Producción tecnológica del cemento portland[26]	6
Figura. 2 Diagrama del sistema de horno de precalcinación que muestra la ubicación de las principales reacciones químicas[28].....	11
Figura. 3 Proporciones indicativas de los minerales presentes durante la conversión de la harina cruda en clínker[28]	12
Figura. 4 Clasificación de los materiales puzolánicos[54], [55].....	30
Figura. 5 Distribución del tamaño de las partículas del cemento (OPC), cuarzo y zeolitas naturales[58].....	32
Figura. 6 Distribución de esfuerzos de la probeta bajo el ensayo de tracción indirecta[38]	37
Figura. 7 Frasco volumétrico de Le Chatelier[70]	44
Figura. 8 Aparato Blaine de permeabilidad al aire[71].....	45
Figura. 9 Hidrómetro 152 H.....	46
Figura. 10 Baño maría[72]	46
Figura. 11 Aparato manual de Vicat	47
Figura. 12 Aparato automático de Vicat, Vicatronic	48
Figura. 13 Tanque de curado.....	48
Figura. 14 Máquina de ensayo	49
Figura. 15 Máquina de penetración de agua[75].....	50
Figura. 16 Valor de la constante b, y correlación entre la porosidad ε y ε_{3T}	82
Figura. 17 Superficie específica de los materiales estudiados	84
Figura. 18 Curva granulométrica de la zeolita natural comercial Z.....	86
Figura. 19 Proceso de fraguado de la pasta de cemento	88
Figura. 20 Proceso de fraguado de la pasta con 10% de sustitución de cemento por zeolita	89
Figura. 21 Proceso de fraguado de la pasta con 15% de sustitución de cemento por zeolita	90
Figura. 22 Proceso de fraguado de la pasta con 20% de sustitución de cemento por zeolita	91
Figura. 23 Proceso de fraguado de las pastas.....	93
Figura. 24 Tiempo de fraguado de las pastas	93
Figura. 25 Asentamiento de las mezclas	98
Figura. 26 Densidades de las mezclas del hormigón fresco.....	102
Figura. 27 Densidades del hormigón endurecido por edades	106
Figura. 28 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón de control con la edad de curado.....	108
Figura. 29 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón Z10 con la edad de curado	109
Figura. 30 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón Z15 con la edad de curado	111

Figura. 31 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón Z20 con la edad de curado	112
Figura. 32 Desarrollo de la resistencia de los hormigones con la edad de curado.....	114
Figura. 33 Resistencia a la tracción indirecta de los hormigones CEM, Z10, Z15 Y Z20	115
Figura. 34 Penetración de agua bajo presión de los hormigones CEM, Z10, Z15 y Z20	117

RESUMEN

La emisión de dióxido de carbono de la industria cementera genera problemas medioambientales, de ahí la estrategia de usar zeolitas como materiales cementantes suplementarios y contribuir a la lucha contra el cambio climático.

En esta investigación se llevó a cabo la caracterización física de un mineral de zeolita y de un tipo de cemento disponibles comercialmente, seguido se determinó el tiempo de fraguado en pastas para llegar al tema que es la resistencia a la tracción indirecta de hormigones con fines estructurales, diseñados para una resistencia a compresión de 24MPa y la permeabilidad se evaluó mediante la penetración de agua bajo presión, factor que influye en su durabilidad. Los porcentajes de sustitución de cemento por zeolita fueron del 0, 10, 15 y 20 por ciento en pastas como hormigones.

La densidad, superficie específica y tamaño medio de las partículas determinadas para la zeolita son de 2.41 gramos por centímetros cúbicos, 563 metros cuadrados por kilogramo y 5 micrómetros, respectivamente. Las pastas de cemento-zeolita evidenciaron una mayor demanda de agua para entrar en consistencia normal, por ende, un mayor tiempo de fraguado. Para asegurar la trabajabilidad del hormigón con zeolita se usó un aditivo plastificante.

La resistencia a la tracción indirecta a la edad de 28 días en los especímenes de hormigón con zeolita fue casi igual o ligeramente menor al hormigón de control. La penetración de agua fue mayor en todos los porcentajes de sustitución. El 20 por ciento de sustitución demostró mejores efectos en las propiedades en estado fresco y endurecido.

Palabras clave: Zeolita, Tracción indirecta, Permeabilidad, Tiempo de fraguado, Finura Blaine, Superficie específica, Hidrómetro, Durabilidad

ABSTRACT

The emission of carbon dioxide from the cement industry generates environmental issues, hence the strategy of using zeolites as supplementary cementitious materials and contributing to the fight against climate change.

In this research, the physical characterization of a zeolite mineral and a type of cement, commercially available, was carried out, followed was determinate of the setting time in pastes to reach the topic that is the indirect tensile strength of concretes for structural purposes, designed for a compressive strength of 24MPa and the permeability was evaluated through the penetration of pressurized water, a factor that influences its durability. The percentages of cement substitution by zeolite were 0, 10, 15 and 20 percent in pastes such as concretes.

The density, specific surface area and average particle size determined for zeolite are 2.41 grams per cubic centimeter, 563 square meters per kilogram and 5 micrometers, respectively. The cement-zeolite pastes evidenced a higher water demand to enter normal consistency, hence, a longer setting time. To ensure the workability of the zeolite concrete, a plasticizing additive was used.

The indirect tensile strength at the age of 28 days in the zeolite concrete specimens was almost equal to or slightly lower than the control concrete. Water penetration was higher at all substitution percentages. The 20 percent substitution showed better effects on fresh and hardened properties.

Keywords: Zeolite, Indirect Tensile, Permeability, Setting Time, Fineness Blaine, Specific Surface, Hydrometer, Durability

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1.1. Antecedentes

La zeolita es un material puzolánico natural, históricamente definido como aluminosilicatos, acuñado en 1756 por el mineralogista sueco, Axel von Cronstedt. A partir de estos años, muchos minerales de esta familia han sido descubiertos y estudiados[1], [2]. Actualmente, la Asociación Internacional de Zeolitas (IZA) con la comisión de zeolitas naturales desde su organización en 1973, agrupa en su base de datos, 67 especies de minerales dentro de las cuales pueden existir cationes alcalinos o alcalinotérreos, o ambos[3].

En 1974, programas de investigación y desarrollo cubanos, iniciaron el empleo de tobas volcánicas con minerales de zeolita, como la mordenita en la producción de cemento portland puzolánico. Posteriormente, utilizaron clinoptilolita-heulandita como áridos ligeros. Los minerales estudiados presentaron altos contenidos en sílice y alúmina, con una superficie específica elevada, mientras que las densidades eran bajas. El Centro Técnico para el Desarrollo de Materiales de Construcción de la Habana, estudió la aplicación de zeolita natural como aditivos y componentes en las mezclas de hormigón y morteros de altas prestaciones, que alcanzaron resistencias superiores a los 70.0 MPa. Las propiedades que sustentaron su efectividad fue la posibilidad de aligeramiento de la masa, aislamiento térmico, mayor resistencia frente a la corrosión en hormigones reforzados, entre otras[4].

En Ecuador, las investigaciones empezaron en 1994 mediante un convenio entre Cuba y Ecuador para el reconocimiento geológico, muestreo y caracterización de los yacimientos

e indicios de zeolitas de la formación Cayo, en la cordillera Chongón-Colonche. Los resultados fueron satisfactorios, reconociendo a la formación como principal enclave geológico de rocas zeolitizadas. En el techo de esta formación aparecen minerales tipo clinoptilolita-heulandita; del centro a su base, modernita y laumontita[4], [5].

Durante el año 2005, una investigación financiada por el Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CYCYT) de la ESPOL, con colaboración de instituciones como Holcim-Guayaquil, desarrolló un proyecto con el objetivo de utilizar las zeolitas en las mezclas de cementos puzolánicos, hormigones y morteros. Al sustituir en niveles de remplazo del 20 al 50% de zeolita se comprueba una menor deformación de los prismas de mortero por el ataque de sulfatos que fueron almacenados en una solución de sulfato de sodio al 5%. Además, las mezclas con zeolitas mostraron mayor eficiencia en la resistencia a compresión y como material puzolánico, hasta un 20% de sustitución del cemento portland[4].

En este contexto, el uso de zeolita tipo clinoptilolita procedente de Semnán, Irán, como material cementante suplementario, ha sido ampliamente investigado en [6]–[11]. Los autores de estas investigaciones determinan que la zeolita natural al tener una estructura porosa y una alta superficie específica, la demanda de agua o un superplastificante aumenta, para mantener el asentamiento y asegurar su trabajabilidad.

Ahmadi y Shekarchi [6] evidenciaron que la resistencia mecánica del hormigón con zeolita en todas las edades independientes del nivel de sustitución, aumentaron, su efectividad la relacionan a su alta pureza del 90-95%. La resistencia a la tracción indirecta en el hormigón fue mayor a partir de los 28 días, al sustituir 10% del cemento portland por zeolita y evidenció un mejor comportamiento con relaciones agua/materiales cementantes, mayores[9]. No obstante, Najimi et al.[7] y Samini et al.[10] al estudiar un hormigón convencional y autocompactante de alta resistencia, respectivamente, con porcentajes de sustitución del 10% al 30% de zeolita natural en comparación del hormigón de control, la resistencia a compresión fue menor en todas la edades. Sin embargo, el porcentaje de reducción fue disminuyendo con la edad, atribuyendo este comportamiento a la actividad puzolánica[1], [7], [10].

Najimi et al.[7] vinculan la penetración de agua bajo presión con la microestructura; la mezclas con zeolita tienen menos poros debido a la actividad puzolánica y al consumo de hidróxido de calcio. Además, Samimi et al.[10] indican que el ensayo de penetración de agua se puede utilizar como un indicador de durabilidad del hormigón, ya que el agua puede disolver componentes cementosos, y la propia penetración provocar daños físicos y químicos.

La eficacia de la zeolita natural se evidencia en la durabilidad del concreto con un mejor comportamiento frente a la penetración del ion cloruro, velocidad de corrosión, contracción por secado y penetración de agua[7]. La disminución en el coeficiente de difusión de cloruros y aumento de la resistividad eléctrica, generan un escenario para que tenga mayor resistencia a la corrosión[6]. Además, Valipour et al. [12] con la sustitución del 20% de cemento por zeolita natural, durante el análisis del ciclo vida, los cálculos indicaron una reducción del 69.7% del potencial de calentamiento global con el uso de la zeolita.

Actualmente, se ejecuta un proyecto de investigación “Estudios de las propiedades físicas y morfológicas de aluminosilicatos para el reemplazo parcial del cemento portland en el concreto estructural” por parte de la Universidad Técnica de Ambato, dentro de la cual se desarrolló esta investigación. Mediante la caracterización de la microscopía electrónica de barrido (SEM) se han identificado la morfología y la espectrometría de dispersión de energía de rayo X (EDS), la composición química. Las muestras fueron recolectadas de la cordillera Chongón-Colonche, principalmente de la provincia del Guayas; como se indica en [13]–[17], los autores se sustentan en la relación Si/Al e identifican minerales de tipo clinoptilolita, mordenita y heulandita.

1.1.2. Justificación

El cambio climático producto de la emisión de gases de efecto invernadero afecta a países desarrollados y en desarrollo, la ONU en esfuerzo para combatir sus efectos, plantea “Acción por el clima” como objetivo para el desarrollo sostenible de la Agenda en 2030, con ello el Acuerdo de París, tratado internacional para mantener la temperatura 1.5°C por debajo de los niveles preindustriales, promoviendo así la investigación, el desarrollo e innovación de tecnologías y materiales[18], [19]. Dado los problemas ambientales, investigaciones, buscan materiales sostenibles, una transición de prácticas convencionales a métodos y tecnologías ecológicas.

El cemento, un aglutinante líder en la industria de la construcción global, libera grandes cantidades de gases de efecto invernadero, particular una alta emisión de dióxido de carbono (CO₂), el 60-70% asociado a la descomposición química del carbonato de calcio (CaCO₃) en óxido de calcio (CaO), que resulta en la producción del clínker, y el resto procede de la combustión de combustibles fósiles necesarios para generar la energía de procesamiento[11], [20], [21].

La producción del cemento emite hasta un 8% de las emisiones globales de CO₂[21]. Aproximadamente cuatro mil millones de toneladas se fabrican cada año y se estima que seis mil millones de toneladas se usaran anualmente en las próximas 4 décadas[11]. Además, producir una tonelada de cemento genera una media de 0.6 toneladas de CO₂[22]. De hecho, la industria del cemento entre los esfuerzos para reducir las emisiones de CO₂, aparecen estrategias que se enfocan en la eficiencia energética, el uso de combustibles alternativos, la captura del carbono y la reducción de la relación clínker/cemento[20], [23].

Gran parte del consumo de cemento involucra al concreto, el material más utilizado en el mundo después del agua. Como se indica en [20], [23] producir cemento con materiales cementantes suplementarios como aditivo o en las mezclas de concreto, es la opción más razonable para mitigar las emisiones de carbono [11].

La zeolita, es una alternativa técnica, ambiental y económica, como un material cementante suplementario (SCM), al ser un material puzolánico de origen natural de bajo costo, con altos contenido de reactivos de sílice (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃)[1]. Los efectos

son positivos en las propiedades del hormigón fresco y endurecido; la resistencia mecánica como su durabilidad, es mayor a edades superiores a los 28 días[8], [9]. La principal característica es la reacción puzolánica, demostrando su eficiencia en la durabilidad en la mezcla de morteros y hormigones. En este contexto, conduce a una baja permeabilidad y una microestructura densa.

Los depósitos de zeolitas naturales están en la formación Cayo de la costa ecuatoriana, específicamente en la cordillera Chongón-Cholote, en una superficie de más de 1000 km²; y las investigaciones científicas como técnicas de los yacimientos a nivel local son pocas para utilizar como sustituto parcial del cemento portland en el hormigón[4], [5], [24].

1.1.3. Fundamentación teórica

1.1.3.1. Cemento

El cemento es un aglutinante mineral en polvo que, mezclado con agua en proporciones en peso o porcentaje, forma una masa plástica que fragua con el tiempo y endurece gradualmente, resultado de procesos fisicoquímicos. Es la materia prima para la producción del concreto[25], [26].

1.1.3.1.1. Cemento portland

El cemento portland es un aglutinante hidráulico dominado por la composición de silicatos de calcio (70-80%). El producto final molido, es una mezcla de clínker más una cantidad de yeso (3-5%)[26].

1.1.3.1.2. Fabricación del cemento portland

La fabricación del cemento engloba la preparación de las materias primas, producción del clínker y molienda del clínker con las adiciones, mediante procesos en húmedo, seco, semihúmedo o semisecco[23], [26], como se muestra en la Figura. 1.

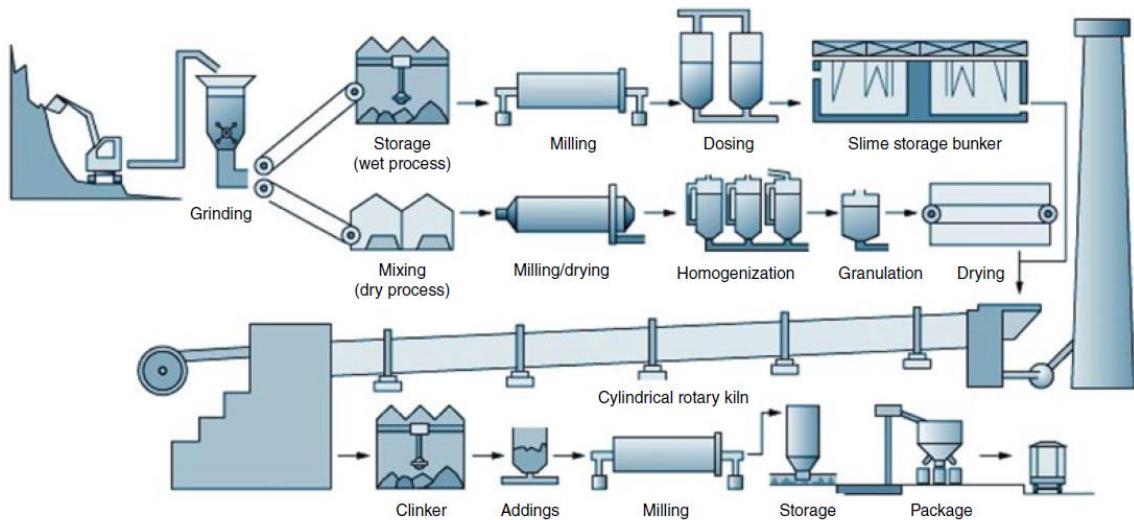


Figura. 1 Producción tecnológica del cemento portland[26]

Antes de iniciar la producción, es analizada la composición química en óxidos de las materias primas. Parámetros como el factor de saturación de la cal (LSF), módulo de sílice

(SM) y módulo de alúmina (AM), garantizan la calidad del clínker y la quemabilidad. El LSF del clínker, se encuentra típicamente en el rango de 94-98%. Las expresiones para el cálculo son las siguientes:

$$LSF = \frac{100xCaO}{2.8xSiO_2 + 1.18xAl_2O_3 + 0.65xFe_2O_3}$$

$$SM = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

$$LSF = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

El principal compuesto para la producción del clínker, es la cal (CaO) seguido de sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃) y óxido de hierro (Fe₂O₃). Además, se incluye materiales correctivos para ajustar los contenidos de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O₃[27], [28]. La caliza, una roca sedimentaria dura, raramente pura en carbonato de calcio (CaCO₃), es la más común para obtener la cal; el LSF de esta materia prima tiene un valor superior a 200, que garantiza la producción del clínker. El resto de los componentes no calcáreos extraídos son las pizarras y arcillas, ricos en alúmina y hierro. Además, son usados la arena de cuarzo, rica en sílice, y el mineral de hierro[28].

Las materias primas contienen contaminantes que provocan impacto en la calidad del clínker, operación del horno y emisiones a la atmósfera. El contenido de magnesio (MgO), no debe exceder el 6% en masa conforme la ASTM C150. Los cloruros, se encuentran en la piedra caliza cerca del mar y es necesario su eliminación del sistema del horno. Soluciones mineralizadas alteran la piedra caliza y generan minerales que incluyen flúor; la presencia de fluorita (CaF₂) podría dañar el enfriador del clínker al pasar de clínker nodular a lava. Los álcalis en mayor proporción se encuentran en las arcillas o pizarras, y en menor cantidad en los componentes calcáreos[28]. La Tabla 1 muestra las fuentes de materias primas requeridos para la fabricación.

De igual manera, durante el proceso de producción existe un control exhaustivo de la fórmula química mediante inversiones en la homogenización de los materiales, debido a

la extensa variabilidad de las materias primas. El proceso de producción se describe a continuación.

Tabla 1 Fuentes de las materias primas usadas en la fabricación del cemento portland[29]

Calcio	Hierro	Sílice	Alúmina	Sulfato
Desechos industriales	Polvo de humo de horno de fundición	Silicato de calcio	Mineral de aluminio ^a	Anhidrita
Aragonita ^a		Roca calcárea	Bauxita	Sulfato de calcio
Calcita ^a	Arcilla	Arcilla	Roca calcárea	Yeso ^a
Polvo de horno de cemento	Mineral de hierro ^a	Ceniza volante	Arcilla ^a	
	Costras de laminado ^a	Greda	Escoria de cobre	
Roca de cemento	Lavadura de mineral	Caliza	Ceniza volante ^a	
Creta	Cenizas de pirita	Loes	Greda	
Arcilla	Esquisto	Marga ^a	Granodiorita	
Greda		Lavadura de mineral	Caliza	
Caliza ^a		Cuarcita	Loes	
Mármol		Ceniza de arroz	Lavadura de mineral	
Marga ^a		Arena ^a	Esquisto ^a	
Coquilla		Arenisca	Escoria de cobre	
Esquisto ^a		Esquisto ^a	Estauroлита	
Escoria		Escoria		
		Basalto		

^a Fuentes más comunes de materias primas

1. Extracción

Las materias primas seleccionadas, en el caso de materiales duros, como la caliza y esquisto(pizarra), se emplea explotación mediante voladuras controladas, mientras que los materiales blandos, como las arcillas y margas, se emplea excavadoras para su extracción. Las canteras tienen planes de explotación y modelos divididos en bloques, para el conocimiento de la composición química asegurando la calidad y homogeneidad del material[20], [28].

2. Trituración

Una vez extraído el material, es triturado hasta obtener una granulometría adecuada para la molienda, normalmente a menos de 10 cm de tamaño y transportado a las plantas de cemento. Realizar viajes de acarreo de grandes distancias por una materia prima ideal, económicamente no es viable, caso particular en la elección de arcillas, pizarra, marga u otros aluminosilicatos[20], [28].

3. Prehomogenización

Los materiales triturados son mezclados para lograr la composición química, después de conocer el porcentaje de aporte de cada materia prima. La variabilidad en la química de las materias primas es monitoreada y controlada para obtener una composición uniforme y óptima[20]. En el sistema de producción en seco, muestras de la materia prima se recogen durante una hora y las decisiones de control se toman tras el análisis. Analizadores de bandas cruzada en línea con la tecnología de análisis de activación rápida de neutrones gama (PGNAA), controlan la química de las rocas trituradas en un rango de 0 a 75mm. La necesidad de una mayor inversión en la homogenización de la materia prima es reducida[28].

4. Molienda del crudo

Un polvo fino denominado “harina de crudo”, se obtiene después de la moler las materias primas. Los molinos están equipados con separadores de alto rendimiento para reducir la sobre molienda. Una molienda más fina aumenta el consumo eléctrico consecuentemente el consumo de energía. Normalmente, para una combinación completa en el horno, el tamaño de la partícula para el carbonato de calcio y el cuarzo debe ser menor a 125 μ m y 45 μ m, respectivamente. Al final, la harina de crudo pasa a silos de homogenización y almacenamiento, mientras se monitorea y controla la composición química para asegurar la calidad del cemento[28].

5. Pre calentamiento

La harina cruda es transportada al sistema de pre calentamiento, para dar inicio al tratamiento térmico, antes de entrar al horno rotatorio. Durante este proceso, la harina

cruda pasa a través de los ciclones del sistema de precalentamiento mientras que los gases provenientes de la combustión en el horno ascienden en sentido contrario. Para una mayor eficiencia térmica es común utilizar cinco o seis ciclones, que dependen del contenido de humedad. La temperatura es elevada a más de 900°C. Al ingresar la harina cruda es rápidamente secada.

Las reacciones químicas empiezan con la deshidratación de los minerales de arcilla. Las materias primas naturales pueden tener materia inorgánica en forma de carbono fósil e hidrocarburos. La materia orgánica volátil se descompone en las etapas superiores del precalentador a una temperatura baja y una fracción volátil se emite a la atmósfera. El carbono orgánico refractario se quema en las etapas intermedias y forma monóxido de carbono (CO). La oxidación de CO a CO₂ (dióxido de carbono), se produce en etapas medias a superiores, lentamente. En este sentido, el CO tanto del precalentador como de la combustión incompleta en el calcinador, se emite a la atmósfera[28].

6. Precalcinación

Previo a ingresar la harina cruda en el horno rotatorio, se produce el 95% y el 97% de la calcinación, utilizando un horno de precalcinación, con al menos la mitad de calor del sistema. El proceso da lugar a la descomposición química de CaCO₃ en CaO y CO₂. La presencia de cal libre indica que parte de CaO reaccionó con los minerales de silicato, producto de las impurezas de las fuentes calcáreas.

En la calcinación se requiere la presencia de dos segundos de los gases provenientes del horno a 880°C, cuando se utilizan combustibles alternativos varía entre 4 y 6 segundos. Por lo tanto, el tiempo de residencia y la geometría del calcinador, dependen de la quema completa del combustible.[28].

Entre el 60% y el 70% del total de las emisiones de CO₂ se producen en este proceso, y el resto se generan de la combustión de combustibles. En general, el 65% de combustible se quema en esta parte del proceso[20]. La Figura. 2 muestra las principales reacciones producidas en el sistema de horno de precalcinación.

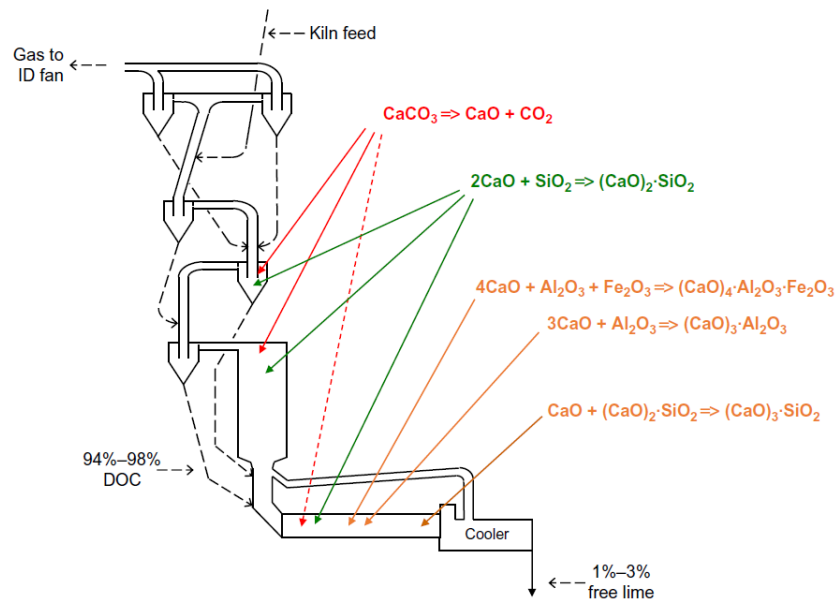


Figura. 2 Diagrama del sistema de horno de precalcinación que muestra la ubicación de las principales reacciones químicas[28]

7. Clinkerización

La harina precalcinada llega al horno rotatorio, que alcanza picos de temperatura entre 1350-1450°C. El horno gira entre tres y cinco veces por minuto, permitiendo el avance de la harina hacia la zona de combustión. El intenso calor, genera reacciones químicas y físicas, obteniendo así el clínker, que a su vez está parcialmente fusionado. El CaCO_3 completa la calcinación que restaba de la precalcinación[20], [28].

Para producir la energía térmica, combustibles como el carbón, gas, petróleo y combustibles alternativos, son quemados para que la llama producida se aplique directamente al horno. Los combustibles alternativos incluyen coque de petróleo, derivados de desechos domésticos, neumáticos, residuos disolventes y harina de animal[20]. La Figura. 3 presenta las proporciones indicativas de los minerales presentes durante la conversión de la harina cruda en clínker

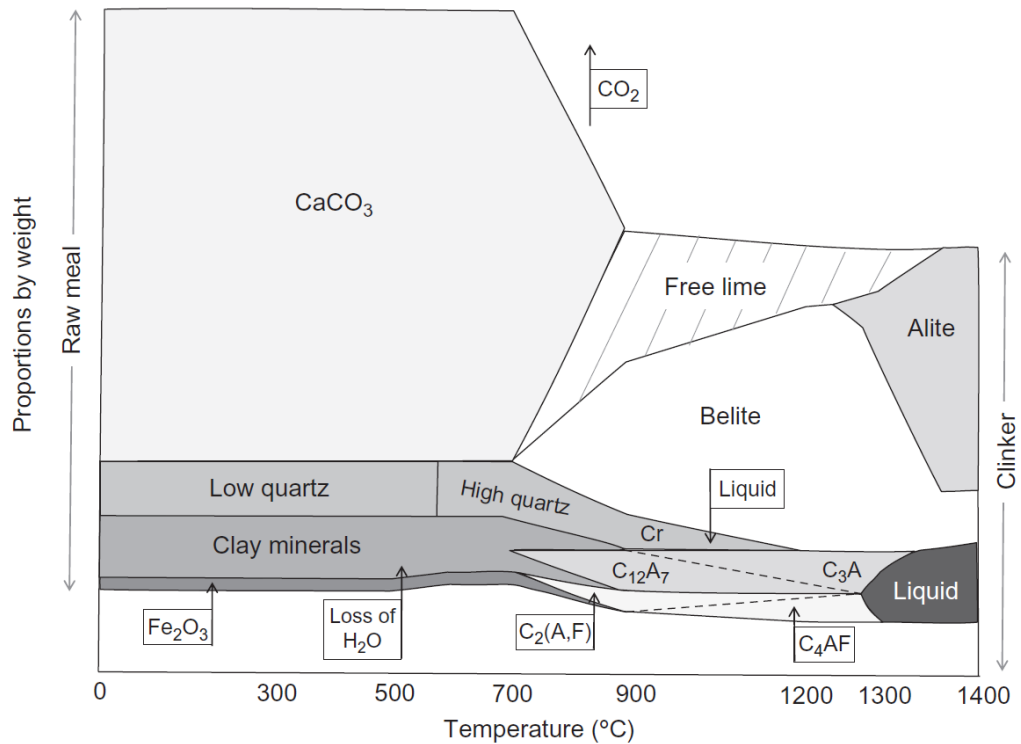


Figura. 3 Proporciones indicativas de los minerales presentes durante la conversión de la harina cruda en clínker[28]

8. Enfriamiento y almacenamiento

El clínker ingresa al enfriador, diseñado para reducir rápidamente la temperatura de más de 1000°C a 100°C. Los enfriadores de parrilla soplan aire de combustión entrante sobre el clínker. Este sistema mejora su eficiencia energética a través del uso de energía y circulación de aire soplado calentado. Después el clínker es almacenado para utilizarlo en la planta o transportado para su comercialización[20]. Una operación correcta evita la reducción de C₃S y un aumento de cal libre[28].

9. Mezclado

Después de ser almacenado o transportado el clínker, es mezclado con otros minerales para convertirlo en cemento. Todos los tipos de cemento tienen del 4-5% de yeso para controlar el tiempo de fraguado. La adición de escoria, cenizas volantes, caliza u otros

materiales, triturados o mezclados, sustituyen parte del clínker y producen los cementos mezclados[20].

10. Molienda

La mezcla enfriada de clínker y yeso se muele hasta convertirle en un polvo gris y homogéneo, denominado cemento portland. La molienda se produce en molinos de bolas, verticales y prensas de rodillos. Estos últimos presentan una mayor eficiencia energética[20]. En los molinos verticales el consumo de energía es 30% menor que los molinos de bolas[28].

11. Almacenamiento en silos para carga o envasado

En la etapa final, el cemento es homogenizado y almacenado en silos. Para la posterior distribución, el cemento es empacado en sacos o se carga a granel[20]. En Ecuador, la masa de cemento en un saco es de 50 kg, mientras que, en Estados Unidos y Chile, es de 42 y 42.5 kg, respectivamente.

1.1.3.1.3. Composición química y mineral del cemento portland

El proceso de obtención del clínker del cemento portland es el resultado de reacciones químicas complejas, formando en su mayoría silicatos de calcio. Las reacciones químicas se producen en rangos de temperatura. CaO , SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 son los principales óxidos que constituyen el clínker.

El CaO (cal) es el componente de mayor presencia en el cemento resultado de la descarbonatación de la calcita, CaCO_3 . El MgO (periclasa), proveniente de las impurezas de las fuentes de piedra caliza, arcilla o esquisto. La hidratación baja de MgO en los cementos se evidencia en la falta de solidez de los cementos, por lo que se limita a menos de 3% del contenido de cemento[30].

El SiO_2 (sílice), se encuentra en estado puro en el cuarzo, cristobalita y tridimita; y como minerales impuros en el ópalo y pedernal. El mayor aporte de SiO_2 proviene de los minerales de aluminosilicato de la pizarra o arcilla. Durante el proceso de obtención del

clínker, se combina con CaO para dar los silicatos de calcio impuros, alita y belita. Estos minerales comprenden la mayor parte del material hidráulico activo del clínker[30].

El óxido de aluminio se presenta en la naturaleza como α -Al₂O₃ (corindón). En el horno de calcinación, γ - Al₂O₃, puede surgir al calentar bauxita y las arcillas a una temperatura de 900°C. Un cemento con alto contenido de alúmina proviene del uso de bauxita. Por otro lado, los óxidos de hierro se derivan de la arcilla y pizarra[30]. En la Tabla 2 se muestra la notación química del cemento comúnmente usada, bajo la suposición de que los elementos que se requiere están presentes en óxidos.

Tabla 2 Notación usada en la química del cemento[31]

SiO ₂	Sílice	S
Al ₂ O ₃	Alúmina	A
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro	F
CaO	Cal	C
MgO	Magnesia	M
K ₂ O	Óxido de potasio	K
Na ₂ O	Óxido de sodio	N
SO ₃	Sulfato	\bar{S}
H ₂ O	Agua	H

El óxido de hierro reacciona con alúmina y cal para formar 4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃. La alúmina que resta de la reacción anterior reacciona con cal para formar 3CaO.Al₂O₃. La cal que permanece de las reacciones anteriores actúa con la sílice, generando 2CaO.SiO₂. Este último componente reacciona con la cal sobrante, formando 3CaO.SiO₂[32].

El clínker, la base del cemento tiene cuatro componentes principales cristalinos, resultado de las reacciones. Estos son el silicato tricálcico denominado alita, el silicato dicálcico como belita, aluminato tricálcico conocido como fase aluminato y ferroaluminato tetracálcico como fase ferrita[31]. Además, contiene CaO libre hasta el 1%, MgO libre y como parte de otras fases entre 1-5%; y Na₂O como K₂O en fases que contienen álcali hasta el 1%[26]. La Tabla 3 recoge los términos de los minerales de cemento comúnmente utilizados en la literatura, normativas y plantas de cemento.

Tabla 3 Diversos términos utilizados para los minerales de cemento[31]

Descripción química	Nombre de la fase	Composición química	Composición de óxido	Notación química
Silicato tricálcico	Alita	Ca_3SiO_5	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	Belita	Ca_2SiO_4	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	Aluminato	$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	Ferrita	$2(\text{Ca}_2\text{Al FeO}_5)$	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

La composición mineral del cemento portland es calculado acorde a lo establecido por el Dr. Robert Herman Bogue en 1929[28]. En la norma NTE INEN 152, que es equivalente a la ASTM C150, las ecuaciones establecidas para el cálculo del potencial de la fase del cemento tienen fundamento en el cálculo de Bogue y son las siguientes:

$$\text{C}_4\text{AF} = 3.043 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3$$

$$\text{C}_3\text{A} = (2.650 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1.692 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\text{C}_3\text{S} = (4.071 \times \% \text{CaO}) - (7.600 \times \% \text{SiO}_2) - (6.718 \times \% \text{Al}_2\text{O}_3) - (1.43 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3) - (2.852 \times \% \text{SO}_3)$$

$$\text{C}_2\text{S} = (2.867 \times \% \text{SiO}_2) - (0.7544 \times \% \text{C}_3\text{S})$$

Estas ecuaciones siguen siendo muy usadas, sin embargo, los avances tecnológicos en los análisis XRD (difracción de rayos X) han permitido que los laboratorios de control de las plantas de cemento hagan una medición directa de la mineralogía del clínker[28].

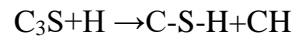
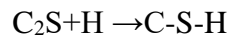
1.1.3.1.4. Hidratación del cemento portland

La hidratación en la química del cemento es una reacción de un componente anhidro con agua para dar lugar a un hidrato, asociado a cambios químicos y físico-mecánicos, como el fraguado y endurecimiento[33].

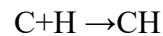
La hidratación del cemento portland, resulta en una interferencia de procesos e interacción mutua entre fases del cemento hidratante tanto en paralelo como sucesivamente, relacionado a la liberación de calor[33], [34].

El proceso de hidratación está determinado por composición de las fases y presencia de iones extraños en las redes cristalinas, distribución del tamaño de la partícula, superficie específica, relación agua/cemento (w/c), temperatura de curado, presencia de aditivos químicos y minerales[26], [33].

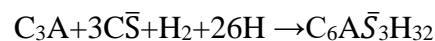
Las reacciones básicas en la hidratación involucran la disolución de los componentes clínker y otros componentes no inertes. La reacción produce tres compuestos primarios como son: silicato de calcio hidratado, hidróxido de calcio y AFm (a través de AFt). El silicato de calcio hidratado se produce por la reacción de C₃S o C₂S con agua, descrito como un gel, que no tiene una composición fija y se expresa como C-S-H, con una estequiometría incompleta. La reacción de C₂S y C₃S produce predominante C-S-H, pero en la hidratación de C₃S, el exceso de CaO disponible reacciona con el agua formando hidróxido de calcio.



Al mismo tiempo, la presencia de CaO libre en el clínker reacciona con el agua para formar hidróxido de calcio. Este compuesto generalmente es puro y forma cristales de varios tamaños dentro de la pasta[31].



La presencia de C₃A, sulfato y agua, durante la hidratación genera sulfoaluminato de calcio hidratado. Este componente conocido como ettringita abreviado a la nomenclatura química como AFt, donde A y F denota la presencia de Al₂O₃ y Fe₂O₃, mientras que t indica la presencia de tres moles de sulfato de calcio. La formación de ettringita en el concreto genera una reacción expansiva después que al agua con sulfatos penetre y reaccione con C₃A que encuentre presente[31].



1.1.3.1.5. Tipos de cemento

La composición del cemento es la base para la división de cementos en tipos: portland, escoria, puzolana, estos dos últimos se diferencian en la cantidad de adición. Las normas técnicas dividen al cemento conforme la cantidad y el tipo de adición de mineral, pero una división en clases es más común. Las propiedades de resistencia del mortero después de los 28 días de endurecimiento, la tasa de desarrollo de la fuerza y el tiempo de fraguado, son fundamentales y base de la clasificación[34].

En Ecuador, la NTE INEN 152 que tiene base de estudio a la ASTM C150, clasifica en 10 tipos de cemento portland:

Tipo I: Normal, empleado en la construcción general sin requerimiento de propiedades especiales.

Tipo II: Cemento que tiene una moderada resistencia a los sulfatos, particularmente para estructuras en contacto con el suelo o aguas subterráneas, con un contenido máximo de 8% de C_3A .

Tipo II (MH): Producido cuando se requiere un moderado calor de hidratación y una moderada resistencia a los sulfatos. Generan una tasa de liberación de calor más lenta que el cemento tipo I. Su empleo disminuye los efectos relacionados al aumento de la temperatura, como la fisuración, en elementos de gran volumen.

Tipo III: Para alcanzar una alta resistencia inicial o temprana. Química y físicamente similar al cemento tipo I, pero con una mayor finura en sus partículas. Implica un fraguado rápido y calor de hidratación alto.

Tipo IV: Cemento de bajo calor de hidratación provocando una disipación de calor muy lenta en el concreto con un desarrollo de resistencia más bajo. Específicamente usado en estructuras de concreto masivo tales como las presas de gravedad.

Tipo V: Cemento con alta resistencia a la acción de los sulfatos, especialmente cuando la estructura está en contacto con suelos y aguas subterráneas con alta concentración de sulfatos. Estos requerimientos se deben al bajo contenido de C_3A , inferior al 5%.

Tipo IA, IIA, II(MH)A, IIIA: Cementos que cumplen los mismos usos de sus correspondientes tipos con la inclusión de incorporador de aire[29], [35].

En la industria cementera ecuatoriana, existe la disponibilidad comercial de cementos hidráulicos adicionados. Comprenden cementos con adición o mezcla de materiales cementantes suplementarios, en la planta de cemento o durante la elaboración del hormigón. Normalmente, utilizando clínker en combinación con puzolanas, escorias, ceniza volante, humo de sílice, arcilla calcinada, entre otros materiales. El producto final resulta de la molienda de clínker con los materiales o por el mezclado con cemento portland o una combinación entre molienda y mezcla[29].

Estos cementos hidráulicos conforme la NTE INEN 490, para cementos compuestos, con base de estudio en la ASTM C595, clasifica en los siguientes tipos:

Tipo IS: Cemento portland de escoria de altos hornos. El contenido de escoria está entre el 25% y 70% de la masa de cemento.

Tipo IP: Cemento portland puzolánico. El contenido de puzolana está hasta un 40% de la masa del cemento.

Tipo IT: Cemento compuesto ternario. Resulta de la combinación del cemento portland con más de dos puzolanas; o con escoria y una puzolana[29][36].

La NTE INEN 2380/ASTM C1157, establece los requisitos para cementos hidráulicos por desempeño. Estos cementos no establecen requisitos de composición química enfocándose al cumplimiento de las propiedades de desempeño del hormigón. Esta norma clasifica en los siguientes tipos:

Tipo GU: Cemento de uso 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

Adicionalmente, especifica la opción R para un cemento con baja reactividad a los áridos reactivos álcali-sílice[29], [37].

1.1.3.2. Concreto estructural

1.1.3.2.1. Concreto

El concreto es una mezcla de arena, grava, roca triturada u otros agregados que, por medio de una pasta de cemento y agua, forman una roca artificial. Además, incluye el uso de aditivos químicos y minerales, para mejorar sus propiedades en estado fresco y endurecido como su durabilidad[29], [38].

En particular, el concreto, también llamado hormigón, es el material más usado en la industria de la construcción global. La producción anual mundial supera los 12 mil millones de toneladas métricas. La energía de consumo en la producción de hormigón es de 450-750 kWh/t y del hormigón armado de 800-3200 kWh/t, mientras que el acero necesita al menos de 8000 kWh/t. La disposición de las materias primas en cada lugar del mundo, hacen del concreto, un material económicamente viable.

El hormigón tiene un mejor comportamiento frente a la presencia de agua, a diferencia del acero y madera. El silicato de calcio hidratado que proporciona la adherencia de los agregados tiene una deshidratación completa a los 900°C. Debido a esta condición, el hormigón resiste a altas temperaturas. Además, la capacidad de consumir subproductos industriales y residuos, como sustitutos, aporta a solución de los problemas ambientales y una mejor eficiencia en las propiedades.

La calidad del hormigón se relaciona a los agregados, procedimientos de mezcla y habilidades de los operadores de la producción, colocación y consolidación de la mezcla. Sus ventajas, se dirigen a su capacidad de colocación en cualquier tipo de estructura, alta resistencia a la compresión y muy baja a la tensión. La resistencia aumenta con el tiempo debido a la solidificación de la pasta. Sirve de barrera física a la penetración de compuestos agresivos y protección química en un ambiente alcalino del acero de refuerzo.

Analizar el concreto en escala nanométrica, micrométrica y milimétrica, hacen parte del diseño, desarrollo e investigación de un material de manera integral. Las fases del concreto se constituyen en escala nanométrica principalmente por el gel C-S-H, que determina la naturaleza de las propiedades mecánicas, el mecanismo de transporte y las dimensiones de estabilidad de la pasta de cemento hidratado[38].

Las propiedades del concreto incluyen la capacidad de carga a compresión, flexión y fatiga, la estabilidad dimensional como la contracción y fluencia, y la relación tensión-deformación o carga-deformación[39], [40].

1.1.3.2.2. Agregados

Los agregados constituyen aproximadamente las tres cuartas partes del volumen del concreto convencional. Estos componentes contribuyen a las propiedades tanto del hormigón fresco como del endurecido[29], [38].

Los agregados al iniciar la mezcla se encuentran suspendidos en la pasta de burbujas de aire-agua-cemento. Parámetros como la fluidez, cohesividad y el comportamiento reológico, dependen de la cantidad, tipo, textura de la superficie y granulometría del agregado. Una vez endurecida, la poca reacción química entre los agregados y la pasta de cemento no limita su contribución a las propiedades del concreto. Proporcionan rigidez, resistencia, propiedades térmicas, adherencia y resistencia al desgaste[38], [41].

Los agregados se pueden clasificar de acuerdo con su tamaño, fuente y densidad aparente como se muestra en la Tabla 4. En cuanto al tamaño, son agregados gruesos y finos. Los agregados gruesos tienen partículas de 5 a 150mm. En un concreto normal para vigas y columnas el tamaño máximo es de 25mm. En el caso de presas o cimentaciones profundas, el tamaño máximo de 150mm. La arena de río y el polvo de roca triturada son comúnmente usados como agregado fino.

El uso de agregados ultraligeros como la perlita y espuma plástica constituyen un hormigón con una densidad aparente de 800 a 1100 kg/m³. Utilizar agregados ligeros como la ceniza, escoria de alto horno y piedra pómez volcánica genera un hormigón con una densidad aparente de 1200 a 1800 kg/m³. Los agregados de carácter normal, con una

densidad aparente de 1520 a 1680 kg/m³, como la arena, grava y roca triturada, pueden producir un concreto normal con una densidad aparente de 2300-2400 kg/m³. Por último, un agregado pesado, si el peso unitario es mayor a 2100 kg/m³, por ejemplo, el mineral de hierro y limonita de magnesita, el hormigón supera los 3200 kg/m³ y puede alcanzar los 4000 kg/m³[38].

Tabla 4 Clasificación de los agregados[38]

Criterio	Clasificación	Condición/Ejemplo
Tamaño	Agregado grueso	\geq No. 4
	Agregado fino	No.200 \leq % pasa < No. 4
Fuente	Natural	Grava, arena
	Fabricado	Productos, subproductos industriales
Densidad aparente o Peso unitario	Ultraligero	<500 kg/m ³
	Ligero	500-1120 kg/m ³
	Normal	1520-1680 kg/m ³
	Pesado	>2100 kg/m ³

Las condiciones de humedad de los agregados definen la presencia y cantidad de agua en los poros y en la superficie. Seca al horno, cuando los agregados se mantienen en un horno a una temperatura de 110°C y han expulsado toda el agua de los poros internos. Secado al aire, si el agregado está a temperatura y humedad ambiente, y los poros están parcialmente llenos de agua. Saturado con superficie seca (SSS), cuando los poros de los agregados están completamente llenos de agua y la superficie seca. Esta condición hace que los agregados no absorban ni cedan agua durante el proceso de mezcla. Finalmente, en la condición húmeda, el agregado tiene sus poros llenos y una película de agua en la superficie.

Así mismo, diferenciar entre densidad, densidad aparente, gravedad específica y peso unitario, en la práctica es importante. La densidad es la masa por unidad de volumen del material excluyendo el volumen de poros. A la masa por unidad del volumen del material que incluye el volumen de poros y vacíos, se le conoce como densidad aparente o peso unitario. Gravedad específica, cuando existe una relación entre densidad o densidad aparente del agregado y la densidad del agua[38], [41].

En la granulometría de los agregados se reconocen distribuciones tipo densa, graduada por espacios, bien graduada, uniforme y abierta. Una granulometría densa y bien graduada es ideal para el agregado grueso y fino, respectivamente. En definitiva, los espacios entre las partículas de agregado se asocian a la cantidad de pasta requerida para requerida para rellenar la mezcla de concreto.

La forma en los agregados se asocia a la trabajabilidad. Una forma esférica, cúbica e irregular, garantizan un adecuado recubrimiento de la pasta del cemento al agregado, por ende, su lubricación. También, la textura de la superficie se relaciona con la fluidez de concreto fresco, y la adherencia entre los agregados y la pasta de cemento en el hormigón endurecido[38].

1.1.3.2.3. Agua

El agua en una mezcla de concreto representa entre el 15 al 25% del volumen. Esta influye en la trabajabilidad deseada del concreto fresco, la durabilidad y resistencia para el concreto endurecido. La cantidad de agua y con ello la relación agua/cemento, son los factores críticos que garantiza la calidad de un concreto. Esta reacciona con el polvo de cemento para producir los productos de hidratación, actúa como lubricante y asegura el espacio necesario en la pasta para la hidratación.

El agua que es apta para el consumo humano es la ideal para el uso en el hormigón. Las impurezas presentes en el agua, tanto sólidos en suspensión, sólidos disueltos como materiales orgánicos, afectan al tiempo de fraguado y la resistencia del concreto. En particular, produce eflorescencias, manchas, corrosión del refuerzo, inestabilidad de volumen y durabilidad reducida[29], [38].

1.1.3.2.4. Aditivos

Los aditivos son materiales diferentes a los agregados, agua y cemento, que se agrega al concreto, antes o durante la elaboración de la mezcla. Las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido, son modificadas o mejoradas.

Los aditivos se pueden dividir en agentes incorporadores de aire, químicos, minerales y misceláneos. Incorporadores de aire (ASTM C260) para mejorar la resistencia a las

heladas. Químicos (ASTM C494-ASTM C1017) para mejorar las propiedades del hormigón. En particular, los reductores de la demanda de agua utilizados para mejorar la trabajabilidad; acelerantes y retardantes, en control del tiempo de fraguado y la tasa de ganancia de resistencia. Además, incluyen agentes modificadores de la viscosidad, de reducción de la contracción y mitigadores de la reacción álcali-sílice.

Los aditivos minerales finamente molidos se adicionan a la mezcla para mejorar la trabajabilidad, durabilidad y resistencia; la escoria y puzolanas son ejemplos. También, los aditivos misceláneos que incluyen aditivos diferentes a las categorías mencionados, como látex, inhibidores de corrosión y aditivos expansivos. La Tabla 5 recoge los efectos de los diferentes tipos de aditivos más comunes utilizado sobre las propiedades del hormigón[29], [38].

Tabla 5 Efectos de los beneficios de diferentes tipos de aditivos sobre las propiedades del hormigón[38]

Propiedad del hormigón	Tipo de aditivo	Categoría de aditivo
Trabajabilidad	Reductores de agua	Químico
	Agentes incorporador de aire	Incorporador de aire
	Polvo mineral inerte	Mineral
	Puzolanas	Mineral
	Látex polimérico	Misceláneo
Control del tiempo de fraguado	Acelerador	Químico
	Retardador	Químico
Resistencia	Puzolanas	Mineral
	Látex polimérico	Misceláneo
Durabilidad	Agentes incorporador de aire	Incorporador de aire
	Puzolanas	Mineral
	Reductores de agua	Químico
	Inhibidores de corrosión	Misceláneo
	Reductor de contracción	Misceláneo
Hormigón especial	Látex polimérico	Misceláneo
	Humo de sílice	Mineral
	Aditivos expansivos	Misceláneo
	Pigmentos de colorante	Misceláneo
	Formador de gas	Misceláneo

1.1.3.2.5. Tipos de concreto

Conforme a la densidad aparente, el hormigón se puede clasificar en 4 tipos como se muestra en la Tabla 6. Ultraligero usado en elementos no estructurales. Ligero para construir miembros estructurales y no estructurales. Normal usado para la construcción de infraestructura y edificios. Pesado utilizado en construcciones especiales como plantas nucleares. El principal componente que hace la diferencia, son los agregados.

También, el hormigón de acuerdo con su resistencia se divide en 4 tipos, como se detalla en la Tabla 6. Baja resistencia para construir estructuras de hormigón en masa, subrasante de carreteras y mampuestos. Resistencia moderada para edificios, puentes y estructuras similares. Alta resistencia usado para columnas de edificios altos, torres de puentes y muros de corte. Ultra alta resistencia en vigas que requieran grandes sollicitaciones.

Tabla 6 Clasificación del hormigón según la densidad aparente y resistencia[38]

Clasificación	Categoría	Condición
Densidad aparente	Ultraligero	$<1200 \text{ kg/m}^3$
	Ligero	$1200 \text{ kg/m}^3 < DA < 1800 \text{ kg/m}^3$
	Normal	$\sim 2400 \text{ kg/m}^3$
	Pesado	$>3200 \text{ kg/m}^3$
Resistencia	Baja	$< 20 \text{ MPa}$
	Moderada	$20\text{-}50 \text{ MPa}$
	Alta	$50\text{-}150 \text{ MPa}$
	Ultra alta	$>150 \text{ MPa}$

1.1.3.3. Zeolitas

1.1.3.3.1. Zeolitas

Las zeolitas son minerales de aluminosilicatos hidratados caracterizados por estructuras de armazón de tetraedros conectados entre sí, cada uno con cuatro átomos de oxígeno que rodean un catión de Si o Al. El armazón presenta cavidades abiertas en forma de canales y jaulas, deviniendo en un material microporoso, que contienen cationes alcalinos y alcalinotérreos, moléculas polares de H₂O u otros grupos (OH, F)[4], [42]–[45].

No obstante, estos minerales no solo se limitan a los aluminosilicatos, puesto que, en otras especies, la posición tetraédrica del armazón puede estar ocupador por cationes distintos al Si y Al, como Be, P, Zn, Mg, Co, B, entre otros[2], [44].

En 1756, Axel von Cronstedt, mineralogista sueco, acuñó estos minerales como zeolitas, ya que, al calentar rápidamente, liberan agua y parecen hervir. Más tarde, la primera especie reconocida de esta familia es la estilbita[2], [4], [42], [46]. En la actualidad, la Asociación Internacional de Zeolita (IZA), con la comisión de zeolitas naturales, dispone en su base de datos de 67 especies de minerales[3]. Estas agrupadas en series que dependen del catión de intercambio de mayor presencia[43].

1.1.3.3.2. Estructura

La estructura interna y el ordenamiento estructural de las zeolitas las convierten en tectosilicatos o silicatos en armazón [4]. Los tetraedros de [SiO₄] se enlazan entre sí en sus cuatro esquinas, constituyendo el armazón tridimensional. Por lo tanto, dos de los cuatro aniones de oxígeno le pertenecen al Si, formando SiO₂, una estructura electroestáticamente neutra[43], [46], [47]. El Si⁴⁺ regularmente es sustituido por Al³⁺ en el centro del tetraedro produciendo un exceso de cargas eléctricas negativas que se compensan con cationes de intercambio[4], [46], [47].

En consecuencia, la estructura de las zeolitas, los tetraedros que conforman el armazón crean un sistema estructural abierto con cavidades que son extremadamente grandes, en forma de canales y jaulas. Estos espacios están ocupados por cationes grandes tales como Na⁺, Ca²⁺, K⁺, subordinadamente por Ba²⁺ o Sr²⁺, que están débilmente unidos dando

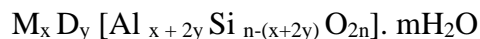
lugar al intercambio iónico. Además, las cavidades también contienen moléculas polares de H₂O. Algunas estructuras pueden estar interrumpidas por grupos (OH, F), que ocupan los vértices del átomo de oxígeno[2], [42]–[47].

Las moléculas de agua representan hasta un 30% del peso neto de la zeolita, que después de un calentamiento controlado, el agua es expulsada de forma escalonada y reversible, sin afectar la estructura de los aluminosilicatos[4], [47]. Para Coombs et al. [42] y Colella y Wise[44], la temperatura a la que se produce la deshidratación del mineral, es inferior a los 400°C. La mayoría de las estructuras se rehidratan con la exposición a un ambiente húmedo. La composición del número de moléculas de agua es la menos restrictiva porque la cantidad contenida puede variar con la humedad[43].

1.1.3.3.3. Composición química

Los minerales de zeolita comúnmente son aluminosilicatos de sodio, potasio o calcio, siendo menos frecuentes magnesio, estroncio y bario. Existe una variación significativa en la composición entre las especies de minerales, incluso en las series. La variación puede ocurrir dentro de la estructura, es decir, la cantidad de aluminio en los sitios tetraédricos y en los cationes de intercambio que equilibran la carga[43].

Una propiedad química importante de cualquier zeolita es su capacidad de intercambio iónico, es decir la medida en que los cationes externos pueden intercambiarse con los presentes naturalmente en la estructura. La fórmula general de las zeolitas naturales comunes es la siguiente:



donde M= Li⁺, Na⁺, K⁺ y otros cationes alcalinos; D=Mg²⁺, Ca²⁺, Sr²⁺, Ba²⁺ y otros cationes alcalinotérreos; mH₂O= el número variable de moléculas de agua[4], [45].

La relación Si/Al no es suficiente para identificar una especie de mineral de zeolita. La literatura especifica una excepción en el caso de la heulandita y clinoptilolita, que tienen una relación de Si/Al < 4 y Si/Al ≥ 4, respectivamente[42], [44]. También, una relación Si/Al alta, diferencia de una zeolita que tiene una elevada temperatura de descomposición y colapso estructural, regularmente mayor a 1300°C[4]. Por otra parte, un alto contenido

de sílice y bajo de aluminio, en las posiciones tetraédricas, dificultan el intercambio de iones, por ejemplo la clinoptilolita, caso contrario sucede con la phillipsita [43].

En la Tabla 7 se muestra la composición química en % en masa de diferentes muestras de zeolita de la cordillera Chongón Colonche, Ecuador. El método de microanálisis de espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS) es la técnica utilizada para la caracterización de estos minerales.

Tabla 7 Composición química de muestras de zeolita de la cordillera Chongón-Colonche

Elemento	%masa								
	Fernández[13] y Salcedo[15]			Maldonado[14] y Ramos[16]			Yanchaguano[17]		
	ZA	ZI	ZZ	ZV	ZX	ZCr	ZR	ZC	ZCa
Si	12.23	10.76	11.42	8.22	9.19	11.85	3.93	7.56	8.09
Al	2.53	4.03	2.98	1.17	1.93	2.11	1.46	2.77	1.79
Fe					1.10	1.41	1.11	2.28	1.44
Ca	1.19	0.45	1.13	0.47	0.74	0.83	0.62	0.39	1.33
Na	0.86	2.95	0.57	0.27	0.40	0.49		0.56	0.45
Mg			0.32	0.32	0.26	0.25		0.63	
K			0.41	0.48	0.37	0.60	0.16	0.26	
O	17.98	16.42	18.54	13.54	13.75	19.54	5.88	17.10	13.35
C				2.85		2.61		3.53	2.71
Si/Al	4.83	2.67	3.83	7.03	4.76	5.62	2.69	2.73	4.52

1.1.3.3.4. Zeolitas naturales en el Ecuador

En cuanto a la aparición, las zeolitas se encuentran en rocas sedimentarias, metamórficas e ígneas, como productos de alteración. La mayoría se forma en temperaturas inferiores a 250°C y a profundidades inferiores a 10 km, en entornos saturados en agua. En particular, tiene lugar cuando el material volcánico, como lava o toba, reacciona con agua superficial o subterránea. Así mismo, cuando las plagioclasas reaccionan con el fluido de los poros[43].

En el Ecuador, los yacimientos de zeolita más importantes están en la cordillera Chongón-Colonche, específicamente en la formación Cayo que tiene altos contenidos de minerales de zeolitas; ubicada al oeste de Guayaquil, limitada al norte y sur con las

cuencas sedimentarias Manabí y Progreso, respectivamente, y la falla del Puerto Cayo-Canade al oeste, con una superficie de más de 1000km² compuesto por rocas marinas vulcanoclásticas y sedimentarias interestratificadas[4], [5].

Los minerales de zeolita encontrados en la formación Cayo de mayor manifestación es la clinoptilolita y heulandita, presente en todo tipo de rocas de la formación, ubicadas a lo largo de la vía perimetral de Guayaquil; la modernita, es abundante en rocas con alto contenido de sílice, tobas verdes son características. El Ca es el catión de intercambio dominante en estas zeolitas. La laumontita es menos abundante que la modernita; y en menor cantidad existen los minerales de analcima, wairakita y erionita[4], [5], [24], [48].

De acuerdo con Machiels et al. [5], en la formación Cayo, la presencia de zeolita en tobas vítreas es mayor al 60%, en tobas lapilli y de cristal del 30 a 50% y en rocas sedimentarias menor al 30%. De modo que, evidencia una mezcla heterogénea de zeolitas y minerales asociados, una variabilidad vertical y lateral en la litología y mineralogía. Machiels et al. [5] y Morante[24] determinan que coexisten minerales en la zeolita como cuarzo, feldespatos (albita), arcillas, incluso calcita. La fracción dominante en la zeolitas regularmente es mayor al 50% en peso[45].

Si bien, las investigaciones se han centrado en el litoral ecuatoriano, la formación Azogues y Saraguro, ubicadas en la Sierra occidental del país, también evidencian manifestaciones zeolíticas. En la formación Azogues la presencia de zeolitas está alrededor de 40% y 20 % en peso, para el mineral de tipo heulandita y mordenita, respectivamente. En la formación Saraguro, el mineral predominante es la heulandita entre el 40-70% en peso[48].

Debido a la capacidad de intercambio iónico, actividad catalítica, adsorción y la propiedad de tamizado molecular, convierten a los minerales de zeolita en un material multifuncional aplicable a diferentes industrias[4], [49]. Los usos se enfocan a la agricultura, avicultura, actividades pecuarias, desecación, absorción de gases, depuración de aguas residuales, procesamiento de residuos industriales, aplicaciones farmacológicas y biomédicas. Estas últimas desarrolladas en el extranjero[45], [46]. También, la aplicación en la industria de la construcción, específicamente en la producción de cemento

y hormigón, que posteriormente será analizado. La ventaja excepcional de este material, la relacionan a una alternativa eco-amigable, segura y sostenible, además de sus propiedades fisicoquímicas[46].

La producción minera mundial de esta clase de minerales en el 2020 fue de 1.1 millones de toneladas. En países como China y Estados Unidos superan las 407.8 mil toneladas, juntos[50]. En Ecuador, la producción reportada en el 2004 fue de 3300 toneladas, un año pico en la explotación. Más tarde, existe una reducción significativa en los años 2010 y 2012, a 119.90 y 28.20 toneladas, respectivamente; los factores que han incidido se relacionan a un bajo nivel de estudio y conocimiento de sus reservas, a fin de establecer la posibilidad de aprovechamiento industrial[44], [51].

1.1.3.4. Zeolitas como materiales cementantes suplementarios (SCM)

1.1.3.4.1. Materiales cementantes suplementarios

Los materiales cementantes suplementarios (SCM) suelen ser subproductos industriales o materiales naturales. Estos materiales pueden tener o no, características cementantes por sí solos[23]. El uso de estos materiales, en la actualidad, es una estrategia técnica, económica y ambiental, enfocada principalmente a la mitigación de las emisiones de carbono, producidas durante la fabricación del cemento portland[1], [23], [52].

La escoria de alto horno, ceniza volante, humo de sílice y puzolanas naturales, son comúnmente usadas en la fabricación de cemento compuestos o como sustitución del cemento en el hormigón. Estos materiales proporcionan beneficios tanto en las propiedades del hormigón fresco y endurecido, como mejor trabajabilidad, menor calor de hidratación y mayor durabilidad[53], [54]. Una clasificación de estos materiales puzolánicos se asocia a su origen, naturales o artificiales, como se muestra en la Figura. 4.

La ASTM 618 dispone que un material puzolánico, tal como cenizas volantes y puzolanas naturales, es adecuado para su uso en el hormigón, si el contenido de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 es mayor al 70%. Además, clasifica en tres clases: N para puzolanas naturales crudas o calcinadas, F para ceniza volantes con propiedades puzolánicas, y C para cenizas volantes con propiedades puzolánicas y cementosas.

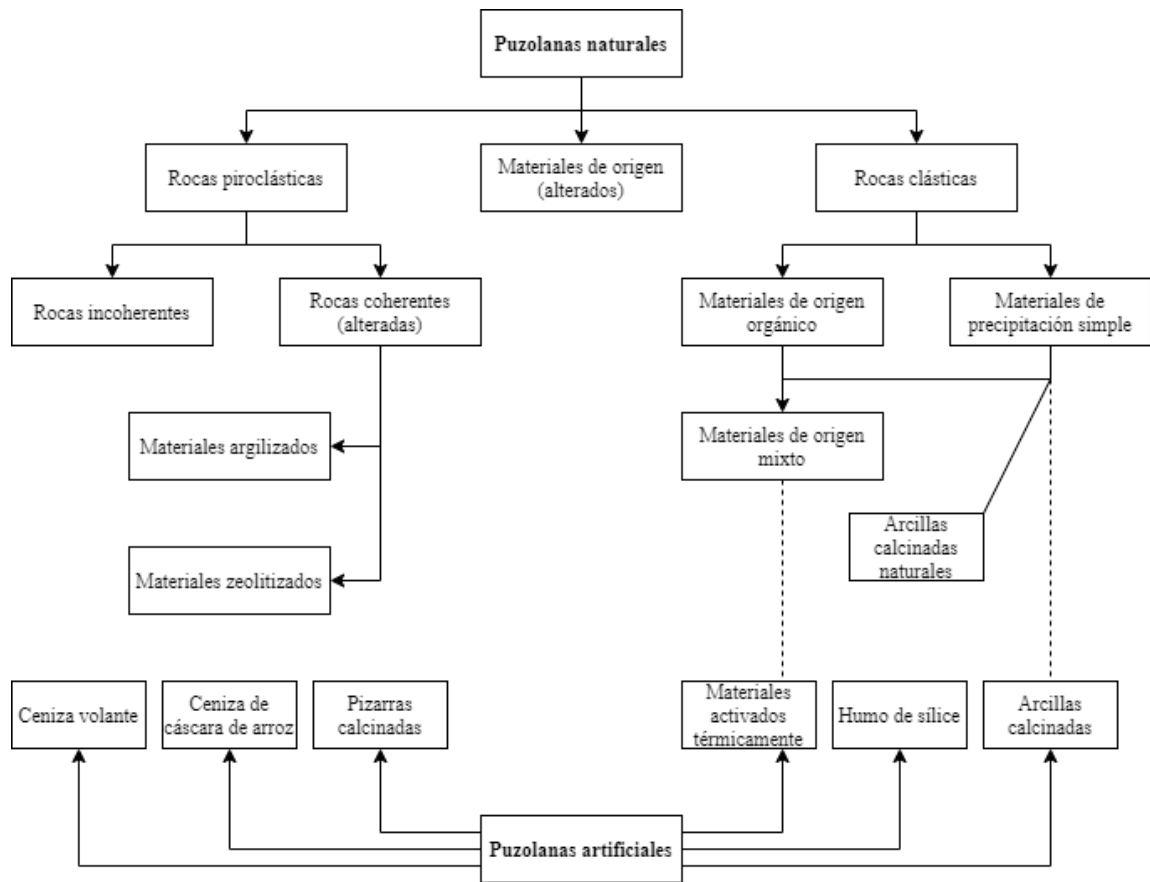


Figura. 4 Clasificación de los materiales puzolánicos[54], [55]

De modo que esta investigación se enfoca en un material puzolánico de origen natural, como las zeolitas. Estas son comúnmente utilizadas en la industria del cemento y hormigón. El alto contenido de SiO_2 y Al_2O_3 de estos minerales, responsables de la reacción puzolánica, reaccionan con el hidróxido de calcio producido durante la hidratación del cemento para formar silicato de calcio hidratado (C-S-H) y aluminatos, proporcionando una mejor microestructura del cemento endurecido. El uso de este material se aplica a cementos mezclados, morteros, lechadas y en el hormigón como sustituto parcial del cemento portland o por el agregado[1], [6], [8], [9], [12], [52], [56]–[58].

La reacción puzolánica de las zeolitas naturales, la condición fundamental de uso depende de varios factores como la composición química y mineralógica, distribución del

tamaño de la partícula, superficie específica, capacidad de intercambio iónico, relación de Si/Al de la estructura, etc.[52] En la Tabla 8 se muestra los resultados de la composición química en óxidos de las muestras de zeolita reportadas de la cordillera Chongón-Colonche.

Tabla 8 Composición química de muestras de zeolitas de la cordillera Chongón-Colonche

Elemento	%atómico								
	Fernández [13] y Salcedo [15]			Maldonado [14] y Ramos [16]			Yanchaguano [17]		
	ZA	ZI	ZZ	ZV	ZX	ZCr	ZR	ZC	ZCa
SiO ₂	77.48	65.32	73.07	80.20	72.87	74.86	62.46	60.80	69.91
Al ₂ O ₃	14.16	21.61	16.84	10.08	13.52	11.77	20.50	19.68	13.66
Fe ₂ O ₃					4.53	4.63	9.16	9.53	6.46
CaO	4.93	1.79	4.73	3.00	3.84	3.43	6.45	2.05	7.52
MgO			1.59	2.42	1.60	1.22		3.93	
SO ₃									
Na ₂ O	3.43	11.28	2.30	1.66	2.00	1.95		2.84	2.45
K ₂ O			1.48	2.64	1.65	2.13	1.43	1.18	
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃	91.64	86.93	89.91	90.28	90.92	91.26	92.12	90.01	90.03

1.1.3.4.2. Propiedades físicas

Interpretar las propiedades físicas del cemento, zeolita y del sistema cemento-zeolita, es fundamental para evaluar su comportamiento. En el cemento las propiedades dependen de su composición y finura de la molienda[26]; más aún de las zeolitas que están en gran medida influenciados por las amplias estructuras de armazón[47]. Las especificaciones técnicas del cemento establecen requerimientos conforme el tipo de cemento. Dentro de esta investigación se aborda las propiedades de densidad, tamaño de la partícula, finura y tiempo de fraguado.

Densidad

La densidad se define como la masa por unidad de volumen de los sólidos o partículas, excluyendo el aire de las partículas. En el cemento portland, varía entre 3.10-3.25, con un promedio de 3.15 g/cm³. En cementos portland de escoria de alto horno y cementos

portland puzolánicos varía de 2.90 a 3.15 g/cm³. Este valor es fundamental en el diseño de la mezcla. Para una dosificación y control de las mezclas, la densidad se expresa en gravedad específica, un valor adimensional, después de dividir para la densidad del agua a 4°C, que es 1.0 g/cm³ [29].

La gravedad específica de las zeolitas está entre 2.0 y 2.4[47]. En [7], [8], dan a conocer que la baja gravedad específica de zeolita natural de tipo clinoptilolita, aumenta el volumen de la pasta y la viscosidad de las mezclas frescas. Narasimhulu, Gettu y Ganesh[57], determinan una gravedad específica de 2.16 y 2.08 para la zeolita natural y la zeolita calcinada tratada a 800°C durante 8 min, respectivamente; en consecuencia, es mencionado como agregado ligero. Por tanto, la determinación de esta propiedad incluye el método de ensayo referenciado en la norma NTE INEN 196/ASTM C188.

Tamaño de la partícula

El cemento como la zeolita, presenta una variedad de tamaños, resultado de sus procesos de molienda. En general, el cemento tiene el 95% de las partículas menores que 45 μm, con un promedio de partículas de 15μm[29].

Narasimhulu et al.[57], mediante análisis de difracción láser, verifica que el tamaño de partícula medio del cemento, zeolita natural y calcinada es de 26μm, 20μm y 25μm. Para Burris y Juenger [58], el tamaño de la partícula de la zeolita contribuye significativamente a la reacción puzolánica, por ende, a la resistencia a compresión de los morteros. Algunas gráficas de distribución del tamaño de las partículas se muestran en la Figura. 5.

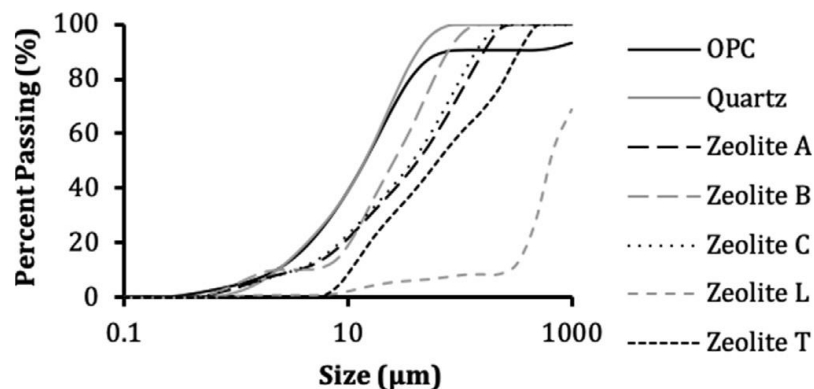


Figura. 5 Distribución del tamaño de las partículas del cemento (OPC), cuarzo y zeolitas naturales[58]

Diferentes son las técnicas empleadas en el análisis tamaño de las partículas. De estas, el proceso de sedimentación por hidrómetro permite una determinación cuantitativa. Este ensayo se fundamenta en la ley de Stokes y se realiza conforme las normativas INV E-123-13/ASTM D422/AASHTO T88. En particular, la distribución del tamaño de las partículas se puede expresar a través de valores característicos que identifican un tamaño; tal como, D_{10} , D_{50} y D_{90} que son los diámetros que corresponden al 10, 50 y 90% más fino de la distribución[59]–[61].

Finura

Esta propiedad es representada comúnmente en términos de superficie específica, expresada como el área total de superficie total por masa de los sólidos. Sobre todo, se relaciona con la reactividad química y reología de los sistemas aglutinantes[57].

A una mayor finura de las partículas del cemento, aumenta la velocidad de hidratación, por tanto, su resistencia. Partículas más finas pueden significar mayor calor de hidratación, agrietamiento y reducción en la durabilidad. Los efectos de la finura se manifiestan durante los primeros 7 días[29], [38].

En el caso de las zeolitas, la superficie específica es elevada dado su estructura interna microporosa y áspera, que provoca una reducción significativa en el tiempo de fraguado y trabajabilidad[7]. Por ende, cuanto mayor finura mayor es la reactividad de las zeolitas[4]. Las normativas que permiten su determinación en nuestro medio es la NTE INEN 196/ASTM C 204. Estas utilizan el aparato Blaine de permeabilidad al aire. En muestras de zeolitas se aplican los mismos criterios del cemento teniendo en cuenta la densidad y porosidad del material[29].

Tiempo de fraguado

El tiempo fraguado de un material cementoso, es el tiempo que transcurre desde el momento que el material entra en contacto con el agua y pierde su plasticidad (fraguado inicial); hasta que alcanza una parte de su resistencia (fraguado final). Esta propiedad indica el comportamiento normal de la hidratación. Los factores que se relacionan son la finura, relación agua- cemento y cualquier aditivo empleado[29]. El fraguado inicial debe

ser suficiente para garantizar los requisitos de mezcla, transporte, colocación y acabado[38].

Narasimhulu et al. [62] y Bilim [63], demuestran que la incorporación de zeolita tipo clinoptilolita aumenta el contenido de agua para que la pasta se encuentre en consistencia normal, por ende existe un aumento en el tiempo de fraguado, más aun con el incremento del contenido.

En la determinación del tiempo de fraguado para pastas de cemento, el método de Vicat es utilizado conforme con los requerimientos de la NTE INEN 158/ASTM C191. Previamente, se requiere conocer la consistencia normal, es decir la capacidad de una pasta o mortero de cemento para fluir usando el aparato de Vicat, de acuerdo con la NTE INEN 157/ASTM C187. Una pasta de cemento está en consistencia normal cuando la penetración es ± 10 mm en la aguja de Vicat. La consistencia normal para un cemento portland está entre 24-33%. Luego de realizar este ensayo, el tiempo de fraguado se determina por medio del aparato de Vicat con una aguja de 1mm de diámetro[29], [38].

1.1.3.4.3. Propiedades del hormigón fresco

El hormigón fresco es ideal cuando fácilmente es transportado, colocado, compactado y acabado, sin producir efectos adversos en la resistencia y durabilidad del hormigón[29], [38]. Existe diferentes propiedades a evaluar el comportamiento del hormigón fresco, estas a su vez depende del tipo de hormigón. De estas, la trabajabilidad es planteada como un reto cuando se utiliza la zeolita como sustituto parcial del cemento[64], que posteriormente se profundiza.

Trabajabilidad

La trabajabilidad es el esfuerzo requerido para que una mezcla pueda ser manipulada, y así asegurar las operaciones de colocado, compactado y acabado. Si bien el diseño de la mezcla puede cumplir con todos los requerimientos, las operaciones mencionadas responden a una adecuada resistencia y durabilidad. Depende de las propiedades reológicas de la pasta cemento y la fricción interna entre las partículas del agregado, además de la fricción externa entre el hormigón y la superficie del encofrado.

La trabajabilidad considera los criterios de consistencia y cohesividad. La consistencia describe la facilidad con el hormigón fluye, mientras que cohesividad se relaciona con la capacidad de mantener unidos los agregados. La consistencia en un hormigón normal se mide a través del cono de Abrams, reconocido como asentamiento[38]. Esta medición debe cumplir con los requerimientos de la NTE INEN 158/ASTM C143

Najimi et al.[7], expresan que el uso de zeolita natural disminuye la trabajabilidad del hormigón que puede ser compensado con aditivos superplastificante, asociando el comportamiento a su porosidad y la alta superficie específica.

1.1.3.4.4. Propiedades del hormigón endurecido

En estado endurecido, el hormigón es adecuado para soportar cargas como material estructural. Las propiedades más importantes del hormigón endurecido incluyen la resistencia a la compresión, tracción, corte y flexión, estabilidad dimensional, relación esfuerzo-deformación, varios módulos y la relación de Poisson[29], [38]. De estas, la determinación de la resistencia a la tracción por compresión diametral es el tema de investigación, de modo que posteriormente será mencionada.

La resistencia a compresión a los 28 días determinada mediante un ensayo de compresión uniaxial es aceptada como un parámetro para el diseño estructural. Los espacios vacíos de varios tamaños y formas como las microfisuras entre la matriz y los agregados gruesos o la matriz, influyen en la resistencia[38]. Esta depende de la relación agua/cemento, el progreso de la hidratación, curado, condiciones ambientales y de la edad del concreto. A los 7 días se espera el 70% de la resistencia, mientras que a los 56 y 90 días se espera que el valor supere entre el 10 y 15% de la resistencia[29]. Altos contenidos de zeolita están relacionados con una baja resistencia a compresión, pero la reducción disminuye con el incremento en la edad del hormigón[52].

Resistencia a la tracción

El hormigón tiene una alta resistencia a la compresión, pero la resistencia a la tracción es muy baja. Esta resistencia es aproximadamente del 7-10% de la resistencia a compresión, por lo cual su resistencia se desprecia en la mayoría de los diseños

estructurales[19], [39]. En particular en elementos estructurales de hormigón reforzado sometidos a flexión y carga axial[65].

No obstante, esta propiedad se asocia al tamaño y extensión de las grietas que se producen cuando un elemento está sometido a esfuerzos de tracción. En particular tiene un efecto en la reducción de deflexiones en elementos de hormigón. Una vez presentadas las grietas, el hormigón ya no tiene resistencia a tensión, dado que las deformaciones unitarias de tracción son muy bajas[39]. Los elementos que puede estar sometidos a este esfuerzo son voladizos, descansos de escaleras que cuelgan de las vigas del nivel superior, diagonales de concreto para arriostramiento lateral, entre otros[40].

La determinación del esfuerzo de tracción puro requiere centrar las cargas axiales con el centroide mecánico, controlar el proceso de carga y que los dispositivos que sujetan el espécimen no liberen esfuerzos; condiciones que dificultan el ensayo. Por tanto, el esfuerzo de tracción uniaxial no se puede medir directamente, la tracción indirecta es el mecanismo alternativo para analizar el comportamiento del hormigón ante este esfuerzo[39], [40].

El ensayo de tracción indirecta, también conocido como ensayo de tracción por compresión diametral o ensayo brasileño, es el método utilizado para analizar el comportamiento del hormigón ante este esfuerzo. Dos cargas de compresión se aplican a lo largo de dos líneas axiales diametrales opuestas como se muestra en la Figura. 6. La distribución de los esfuerzos en la parte central del diámetro genera una tensión de tracción uniforme, así mismo, esfuerzos de compresión en los bordes. La expresión para determinar el esfuerzo de tensión es:

$$\sigma = \frac{2P}{\pi LD}$$

donde P es la carga aplicada en N , L la longitud del cilindro en mm y D el diámetro del cilindro en mm[38]–[40]. Las normativas correspondientes son NTE INEN 2648/ASTM496.

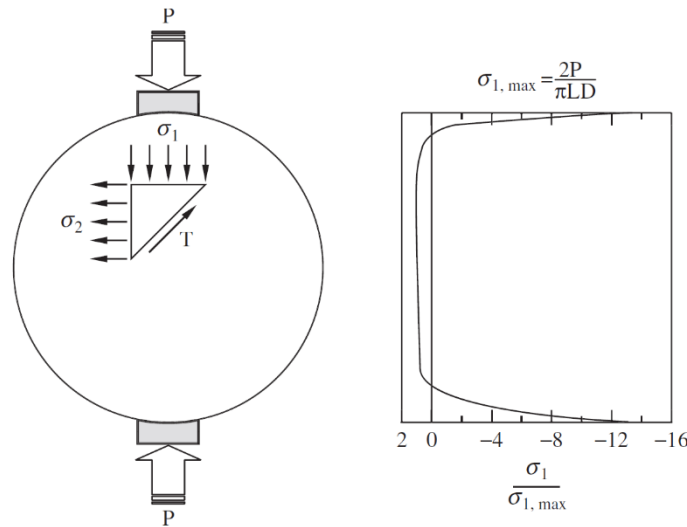


Figura. 6 Distribución de esfuerzos de la probeta bajo el ensayo de tracción indirecta[38]

Por lo que se refiere al comportamiento de este esfuerzo en hormigones con sustitución de zeolita por el cemento. Ramezianpour et al. [9], demostraron que la resistencia a la tracción de las mezclas con 10% de zeolita de tipo clinoptilolita a los 28 y 90 días, aumento. Además, determinan que una relación alta de agua/cemento presenta una mejor resistencia a la tracción de las mezclas.

1.1.3.4.5. Durabilidad

La durabilidad de un hormigón es la capacidad que tiene para resistir la acción de la intemperie, ataques químicos, abrasión u otro proceso que afecte la forma original, calidad y mantenimiento cuando es expuesto a un entorno de servicio. Está relacionada con la capacidad de servicio a largo plazo de los elementos del hormigón[29], [38], [66].

Aunque, la resistencia a compresión a los 28 días es un parámetro adecuado de control. La durabilidad es el principio que asegura que el hormigón cumpla con su vida útil para que el que fue diseñado. Los problemas ocasionados cubren la carbonatación, la reacción álcali agregado, corrosión de las barras refuerzo, ataque de sulfatos, lixiviación del hidróxido de calcio, congelación y deshielo[38]. La Tabla 4 recoge la categoría y clases

de exposición en la que se enfocan la durabilidad del hormigón según la NEC-SE-HM y la ACI 318-19.

Tabla 9 Categoría y clases de exposición para la durabilidad del hormigón[65], [66]

Exposición	Clase	Condición	
Congelamiento y deshielo (F)	F0	No expuesto a ciclos de congelación y deshielo	
	F1	Expuesto a ciclos de congelación, deshielo y exposición ocasional a la humedad	
	F2	Expuesto a ciclos de congelación, deshielo y en contacto continuo con la humedad	
	F3	Expuesto a ciclos de congelación, deshielo que estará en contacto continuo con la humedad y expuesto a productos químicos descongelantes	
Sulfato (S)		Sulfatos solubles en agua (SO_4^{2-}) en el suelo, % en masa	Sulfato (SO_4^{2-}) disuelto en suelo, ppm
	S0	$SO_4^{2-} < 0.1$	$SO_4^{2-} < 150$
	S1	$0.1 \leq SO_4^{2-} < 0.2$	$150 \leq SO_4^{2-} < 1500$, o agua marina
	S2	$0.2 \leq SO_4^{2-} \leq 2.0$	$1500 \leq SO_4^{2-} \leq 10000$
	S3	$SO_4^{2-} > 2.0$	$SO_4^{2-} > 10000$
Requiere baja permeabilidad (P)	P0	Contacto con el agua donde no se requiere baja permeabilidad	
	P1	Contacto con el agua donde se requiere baja permeabilidad	
Protección del refuerzo contra la corrosión (C)	C0	Seco o protegido contra la humedad	
	C1	Expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros	
	C2	Expuesto a la humedad, pero no a una fuente externa de cloruros provenientes de producto químicos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o salpicaduras del mismo origen	

La durabilidad del hormigón depende de su permeabilidad y difusión, así mismo la presencia de agrietamientos entre estos factores agudizan el deterioro. La permeabilidad se define como la propiedad que gobierna la velocidad de flujo de un fluido en un material poroso bajo presión. En la presente investigación, la permeabilidad se estudia a través de la penetración de agua bajo presión.

La porosidad en el hormigón reside en el interfaz entre el agregado y la pasta de cemento. La permeabilidad está en función de los tamaños de los poros del interior del material que, incluye el porcentaje total de poros y distribución del tamaño de los poros o la conexión de los poros. En este contexto, el hormigón está compuesto por agregados, pasta de cemento y el interfaz entre el agregado y la pasta. A medida que se produce la hidratación, la formación de C-S-H desconecta la red capilar de poros y se vuelve más tortuosa[38].

Estrategias para garantizar la durabilidad y reducir la permeabilidad en el hormigón se logra con una baja relación agua/cemento, contenido de cemento que asegure la consistencia por tanto la compactación y condiciones de curado que reduzcan las grietas superficiales.

Penetración de agua a presión

El método de penetración de agua bajo presión es adecuado para medir la permeabilidad del concreto. La penetración de agua se logra registrando el volumen del agua que ingresa a la muestra o midiendo la profundidad de decoloración debido a la humedad inmediatamente después de que el ensayo es detenido y es dividido el espécimen.

La profundidad de penetración del agua puede aproximarse al coeficiente de permeabilidad equivalente al utilizado en la ley de Darcy, de acuerdo con lo desarrollado por Valenta en 1969:

$$k = \frac{x^2 v}{2\Delta H T}$$

donde x es la profundidad de penetración (m); v la fracción del volumen del concreto ocupada por los poros; ΔH la caída de la altura hidráulica a través de la muestra (m); y T el tiempo de duración bajo presión (s). El valor de v representa a los poros discretos como las burbujas de aire, que se llenan de agua bajo presión y puede ser calculada a partir del incremento de la masa del hormigón durante el ensayo. Puesto que, los vacíos se consideran solo del área de penetración, v se expresa como sigue:

$$v = \frac{\Delta W}{DAx}$$

en la que ΔW es el peso ganado del espécimen durante la penetración; D la densidad del hormigón; y A el área de la sección transversal. Este método de penetración puede ser usado como evaluación cualitativa de la permeabilidad del hormigón. Aplicado en hormigones de muy baja permeabilidad[38].

1.1.4. Hipótesis

La zeolita natural de la cordillera Chongón-Colonche como una alternativa para mejorar las propiedades del concreto estructural en estado fresco y endurecido como su durabilidad, y pueda ser usado como material cementante suplementario.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. General

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

1.2.2. Específicos

- Analizar las propiedades físicas de una muestra de zeolita natural procedente de la cordillera Chongón-Colonche posterior a ensayos de densidad, finura de Blaine y granulometría por hidrómetro.
- Determinar el tiempo de fraguado del cemento portland y la zeolita con el aparato automático de Vicat.
- Realizar ensayos de tracción indirecta en especímenes cilíndricos de hormigón para 4 edades con 4 porcentajes de sustitución parcial del cemento con zeolita natural en su dosificación.
- Analizar la permeabilidad del hormigón para los 4 porcentajes de sustitución parcial del cemento con zeolita natural mediante la penetración de agua bajo presión.
- Comparar los efectos de la zeolita natural sobre las propiedades del cemento y el hormigón.

CAPÍTULO II

METEDOLOGÍA

2.1. MATERIALES

2.1.1. Zeolita natural comercial ZZ

La zeolita natural usada como material cementante suplementario durante esta investigación, en base a la ficha técnica, es clinoptilolita. Esta se encuentra disponible comercialmente en el mercado ecuatoriano para la construcción por la empresa Zeonatec S.A, como Mineplus. El producto es un polvo fino de color verde amarillento que pasa el tamiz No. 200. Este tiene una presentación de 45 kg envasado en sacos de polipropileno.

Los yacimientos de esta empresa están ubicados en el cantón Isidro Ayora, provincia del Guayas, y estos son parte de la cordillera Chongón-Colonche, donde la presencia de zeolitas es alta. La composición química de la zeolita se presenta en la Tabla 10, tanto los proporcionados por la empresa y los resultados de Fernández[13] y Salcedo[15], que especifican este mismo producto como material de investigación y abrevian como ZZ.

Tabla 10 Composición química de la zeolita natural

Elemento	Zeonatec S.A. [67] ^a	Fernández[13] y Salcedo[15] ^b
	ZZ	ZZ
SiO ₂	61.88%	73.07%
Al ₂ O ₃	10.85%	16.84%
Fe ₂ O ₃	3.53%	-
CaO	-	4.73%
MgO	0.77%	1.59%
Na ₂ O	-	2.30%
K ₂ O	-	1.48%

^a % SiO₂ es el resultado de un análisis de gravimetría y el resto de la absorción atómica

^b La técnica de EDS fue la empleada en la obtención de los resultados

2.1.2. Cemento tipo GU

El material aglutinante utilizado es un cemento disponible comercialmente y tradicional en el sector de la construcción. Este cumple con los requisitos específicos de desempeño de los cementos hidráulicos de la NTE INEN 2380/ASTM C 1157; clasificando a este producto como tipo GU, que es para la construcción general y no tiene propiedades especiales. Este material es producido en Ecuador por Holcim S.A. Distribuido comercialmente como Holcim Fuerte Tipo GU. Está compuesto por clínker, sulfato de calcio y una o más adiciones de puzolanas naturales[68].

2.1.3. Cemento portland SRM 114q

El cemento portland SRM 114q es un material de referencia estándar (SRM) utilizado en la calibración del aparato de permeabilidad al aire para la determinación de la finura. Este material es producido por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología (NIST) de los Estados Unidos. El material viene en viales de vidrio con un contenido aproximado de 5 gramos de cemento. La Tabla 11 recoge los valores del certificado de análisis del SRM 114q proporcionado por NIST de la composición química y componentes de este material.

Tabla 11 Composición química y componentes del cemento portland SRM 114q[69]

Composición química (% fracción en masa)										
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P. F
20.7	4.7	3.2	64.0	2.2	2.4	0.07	0.70	0.30	0.12	1.67
Componentes (% fracción en masa)										
C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₃ AF				
60.0		14.0		7.0		10.0				

2.1.4. Tripolifosfato de sodio

Tripolifosfato de sodio (Na₅P₃O₁₀) es usado como agente defloculante en la determinación del tamaño de las partículas de la zeolita natural por medio del hidrómetro. Este material es adquirido en la Casa del Químico, Ambato; en alternativa al hexametafostato de sodio.

2.1.5. Agregados

Los agregados finos y gruesos utilizados en la elaboración del hormigón provienen de la mina La Playa del cantón Salcedo, provincia de Cotopaxi. El agregado fino es un polvo de trituración llamado también polvo de roca, con un módulo de finura de 2.76, una gravedad específica de 2.60 y una capacidad absorción de 1.86%. El agregado grueso es una grava triturada de 3/4" con un tamaño nominal máximo de 12.70 mm, una gravedad específica de 2.64 y una capacidad de absorción de 3.17%. En la Tabla 12 se resume las propiedades físicas de los agregados, en base a los ensayos ejecutados en la investigación en correspondencia con las normativas NTE INEN.

Tabla 12 Propiedades físicas de los agregados

Propiedad física	Agregado	
	Fino	Grueso
Densidad real (g/cm ³)	2.60	2.64
Densidad aparente (g/cm ³)	1.58	1.29
Densidad aparente compactada (g/cm ³)	1.76	1.43
Porcentaje óptimo de agregado (%)	48.00	52.00
Densidad aparente óptima de los agregados (g/cm ³)	1.93	
Capacidad de absorción (%)	1.86	3.17
Contenido de humedad (%)	0.98	0.68
Módulo de finura	2.77	
Tamaño nominal máximo (mm)	12.70	

2.1.6. Aditivo plastificante

El aditivo plastificante usado para lograr el asentamiento de las mezclas y así garantizar la trabajabilidad del hormigón, fue el Sikament® N-100. Este es un aditivo químico líquido de color café compuesto por resinas sintéticas con una densidad 1.22 kg/l. Está diseñado para cumplir con los requerimientos de la ASTM C494, ASTM C1017 y la NTC 1299 como aditivo tipo A y F. El material está disponible comercialmente en el mercado ecuatoriano y es producido por Sika S.A. Ecuador. La dosificación utilizada es del 0.5% del peso del cemento.

2.2. EQUIPOS

2.2.1. Frasco Le Chatelier

El frasco volumétrico de Le Chatelier es usado para determinar la densidad del cemento tipo GU como de la zeolita natural. Este tiene una sección transversal circular con un bulbo ovalado en el cuello que tiene una capacidad de 17cm³. La graduación por debajo del bulbo es de 0 a 1.0 cm³ con dos subdivisiones adicionales de 0.1cm³ sobre la marca 1 y bajo la marca 0. En el cuello la graduación varía desde 18 a 24 cm³ en subdivisiones de 0.1cm³ por encima del bulbo. La temperatura normalizada indicada es de 20°C. Además, contiene un tapón de cristal esmerilado número 13. Este ha sido fabricado por Humboldt con un cristal de excelente calidad, transparente y libre de estrías [70].



Figura. 7 Frasco volumétrico de Le Chatelier[70]

2.2.2. Aparato Blaine de permeabilidad al aire

El aparato Blaine de permeabilidad al aire de operación manual, modelo E009, marca Matest, es usado para determinar la finura en términos de superficie específica del cemento tipo GU y de la zeolita natural; en el que se mide el tiempo de flujo del aire que pasa a través de una camada del material pulverizado con una porosidad asumida. Este cuenta con un manómetro montado verticalmente, que es un tubo de vidrio en forma de U con un diámetro exterior nominal de 9mm. En la parte superior tiene un acople hembra normalizado para alojar la parte inferior de la celda de permeabilidad y en la salida lateral, a una altura de 250mm y a no más de 50mm del brazo del manómetro, tiene una válvula de cierre hermética.

Además, incluye una celda de permeabilidad con un diámetro interior de 12.70mm, un émbolo que encaja dentro de la celda y un disco perforado con un espesor de 0.9mm, todas estas partes en acero inoxidable. También complementan al equipo, cemento portland SRM 114q, discos de papel filtro, líquido manométrico, vaselina y una bombilla aspiradora de goma. [71].



Figura. 8 Aparato Blaine de permeabilidad al aire[71]

2.2.3. Hidrómetro 152 H

El hidrómetro 152 H, marca Soiltest, es usado para determinar la granulometría de la zeolita natural, específicamente el tamaño medio de las partículas. Este está graduado de -5g/l a +60g/l cada 0.1g/l para leer los gramos por litro de suspensión y está calibrado para el supuesto de que el agua destilada tiene una gravedad específica de 1.00 a 20°C[61].



Figura. 9 Hidrómetro 152 H

2.2.4. Baño María

El baño maría, modelo H-190, marca Humboldt es usado durante la ejecución de los ensayos de densidad y tamaño de las partículas. En el primero es utilizado para sumergir el frasco Le Chatelier y controlar la variación de temperatura en 0.2°C entre lecturas del volumen del frasco, mientras que en el segundo permite mantener la suspensión del suelo a una temperatura constante de 20°C durante el análisis del hidrómetro. Este cuenta con un control digital basado en un microprocesador para un control preciso de la temperatura y una barra de agitación magnética para inducir el flujo de agua. Además, todas las áreas expuestas son de acero inoxidable. El volumen es de 7.76 galones y las dimensiones son 459.3x 292.1x 203.0mm [71].



Figura. 10 Baño maría[72]

2.2.5. Aparato manual de Vicat

El aparato de Vicat manual, marca Soiltest, es usado para determinar la consistencia normal de las pastas. Este incluye una varilla móvil de penetración de 10mm de diámetro en una longitud de 50mm, con un peso de 300g y en acero inoxidable. La escala de medición es de 50mm y está graduada en milímetros. Además, cuenta un tornillo de ajuste y un indicador ajustable que se mueve sobre la escala de medición. Entre los complementos del equipo, está el anillo cónico rígido con un diámetro interior en la base de 70 y en la parte superior de 60, por 40 mm de alto[73].



Figura. 11 Aparato manual de Vicat

2.2.6. Aparato automático de Vicat

El aparato automático de Vicat, Vicatronic, modelo E044N, marca Matest, es usado para determinar el tiempo de fraguado inicial y final de pastas. Este cuenta con una aguja templada con un diámetro de 1mm de punta recta, aguja de Vicat, para medir las penetraciones periódicas en la pasta. El instrumento es capaz de hacer mediciones periódicas en el tiempo afijado a una distancia de 5mm de cualquier penetración anterior y a 10 mm de distancia de la cara interna del anillo cónico. La masa soportada por la aguja al momento de la medición de 300g. Además, incluye un anillo cónico plástico de 60/70 por 40mm de alto y una placa base de vidrio[74].

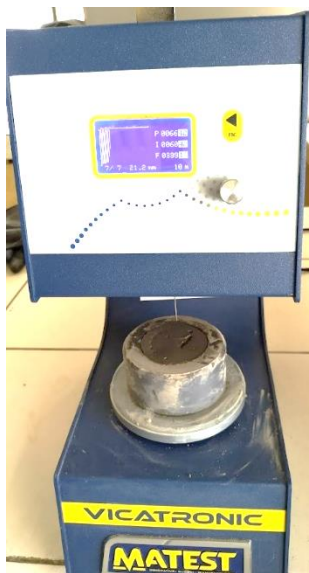


Figura. 12 Aparato automático de Vicat, Vicatronic

2.2.7. Tanque de curado

El tanque de curado, modelo C302, marca Matest, es usado para el curado final de los especímenes cilíndricos de hormigón. Este está programado para mantener una temperatura de $22\pm 2^{\circ}\text{C}$. Este tiene una capacidad de 650 litros y las dimensiones interiores son de 1040x1040x605mm. Este ha sido fabricado en polietileno extremadamente robusto y estable. Entre los accesorios que complementa el funcionamiento están el termostato con un sistema de calefacción digital, termostato analógico con resistencia, una bomba de circulación de agua sumergible y una cubierta plástica.



Figura. 13 Tanque de curado

2.2.8. Máquina de ensayo

La máquina de ensayo de compresión del hormigón, modelo Concreto 2000x, marca Shimadzu, es usada para el ensayo de tracción indirecta de los especímenes cilíndricos de hormigón, este se realizó a una velocidad de 0.02 MPa/s. La capacidad de prueba es de 40 a 2000 kN en rango de 6 etapas, el método de control es de tipo servo hidráulico con función a prueba de explosiones y el diámetro de la placa superior e inferior es de 220mm. Esta máquina tiene un indicador de carga de aguja ideal para lectura de la carga total y está controlado bajo el software Trapezium X [74].



Figura. 14 Máquina de ensayo

2.2.9. Máquina de penetración de agua

La máquina usada para medir la profundidad de penetración de agua, específicamente para el montaje de los especímenes y recibir el agua a presión de 500 ± 50 kPa durante 72 ± 2 horas. Esta ha sido fabricada por el Ing. Santiago Rodríguez en su estudio de hormigones impermeables, según el origen local de los materiales y la adición de aditivo impermeabilizantes. Esta incluye manómetros de aceite, un sistema de tuberías adecuadamente sellado para evitar fugas en el sistema[75].



Figura. 15 Máquina de penetración de agua[75]

2.3. MÉTODOS

En el presente estudio se llevó a cabo una investigación bibliográfica y experimental, con el fin de determinar los efectos de la zeolita natural como material cementante suplementario en el concreto estructural. La investigación bibliográfica corresponde a la revisión de artículos científicos, libros y otros trabajos ejecutados en el país como en el extranjero, relacionados al uso de la zeolita natural en la industria de la construcción.

La investigación experimental parte desde la caracterización física de la zeolita y el cemento. Esta incluyó la determinación de la densidad a través del frasco volumétrico Le Chatelier, la finura usando el aparato Blaine de permeabilidad al aire y el tamaño de la partícula mediante el análisis granulométrico con el hidrómetro. En lo que respecta al tiempo de fraguado se usó el aparato automático de Vicat.

Después se abordó la resistencia a la tracción indirecta del hormigón a la edad de 7, 14, 28 y 56 días, para los porcentajes de sustitución del 0, 10, 15 y 20% de la masa de cemento por zeolita. También, se evaluó la permeabilidad del hormigón para cada porcentaje de sustitución mediante la penetración de agua bajo presión. Los ensayos ejecutados se realizaron en base a las normas técnicas ecuatorianas NTE INEN e internacionales como las ASTM y AASHTO.

2.3.1. Caracterización física

2.3.1.1. Densidad

En la determinación de la densidad de la zeolita y el cemento, se realizó conforme las normativas NTE INEN 156 y la ASTM C188 usando el frasco volumétrico de Le Chatelier. Es importante mencionar que 1mL es igual a 1cm³.

La cantidad de zeolita utilizada es de 55g en lugar de los 64g de cemento que recomienda la norma, ya que nivel de líquido excedería de la graduación del cuello. Previamente, una cantidad considerable de los materiales, una vez adquiridos, se almacenó en fundas herméticas a fin de evitar la penetración de humedad y contaminación. Además, el líquido utilizado como reactivo es la gasolina, denominado como nafta en la norma.

Procedimiento

1. Pesar la cantidad del material con una aproximación de 0.05g en recipientes ligeros. Esta aproximación también será utilizada en el registro del resto de masas.
2. Colocar el líquido entre las marcas 0mL y 1mL del frasco, utilizando una piseta, a fin de evitar la adherencia del reactivo al cristal del cuello.
3. Pesar y registrar la masa del frasco con adición de gasolina, M_a . Inmediatamente colocar el tapón para evitar la evaporación de la gasolina
4. Sumergir el frasco en un baño maría a una temperatura constante por un tiempo suficiente para que el líquido mantenga su nivel.
5. Colocar el frasco en una superficie nivelada y registrar la primera lectura del volumen del frasco, V_o .
6. Introducir la muestra haciendo uso de un embudo de vidrio y espátula de laboratorio, en incrementos pequeños evitando la adherencia y atascamiento del material en el interior del frasco.
7. Pesar y registrar la masa del frasco, M_t , una vez que se ha introducido toda la muestra.
8. Colocar el tapón y girar manualmente en posición inclinada hasta que ya no existan burbujas saliendo hacia la superficie.
9. Registrar la lectura final, V_f , una vez que se ha introducido el frasco en el baño maría y se ha evidenciado que la variación de la temperatura no exceda lo recomendado.

Durante este procedimiento se controló que la variación de temperatura entre la lectura inicial y final del volumen no sea mayor a 0.2°C . La temperatura es tomada directamente en el agua del baño maría a través de un termómetro digital de tallo largo. Las lecturas del volumen se realizan por debajo del menisco formado por el reactivo

Cálculos

La densidad del material analizado, ρ , se obtiene de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{M_t - M_a}{V_f - V_o}$$

donde ρ es la densidad del material en g/cm^3 ; M_t la masa del frasco que contiene el material y el líquido en g; y M_a la masa del frasco solo con el líquido en g; V_f el volumen final en cm^3 ; V_o el volumen inicial en cm^3 .

2.3.1.2. Finura

La determinación de la finura de la zeolita y el cemento tipo GU se realizó con el aparato Blaine de permeabilidad al aire de operación manual. De los materiales usados, el cemento portland SRM 114q es el más importante durante la ejecución del ensayo, del cual se debe evitar la contaminación y desperdicio; y se denomina muestra normalizada o cemento normalizado.

Los equipos y materiales mencionados, como el método de ensayo aplicado, están en correspondencia con la normativa NTE INEN 196 que tienen como base de estudio a la ASTM C204. El procedimiento y cálculo de este método se dividió en 4 etapas. La primera en la calibración del aparato. Las siguientes en ensayos de permeabilidad para la muestra normalizada, el cemento tipo GU y la zeolita, respectivamente.

Cada material previamente a su ensayo se sacudió vigorosamente en un frasco por 2 minutos y se dejó reposar durante 2 minutos. La intención es romper la aglomeración y tener una distribución de las partículas en la muestra. Las masas se registraron con una precisión de 0.001g.

Calibración del aparato

1. Colocar el disco perforado y dos discos de papel filtro en la celda de permeabilidad.
2. Llenar de mercurio la celda y golpear ligeramente las paredes de esta, con la intención de eliminar cualquier burbuja de aire.
3. Nivelar el mercurio con una placa de vidrio hasta que el borde superior de la celda y la superficie de placa estén en el mismo plano. Seguido registrar su masa, W_A .
4. Retirar el mercurio y uno de los discos de papel filtro de la celda
5. Tarar la balanza con el peso de la celda y pesar en su interior 2.80 g de la muestra normalizada.

6. Nivelar la camada de cemento con golpes ligeros en las paredes de la celda y colocar el disco de papel extraído
7. Introducir el émbolo y presionar la camada hasta que el borde superior de la celda este en contacto con el collarín del émbolo; extraer una pequeña distancia y girar aproximadamente 90°C para volver a presionar; y después retirar completamente el émbolo.
8. Añadir el mercurio en el espacio de la celda; nivelar como se indicó anteriormente y registrar la masa, WB.

En esta determinación se registró la temperatura de ensayo en la vecindad de la celda. De la temperatura registrada depende la densidad del mercurio y posteriormente la ecuación a utilizar para el cálculo de la superficie específica. La Tabla 13 muestra los valores de densidad del mercurio a temperatura ambiente.

Tabla 13 Densidad del mercurio a temperatura ambiente[76]

Temperatura ambiente (°C)	Densidad del mercurio (g/cm ³)
18	13.55
20	13.55
22	13.54
24	13.54
26	13.53
28	13.53
30	13.52
32	13.52
34	13.51

El volumen aparente de la camada es calculado como sigue:

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

Donde V es el volumen de la camada de cemento normalizado en cm³; WA la masa del mercurio y el cemento en g; WB la masa del mercurio en g; y D la densidad del mercurio

a temperatura de ensayo en g/cm^3 . Se realizó dos determinaciones del volumen y se verificó que no exista una variación de $\pm 0.005\text{cm}^3$. El volumen utilizado es el promedio de los dos valores.

Seguido se calculó la masa de la muestra normalizada para realizar el ensayo de permeabilidad:

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

Donde W es la masa de la muestra normalizada en g ; ρ es la densidad de la muestra normalizada, que es de 3.15g/cm^3 , valor que está especificado en el certificado de análisis y recomendado en la norma; y ε es la porosidad deseada de la camada de cemento, que es de 0.5.

Previamente, a la ejecución de las siguientes etapas se llenó el líquido manométrico hasta la marca inferior del manómetro, evacuando el aire del manómetro. Este procedimiento se completa con el ascenso y descenso del líquido del manómetro varias veces a fin de que el nivel de líquido sea constante. Un ascenso brusco al acople y válvula del manómetro implica la recalibración del aparato, por tanto, el rechazo de los resultados.

Ensayo de permeabilidad de la muestra normalizada

El intervalo de tiempo de la caída del manómetro de la muestra normalizada, T_s , se determinó del promedio de tres camadas y cada camada con la medición de tres tiempos de flujo. El procedimiento es repetitivo para cada camada y se describe a continuación.

1. Colocar el disco perforado y un disco de papel filtro en la celda de permeabilidad. Verificar que estén asentados en la base.
2. Tarar la balanza con el peso de la celda y pesar en su interior la masa de muestra normalizada calculada.
3. Nivelar la camada de la muestra con golpes ligeros en las paredes de la celda y colocar un disco de papel filtro.
4. Introducir el émbolo y presionar la camada hasta que el borde superior de la celda este en contacto con el collarín del émbolo; extraer una pequeña distancia y girar

aproximadamente 90°C para volver a presionar; y después retirar completamente el émbolo.

5. Recubrir de vaselina la superficie de la celda que estará en contacto con el acople del manómetro.
6. Ajustar la celda en el acople del manómetro asegurándose que exista una conexión hermética.
7. Cubrir la salida de la bombilla y comprimir la misma, seguido abrir la válvula y descomprimir suavemente la bombilla, hasta que el nivel del líquido alcance la marca superior del manómetro.
8. Cerrar la válvula firmemente y registrar el tiempo en s, desde el momento que la base del menisco alcance la marca intermedia superior hasta que llegue a la marca intermedia inferior.
9. Determinar el tiempo de flujo por lo menos tres veces y registrar la temperatura de ensayo.

Ensayo de permeabilidad del cemento tipo GU

La determinación de la superficie específica del cemento tipo GU empieza con la preparación de la muestra de ensayo. La masa de la muestra debe ser la misma calculada en la muestra normalizada. Sin embargo, en el caso del cemento tipo GU, entra dentro de las excepciones de la norma, ya que la porosidad de 0.50 impidió que el collarín del émbolo tenga contacto con el borde superior de la celda.

En ese sentido, la ecuación utilizada para el cálculo de la muestra de cemento es la misma que la muestra normalizada. La diferencia es que se utilizó una porosidad de 0.53 para lograr lo antes mencionado.

En cuanto al ensayo de permeabilidad para el cemento se repitió el procedimiento descrito en la muestra normalizada. La ecuación de cálculo usada en la determinación de la superficie específica depende de la temperatura de ensayo y su variación en $\pm 3^{\circ}\text{C}$ con la temperatura del ensayo de calibración de la muestra normalizada. En el estudio la variación no excedió lo especificado y la ecuación utilizada es la siguiente:

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

Donde S es la superficie específica de la muestra de ensayo en m²/kg; S_s la superficie específica de la muestra normalizada en m²/kg, que es de 381.8m²/kg, valor que está especificado en el certificado de análisis; T es el tiempo de la muestra de ensayo en s; y T_s el tiempo de la muestra normalizada en s.

Ensayo de permeabilidad de la zeolita

El método de la determinación de la finura es aplicable para cementos hidráulicos. No obstante, es adecuado para un material pulverizado, como es la zeolita. En esta se debe considerar la porosidad del material como su densidad. Específicamente en el método de ensayo, la determinación depende de la ecuación de cálculo y el valor de la constante b.

En esta etapa, los cálculos toman una significativa importancia. La determinación de la constante b y con esta, el coeficiente de correlación R a través de una hoja de cálculo, son resultados que permiten controlar la veracidad de los resultados.

La determinación de la superficie específica empieza con la determinación de la constante b. El ensayo se realizó para 4 porosidades diferentes en un rango de 0.06. El procedimiento se detalla a continuación:

1. Calcular la muestra de ensayo de la zeolita conforme la ecuación de la muestra normalizada, teniendo en cuenta la densidad del material y porosidad asumida.
2. Ensayar la muestra con el procedimiento aplicado en el ensayo de permeabilidad de la muestra normalizada.
3. Graficar, haciendo uso de una hoja de cálculo, el valor calculado de $\sqrt{\varepsilon^3 T}$ versus ε .
4. Verificar que el coeficiente de correlación R exceda 0.9970.

La finura de la zeolita es calculada con la porosidad que permite que el collarín del émbolo tenga contacto con el borde superior de la celda. Además, de una camada compactada. El intervalo de tiempo de la muestra ensayo, T, es el promedio de los tres valores determinados. La ecuación de cálculo utilizada es la de materiales diferentes al cemento portland. Estas dependen de la temperatura de ensayo, si varía en ±3°C y si supera

el rango mencionado, de la temperatura de calibración. En el caso de estudio la temperatura está dentro del rango y la ecuación aplicada es la siguiente:

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

Donde ρ_s es la densidad de la muestra normalizada en g/cm³; b_s la constante de la muestra normalizada, que es 0.9; ε_s la porosidad de la muestra normalizada; T el tiempo de la muestra de ensayo en s; ρ la densidad de la muestra de ensayo; b la constante determinada para la muestra de ensayo, ε la porosidad de la muestra de ensayo; y T_s el tiempo de la muestra normalizada.

2.3.1.3. Tamaño de la partícula

El tamaño de las partículas de zeolita se determinó a través del análisis granulométrico por hidrómetro. El hidrómetro empleado es de tipo 152-H graduado de -5g/l a +60g/l cada 0.1g/l. Además, se utilizó un taladro eléctrico de 650W incorporado con un aspa de batidora, que cumple la función de aparato agitador mecánico; probetas de vidrio con un volumen de 1000mL para la sedimentación; baño maría para mantener la temperatura constante; y un horno.

Antes de iniciar con el ensayo se preparó el agente dispersante, que es una solución de 40g de tripolifosfato de sodio en un litro agua destilada. Esta solución debe ser preparada una vez al mes o ajustar su pH de 8 a 9 con carbonato de sodio, condiciones a la cuales no se recurrió, dado que la solución se preparó con una semana de anticipación al ensayo.

El método de ensayo se lo dividió en dispersión y ensayo del hidrómetro, corrección de las lecturas del hidrómetro, porcentaje de la muestra en suspensión y diámetro de las partículas. Los procedimientos y cálculos están en correspondencia con las normativas INE E-123-13, ASTM D422 y la AAHSTO T88.

Dispersión y ensayo del hidrómetro

El análisis por hidrómetro es aplicable a muestras que pasan el tamiz No. 10. La zeolita cumple con lo indicado, ya que pasa el tamiz No. 200. La cantidad de muestra utilizada es de 60g al considerarse un material pulverizado. El proceso para la dispersión y ensayo del hidrómetro se detalla a continuación.

1. Colocar en un recipiente 60g de zeolita con 125mL de agente dispersante, agitar con una varilla de vidrio y dejar reposar durante al menos 24 horas.
2. Terminado el período de saturación, colocar la solución en un recipiente que garantice la agitación y evite la pérdida de partículas, lavar con agua destilada cualquier partícula del recipiente y completar su volumen hasta la mitad de su capacidad con agua destilada.
3. Agitar con un taladro a una velocidad controlada durante 1 minuto. El taladro se adapta al ensayo para que cumpla función del aparato agitador mecánico recomendado en la normativa.
4. Colocar la solución en una probeta y llenar con agua destilada hasta los 990mL.
5. Mover durante 60 ciclos, de arriba y abajo, con un agitador manual para así romper la aglomeración de las partículas y la sedimentación sea uniforme. Procurar que la operación se realice en un minuto.
6. Poner en marcha el cronómetro y completar el volumen a los 1000mL de capacidad con agua destilada.
7. Llevar la probeta al baño maría. La temperatura constante a la que se debe utilizar es de 20°C.
8. Introducir verticalmente el hidrómetro a la solución, registrar la primera lectura del hidrómetro a los 2 minutos y luego la temperatura dentro de la solución.
9. Tomar el resto de las lecturas como su temperatura a los 5, 15, 60, 120, 250 y 440 minutos. Después de cada lectura extraer el hidrómetro y colocar en una probeta con agua destilada.
10. Determinar el peso seco de la muestra de suelo al vaciar todo el contenido de la probeta a un recipiente metálico, seguido poner en horno durante al menos 24 horas. Registrar la masa del recipiente como la masa seca del horno.

Corrección de las lecturas del hidrómetro

Las lecturas en un hidrómetro requieren de correcciones para una precisión en los resultados. Estas son corrección por agente dispersante, menisco y temperatura. La corrección por agente dispersante se determinó experimentalmente como sigue:

1. Colocar 125mL de agente dispersante en una probeta y completar los 1000mL con agua destilada.
2. Llevar la probeta al baño maría y mantener la temperatura de la solución a 20°C.
3. Introducir verticalmente el hidrómetro y controlar que la temperatura de la solución se mantenga en 20°C.
4. Registrar la lectura del hidrómetro en la parte superior del menisco, τ' .

Para la corrección por menisco, C_m , se utiliza un valor de 1.0g/L. La corrección por temperatura, C_t , se obtienen de la Tabla 13 y esta depende de la temperatura al momento de la lectura del hidrómetro.

Tabla 14 Valores de C_t para la corrección por temperatura del hidrómetro tipo 152-H[77]

Temperatura (°C)	C_t (g/L)
15	-1.20
16	-1.00
17	-0.80
18	-0.50
19	-0.30
20	0.00
21	0.30
22	0.60
23	0.90
24	1.30
25	1.70
26	2.00
27	2.40
28	2.90
29	3.30
30	3.70

Porcentaje de partículas en suspensión

En esta fase, los cálculos dependen de los datos previamente registrados en el ensayo del hidrómetro de la muestra y las respectivas correcciones. La ecuación para calcular el porcentaje de suelo en suspensión para un hidrómetro 152-H es la siguiente:

$$P = \frac{(R - Cd \pm Ct) \times a}{W}$$

Donde P es el porcentaje que pasa; R es la lectura del hidrómetro corregida por menisco; Cd la lectura de corrección por agente dispersante; Ct la lectura de la corrección por temperatura; a un factor de corrección por gravedad específica de la muestra, los valores se muestran en la Tabla 14; y W la masa del suelo seco al horno.

Tabla 15 Valores del factor a, para diferentes gravedades específicas[61], [78]

Gravedad específica	Factor de corrección a
2.95	0.94
2.90	0.95
2.85	0.96
2.80	0.97
2.75	0.98
2.70	0.99
2.65	1.00
2.60	1.01
2.55	1.02
2.50	1.03
2.45	1.05
2.35	1.08

Para calcular la lectura corregida por menisco, R, se suma la lectura del hidrómetro sin corregir R' y la corrección por menisco Cm. La corrección por agente dispersante y punto cero, Cd, se calcula con la siguiente ecuación:

$$-Cd = \tau' + Cm \pm Ct$$

Donde τ' es la lectura del hidrómetro por agente dispersante.

Diámetro de las partículas

Este parámetro determina diámetro de las partículas correspondientes a cada lectura del hidrómetro. La ecuación de cálculo utilizada es la siguiente:

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

Donde D es el diámetro de las partículas en mm; K es una constante que depende del valor de la gravedad específica de la zeolita y de la temperatura de suspensión; L es la profundidad efectiva del hidrómetro en cm, la Tabla 16 muestra los valores utilizados para el hidrómetro 152-H.

Tabla 16 Valores de profundidad efectiva, L, para el hidrómetro 152-H[61], [78]

Lectura real del hidrómetro	Profundidad efectiva L (cm)	Lectura real del hidrómetro	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		
6	15.3	36	10.4
7	15.2	37	10.2
8	15	38	10.1
9	14.8	39	9.9
10	14.7	40	9.7
11	14.5	41	9.6
12	14.3	42	9.4
13	14.2	43	9.2
14	14	44	9.1
15	13.8	45	8.9
16	13.7	46	8.8
17	13.5	47	8.6
18	13.3	48	8.4
19	13.2	49	8.3
20	13	50	8.1
21	12.9	51	7.9
22	12.7	52	7.8
23	12.5	53	7.6
24	12.4	54	7.4
25	12.2	55	7.3
26	12	56	7.1
27	11.9	57	7
28	11.7	58	6.8
29	11.5	59	6.6
30	11.4	60	6.5

El valor de la constante K se puede extraer de las tablas presentadas en las normativas cuando el material supera una gravedad específica de 2.45, teniendo en cuenta sus unidades. Sin embargo, el valor de K es calculado conforme la siguiente ecuación:

$$K = \frac{30 \times \mu / g}{\rho_s - \rho_w}$$

Donde μ es el coeficiente de viscosidad del agua en Poises; g es la aceleración gravitacional, que es igual a 980.7cm/s²; ρ_s la densidad de la zeolita en g/cm³; ρ_w la densidad del agua destilada en g/cm³. Los valores usados del coeficiente de viscosidad del agua, μ , que dependen de la temperatura de ensayo se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17 Coeficiente de viscosidad del agua a varias temperaturas[79]

Temperatura (°C)	Viscosidad del agua, μ (Poises)
16	0.0111
17	0.0108
18	0.0105
19	0.0103
20	0.0100
21	0.0098
22	0.0096
23	0.0093
24	0.0091

Una vez obtenido todos los resultados descritos anteriormente, se elaboró la curva granulométrica resultante. Esta resulta de graficar el diámetro de las partículas en escala aritmética versus el porcentaje de partículas que pasa en escala logarítmica. En particular, a través de la lectura de la curva se obtiene D₅₀, que corresponde al diámetro del 50% de las partículas.

2.3.2. Tiempo de fraguado

La determinación del tiempo de fraguado inicia con encontrar la consistencia normal de la pasta. Esta se determinó con el uso de un aparato manual de Vicat que incluye una varilla de penetración de 10mm de diámetro. Las normativas bajo cual se fundamentan los equipos, procedimientos y cálculos están en correspondencia con la NTE INEN 157 y la ASTM C187 para consistencia normal. En el caso del tiempo de fraguado con la NTE INEN 158 y la ASTM C191.

Los métodos de ensayo, tanto para consistencia normal como del tiempo de fraguado, se pueden efectuar por separado. Sin embargo, se optó por utilizar el tercer método de obtención de la pasta de la NTE INEN 158, que es utilizar la mezcla restante del ensayo de consistencia normal. Por esta razón, la determinación del tiempo de fraguado contempla una secuencia de procesos que parte desde la calibración de la aguja, configuración del ensayo hasta llegar al ensayo de consistencia y tiempo de fraguado.

Calibración de la aguja

Antes de ejecutar un ensayo de tiempo de fraguado con Vicatronic se calibró la aguja para confiar de los resultados. El procedimiento se detalla a continuación.

1. Colocar y centrar la placa de vidrio.
2. En el menú del equipo, seleccionar instrumentos y luego calibración de la aguja. Seguido confirmar el proceso, esperar que descienda la aguja, y con una llave hexagonal regular la altura y verificar que exista un contacto con la placa de vidrio.
3. Confirmar el procedimiento y mientras asciende colocar el anillo cónico para ejecutar la segunda lectura de calibración.
4. Esperar que descienda por segunda vez, verificar que la altura medida sea de 40mm y confirmar el proceso.

Configuración del ensayo

Después de calibrar la aguja, se procedió a configurar el ensayo. En general, se modificó los datos propios del ensayo como el nombre, fecha, temperatura, consistencia, humedad, entre otros. No obstante, se prestó mayor atención a las siguientes configuraciones:

1. El tipo de prueba, que corresponde a la normativa de ensayo. La opción elegida es la ASTM, ya que la normativa equivale a la NTE INEN 158.
2. El tiempo de la muestra, que corresponde a la hora desde el momento que el material cementante entra en contacto con el agua.
3. El tiempo de la primera penetración como en el retraso no se establecen valores.
4. El tipo de caída seleccionada es libre y no se usa el ajuste final.
5. El tipo de tiempo es afijar, ya que la opción posteriormente permite establecer el intervalo de tiempo entre penetraciones. En el estudio se estableció en 12 minutos para que sean suficientes las penetraciones y la pasta llegue al fraguado final.

Ensayo de consistencia y tiempo de fraguado

Se determinó la consistencia y el tiempo de fraguado para 4 pastas. La primera, la pasta de cemento y las tres restantes corresponden al 10, 15 y 20 % de sustitución del cemento por zeolita. Tanto el procedimiento como los cálculos aplicados se describen a continuación y es igual para todas las pastas.

1. Pesar 650 g de material cementante con una cantidad tentativa de agua en probetas de 100mL para que la pasta entre en consistencia normal.
2. Colocar el agua en un recipiente, seguido el material cementante y esperar 30 segundos a que absorba el agua. Después, mezclar la pasta durante 30 segundos a una velocidad baja.
3. Limpiar la pasta adherida a las paredes del recipiente y bordes del aspa, en un tiempo de 15 segundos.
4. Mezclar durante 60 segundos a una velocidad media.
5. Formar una bola con las manos y lanzar 6 veces de una mano a otra, manteniendo una distancia de 150mm. La manipulación se debe hacer con guantes y ligeramente humedecidos.

6. Introducir la bola formada desde el diámetro mayor al menor del anillo cónico, presionando con la palma de la mano en el diámetro mayor y sosteniendo con la otra en el diámetro menor.
7. Limpiar el exceso de la pasta en el diámetro mayor con una sola pasada de la mano.
8. Asentar el anillo con su diámetro mayor en la base de la placa de vidrio.
9. Retirar el exceso de pasta con una espátula, empezando del centro al extremo con una inclinación aproximada de 30°C.
10. Alisar la superficie de la pasta con leves pasadas de la espátula sin ejercer presión. La superficie debe quedar nivelada con el borde del anillo. Las pasadas no deben exceder de tres ciclos.
11. Llevar el espécimen (anillo y placa) al aparato de Vicat manual y centrar con el eje vertical de la varilla de penetración.
12. Poner en contacto la varilla de penetración con la superficie de la pasta y ajustar el tornillo.
13. Ubicar el indicador en la marca de cero superior de la escala y aflojar el tornillo.
14. Esperar 30 segundos y tomar la lectura de penetración del aparato. Si la pasta está en consistencia normal, la penetración no debe exceder los 10 ± 1 mm. Caso contrario se debe repetir el ensayo hasta encontrar la cantidad de agua para lograr la consistencia normal de la pasta. Además, se debe restablecer las configuraciones del ensayo.
15. Inmediatamente verificado la consistencia normal de la pasta, preparar otra bola de la misma mezcla y repetir el procedimiento desde el paso 5 al 10. El anillo utilizado debe estar cubierto de grasa para ayudar a la remoción una vez endurecida la pasta. La placa de vidrio anteriormente utilizada es limpiada y usada en este paso.
16. Llevar el espécimen al aparato de Vicat automático, centrar con el soporte del aparato y dar inicio al ensayo.

Una vez completado el proceso, la consistencia se calculó en base a la siguiente ecuación:

$$C = \frac{m_a}{m_c} \times 100$$

Donde C es la consistencia normal en %; m_a la masa del agua utilizada en g; y m_c la masa del cemento en g.

En el caso del tiempo de fraguado, los cálculos se derivan de los resultados impresos por el aparato. El fraguado inicial de la pasta se produce cuando la aguja penetra 25mm o más y el tiempo se determina a través de la interpolación de los resultados, como se detalla a continuación:

$$T = \frac{H - E}{C - D} x(C - 25) + E$$

Donde T es el tiempo de fraguado inicial; H el tiempo en minutos de la última penetración mayor que 25 mm; E el tiempo en minutos de la primera penetración menor que 25mm; C la lectura de penetración al tiempo E; y D la lectura de penetración al tiempo H.

El tiempo transcurrido desde el momento que el cemento entra en contacto con el agua y la aguja no deja marca sobre la superficie de la pasta, se establece como tiempo de fraguado final. Este se determinó con una aproximación de 5 minutos. Además, se analizó los resultados en gráficas de penetración versus tiempo para establecer los resultados finales.

2.3.3. Diseño y elaboración de las mezclas de hormigón

2.3.3.1. Diseño de la mezcla

En la investigación, el hormigón se diseñó para que la resistencia a compresión a los 28 días sea de 24 MPa. De manera que tenga propósitos estructurales y pueda ser usado en columnas, vigas, muros y losas. El diseño se realizó mediante el método de dosificación de la densidad óptima. Además, se efectuó la corrección por humedad para la dosificación obtenida.

Previamente al diseño, se realizó los ensayos para determinar las propiedades físicas de los agregados como granulometría, densidad, densidad aparente, densidad aparente compactada y capacidad de absorción. La densidad del cemento utilizada es la determinada por el frasco de Le Chatelier, anteriormente descrita. Estos ensayos se realizaron en base a las normas técnicas ecuatorianas e internacionales como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18 Normas usadas en la determinación de las propiedades del cemento y agregados

Componente	Norma	Propiedad física
Cemento	NTE INEN 156	Densidad
Agregado fino	NTE INEN 696	Granulometría
	NTE INEN 856	Densidad
		Capacidad de absorción
	NTE INEN 858	Densidad aparente
		Densidad aparente compactada
Agregado grueso	ASTM D2216	Humedad
	NTE INEN 696	Granulometría
	NTE INEN 857	Densidad
		Capacidad de absorción
	NTE INEN 858	Densidad aparente
		Densidad aparente compactada
	ASTM D2216	Humedad

El método de dosificación, además de las propiedades mencionadas, requiere conocer la densidad óptima de los agregados. Este valor resulta de serie de mezclas de agregado fino y agregado grueso que han sido compactadas conforme la NTE INEN 858. De los ensayos de cada mezcla se obtiene la densidad aparente. Estos se grafican en función del porcentaje de la mezcla del agregado fino. El porcentaje óptimo de agregado fino y agregado grueso se obtiene de restar 4% y sumar 4% al porcentaje máximo de la curva, respectivamente. El valor de la densidad óptima de la mezcla será el valor correspondiente al porcentaje óptimo del agregado fino. En el estudio, se utilizó una hoja de cálculo para graficar la función cuadrática y determinar el porcentaje máximo a través del punto de inflexión de la curva.

En cuanto al método de la densidad óptima parte desde establecer relación agua/cemento, seguido la densidad de la mezcla de los agregados, el porcentaje óptimo de vacíos y la cantidad de pasta. Finalmente, en determinar la cantidad y dosificación de los componentes. Las ecuaciones utilizadas por el método se detallan a continuación.

$$DRM = \frac{DRAxPOA + DRRxPOR}{100}$$

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

$$C = \frac{CP}{\frac{w}{c} + \frac{1}{\rho}}$$

$$W = \frac{w}{c} x C$$

$$A = \frac{(1000 - CP)xDRAxPOA}{100}$$

$$R = \frac{(1000 - CP)xDRRxPOR}{100}$$

Donde DRM es la densidad real de la mezcla de agregado fino y agregado grueso en kg/dm³; DRA y DRR la densidad del agregado fino y grueso, respectivamente, en kg/dm³; POA el porcentaje óptimo de arena; POR el porcentaje óptimo de ripio; POV el porcentaje óptimo de vacíos; DOM es la densidad óptima de la mezcla en kg/dm³; CP es la cantidad de la pasta en función del asentamiento de diseño ; w/c es la relación agua/cemento; ρ es la densidad del cemento en kg/dm³; C es la cantidad de cemento en kg por m³; A es la cantidad de agregado fino en kg por m³; y R es la cantidad de agregado grueso en kg por m³.

La relación agua/cemento empleada es de 0.56 en correspondencia con la resistencia a compresión de diseño de 24MPa. Este valor fue extraído de la Tabla 19.

Tabla 19 Resistencia a compresión en base a la relación agua/cemento[41]

Resistencia a compresión a los 28 días 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

El asentamiento de diseño adoptado es de 5 a 10cm, que sería ideal para los elementos estructurales como vigas y columnas. Este rango se tomó de la Tabla 20. La cantidad de pasta se determinó en base al asentamiento de diseño, la ecuación de cálculo se obtiene de la Tabla 21.

Tabla 20 Clasificación de las consistencias según su asentamiento medido en el cono de Abrams[41]

Consistencia	Asentamiento (mm)	Ejemplo de tipo de construcción	Sistema de colocación	Sistema de compactación
Muy seca		Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; hormigón de proyección neumática (lanzado)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20 a 35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi-seca	35 a 50	Pavimentos, fundaciones en hormigón simple o con refuerzo simple	Con máquinas operadas manualmente	Vibración mecánica
Media	50 a 100	Pavimentos, losas, muros, vigas y secciones medianamente reforzadas	Colocación manual	Vibración mecánica
Húmeda	100 a 150	Elementos estructurales esbeltos y secciones bastante reforzadas	Bombeo	Vibración mecánica
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos «in situ»	Bombeo, tubo-embudo, tremie	Normalmente no adecuados para vibrarse

Tabla 21 Cantidad de pasta en función del asentamiento de requerido, CP

Asentamiento (cm)	Cantidad de pasta (%)
0-3	$POV+2\%+0.03xPOV$
3-6	$POV+2\%+0.06xPOV$
6-9	$POV+2\%+0.08xPOV$
9-12	$POV+2\%+0.11xPOV$
12-15	$POV+2\%+0.13xPOV$

Finalmente, se calculó el volumen de las probetas a ensayar por tracción indirecta y penetración de agua. En este volumen se consideró el rendimiento de la mezcla. Además, se realizó la corrección de humedad.

El rendimiento de la mezcla se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$RE = \frac{1000dm^3}{VAW + VAC + VAA + VAR}$$

Donde RE es el rendimiento de la mezcla en %; VAW, VAC, VAA y VAR son los volúmenes aparentes en dm³ correspondientes al agua, cemento, agregado fino y agregado grueso, respectivamente. El volumen real requerido se determinó a partir de la siguiente ecuación:

$$VR = V(1 + (1 - RE))$$

La corrección por humedad permite determinar la cantidad de agua requerida para que los agregados puedan alcanzar la condición saturado superficialmente seco (SSS). Los datos necesarios para el cálculo son: contenido de humedad y capacidad de absorción de los agregados. La cantidad de agua calculada es la suma de las correcciones de cada agregado. Las ecuaciones de cálculo utilizadas son:

$$CHA = (CAA - CHA) \times VR \times A$$

$$CHR = (CAR - CHR) \times VR \times R$$

Donde CHA y CHR son las correcciones del agregado fino y grueso en kg; CAA y CAR la capacidad de absorción del agregado fino y grueso en %; CHA y CHR el contenido de humedad del agregado fino y grueso en %; A y R con las cantidades del agregado fino y grueso en kg por cada m³ de hormigón. Para completar la corrección por humedad se restó las correcciones de cada agregado a la cantidad del volumen requerido.

El agua calculada será la adecuada para garantizar la trabajabilidad del hormigón, ya que la cantidad de la dosificación inicial puede penetrar en los poros y puede verse reducida. De exceder en la adición, se altera la relación agua/cemento y otros resultados no favorables se esperarían en las propiedades del hormigón endurecido.

2.3.3.2. Elaboración de las mezclas de hormigón

Las cantidades de los componentes sólidos del hormigón se pesaron con una precisión de 0.01g, mientras que para los componentes líquidos se utilizaron probetas. Las mezclas se prepararon en una máquina concretera de saco. El orden de los componentes bajo cual se preparó las mezclas es el siguiente:

1. Colocar el 50% del agua, seguido la mitad de ripio y después la mitad de arena.
2. Agregar el cemento y 25% de agua.
3. Completar la cantidad restante de arena y ripio.
4. Colocar el 25% de agua y mezclar durante 3 minutos.
5. Agregar el plastificante y mezclar durante 4 minutos.

Después de la preparación de las mezclas se vació en bandejas metálicas y se movió a un lugar plano y libre de los rayos directos sol. Inmediatamente se midió el asentamiento utilizando el cono de Abrams teniendo en cuenta los requisitos de la NTE INEN 1578.

Los especímenes se elaboraron conforme la NTE INEN 1576. En particular, los moldes se compactaron por vibración mediante un vibrador de motor a gasolina. Específicamente, a los moldes de 100mmx200mm se compactó en dos capas y una inserción por capa; y a los moldes de 150x300mm se lo realizó en 2 capas y 2 inserciones por capa.

Una vez dado el acabado a los especímenes se añadió la identificación y se registró su masa, para después determinar la densidad del hormigón fresco. Los especímenes se almacenaron durante 24 horas antes de desencofrar. El curado del hormigón endurecido se realizó en un tanque de almacenamiento de agua, programado para mantener una temperatura de $22\pm 2^{\circ}\text{C}$ a través de un sistema de calentamiento por termostato y una bomba de circulación de agua sumergible. Tanto el tanque y el sistema de calentamiento fue fabricado por Matest, y cumplen con los requerimientos de la NTE INEN 2528.

Se elaboró tres especímenes de 100mmx200mm para cada edad de ensayo de tracción indirecta por cada porcentaje de sustitución, mientras que para el ensayo de penetración de agua se fabricó tres especímenes de 150x300mm para cada porcentaje de sustitución.

2.3.4. Ensayo de tracción indirecta del hormigón endurecido

El ensayo se realizó en base a la NTE INEN 2648. Para el posicionamiento y alineación de cargas de los especímenes se utilizó un dispositivo constituido por un marco de acero de dos columnas con barras. Además, se usó tiras delgadas de madera de 3mm para colocar entre el espécimen y las barras.

Antes de la determinación de la tracción indirecta de los especímenes se dejó secando durante 24 horas previo al día del ensayo. El procedimiento aplicado es el siguiente:

1. Dibujar las líneas diametrales en cada extremo del espécimen. El dispositivo utilizado para la causa es un canal de acero y una barra vertical para guiar las marcas.
2. Medir el diámetro y longitud del espécimen.
3. Colocar las tiras de carga en el dispositivo de alineación y posicionar el espécimen entre las barras y tiras, revisando que un extremo quede en la marca de la longitud del espécimen.
4. Alinear las líneas diametrales de tal forma que queden verticales y centradas en las tiras.
5. Centrar el dispositivo con el bloque de carga y ejecutar el ensayo, después de ingresar las dimensiones del espécimen en el software de control.

Del ensayo se registró la carga máxima aplicada, indicada por la máquina de ensayo y se calculó la tracción indirecta de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$T = \frac{2P}{\pi x D x L}$$

Donde en P es la carga máxima aplicada en N; D el diámetro del espécimen en mm; y L la longitud del espécimen en mm. El resultado de tracción indirecta es el promedio de los tres valores de tracción indirecta de cada edad ensayo del porcentaje de sustitución respectivo.

2.3.5. Penetración de agua bajo presión del hormigón endurecido

La permeabilidad de los especímenes de hormigón se determinó a través de penetración de agua a presión. El ensayo se realizó en un equipo construido por el Ing. Santiago Rodríguez en su estudio de hormigones impermeables, según el origen local de los materiales y la adición de aditivo impermeabilizantes. En complemento del equipo, se utilizó una bomba manual para aplicar la presión requerida del ensayo.

Los especímenes usados son cilindros de 150mmx300mm. Para cada porcentaje de sustitución se evaluó tres especímenes. Estos fueron curados en agua durante 28 días. Después del curado se mantuvo 7 días secando para evidenciar con facilidad la penetración de agua. Concluido el tiempo mencionado, el ensayo se realizó en base a la norma española UNE-EN 12390-8. El procedimiento aplicado es el siguiente.

1. Cepillar la superficie en el extremo no acabado del espécimen.
2. Colocar el espécimen con el extremo cepillado sobre el anillo de estanquidad del equipo.
3. Ajustar lo suficiente para que no exista fugas de presión en el sistema.
4. Aplicar agua presión durante 72 ± 2 horas de 500 ± 50 kPa (72.5 ± 7.25 psi). El agua utilizada es la del sistema de agua potable
5. Retirar el espécimen de ensayo, limpiar el extremo que estuvo en contacto con agua y ensayar a tracción indirecta tan pronto como sea posible.
6. Marcar la penetración de agua de una de las mitades del espécimen.
7. Medir la profundidad máxima de penetración y redondear al mm más próximo.

La profundidad de penetración de agua es el promedio de las profundidades medidas en los especímenes de cada porcentaje de sustitución. Por otro lado, el agua utilizada es la del sistema de agua potable. Las lecturas del manómetro se revisaron periódicamente y de observar una variación en el rango, se volvió aplicar agua a presión para que entre dentro del rango requerido.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Los resultados de los ensayos que comprenden la caracterización física, tiempo de fraguado, resistencia a la tracción indirecta y la penetración de agua bajo presión se presentan en esta sección. Además, se incluye las proporciones de las mezclas utilizadas para la elaboración de los hormigones con fines estructurales.

En la caracterización física se determinó que la densidad de la zeolita y el cemento tipo GU es de 2.41 y 2.89 g/cm³, respectivamente. La finura de la zeolita medida es de 563 m²/kg y en el cemento de 476 m²/kg. El tamaño medio de la partícula después del análisis granulométrico por hidrómetro de la zeolita es de 5µm. Entre estas, las características de la finura y tamaño medio de la partícula de la zeolita cumplen una función importante en la demanda de agua, por ende, en la trabajabilidad de las pastas y el hormigón.

El tiempo de fraguado inicial obtenido en la pasta con cemento tipo GU tiene lugar a los 53 minutos y el final a los 280 minutos. En las pastas con contenido de zeolita el tiempo de fraguado inicial ocurrió entre los 107 y 127 minutos, y el final entre los 305 y 390 minutos. Demostrando que, al usar zeolita como sustituto del cemento, aumenta la demanda de agua para que la pasta entre en consistencia normal y por tanto un mayor tiempo de fraguado.

En cuanto a la resistencia a la tracción indirecta, los hormigones con zeolita a la edad de 28 días llegaron a superar o quedaron muy cerca, en comparación con el hormigón de control, dependiendo de la cantidad de zeolita usada como sustituto. El hormigón que tiene el 20% de sustitución de cemento por zeolita prestó adecuadas condiciones bajo la penetración de agua a presión.

3.1.1. Densidad de la zeolita y cemento tipo GU

La densidad de la zeolita y el cemento tipo GU, se muestra en la Tabla 22 y la Tabla 23, respectivamente, después de mantener la variación de temperatura en 0.2°C entre lecturas del volumen, emplear el frasco de Le Chatelier y utilizar como reactivo la gasolina.

Tabla 22 Densidad de la zeolita natural comercial

Denominación	Zeolita natural comercial		
	ZZ		
	1	2	3
Número de determinación			
Ma: Masa del frasco y gasolina, (g)	319.61	319.58	319.72
Temperatura inicial en baño de agua (°C)	24.40	24.40	24.4
Vo: Volumen inicial del frasco (cm ³)	0.30	0.20	0.5
Mt: Masa del frasco, gasolina y muestra(g)	373.64	373.68	373.74
Temperatura final en baño de agua(°C)	24.40	24.40	24.4
Vf: Volumen final del frasco (cm ³)	22.80	22.70	22.90
Mc: Masa de la muestra(g)	54.03	54.10	54.02
V: Volumen de gasolina desplazada(cm ³)	22.50	22.50	22.40
ρ : Densidad (g/cm ³)	2.40	2.40	2.41
ρ : Densidad promedio (g/cm ³)		2.41	
Gravedad específica		2.41	

Tabla 23 Densidad del cemento tipo GU

Denominación	Cemento Tipo GU		
	CEM		
	1	2	3
Número de determinación			
Ma: Masa del frasco y gasolina, (g)	308.88	301.29	300.69
Temperatura inicial en baño de agua (°C)	24.90	24.80	24.70
Vo: Volumen inicial del frasco (cm ³)	0.10	0.30	0.00
Mt: Masa del frasco, gasolina y muestra(g)	372.21	364.58	364.09
Temperatura final en baño de agua(°C)	24.80	24.80	24.70
Vf: Volumen final del frasco (cm ³)	22.00	22.20	21.90
Mc: Masa de la muestra(g)	63.33	63.29	63.40
V: Volumen de gasolina desplazada(cm ³)	21.90	21.90	21.90
ρ : Densidad (g/cm ³)	2.89	2.89	2.89
ρ : Densidad promedio (g/cm ³)		2.89	
Gravedad específica		2.89	

La densidad de la zeolita determinada es de 2.41g/cm³, mientras que la del cemento es de 2.89g/cm³. Estos valores son el promedio de tres determinaciones. Los resultados de cada determinación no varían en más de 0.03g/cm³, cumpliendo así con la precisión de la NTE INEN 156 entre un mismo operador. El valor de la densidad del cemento es utilizado posteriormente en el diseño de las mezclas de hormigón.

La baja densidad de la zeolita se evidencia desde el momento del ensayo, donde al colocar la misma masa requerida para una muestra de cemento en el frasco de Le Chatelier, la graduación del cuello es insuficiente para medir su volumen. Por esta razón, la muestra usada en la determinación es de 55g.

Según los resultados obtenidos, la densidad del cemento es 1.2 veces mayor que la zeolita. Por tanto, el volumen de la pasta de cemento será menor a la pasta que sustituya el cemento por zeolita. Además, la baja densidad de la zeolita provocará una reducción en la densidad del hormigón, considerado la posibilidad de aligeramiento de la masa.

En la literatura, la densidad es expresada en gravedad específica. En la Tabla 24 se muestran las gravedades específicas de zeolitas naturales y cementos usados en otras investigaciones. Además, se incluye los valores de la actual investigación.

Tabla 24 Comparación de gravedades específicas de zeolitas y cementos

Material	Mineral /Tipo	Gravedad específica	Investigación
Zeolitas	Clinoptilolita	2.41	
		2.20	Ahmadi y Shekarchi[6]
		2.35	Fernández[13]
		2.11	Güngör y Özen[80]
	Mordenita	2.12	Güngör y Özen[80]
	Analcima	2.27	Güngör y Özen[80]
Cementos	Tipo GU	2.89	
		3.07	Salcedo[15]
	Tipo I	3.15	Ramezianpour et al.[9]
	Tipo II	3.14	Ahmadi y Shekarchi[6]
		3.10	Najimi et al. [7]
	IP	2.86	Fernández[13]

A partir de la Tabla 24, queda claro que la gravedad específica de un cemento disminuye con la presencia de adiciones minerales. En esta se puede ver que la gravedad específica del cemento tipo GU es menor, puesto que además del clínker y yeso de un cemento portland tipo I, contiene puzolanas naturales.

Por otro lado, la gravedad específica de la zeolita evidentemente demuestra una variación entre minerales de zeolita. Además, una mayor densidad puede significar la coexistencia de minerales de zeolita e impurezas como feldespatos. Fernández [13] sostiene que la muestra zeolita denominada ZZ pueden estar coexistiendo dos minerales dada las aglomeraciones pequeñas. Esta muestra es la misma utilizada durante este estudio, ya que pertenece al producto comercial, Mineplus.

En definitiva, los minerales zeolita están presentes en todo el mundo, la comunidad científica se enfrenta a la variación que hay entre una fuente y otra. La pureza del material es determinante y encontrar un grado de pureza alto, implica resultados favorables en la resistencia y durabilidad del hormigón.

3.1.2. Finura

Antes de conocer los resultados de la finura en términos de superficie específica, se muestran en la Tabla 25 los resultados de la calibración del aparato y la masa calculada de la muestra requerida para los ensayos de permeabilidad. La densidad adoptada es de 3.15g/cm^3 , valor especificado en la normativa cuando se utilice cementos portland, como es el caso del cemento portland SRM 114q. Este material se lo denominó muestra normalizada o cemento normalizado.

El volumen aparente de la camada compactada determinada con el uso del cemento normalizado es de 1.860 cm^3 , valor esencial para la preparación de las capas de cemento normalizado, cemento tipo GU y zeolita. Este volumen es el promedio de dos determinaciones. La variación entre una determinación y otra es de 0.003 cm^3 , por tanto, los valores coinciden dentro del rango de $\pm 0.005\text{ cm}^3$ estipulado en la norma NTE INEN 196. La temperatura registrada del ensayo de calibración es de 18°C , valor que definió la densidad del mercurio y se tiene en cuenta al momento de elegir la ecuación para la determinación de la superficie específica.

Tabla 25 Volumen aparente de la camada compactada y masa de la muestra

Tipo	Cemento portland	
Marca de cemento	NIST SRM 114q	
Volumen aparente de la camada compactada		
Número de determinación	1	2
Temperatura al momento del ensayo (°C)	18	18
WA: Gramos de mercurio requeridos para llenar la celda sin la muestra(g)	85.340	85.309
WB: Gramos de mercurio requerido para llenar la porción de la celda no ocupada por la camada en la celda (g)	60.117	60.122
D: Densidad del mercurio a la temperatura del ensayo (g/cm ³)	13.550	13.550
V: Volumen aparente del cemento (cm ³)	1.861	1.859
V: Promedio del volumen aparente del cemento (cm ³)	1.860	
Masa de la muestra		
ρ : Densidad de la muestra de ensayo (g/cm ³)	3.150	
V: Volumen aparente del cemento (cm ³)	1.860	
ε : porosidad deseada de la camada de la muestra	0.500	
W: gramos de muestra requerida (g)	2.930	

La masa del cemento normalizado es de 2.930g. Los valores utilizados en el cálculo de la masa se muestran en la Tabla 25. Esta cantidad de muestra permite la compactación de las capas de cemento portland, como es caso del cemento normalizado.

Los tiempos registrados durante la caída del líquido del manómetro del cemento normalizado se presentan en la Tabla 26. El promedio de las tres capas es de 78.33 segundos y este valor se convierte en el intervalo de tiempo de la muestra normalizada para ser usado en el cálculo de las superficies específicas de la zeolita y el cemento tipo GU.

Tabla 26 Tiempo de la muestra normalizada (Cemento SRM 114q)

No. Camada	Temperatura de ensayo (°C)	Ts: Intervalo de tiempo medido (s)		
		Por flujo	Por camada	Promedio
1	18	77.75		
	18	77.75	77.38	
	18	76.65		
2	18	78.97		
	18	79.28	79.20	78.33
	18	79.34		
3	18	78.37		
	18	78.00	78.41	
	18	78.85		

La norma determina utilizar la misma cantidad de masa de cemento normalizado, que es de 2.930g, cuando se requiera determinar la superficie específica de un cemento. El cemento tipo GU ingresa dentro de las excepciones, puesto que la misma masa del cemento normalizado evita que el émbolo entre en contacto con el borde superior de la celda. Por ende, se utilizó una porosidad de 0.53 y la masa calculada para el ensayo de permeabilidad es de 2.754g. El cálculo de esta masa se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27 Masa para muestras de cemento tipo GU

ρ : Densidad de la muestra de ensayo(g/cm ³)	3.150
V: Volumen aparente del cemento (cm ³)	1.860
ε : porosidad deseada de la camada de la muestra	0.530
W: gramos de muestra requerida (g)	2.754

3.1.2.1. Superficie específica del cemento tipo GU

En la Tabla 28 se muestra la superficie específica de dos camadas de cemento tipo GU. Los valores están redondeados a la unidad. Además, se incluye la superficie específica del cemento portland SRM 114q y el tiempo de la muestra normalizada, necesarios para la ecuación de cálculo.

Tabla 28 Superficie específica del cemento tipo GU

Tipo de cemento Marca	Tipo GU Holcim					
Ss: Superficie específica muestra normalizada (m ² /kg)	381.8			381.8		
Ts: Tiempo de la muestra normalizada (s)	78.33			78.33		
No. de camada	1			2		
Temperatura al momento del ensayo (°C)	19	19	19	19	19	19
T: Tiempo de la muestra de ensayo (s)	122.38	122.37	121.44	121.41	122.02	121.81
S: Superficie específica de la muestra de ensayo(m ² /kg)	477.23	477.21	475.40	475.34	476.53	476.12
S: Promedio de la superficie específica (m ² /kg)	476.61 ≈477			476.00 ≈476		

La superficie específica del cemento tipo GU determinada es 477m²/kg, que corresponde al promedio de las dos camadas y redondeada a la unidad. Al momento, este valor ya refleja una mayor superficie específica que el cemento portland normalizado.

3.1.2.2. Superficie específica de la zeolita natural

La determinación de la superficie específica de zeolita es más extensa, ya que la ecuación de cálculo requiere de la determinación de la constante b. Valor que depende de la porosidad asumida para producir las camadas de la muestra. Por tanto, primero se muestra en la Tabla 29 las masas de las camadas para 4 diferentes porosidades en un rango de 0.02, menor al especificado en la normativa de 0.06. Al igual, la tabla muestra los intervalos de tiempo medidos para cada porosidad de la camada.

Tabla 29 Valores para la determinación de la constante b de la zeolita

ρ : Densidad de la muestra de ensayo (g/cm ³)		2.406			
V: Volumen de la camada (cm ³)		1.860			
Porosidad ε	Masa (g)	Tiempo medido (s)			$\sqrt{\varepsilon^3 T}$
		T1	T2	T3	
0.54	2.059	45.92	46.18	46.27	2.69
0.52	2.148	59.09	59.19	59.34	2.89
0.50	2.238	74.24	74.32	74.41	3.05
0.48	2.327	94.04	94.29	94.35	3.23

A partir de estos se graficó la correlación entre la porosidad ε y $\sqrt{\varepsilon^3 T}$ como se muestra en la Figura. 16. El valor de la constante b de la zeolita determinada por la hoja de cálculo es de 0.8461 con un coeficiente de correlación de 0.9992, superando al coeficiente de 0.9970 especificado en la norma.

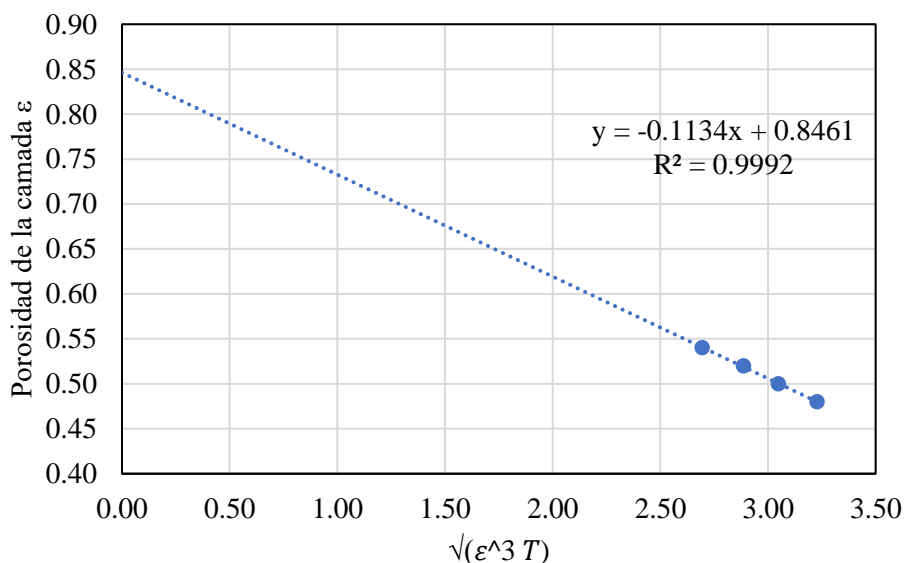


Figura. 16 Valor de la constante b, y correlación entre la porosidad ε y $\sqrt{\varepsilon^3 T}$

La Tabla 30 muestra la superficie específica de la zeolita, como también los valores de la muestra normalizada necesarios para la determinación. Los tiempos de la muestra de

ensayo corresponden a la porosidad en la cual la camada de zeolita se compactó mejor durante la determinación del valor de b.

Tabla 30 Superficie específica de la zeolita natural

Muestra normalizada:	Cemento portland SRM 114q		
Marca	NIST		
ρ : Densidad de la muestra de normalizada (g/cm ³)	3.15		
Ss: Superficie específica muestra normalizada (m ² /kg)	381.8		
Ts: Tiempo de la muestra normalizada (s)	78.33		
bs: Valor de la constante b de la muestra normalizada	0.90		
ε : Porosidad de la camada preparada en la calibración	0.50		
Muestra de ensayo:	Zeolita ZZ		
Marca	Zeonatec		
ρ : Densidad de la muestra (g/cm ³)	2.406		
b: Valor de la constante b	0.8461		
ε : Porosidad de la camada preparada	0.500		
Temperatura al momento del ensayo (°C)	19	19	19
T: Tiempo de la muestra de ensayo (s)	74.24	74.32	74.41
S: Superficie específica de la muestra (m ² /kg)	562.48	562.78	563.12
S: Promedio de la superficie específica (m ² /kg)	562.79≈563		

3.1.2.3. Discusión de resultados de superficie específica

Las superficies específicas determinadas del cemento tipo GU y de la zeolita natural son 477 y 563 m²/kg, respectivamente. Propiedad física que depende del tamaño de las partículas, el tamaño y cantidad de poros que hay entre estas. Un material con una elevada superficie específica tiene partículas más pequeñas. Así mismo, un material más fino tiene un mayor nivel de molienda.

La Figura. 17 representa gráficamente las superficies específicas de los materiales estudiados. La mayor superficie específica se presenta en la zeolita natural. Este valor es 1.2 veces mayor que el cemento tipo GU. Por tanto, este material tendrá mayor área superficial para ser recubierto por un líquido. Además, se espera una mayor demanda de agua.

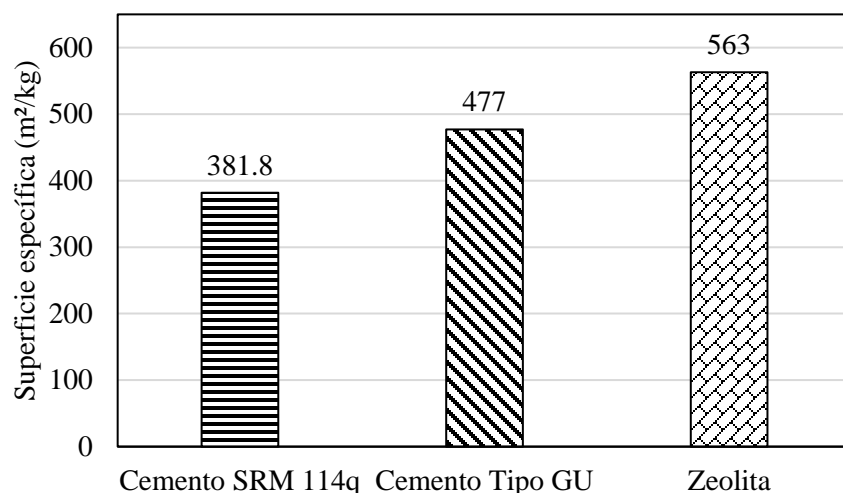


Figura. 17 Superficie específica de los materiales estudiados

De los resultados, las partículas del cemento tipo GU tienen una menor superficie específica que la zeolita, mucho menos el cemento portland SRM 114q. Así mismo, las zeolitas al tener una estructura interna porosa en forma de canales y jaulas, mayor aún será la superficie específica interna. De la misma manera, mientras más fino es el material menor será la concentración de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, por tanto, mayor reacción puzolánica[81].

3.1.3. Tamaño de la partícula

El análisis granulométrico realizado a la zeolita natural mediante el empleo de un hidrómetro 152-H se muestra en la Tabla 31. Este incluye las lecturas del hidrómetro R'; correcciones por agente dispersante, temperatura y menisco. Además, los cálculos del diámetro de partículas y el porcentaje más fino mediante los cuales se construye la curva granulométrica del material.

Las normativas aplicadas son la INV E-123-13, ASTM D422 y AAHSTO T88. Los valores obtenidos de profundidad efectiva del hidrómetro, L, se extrae de la INVE E-123-13 en base a la temperatura de ensayo. El empleo de la AAHSTO T88 permite obtener la constante a para la gravedad específica de la zeolita, que es 2.41. Los valores calculados de la constante K que dependen de la temperatura al momento de las lecturas del hidrómetro y la gravedad específica de la zeolita se muestran en la Tabla 32, ya que las tablas de las normativas no incluyen valores para una gravedad específica menor a 2.45.

Tabla 31 Análisis granulométrico de la zeolita natural comercial, ZZ, por hidrómetro

Hidrómetro	152H	Cilindro	1000ml	Recipiente	S/N	#
Defloculante	Tripolifosfato de sodio	Cm (g/l)	1	Peso recipiente	183.53	g
Fecha preparada	21/4/2021	a	1.0632	Peso recipiente + suelo seco	246.51	g
Solución	125 ml	Gs (g/cm³)	2.41	Peso suelo seco	62.98	g

Fecha	Hora	T (min)	R' (g/l)	Temp (°C)	τ' (g/l)	Ct (mm)	Cd (mm)	R (g/l)	R- Cd+Ct	L (cm)	n (Poises)	K	D (mm)	Pasa (%)
28/4/2021	9:47	2	41	19.0	8.0	-0.30	-8.70	42.00	50.40	9.4	0.0103	0.0150	0.0324	85.08
28/4/2021	9:50	5	35	19.0	8.0	-0.30	-8.70	36.00	44.40	10.4	0.0102	0.0150	0.0216	74.95
28/4/2021	10:00	15	30	19.5	8.0	-0.15	-8.85	31.00	39.70	11.2	0.0096	0.0149	0.0128	67.02
28/4/2021	10:15	30	26	22.0	8.0	0.60	-9.60	27.00	37.20	11.9	0.0096	0.0144	0.0091	62.80
28/4/2021	10:45	60	21	22.0	8.0	0.60	-9.60	22.00	32.20	12.7	0.0096	0.0144	0.0066	54.36
28/4/2021	11:45	120	18	22.0	8.0	0.60	-9.60	19.00	29.20	13.2	0.0093	0.0144	0.0048	49.29
28/4/2021	13:55	250	16	23.0	8.0	0.90	-9.90	17.00	27.80	13.5	0.0100	0.0142	0.0033	46.93
29/4/2021	9:45	1440	12	20.0	8.0	0.00	-9.00	13.00	22.00	14.2	0.0103	0.0148	0.0015	37.14

T:	Tiempo (min)	R	Lectura Hidrómetro Corregida por menisco (g/litro)
R'	Lectura Hidrómetro (g/litro)	L	Profundidad Efectiva (cm)
Temp	Temperatura (°C)	n	Coefficiente Viscosidad del agua (Poises)
Cm	Corrección por Menisco (g/litro)	K	Constante K
τ'	Lectura del hidrómetro, en agua con defloculante únicamente	D	Diámetro Máximo (mm)
Ct	Corrección por temperatura (mm)	a	Constante a
Cd	Corrección por defloculante y punto cero(mm)	Pasa	Porcentaje más fino

Tabla 32 Constante K en función de la densidad de la zeolita y temperatura de ensayo

Temperatura (°C)	Coficiente de viscosidad del agua μ (Poises)	Aceleración gravitacional g (cm/s ²)	Densidad de la zeolita ρ_s (g/cm ³)	Densidad del agua destilada, a la temperatura T ρ_w (g/cm ³)	Constante K
19.0	0.01028	980.70	2.41	1.00	0.01496
19.0	0.01028	980.70	2.41	1.00	0.01496
19.5	0.01016	980.70	2.41	1.00	0.01487
22.0	0.00955	980.70	2.41	1.00	0.01442
22.0	0.00955	980.70	2.41	1.00	0.01442
22.0	0.00955	980.70	2.41	1.00	0.01442
23.0	0.00933	980.70	2.41	1.00	0.01425
20.0	0.01003	980.70	2.41	1.00	0.01477
19.0	0.01028	980.70	2.41	1.00	0.01496

Para el análisis del tamaño de la partícula se parte de la curva granulométrica mostrada en la Figura. 9 resultado del ensayo por hidrómetro. El diámetro de las partículas que corresponde al 50% de las partículas D_{50} se obtiene de la lectura de la curva.

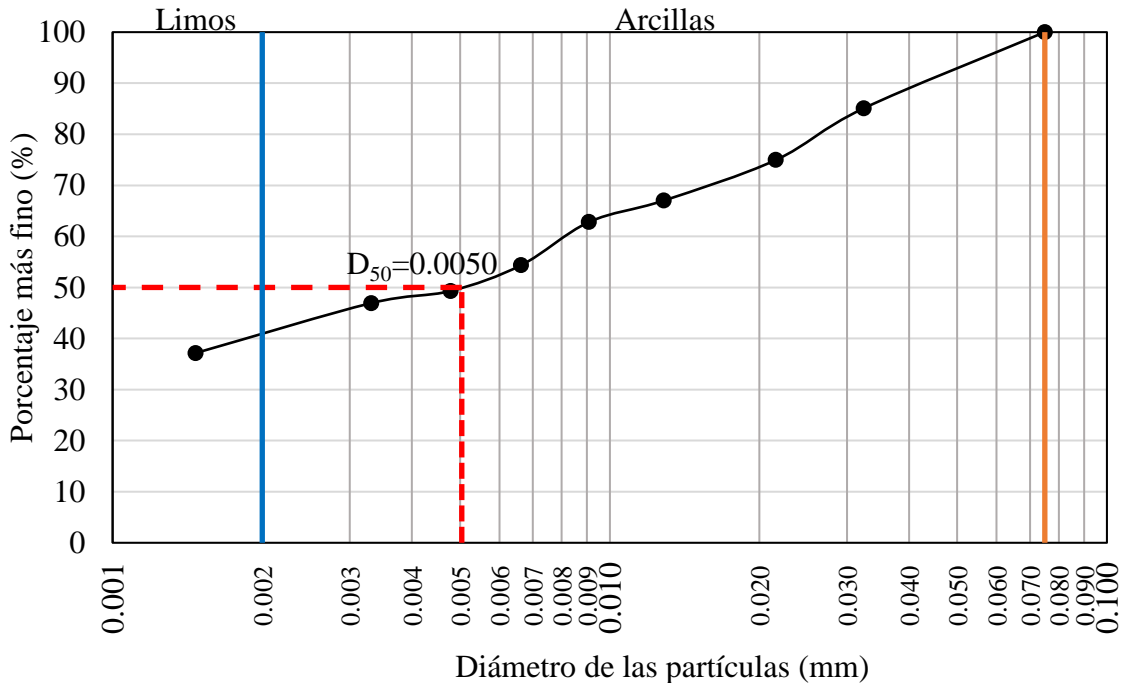


Figura. 18 Curva granulométrica de la zeolita natural comercial Z

3.1.3.1. Discusión del tamaño de la partícula de la zeolita

El diámetro del tamaño medio de las partículas, D_{50} , de la zeolita natural es de $5\mu\text{m}$ (0.0050mm). De los resultados, el 74% de las partículas es menor a $20\mu\text{m}$ y el 40% es menor $2\mu\text{m}$. Además, el 37% de las partículas es menor $1.5\mu\text{m}$. Teniendo en cuenta el tamaño de partículas de limos y arcillas de la AAHSTO T88, este material tiene 60% de limos y 40% de arcillas, ya que el tamaño de las partículas de limos está entre $75\mu\text{m}$ y $2\mu\text{m}$, mientras que en las arcillas son menores a $2\mu\text{m}$.

No obstante, la estructura de los minerales de zeolitas y arcillas son diferentes, principalmente la primera tiene un armazón estructurado tridimensional en contraste con las arcillas que tienen una estructura constituida por láminas. Así mismo, las arcillas requieren de un pretratamiento para ser usadas como puzolanas naturales[82].

Con respecto al tamaño de partículas del cemento tipo GU, en la caracterización mediante SEM de Salcedo[15], el tamaño de medio de la partícula es de $3.97\mu\text{m}$. Por tanto, el tamaño de las partículas de la zeolita es ligeramente mayor. En definitiva, la zeolita natural es un material fino.

3.1.4. Tiempo de fraguado

3.1.4.1. Consistencia normal de las pastas

Como fue descrito en el capítulo anterior, para obtener el tiempo de fraguado de las pastas de cemento y cemento-zeolita, se requiere conocer la consistencia normal de las mismas. En la Tabla 33 se presenta los resultados de consistencia normal para los 4 porcentajes de sustitución cuando la varilla penetró $10\pm 1\text{mm}$.

Tabla 33 Consistencia normal de las pastas de cemento y cemento-zeolita

Tipo de mezclado ^a	Porcentaje de sustitución	Masa cemento (g)	Masa zeolita (g)	Masa agua (g)	Penetración (mm) ^b	Consistencia normal (%)
Mecánico	0	650.00	0	200	9	30.8
Mecánico	10	585.00	65.00	205	9	31.5
Mecánico	15	552.50	97.50	208	9	32.0
Mecánico	20	520.00	130.00	211	10	32.5

^a Taladro eléctrico 650 Watt, ^b Penetración $10\text{mm} \pm 1$, NTE INEN 157

3.1.4.2. Tiempo de fraguado de la pasta de cemento tipo GU

Tabla 34 Tiempos de fraguado de la pasta de cemento

	Cemento (g)	650		
	Zeolita(g)	0		
	Agua (g)	200		
	Consistencia (%)	30.8		
Fraguado inicial			Fraguado final	
Penetración (mm)		Tiempo (min)	Tiempo (min)	
Última penetración >25mm	25.7	52.3	Primera caída de la aguja sin dejar marca en la superficie de la pasta	280.3
Primera penetración <25mm	8.7	64.3		
Fraguado inicial (min)	52.8≈53		Fraguado final (min)	280.3≈280

Las lecturas de penetración medidas en cada intervalo de tiempo por el equipo Vicatronic se encuentran en el anexo A1.

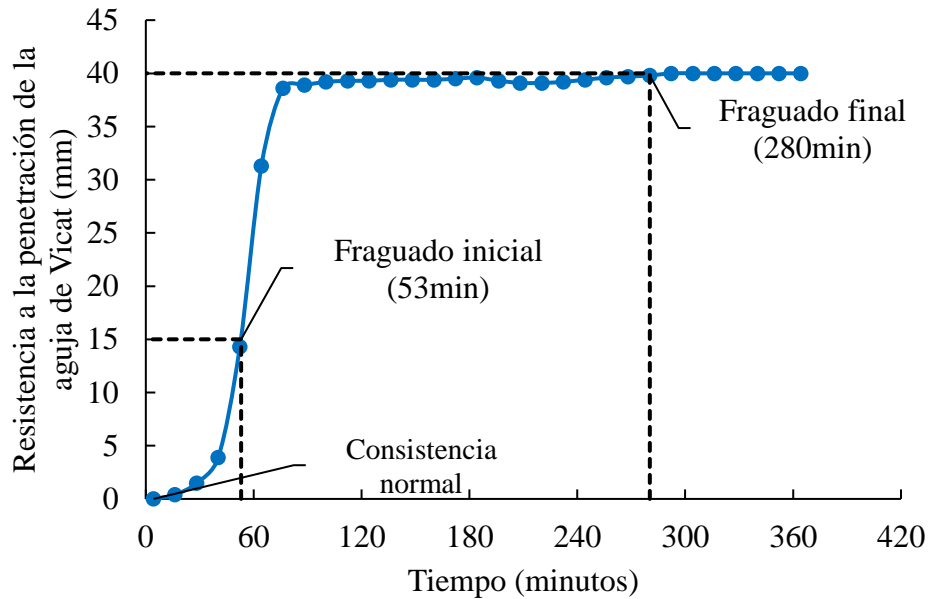


Figura. 19 Proceso de fraguado de la pasta de cemento

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

Tabla 35 Tiempos de fraguado de la pasta con 10% de sustitución de cemento por zeolita

	Cemento (g)	585		
	Zeolita(g)	65		
	Agua (g)	205		
	Consistencia (%)	31.5		
Fraguado inicial		Fraguado final		
Penetración (mm)	Tiempo (min)			Tiempo (min)
Última penetración >25mm	29.1	100.2	Primera caída de la aguja sin dejar marca en la superficie de la pasta	304.2
Primera penetración <25mm	21.8	112.2		
Fraguado inicial (min)	106.9	≈107	Fraguado final (min)	304.2
				≈305

Las lecturas de penetración medidas en cada intervalo de tiempo por el equipo Vicatronic se encuentran en el anexo A2.

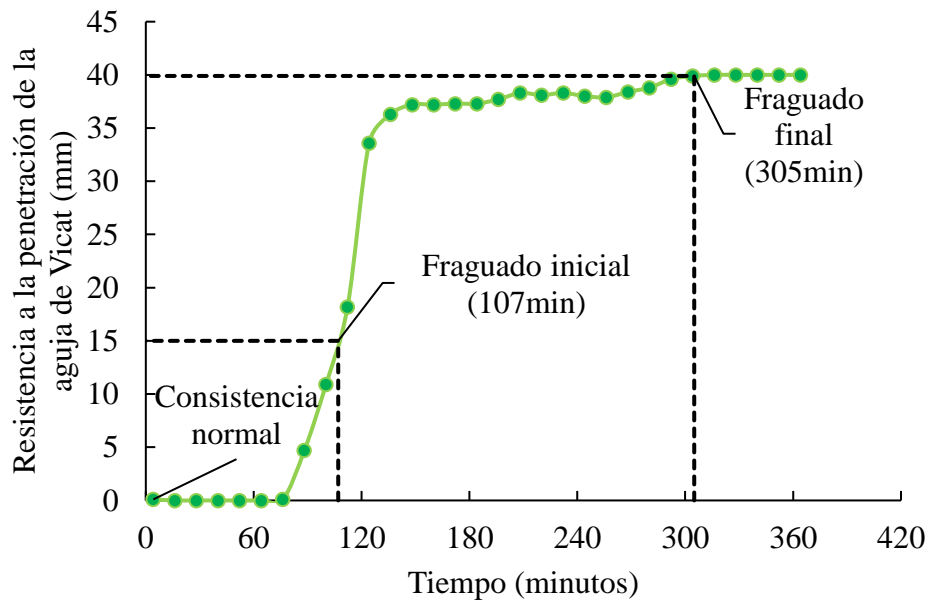


Figura. 20 Proceso de fraguado de la pasta con 10% de sustitución de cemento por zeolita

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

Tabla 36 Tiempos de fraguado de pasta con 15% de sustitución de cemento por zeolita

	Cemento (g)	552.5		
	Zeolita(g)	97.5		
	Agua (g)	208		
	Consistencia (%)	32.0		
Fraguado inicial			Fraguado final	
Penetración (mm)		Tiempo (min)		Tiempo (min)
Última penetración >25mm	33.3	112.52	Primera caída de la aguja sin dejar marca en la superficie de la pasta	340.52
Primera penetración <25mm	12.6	124.52		
Fraguado inicial (min)		117.3≈117	Fraguado final (min)	340.52≈340

Las lecturas de penetración medidas en cada intervalo de tiempo por el equipo Vicatronic se encuentran en el anexo A3.

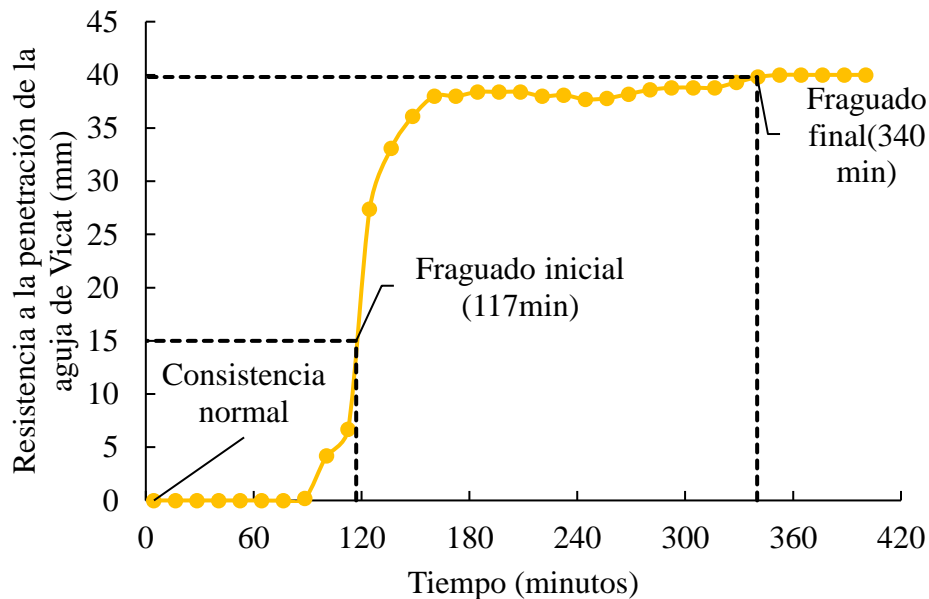


Figura. 21 Proceso de fraguado de la pasta con 15% de sustitución de cemento por zeolita

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

Tabla 37 Tiempos de fraguado de pasta con 20% de sustitución de cemento por zeolita

	Cemento (g)	520		
	Zeolita(g)	130		
	Agua (g)	211		
	Consistencia (%)	32.5		
Fraguado inicial			Fraguado final	
	Penetración (mm)	Tiempo (min)		Tiempo (min)
Última penetración >25mm	37.8	115.56	Primera caída de la aguja sin dejar marca en la superficie de la pasta	391.56
Primera penetración <25mm	24.4	127.56		
Fraguado inicial (min)		127.0	Fraguado final (min)	391.56

Las lecturas de penetración medidas en cada intervalo de tiempo por el equipo Vicatronic se encuentran en el anexo A4.

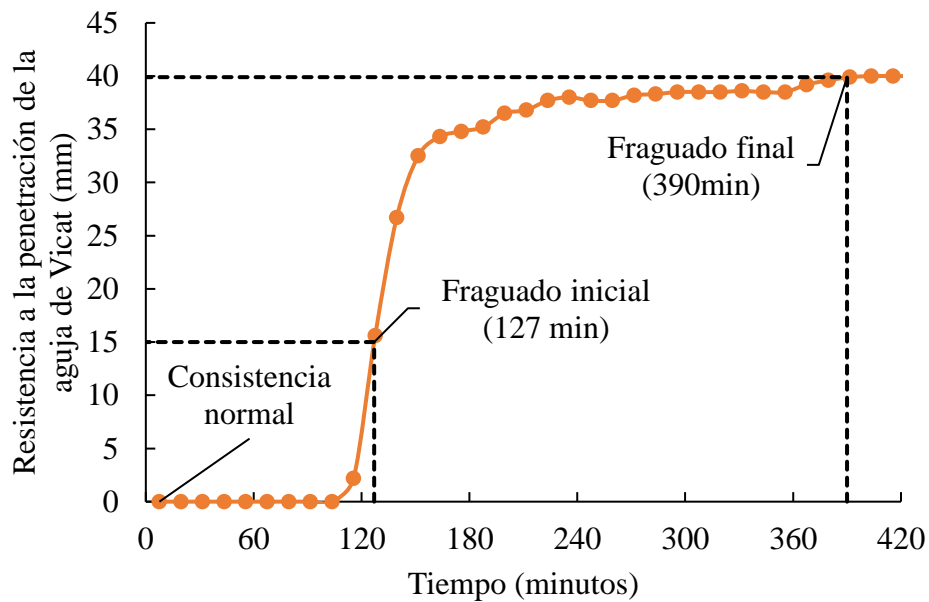


Figura. 22 Proceso de fraguado de la pasta con 20% de sustitución de cemento por zeolita

3.1.4.6. Discusión de resultados de consistencia y tiempo fraguado

La Tabla 38 resume los resultados de consistencia y tiempo de fraguado de las pastas elaboradas.

Tabla 38 Tiempo de fraguado de las pastas de cemento y cemento-zeolita

ID. de la pasta	Porcentaje de sustitución	Consistencia (%)	Tiempo de fraguado inicial (min)	Tiempo de fraguado final (min)
CEM	0	30.8	53	280
Z10	10	31.5	107	305
Z15	15	32.0	117	340
Z20	20	32.5	127	390

Las pastas elaboradas demuestran que al utilizar zeolita como sustituto parcial del cemento mayor es la demanda de agua para lograr la consistencia normal en todos los porcentajes de sustitución. En particular, la pasta Z20 requiere 5.5% de agua adicional a la utilizada en la CEM, que solo contiene cemento tipo GU. Pastas como la Z10 y Z15 requieren del 2.5% y 4%, respectivamente, de agua adicional. Estos valores se traducen a consistencia. Las pastas con una sustitución parcial del 10 al 20% del cemento por zeolita, la consistencia varía entre 31.5% y 32.5%. En cambio, la pasta que solo tiene cemento tiene una consistencia de 30.8%.

La mayor demanda de agua en las pastas que contienen zeolita se produce por su mayor área superficial por unidad de masa en contraste con el cemento que tiene una menor área. Esto se fundamenta en la superficie específica determinada anteriormente de 477m²/kg y 563m²/kg para el cemento tipo GU y la zeolita. De igual manera, a la estructura interna microporosa de la zeolita formado por canales, evidentemente mayor será la demanda de agua en las pastas. En definitiva, una mayor cantidad de agua significa el incremento de la relación agua/cemento y la reducción de la resistencia.

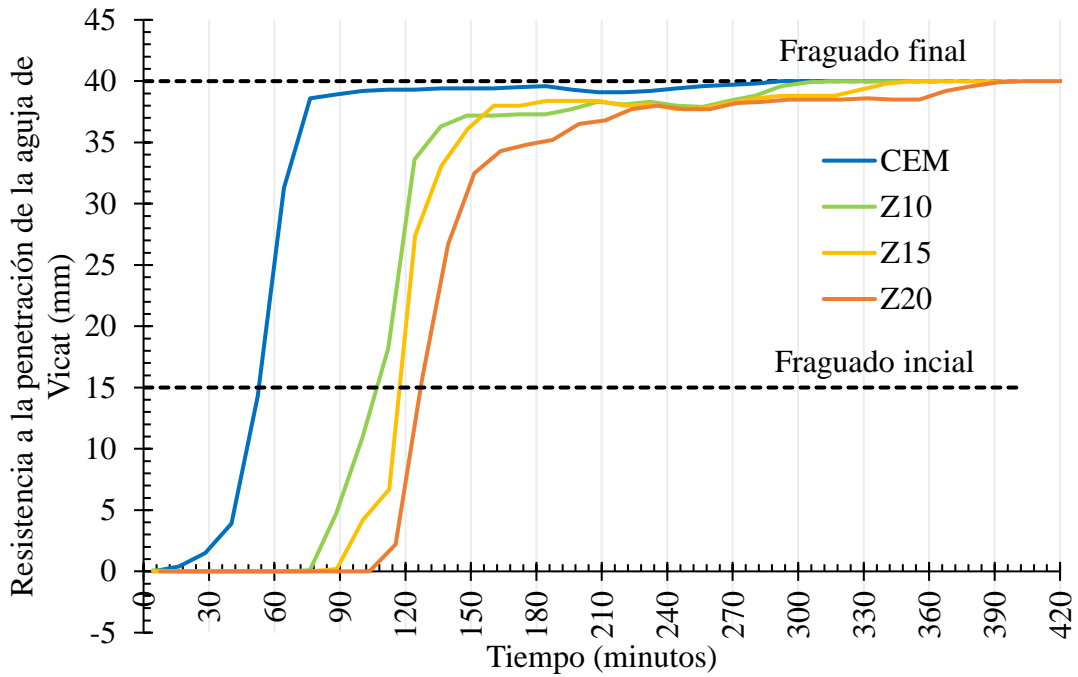


Figura. 23 Proceso de fraguado de las pastas

En la transición de consistencia al fraguado inicial de las pastas, tanto de cemento y cemento-zeolita, la plasticidad es constante y no sufre cambios repentinos. Sin embargo, minutos antes y después del fraguado inicial, el endurecimiento es rápido hasta llegar a los picos cercanos al fraguado final. Esto se demuestra en la Figura. 23.

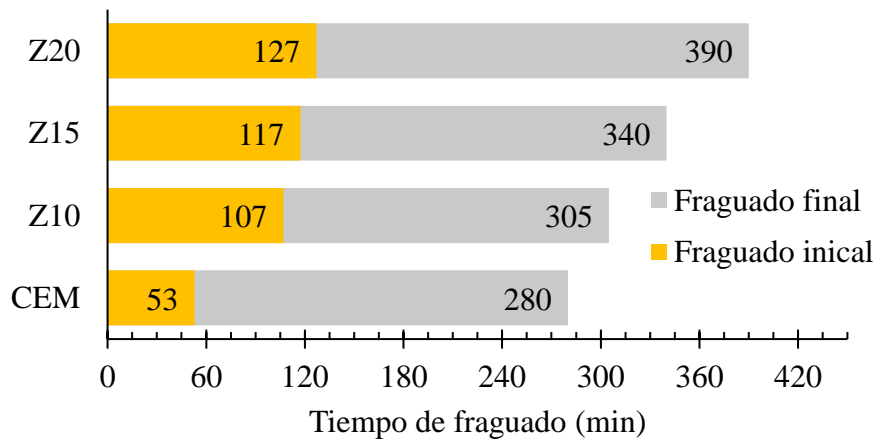


Figura. 24 Tiempo de fraguado de las pastas

En general, una mayor demanda de agua aumenta la consistencia normal e incrementa el tiempo de fraguado de las pastas, tanto el inicial como el final. El tiempo de fraguado de las pastas elaboradas se muestran en la Figura. 24. La pasta CEM es la que en un menor tiempo pierde la plasticidad, a los 53min. En cambio, en las pastas con zeolita se produce mucho más tarde, entre los 107min y 127min. Este comportamiento permite tener un tiempo suficiente para que la pasta pueda ser transportada, colocada, moldeada y acabada.

El tiempo de fraguado inicial presentó una diferencia significativa entre la pasta de cemento tipo GU y las pastas que contienen zeolita como sustituto del cemento. Esto se convierte en un bajo calor de hidratación y reducción en los cambios de volumen para las pastas con zeolita.

En cuanto al fraguado final, las pastas con zeolita llegan a endurecerse entre los 305 min y 390min. La pasta Z20 es la que presenta un mayor tiempo de endurecimiento desde el momento que el cemento y la zeolita entraron en contacto con el agua, a los 390min. En el caso de la pasta CEM se produce a los 280 min. Por lo que el endurecimiento de las pastas que contienen zeolita se produce mucho más tarde y por ende las reacciones son lentas.

Por otra parte, el tiempo de fraguado de las pastas estudiadas cumplen con los requisitos físicos normalizados de la NTE INEN 2380, donde el fraguado inicial no debe ser menor a 45 minutos, mientras que el fraguado final no debe ser mayor a los 420 minutos.

3.1.5. Diseño de la mezcla de hormigón

En primer lugar, se presentan los resultados de los ensayos requeridos para el desarrollo del método de dosificación de la densidad óptima. Los valores se presentan en la Tabla 39. Los ensayos completos de cada agregado se encuentran desde el anexo A.5 al A.10.

Tabla 39 Propiedades de los agregados requeridos para el diseño de la mezcla

Propiedad física	Valor	Unidades	Anexo
DRC: Densidad real del cemento	2.892	g/cm ³	*Tabla 22
DRA: Densidad real del agregado fino	2.597	g/cm ³	A.5
DRR: Densidad real de agregado grueso	2.641	g/cm ³	A.6
DAA: Densidad aparente del agregado fino	1.579	g/cm ³	A.7
DAR: Densidad aparente del agregado grueso	1.292	g/cm ³	A.7
DAA: Densidad aparente del agregado fino (compactada)	1.755	g/cm ³	A.7
DAR: Densidad aparente del agregado grueso (compactada)	1.431	g/cm ³	A.7
POA: Porcentaje óptimo de agregado fino	48.00	%	A.8
POR: Porcentaje óptimo de agregado grueso	52.00	%	A.8
DOM: Densidad óptimo de la mezcla	1.933	g/cm ³	A.8
MFA: Módulo de finura del agregado fino	2.76		A.9
CAA: Capacidad de absorción del agregado fino	1.86	%	A.5
CAR: Capacidad de absorción del agregado grueso	3.17	%	A.6
CHA: Contenido de humedad del agregado fino	0.98	%	A.10
CHR: Contenido de humedad del agregado grueso	0.68	%	A.10

1kg/dm³=1g/cm³

Los resultados de la Tabla 40 y Tabla 41 corresponden al desarrollo propiamente del método de la densidad óptima. Las condiciones y cálculos de diseño se muestran en la Tabla 40. Las cantidades en kg por cada m³ de hormigón de los componentes se muestran en la Tabla 41. Los cálculos se efectuaron solo para la mezcla de control, CEM. En el resto de las mezclas, la cantidad de zeolita natural corresponden al porcentaje de sustitución en masa del cemento. Además, en las mezclas de hormigón con zeolita se usó un aditivo plastificante que permitió contrarrestar la trabajabilidad disminuida por la capacidad de absorción y la estructura microporosa de la zeolita. La cantidad usada corresponde al 0.5% en masa del cemento y zeolita.

Tabla 40 Condiciones de diseño y cálculos para la dosificación de los componentes del hormigón

Condiciones de diseño			Cálculos	
w/c: agua/cemento	Relación	0.56	DRM: Densidad real de la mezcla (kg/m ³)	2619.94
Asentamiento		6-9cm	POV: Porcentaje óptimo de vacíos (%)	26.21
Porcentaje óptimo de vacíos		POV+2%+0.08xPOV	CP: Cantidad de la pasta (dm ³)	303.01

Tabla 41 Dosificación de las mezclas de hormigón

Mezcla Id.	Porcentaje de sustitución	Agua (kg/m ³)	Cemento (kg/m ³)	Zeolita (kg/m ³)	Agregado		Plastificante (% en masa del cemento y zeolita)
					Fino (kg/m ³)	Grueso (kg/m ³)	
CEM	0	187.35	334.55	0.00	868.82	957.24	0
Z10	10	187.35	301.10	33.46	868.82	957.24	0.5
Z15	15	187.35	284.37	50.18	868.82	957.24	0.5
Z20	20	187.35	267.64	66.91	868.82	957.24	0.5

Para ser más específicos, las cantidades de los componentes del hormigón se calculó considerando el volumen necesario para elaborar tres especímenes cilíndricos de 100mmx200mm por edad de ensayo y porcentaje de sustitución para tracción indirecta; y tres especímenes por porcentaje de sustitución para el ensayo de penetración de agua. Al volumen calculado se incluyó el rendimiento de la mezcla. Por tanto, el volumen real requerido es de 0.0491m³.

La corrección de humedad efectuada a los agregados para que alcancen la condición de saturado superficialmente seco (SSS) se muestra en la Tabla 42. En la misma se encuentra las cantidades calculadas para el volumen requerido con las respectivas correcciones para la mezcla de control, CEM.

Tabla 42 Dosificación al volumen para la mezcla de control, CEM

Dosificación al peso			Corrección por humedad			Dosificación al volumen		
Material	Cantidad en kg por cada m ³ de hormigón	Dosificación al peso	CA (%)	CH (%)	CA-CH %	Cantidad al volumen (kg)	Cantidad de la corrección (kg)	Cantidad corregida al volumen (kg)
W	187.35	0.56	-	-	-	9.20	1.55	10.74
C	334.55	1.00	-	-	-	16.42		16.42
A	868.82	2.60	1.86	0.98	0.89	42.64	0.38	42.26
R	957.24	2.86	3.17	0.68	2.49	46.98	1.17	45.81
Densidad	2347.96							

Finalmente, la Tabla 43 muestra las dosificaciones al volumen de las mezclas elaboradas para los diferentes porcentajes de sustitución. Así mismo, se especifica la cantidad del plastificante utilizado. A partir de estas mezclas se discute las propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón, así como la durabilidad de este.

Tabla 43 Dosificación al volumen de las mezclas

Mezcla Id.	Sustitución parcial (%)	Agua (l)	Cemento (kg)	Zeolita (kg)	Agregado		Plastificante (mL)
					Fino (kg)	Grueso (kg)	
CEM	0	10.74	16.42	0	42.26	45.81	0
Z10	10	10.74	14.78	1.64	42.26	45.81	82.10
Z15	15	10.74	13.96	2.46	42.26	45.81	82.10
Z20	20	10.74	13.14	3.28	42.26	45.81	82.10

3.1.6. Propiedades del hormigón fresco y endurecido

3.1.6.1. Asentamiento de las mezclas

Tabla 44 Asentamiento de las mezclas medidos por el cono de Abrams

Mezcla ID.	Porcentaje de sustitución	Asentamiento (cm)	Trabajabilidad	Cohesividad
CEM	0	5	Buena	Buena
Z10	10	4	Buena	Buena
Z15	15	3	Buena	Buena
Z20	20	3	Buena	Buena

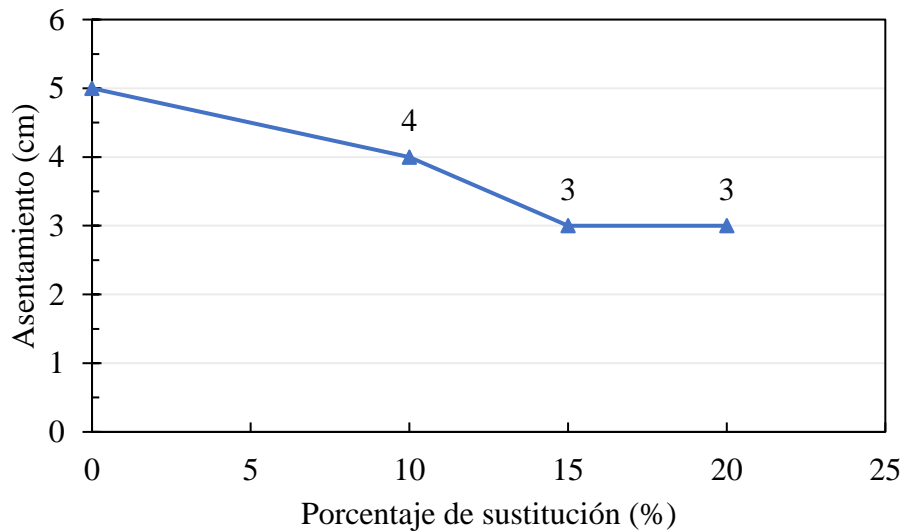


Figura. 25 Asentamiento de las mezclas

El asentamiento medido por el cono de Abrams conforme la NTE INEN 1578/ASTM C143 se muestra en la Tabla 44. En base a la Figura. 25, el asentamiento de las mezclas que incorporan zeolita como sustituto se ven reducidas. La mezcla de control CEM presenta un asentamiento de 5cm reflejado en una trabajabilidad buena. Esta mezcla incluye la suficiente agua para alcanzar la condición de humedad de los agregados, SSS. De acuerdo con el diseño de la mezcla de 6-9cm, el asentamiento medido está cerca del rango inferior esperado, lo que garantiza sus futuras propiedades mecánicas.

En cuanto a las mezclas que contienen zeolita en porcentaje de sustitución, identificadas como Z10, Z15 y Z20. El asentamiento se reduce conforme aumenta el porcentaje de sustitución, de 4 a 3cm. Estas mezclas utilizan aditivo plastificante a base de resinas sintéticas para lograr el asentamiento mencionado. Caso contrario el asentamiento y la trabajabilidad se verán totalmente reducidas.

La reducción en la trabajabilidad se puede explicar por la mayor superficie específica de la zeolita en contraste con el cemento tipo GU, como también de su estructura microporosa interna. Este comportamiento ya se evidenció en la elaboración de las pastas para determinar el tiempo de fraguado.

El uso de plastificante permite estar cerca del rango inferior del asentamiento de diseño. No obstante, con el mezclado y la compactación mediante vibración de las mezclas Z10, Z15 y Z20; la trabajabilidad de las mezclas es restablecida y presta las mismas condiciones que la mezcla de control. En particular la mezcla Z20, prestó mejores condiciones para ser moldeada, colocada y acabada.

En efecto, el uso de zeolita aumenta la demanda de agua lo que puede significar la reducción en las propiedades mecánicas del hormigón. Por lo que, el uso de un plastificante es una alternativa para garantizar la trabajabilidad. Sin embargo, la demanda del plastificante puede significar el incremento en el costo de producción del hormigón.

3.1.6.2. Densidad del hormigón fresco

La densidad de las mezclas en estado fresco se presenta en las siguientes secciones con una aproximación de 10kg/m³, esto en base a la NTE INEN 1573, puesto que puede existir una variación significativa entre moldes, el registró de masas, el proceso de compactación, entre otros procesos durante la elaboración. El análisis de la densidad incluye específicamente a los moldes de 100x200mm certificados bajo la norma ASTM C470.

3.1.6.2.1. Densidad de la mezcla de control en estado fresco

Tabla 45 Densidad de la mezcla de control en estado fresco

ID.	Diámetro (m)	Longitud (m)	Volumen (m ³)	Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad promedio (kg/m ³)
CEM-7D	0.100	0.200	0.0016	7.709	11.358	2320	
CEM-7E	0.102	0.201	0.0017	4.735	8.825	2470	
CEM-7F	0.102	0.201	0.0016	4.589	8.673	2490	
CEM-14A	0.103	0.203	0.0017	4.699	8.807	2430	
CEM-14E	0.100	0.200	0.0016	7.733	11.435	2360	
CEM-14F	0.100	0.200	0.0016	7.708	11.377	2340	2340.00
CEM-28B	0.102	0.202	0.0017	4.717	8.802	2470	
CEM-28D	0.100	0.200	0.0016	7.721	11.388	2330	
CEM-28F	0.100	0.200	0.0016	7.663	11.352	2350	
CEM-56D	0.100	0.200	0.0016	7.721	11.401	2340	
CEM-56E	0.100	0.200	0.0016	7.715	11.393	2340	
CEM-56F	0.100	0.200	0.0016	7.718	11.396	2340	

3.1.6.2.2. Densidad de la mezcla con el 10% de sustitución de cemento por zeolita en estado fresco

Tabla 46 Densidad de la mezcla con el 10% de sustitución de cemento por zeolita en estado fresco

ID.	Diámetro (m)	Longitud (m)	Volumen (m ³)	Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad promedio (kg/m ³)
Z10-7B	0.100	0.200	0.0016	7.720	11.455	2380	
Z10-7D	0.100	0.200	0.0016	7.709	11.414	2360	
Z10-7E	0.102	0.201	0.0016	4.735	8.719	2430	
Z10-14A	0.102	0.202	0.0017	4.699	8.753	2460	
Z10-14C	0.100	0.200	0.0016	7.699	11.419	2370	
Z10-14F	0.100	0.200	0.0016	7.708	11.383	2340	2370.00
Z10-28A	0.100	0.200	0.0016	7.748	11.450	2360	
Z10-28C	0.100	0.200	0.0016	7.710	11.469	2390	
Z10-28E	0.100	0.200	0.0016	7.740	11.451	2360	
Z10-56A	0.100	0.200	0.0016	7.746	11.477	2380	
Z10-56C	0.100	0.200	0.0016	7.706	11.431	2370	
Z10-56E	0.100	0.200	0.0016	7.715	11.442	2370	

3.1.6.2.3. Densidad de la mezcla con el 15% de sustitución de cemento por zeolita en estado fresco

Tabla 47 Densidad de la mezcla con el 15% de sustitución de cemento por zeolita en estado fresco

ID.	Diámetro (m)	Longitud (m)	Volumen (m ³)	Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad promedio (kg/m ³)
Z15-7A	0.100	0.200	0.0016	7.732	11.432	2360	2380
Z15-7C	0.100	0.200	0.0016	7.730	11.498	2400	
Z15-7D	0.100	0.200	0.0016	7.709	11.481	2400	
Z15-14A	0.104	0.204	0.0017	4.699	8.893	2440	
Z15-14C	0.100	0.200	0.0016	7.699	11.402	2360	
Z15-14E	0.100	0.200	0.0016	7.733	11.452	2370	
Z15-28A	0.100	0.200	0.0016	7.748	11.523	2400	
Z15-28C	0.100	0.200	0.0016	7.706	11.442	2380	
Z15-28E	0.100	0.200	0.0016	7.715	11.448	2380	
Z15-56A	0.100	0.200	0.0016	7.746	11.469	2370	
Z15-56C	0.100	0.200	0.0016	7.706	11.421	2370	
Z15-56E	0.100	0.200	0.0016	7.715	11.414	2350	

3.1.6.2.4. Densidad de la mezcla con el 20% de sustitución de cemento por zeolita en estado fresco

Tabla 48 Densidad de la mezcla con el 20% de sustitución de cemento por zeolita en estado fresco

ID.	Diámetro (m)	Longitud (m)	Volumen (m ³)	Peso del molde (kg)	Peso del molde y hormigón (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad promedio (kg/m ³)
Z20-7A	0.100	0.200	0.0016	7.732	11.440	2360.00	2350.00
Z20-7C	0.100	0.200	0.0016	7.730	11.418	2350.00	
Z20-7E	0.103	0.203	0.0017	4.735	8.813	2410.00	
Z20-14A	0.102	0.203	0.0017	4.699	8.755	2450.00	
Z20-14C	0.100	0.200	0.0016	7.699	11.424	2370.00	
Z20-14E	0.100	0.200	0.0016	7.733	11.431	2350.00	
Z20-28A	0.100	0.200	0.0016	7.748	11.439	2350.00	
Z20-28C	0.100	0.200	0.0016	7.710	11.403	2350.00	
Z20-28E	0.100	0.200	0.0016	7.740	11.430	2350.00	
Z20-56A	0.100	0.200	0.0016	7.746	11.441	2350.00	
Z20-56C	0.100	0.200	0.0016	7.706	11.388	2340.00	
Z20-56E	0.104	0.203	0.0017	4.717	8.808	2380.00	

3.1.6.2.5. Discusión de la densidad del hormigón en estado fresco

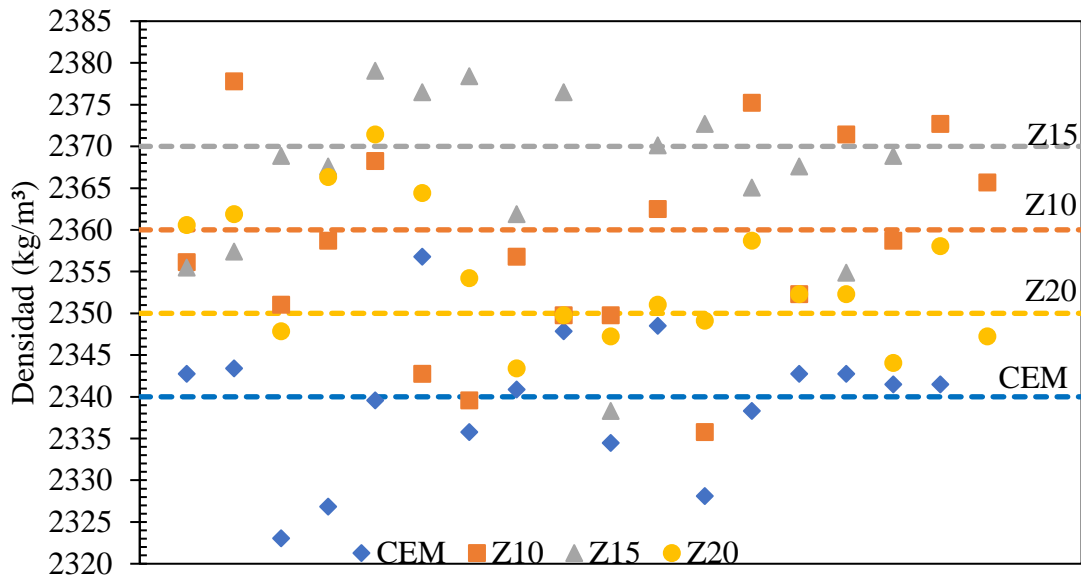


Figura. 26 Densidades de las mezclas del hormigón fresco

Tabla 49 Densidad promedio de las mezclas del hormigón fresco

Mezcla Id.	Porcentaje de sustitución	Densidad del hormigón fresco (kg/m ³)
CEM	0	2340
Z10	10	2360
Z15	15	2370
Z20	20	2350

En la Figura. 26 se muestra cada una de las mediciones de densidad del hormigón en estado fresco que se detallan en las Tablas 45, 46, 47 y 48. En esta figura, las mediciones que presentan una menor densidad corresponden a la mezcla de control, CEM, con valores que están entre 2320-2360 kg/m³. En cambio, la mezclas con contenido de zeolita presentan una mayor densidad que la mezcla de control, los valores oscilan entre 2340-2380kg/m³.

En la Tabla 49 se presentan los valores que corresponde al promedio de las densidades del hormigón fresco para cada porcentaje de sustitución. De acuerdo con la Tabla 49, la

densidad del hormigón fresco de la mezcla es de 2340kg/m³. Las densidades de las mezclas Z10, Z15 y Z20 son de 2360kg/m³, 2370kg/m³ y 2350kg/m³, respectivamente. En definitiva, estos resultados ratifican a un hormigón normal.

Pero la razón de una mayor densidad de las mezclas de hormigón que contienen zeolita se puede relacionar al uso de plastificante durante su elaboración. Puesto que, la mezcla de control solo tiene agua para ayudar con la trabajabilidad, mientras que en las mezclas mencionadas se usa un aditivo plastificante con una densidad de 1.22g/cm³, que es menor a 1 g/cm³ del agua. No obstante, la densidad de la mezcla Z20 evidencia una reducción significativa superando con solo 10kg/m³ a la mezcla de control. Esto se puede explicar que a partir del 20% de sustitución, la zeolita está reduciendo la densidad del hormigón debido a su baja densidad en comparación con el cemento tipo GU.

3.1.6.3. Densidad del hormigón endurecido

La densidad del hormigón endurecido se analiza en base a la edad de los especímenes previo al ensayo de tracción indirecta. De igual manera que el análisis de la densidad del hormigón fresco, los valores están aproximados a 10kg/m³.

3.1.6.3.1. Densidad del hormigón endurecido con la mezcla de control

Tabla 50 Densidad del hormigón endurecido con la mezcla de control, CEM

Edad (días)	ID.	Diámetro (m)	Longitud (m)	Volumen (m ³)	Peso del espécimen (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad (kg/m ³)
7	CEM-7D	0.100	0.200	0.0016	3.606	2300	2300
	CEM-7E	0.102	0.201	0.0017	3.950	2390	
	CEM-7F	0.102	0.201	0.0016	3.985	2430	
14	CEM-14A	0.103	0.203	0.0017	4.057	2400	2330
	CEM-14E	0.100	0.200	0.0016	3.678	2340	
	CEM-14F	0.100	0.200	0.0016	3.659	2330	
28	CEM-28B	0.102	0.202	0.0017	4.053	2460	2320
	CEM-28D	0.100	0.200	0.0016	3.647	2320	
	CEM-28F	0.100	0.200	0.0016	3.648	2320	
56	CEM-56D	0.100	0.200	0.0016	3.662	2330	2330
	CEM-56E	0.100	0.200	0.0016	3.660	2330	
	CEM-56F	0.100	0.200	0.0016	3.633	2310	

3.1.6.3.2. Densidad del hormigón endurecido con el 10% de sustitución de cemento por zeolita

Tabla 51 Densidad del hormigón endurecido con el 10% de sustitución, Z10

Edad (días)	ID.	Diámetro (m)	Longitud (m)	Volumen (m ³)	Peso del molde (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad promedio (kg/m ³)
7	Z10-7B	0.100	0.200	0.0016	3.640	2320	2310
	Z10-7D	0.100	0.200	0.0016	3.636	2310	
	Z10-7E	0.102	0.201	0.0016	4.011	2440	
14	Z10-14A	0.102	0.202	0.0017	3.993	2420	2310
	Z10-14C	0.100	0.200	0.0016	3.624	2310	
	Z10-14F	0.100	0.200	0.0016	3.619	2300	
28	Z10-28A	0.100	0.200	0.0016	3.661	2330	2330
	Z10-28C	0.100	0.200	0.0016	3.660	2330	
	Z10-28E	0.100	0.200	0.0016	3.662	2330	
56	Z10-56A	0.100	0.200	0.0016	3.686	2350	2350
	Z10-56C	0.100	0.200	0.0016	3.691	2350	
	Z10-56E	0.100	0.200	0.0016	3.687	2350	

3.1.6.3.3. Densidad del hormigón endurecido con el 15% de sustitución de cemento por zeolita

Tabla 52 Densidad del hormigón endurecido con el 15% de sustitución, Z15

Edad (días)	ID.	Diámetro (m)	Longitud (m)	Volumen (m ³)	Peso del molde (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad promedio (kg/m ³)
7	Z15-7A	0.100	0.200	0.0016	3.623	2310	2310
	Z15-7C	0.100	0.200	0.0016	3.634	2310	
	Z15-7D	0.100	0.200	0.0016	3.660	2330	
14	Z15-14A	0.104	0.204	0.0017	4.014	2340	2310
	Z15-14C	0.100	0.200	0.0016	3.624	2310	
	Z15-14E	0.100	0.200	0.0016	3.636	2310	
28	Z15-28A	0.100	0.200	0.0016	3.661	2330	2330
	Z15-28C	0.100	0.200	0.0016	3.656	2330	
	Z15-28E	0.100	0.200	0.0016	3.676	2340	
56	Z15-56A	0.100	0.200	0.0016	3.681	2340	2340
	Z15-56C	0.100	0.200	0.0016	3.674	2340	
	Z15-56E	0.100	0.200	0.0016	3.655	2330	

3.1.6.3.4. Densidad del hormigón endurecido con el 20% de sustitución de cemento por zeolita

Tabla 53 Densidad del hormigón endurecido con el 20% de sustitución, Z20

Edad (días)	ID.	Diámetro (m)	Longitud (m)	Volumen (m ³)	Peso del molde (kg)	Densidad (kg/m ³)	Densidad promedio (kg/m ³)
7	Z20-7A	0.100	0.200	0.0016	3.619	2300.00	2300
	Z20-7C	0.100	0.200	0.0016	3.618	2300.00	
	Z20-7E	0.103	0.203	0.0017	3.982	2350.00	
14	Z20-14A	0.102	0.203	0.0017	3.999	2420.00	2330
	Z20-14C	0.100	0.200	0.0016	3.666	2330.00	
	Z20-14E	0.100	0.200	0.0016	3.638	2320.00	
28	Z20-28A	0.100	0.200	0.0016	3.666	2330.00	2340
	Z20-28C	0.100	0.200	0.0016	3.672	2340.00	
	Z20-28E	0.100	0.200	0.0016	3.679	2340.00	
56	Z20-56A	0.100	0.200	0.0016	3.667	2330.00	2340
	Z20-56C	0.100	0.200	0.0016	3.662	2330.00	
	Z20-56E	0.104	0.203	0.0017	4.060	2360.00	

3.1.6.3.5. Discusión de la densidad del hormigón endurecido

En la Tabla 54 se resume la densidad del hormigón endurecido por edades y porcentaje de sustitución. Estos valores corresponden al promedio de los especímenes utilizados en el ensayo de tracción indirecta. El análisis de estos se limitó a los especímenes de 100mmx200mm. En ciertos casos se excluye las densidades medidas dada la dispersión de los datos.

Tabla 54 Densidad promedio del hormigón endurecido por edades

Mezcla Id.	Porcentaje de sustitución	Densidad del hormigón endurecido (kg/m ³)			
		Edad (días)			
		7	14	28	56
CEM	0	2300	2330	2320	2330
Z10	10	2310	2310	2330	2350
Z15	15	2310	2310	2330	2340
Z20	20	2300	2320	2340	2340

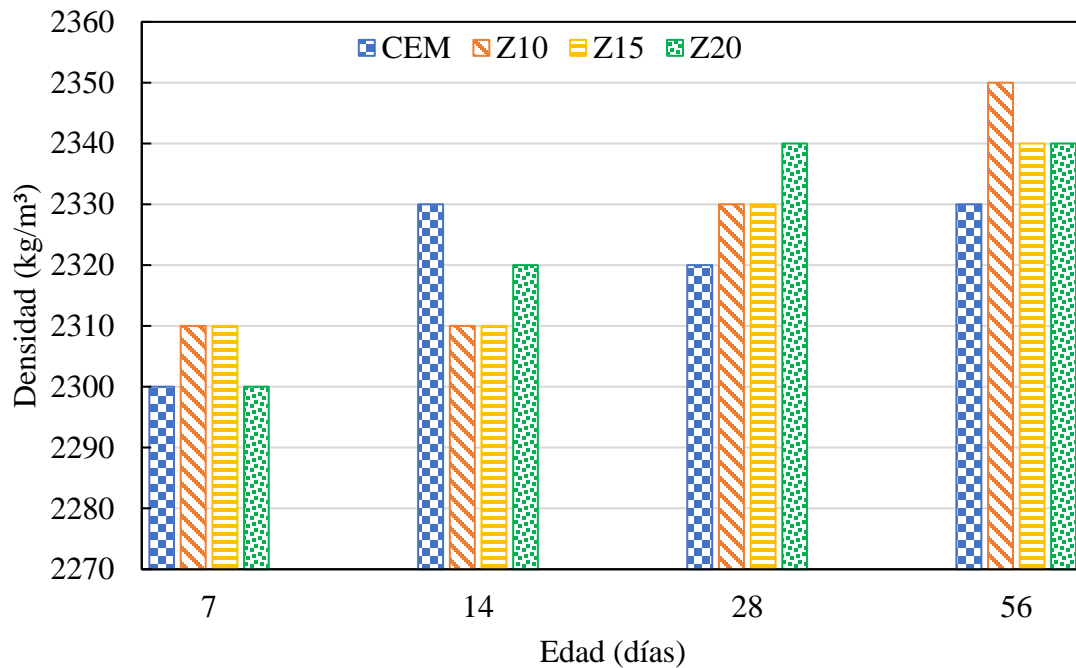


Figura. 27 Densidades del hormigón endurecido por edades

En base a la Tabla 54 y de mejor manera se observa en la Figura. 27, que la densidad del hormigón endurecido para los diferentes porcentajes de sustitución, aumentan con la edad del espécimen. El hormigón de la mezcla de control cambia de 2300kg/m^3 a 2330kg/m^3 . En cuanto a los especímenes que contienen zeolita, la densidad varía de 2300 kg/m^3 a 2350kg/m^3 . Todos estos valores de la edad de 7 a 56 días.

En el caso de los especímenes de hormigón con zeolita, con el 10% y 15% de sustitución, la densidad aumenta a los 28 días después de mantenerse constante hasta los 14 días. En cambio, en el hormigón con el 20% de sustitución, la densidad aumenta linealmente con la edad hasta los 28 días para después mantenerse constante en los 56 días.

En general, los hormigones que contienen zeolita entre sus componentes aumentaron la densidad en estado endurecido en comparación con la mezcla de control que solo contiene cemento tipo GU. Este comportamiento de incrementar la densidad conforme aumenta la edad se puede correlacionar al proceso de hidratación y la reacción puzolánica en el hormigón.

3.1.7. Tracción indirecta

La resistencia a la tracción indirecta del hormigón pertenece a una propiedad mecánica en estado endurecido. La determinación de esta se realizó en base a la NTE INEN 2648 con especímenes cilíndricos de 100x200mm curados en agua a una temperatura de $22 \pm 2^\circ\text{C}$. Los resultados de tracción indirecta de las siguientes secciones corresponden al promedio de tres especímenes con una aproximación de 0.05MPa.

3.1.7.1. Resistencia a la tracción indirecta del hormigón de control

Tabla 55 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón de control, CEM

Edad (días)	ID.	Diámetro (m)	Longitud (m)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a la tracción indirecta (MPa)	
					Por espécimen	Promedio
7	CEM-7D	0.10	0.20	57.28	1.82	1.85
	CEM-7E	0.10	0.20	62.50	1.93	
	CEM-7F	0.10	0.20	58.36	1.81	
14	CEM-14A	0.10	0.20	80.88	2.46	2.35
	CEM-14E	0.10	0.20	71.53	2.28	
	CEM-14F	0.10	0.20	-	-	
28	CEM-28B	0.10	0.20	71.82	2.22	2.15
	CEM-28D	0.10	0.20	62.32	1.98	
	CEM-28F	0.10	0.20	70.52	2.24	
56	CEM-56D	0.10	0.20	105.75	3.37	3.10
	CEM-56E	0.10	0.20	94.73	3.02	
	CEM-56F	0.10	0.20	93.84	2.99	

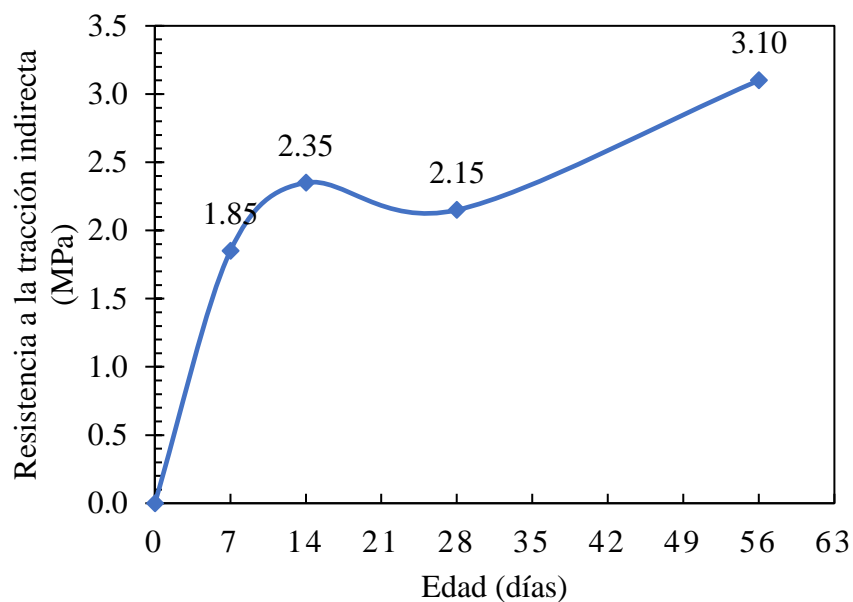


Figura. 28 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón de control con la edad de curado

En base a la Tabla 55, la resistencia a la tracción indirecta del hormigón de control varía de 1.85 a 3.10 MPa después de 7 y 56 días de curado. Teniendo en cuenta la resistencia a los 28 días de 2.15MPa. A la edad de 7 días esta alcanzó el 86% de su capacidad, mientras que a los 56 días superó con el 44%.

El desarrollo de la resistencia con la edad de curado de este hormigón se observa de mejor manera en la Figura. 28. En esta figura existe un pico a los 14 días que se puede relacionar con el proceso de compactación y una mayor densidad de los especímenes. En efecto, la mezcla de control presentó una mayor densidad del hormigón endurecido a los 14 días que a los 28 días, con 10 kg/cm^3 . Estos datos se muestran en la Tabla 54. Además, un cambio en los resultados de tracción indirecta se puede relacionar a la sensibilidad que tiene el ensayo a la presencia de porosidades en los especímenes de ensayo.

3.1.7.2. Resistencia a la tracción indirecta del hormigón con el 10% de sustitución de cemento por zeolita

Tabla 56 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón con el 10% de sustitución, Z10

Edad (días)	ID.	Diámetro (m)	Longitud (m)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a la tracción indirecta (MPa)	
					Por espécimen	Promedio
7	Z10-7B	0.10	0.20	31.82	1.01	1.30
	Z10-7D	0.10	0.20	45.47	1.45	
	Z10-7E	0.10	0.20	44.48	1.38	
14	Z10-14A	0.10	0.20	65.75	2.03	1.70
	Z10-14C	0.10	0.20	49.05	1.56	
	Z10-14F	0.10	0.20	49.04	1.56	
28	Z10-28A	0.10	0.20	79.37	2.53	2.20
	Z10-28C	0.10	0.20	61.76	1.97	
	Z10-28E	0.10	0.20	67.44	2.15	
56	Z10-56A	0.10	0.20	83.69	2.66	2.65
	Z10-56C	0.10	0.20	78.40	2.50	
	Z10-56E	0.10	0.20	87.25	2.78	

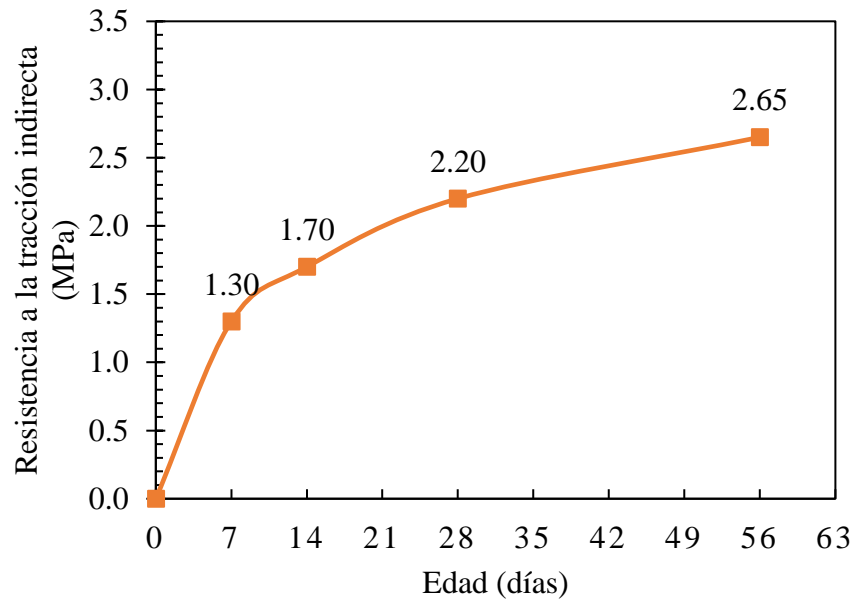


Figura. 29 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón Z10 con la edad de curado

En base a la Tabla 56, la resistencia a la tracción indirecta del hormigón con el 10% de sustitución, Z10, varía de 1.30 a 2.65 MPa después de 7 y 56 días de curado. El desarrollo de la resistencia con la edad de este hormigón se muestra en la Fig. 29. Teniendo en cuenta la resistencia a los 28 días de 2.20 MPa. A los 7 días esta alcanzó el 59% de su capacidad, mientras que a los 56 día superó con el 20%. La mayor ganancia de resistencia de este hormigón ocurre desde los 14 días hasta los 28 días. A partir de los 28 días y hasta los 56 días, la ganancia de resistencia es menor en comparación con el hormigón de control.

3.1.7.3. Resistencia a la tracción indirecta del hormigón con el 15% de sustitución de cemento por zeolita

Tabla 57 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón con el 15% de sustitución, Z10

Edad (días)	ID.	Diámetro (m)	Longitud (m)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a la tracción indirecta (MPa)	
					Por espécimen	Promedio
7	Z15-7A	0.100	0.200	38.99	1.24	1.30
	Z15-7C	0.100	0.200	41.86	1.33	
	Z15-7D	0.100	0.200	39.99	1.27	
14	Z15-14A	0.104	0.204	50.97	1.54	1.40
	Z15-14C	0.100	0.200	38.57	1.23	
	Z15-14E	0.100	0.200	44.76	1.42	
28	Z15-28A	0.100	0.200	65.23	2.08	2.05
	Z15-28C	0.100	0.200	59.66	1.90	
	Z15-28E	0.100	0.200	70.21	2.23	
56	Z15-56A	0.100	0.200	69.28	2.21	2.35
	Z15-56C	0.100	0.200	74.33	2.37	
	Z15-56E	0.100	0.200	78.37	2.49	

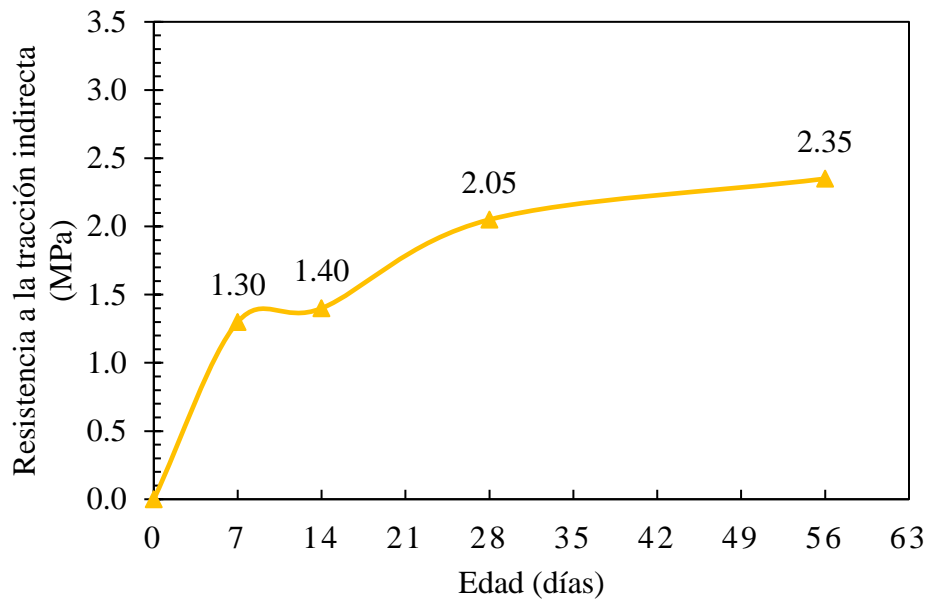


Figura. 30 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón Z15 con la edad de curado

En base a la Tabla 57, la resistencia a la tracción indirecta del hormigón con el 15% de sustitución, Z15, varía de 1.30 a 2.35 MPa después de 7 y 56 días de curado. El desarrollo de la resistencia con la edad de este hormigón se refleja en la Figura. 30. Teniendo en cuenta la resistencia a los 28 días de 2.05 MPa. A los 7 días esta alcanzó el 63% de su capacidad, mientras que a los 56 días superó con el 15%. La mayor ganancia de resistencia de este hormigón ocurre desde los 14 días hasta los 28 días. A partir de los 28 días y hasta los 56 días, la mejoría en la resistencia es menor con comparación con los hormigones CEM y Z10.

3.1.7.4. Resistencia a la tracción indirecta del hormigón con el 20% de sustitución de cemento por zeolita

Tabla 58 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón con el 20% de sustitución, Z20

Edad (días)	ID.	Diámetro (m)	Longitud (m)	Carga máxima aplicada (kN)	Resistencia a la tracción indirecta (MPa)	
					Por espécimen	Promedio
7	Z20-7A	0.10	0.20	27.43	0.87	1.05
	Z20-7C	0.10	0.20	35.93	1.14	
	Z20-7E	0.10	0.20	37.05	1.13	
14	Z20-14A	0.10	0.20	59.45	1.83	1.85
	Z20-14C	0.10	0.20	63.07	2.01	
	Z20-14E	0.10	0.20	54.60	1.74	
28	Z20-28A	0.10	0.20	78.76	2.51	2.10
	Z20-28C	0.10	0.20	65.16	2.07	
	Z20-28E	0.10	0.20	55.20	1.76	
56	Z20-56A	0.10	0.20	95.96	3.05	2.75
	Z20-56C	0.10	0.20	82.01	2.61	
	Z20-56E	0.10	0.20	87.61	2.65	

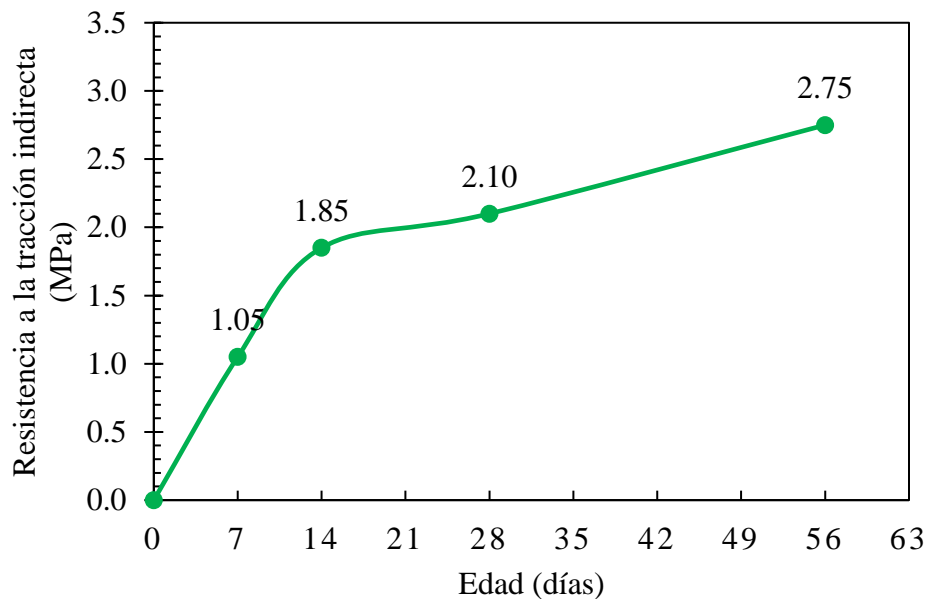


Figura. 31 Resistencia a la tracción indirecta del hormigón Z20 con la edad de curado

En base a la Tabla 58, la resistencia a la tracción indirecta del hormigón con el 20% de sustitución varía de 1.05 a 2.75 MPa después de 7 y 56 días de curado. La ganancia de resistencia con la edad de este hormigón se refleja en la Figura. 31. Teniendo en cuenta la resistencia a los 28 días de 2.10 MPa. A los 7 días esta alcanzó el 50% de su capacidad, mientras que a los 56 superó con el 31%.

La mayor ganancia de resistencia de este hormigón ocurre desde los 14 días hasta los 28 días. En particular este hormigón a los 14 días alcanzó el 88% de su capacidad superando al 77 y 68% de los hormigones Z10 y Z15. A partir de los 28 días y hasta los 56 días, la mejoría en la resistencia es menor en comparación con el hormigón de control, pero mayor que los hormigones Z10 y Z15.

3.1.7.5. Resumen de resultados de tracción indirecta

En la Tabla 59 se muestra los resultados de tracción indirecta de los hormigones estudiados a la edad de 7, 14, 28 y 56 días, correspondientes a cada porcentaje de sustitución. Así mismo, presenta la comparación de los hormigones con contenido de zeolita en un 10, 15 y 20% de sustitución del cemento, con el hormigón que solo tiene cemento tipo GU como material cementante. La Figura. 32 muestra el desarrollo de la resistencia de todos los hormigones estudiados de acuerdo con la edad.

Tabla 59 Resultados de tracción indirecta y comparación con el hormigón de control

Mezcla ID	Porcentaje de sustitución	Resistencia a la tracción indirecta (MPa)			
		7 días	14 días	28 días	56 días
CEM	0	1.85	2.35	2.15	3.10
Z10	10	1.30	1.70	2.20	2.65
Z15	15	1.30	1.40	2.05	2.35
Z20	20	1.05	1.85	2.10	2.75
Comportamiento de la resistencia a la tracción comparado con el hormigón de control (%)					
Z10	10	-30	-28	2	-15
Z15	15	-30	-40	-5	-24
Z20	20	-43	-21	-2	-11

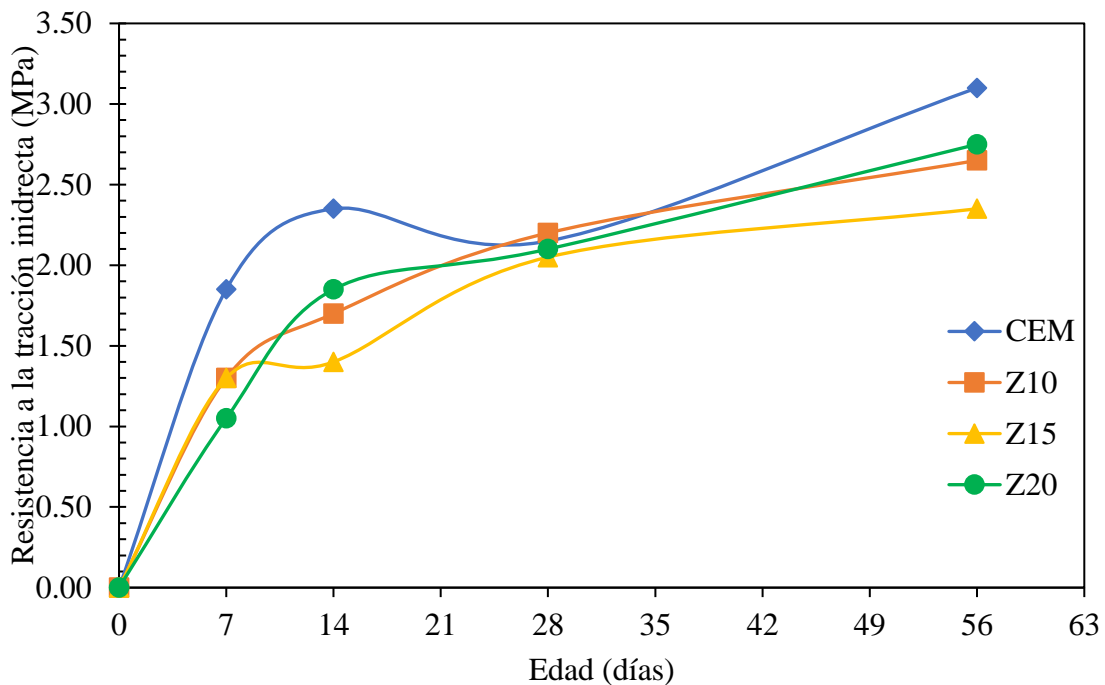


Figura. 32 Desarrollo de la resistencia de los hormigones con la edad de curado

3.1.7.6. Discusión de resultados de tracción indirecta

En base a la Tabla 59 y la Figura. 32, al séptimo día de curado, el hormigón de control alcanzó una resistencia a la tracción de 1.85 MPa. En cambio, los hormigones Z10 y Z15 alcanzaron una resistencia de 1.30 MPa, en ambos casos, lo que se traduce en una reducción del 30%, en comparación con el hormigón de control. De igual manera, el hormigón Z20 tiene una resistencia menor en un 43%.

A los 14 días, la resistencia a la tracción sigue siendo mayor en el hormigón de control, pero en los hormigones Z10 y Z20 es menor, mostrando una reducción del 28% y 21%. A partir de esta edad, los hormigones mostraron una mejoría considerable hasta llegar a los 28 días.

Al completar los 28 días de curado, la tracción en los hormigones con zeolita llegó a tener una reducción mínima, incluso superando al hormigón de control. El hormigón Z10

superó con el 2% de la resistencia. En los hormigones Z15 y Z20 la reducción es de apenas el 5% y el 2%, quedando muy cerca de la resistencia de 2.15 MPa.

La resistencia a la tracción de los hormigones con zeolita a los 56 días sufrió un cambio repentinito después de que a los 28 días estuvieran cerca de la equivalencia del hormigón de control. Sin embargo, los resultados tienen reducción ligera del 15, 24 y 11% para los hormigones Z10, Z15 y Z20, respectivamente, en contraste con el resto de las edades. Todos estos comportamientos del hormigón al esfuerzo de tracción en base a la edad de curado se observan en la Figura. 33.

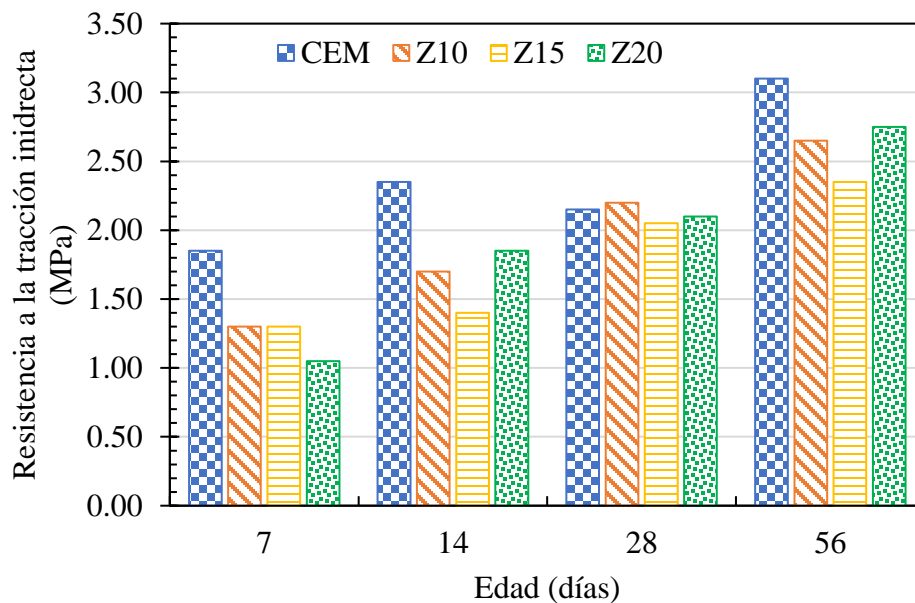


Figura. 33 Resistencia a la tracción indirecta de los hormigones CEM, Z10, Z15 Y Z20

Los resultados mostrados evidencian la reacción de hidratación del cemento como la puzolánica de las zeolitas. No obstante, la reacción puzolánica de los hormigones con la zeolita natural estudiada es lenta y hasta los 56 días no demuestran un cambio significativo en la resistencia a la tracción indirecta que permita establecer una comparación adecuada.

3.1.8. Penetración de agua bajo presión

La penetración de agua bajo presión se determinó en base a la norma española UNE-EN 12390-8. Para el ensayo se utilizó tres especímenes de 150x300mm por porcentaje de sustitución que fueron curados en agua durante 28 días a una temperatura de $22\pm 2^{\circ}\text{C}$. Después fueron secados por una semana y se aplicó agua a presión de 500 ± 50 kPa durante 72 ± 2 horas. Para medir la profundidad de penetración se rompió los especímenes por el ensayo de tracción indirecta en base a las especificaciones anteriormente descritas.

La Tabla 60 muestra la dimensión, resistencia a la tracción indirecta y profundidad de penetración máxima medida en los especímenes. La penetración de cada porcentaje de sustitución de estudio corresponde al promedio de tres valores. En algunos casos se descartó los valores por la presencia de fugas en el sistema y la dispersión de estos.

Tabla 60 Dimensión, tracción indirecta, penetración máxima y promedio de los especímenes de ensayo

ID	Diámetro (mm)	Longitud (mm)	Carga máxima aplicada (kN)	Tracción indirecta (MPa)	Penetración máxima (mm)	Penetración promedio (mm)
CEM-P1	151	300	205.923	2.90	27	
CEM-P2	150	300	221.677	3.15	29	28
CEM-P3	150	300	219.334	3.10	27	
Z10-P1	151	301	157.84	2.20	28*	
Z10-P2	151	299	149.442	2.10	43	44
Z10-P3	150	300	146.327	2.05	45	
Z15-P1	152	300	137.305	1.90	33*	
Z15-P2	151	299	143.903	2.05	40	40
Z15-P3	151	307	156.293	2.15	39	
Z20-P1	151	306	161.732	2.25	36*	
Z20-P2	152	300	148.236	2.05	31	31
Z20-P3	151	300	149.524	2.10	30	

* Los valores exhiben fugas en el sistema y son dispersos

En la Tabla 60 se resumen los resultados de tracción indirecta y la penetración máxima de los hormigones estudiados.

Tabla 61 Resultados de penetración de los hormigones estudiados

ID	Porcentaje de sustitución	Tracción indirecta (MPa)	Penetración máxima (mm)
CEM	0	3.05	28
Z10	10	2.15	44
Z15	15	2.05	40
Z20	20	2.15	32

En base a los resultados de la Tabla 60, la penetración máxima de agua a presión en el hormigón de control es de 28mm, mientras que para los hormigones que contiene zeolita es mayor, llegando a tener una penetración de 44, 40 y 32 mm en los hormigones Z10, Z15 y Z20, respectivamente.

3.1.8.1. Discusión de la penetración de agua bajo presión

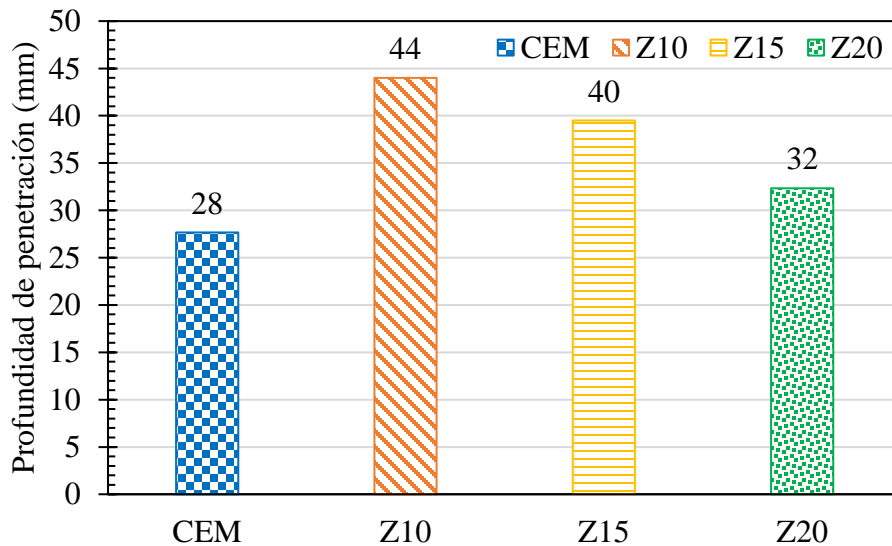


Figura. 34 Penetración de agua bajo presión de los hormigones CEM, Z10, Z15 y Z20

En la Figura. 34 se muestra la penetración de agua bajo presión de los hormigones CEM, Z10, Z15 y Z20. De los hormigones que contienen zeolita, el que prestó mejores condiciones ante el avance del agua es el hormigón Z20, llegando a tener una penetración de 32mm superando con 4 mm al hormigón de control, que es de 28 mm. Puesto que, las partículas de la zeolita a más de actuar como material cementante, producto de la reacción puzolánica, estas han llenado los espacios que existe entre los agregados.

El hormigón de control que tienen cemento tipo GU muestra que después de los 28 días de curado y los 7 días de secado, el proceso de hidratación ha tenido un gran avance y la estructura microporosa se ha ido refinando, evitando así la penetración del agua. En cambio, en los hormigones con zeolita la hidratación y la reacción puzolánica son lentas, que hasta la edad de ensayo no han sido suficientes para evitar el avance del agua.

Estos valores evidencian que los hormigones con zeolita muestran una mayor permeabilidad a la edad de ensayo. Esto puede deberse a las formas y tamaños de los poros formados.

3.2. VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Los resultados de la presente investigación indican que la hipótesis “La zeolita natural de la cordillera Chongón-Colonche como una alternativa para mejorar las propiedades del concreto estructural en estado fresco y endurecido como su durabilidad, y pueda ser usada como un material cementante suplementario” no se cumple, ya que las propiedades del hormigón de control, un hormigón convencional de densidad normal con fines estructurales, han prestado las mejores condiciones y no existe un cambio significativo en contraste con los hormigones que contienen zeolita.

No obstante, la tracción indirecta de los hormigones con contenido de zeolita, tema de la investigación, evidencia que, a la edad de 28 y 56 días, la reacción puzolánica de la zeolita ha tenido efecto y la reducción es de apenas el 11% en el hormigón con el 20% de sustitución de cemento tipo GU por zeolita. Además, usar otro tipo de mineral de zeolita que tenga una pureza establecida, un tamaño medio de la partícula menor a los 5 μ m y una superficie específica más elevada a los 563m²/kg, garantizaran un mejor desarrollo en las propiedades mecánicas y la durabilidad de los hormigones que contengan zeolita a edades más tempranas.

CAPÍTULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

1. Se determinó que la densidad de la zeolita natural estudiada es igual a 2.41g/cm^3 , mientras que del cemento tipo GU es de 2.89g/cm^3 . En el caso de la zeolita, la densidad es mayor a otras investigaciones, esta variación se puede relacionar a la coexistencia de minerales de zeolita e impurezas. Para el cemento tipo GU, al contener adiciones minerales como las puzolanas naturales durante su fabricación, la densidad es menor con respecto a un cemento portland. En consecuencia, la densidad es una propiedad física que depende de la composición química de los componentes de los materiales cementantes.
2. La superficie específica determinada en base a la NTEN INEN 196, en la zeolita natural alcanza un valor de $563\text{m}^2/\text{kg}$ respecto al cemento tipo GU de $470\text{m}^2/\text{kg}$, evidenciando que la zeolita tiene mayor cantidad y tamaño de poros entre sus partículas, por lo que mayor será el área superficial para ser recubierto por el agua requerida para producir una pasta o un hormigón.
3. Mediante el análisis granulométrico por medio de un hidrómetro 152-H, el tamaño medio de las partículas de zeolita natural es de $5\mu\text{m}$. Esta distribución refleja que el 74% de las partículas son menores a $20\mu\text{m}$ y el 40% menor a $2\mu\text{m}$, por lo que se determina que es un material finamente molido con una graduación adecuada, pero no con partículas más finas que el cemento tipo GU, ya que el tamaño medio presentando por Salcedo[15], es igual a $3.97\mu\text{m}$.

4. Las pastas que contienen zeolita como sustituto parcial del cemento demuestran que, mayor es la demanda de agua para lograr la consistencia normal. Esta varía entre 31.5 y 32.5 % para porcentajes de sustitución comprendidos entre el 10 y 20%. Esto se traduce en agua adicional del 2.5 al 5.5% a la requerida en la pasta de cemento tipo GU, que tiene una consistencia de 30.8%.
5. Al usar zeolita como sustituto parcial del cemento tipo GU mayor es el tiempo en el cual ocurre el fraguado inicial y final, más aún con el incremento del contenido. El fraguado inicial ocurre entre los 107 y 127 minutos, en cambio en el fraguado final se produce entre los 305 y 390 minutos, en los porcentajes de sustitución del 10 al 20%. Esto indica, que antes que se produzca el fraguado inicial mayor tiempo existe para el transporte, colocación, moldeado y acabado. De igual manera, el tiempo de fraguado final para que la pasta llegue a endurecerse es mayor, por lo que las reacciones químicas son lentas.
6. La zeolita en las mezclas de hormigón reduce el asentamiento medido por el cono de Abrams y obliga a utilizar un aditivo plastificante para garantizar la trabajabilidad, fenómeno que se explica por la mayor superficie específica en relación con el cemento tipo GU, además de su estructura interna microporosa.
7. La densidad del hormigón fresco en los hormigones que contienen zeolita en porcentajes de sustitución del 10 al 15% presentan un incremento dado el uso del plastificante, pero a partir del 20% de sustitución, la zeolita tiene un efecto de reducción en la densidad, superando con solo 10g/cm^3 al hormigón de cemento tipo GU.
8. A la edad de 7 a 56 días el hormigón endurecido, tanto de los diferentes porcentajes de sustitución y de control, presentan un aumento en la densidad con relación a la edad, demostrando que, a determinada edad, las reacciones químicas de hidratación como la puzolánica de los materiales estudiados generan componentes de mayor densidad.
9. La resistencia a la tracción indirecta del hormigón al sustituir el cemento por zeolita natural es menor en todas las edades, pero la reducción en comparación con el hormigón de control disminuye con el avance de la edad. Esto indica que la reacción puzolánica propia de la zeolita natural se está produciendo a partir de los 28 días y a

los 56 días la ganancia de resistencia ha avanzado en gran proporción, pero no ha sido suficiente para superar al hormigón de control.

10. La penetración de agua bajo presión en los hormigones que contienen zeolita es mayor al hormigón de contiene cemento tipo GU, por lo que mayor será la permeabilidad y el ataque de la intemperie, reduciendo así la durabilidad del hormigón. Sin embargo, el hormigón con 20% de sustitución ante el avance del agua ha superado con 4 mm al hormigón de control que tiene una penetración de 28mm, por lo que la reacción puzolánica y el efecto de rellenado ha refinado la estructura porosa.
11. En relación con los resultados de tracción indirecta y penetración de agua bajo presión de los hormigones que contienen zeolita, el que prestó mejores condiciones corresponde al 20% de sustitución, puesto que la menor reducción de tracción indirecta y menor penetración se obtuvo en dicho hormigón.

4.2. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda utilizar técnicas de análisis que permitan identificar la especie de mineral y el tipo de impurezas existentes en las zeolitas naturales, puesto que la variabilidad química y el porcentaje de pureza de este material pueden influir a favor o en contra de los resultados.
2. Investigar y experimentar con diferentes tamaños de partículas y superficies específicas de una misma u otras especies de minerales de zeolitas. Además, se incluyan ensayos de reacción puzolánica y la capacidad de intercambio iónico de estos materiales, a fin de determinar las mejores prestaciones en el estudio de morteros y hormigones.
3. Es recomendable seguir con investigaciones de los minerales de las zeolitas u otros materiales cementantes suplementarios que se puedan convertir en la transición de materiales convencionales a materiales sostenibles, y así permitan mitigar las emisiones de carbono de la industria cementera y luchar contra el cambio climático. Así mismo, sean capaces de mejorar las propiedades y la durabilidad de los morteros como hormigones.

4. Durante los ensayos ejecutados, los materiales se deben almacenar en un lugar seguro que evite el contacto con la humedad, deterioro y contaminación, ya que la presencia de grumos en el cemento y la zeolita, producto de la absorción de la humedad ambiente, puede significar la variación y aceptación de los resultados. En particular la zeolita tiene una alta capacidad de hidratarse con la humedad ambiente.
5. En la ejecución de los ensayos se debe controlar las condiciones de laboratorio requeridas por las normativas y que todos los equipos estén limpios. En el caso de la densidad y análisis granulométrico por hidrómetro, mantener la temperatura requerida y evitar que su variación supere los rangos establecidos.
6. En el ensayo de tiempo de fraguado, el mezclado mecánico de las pastas se debe hacer con los equipos requeridos en la norma NTE INEN 155, ya que en el presente estudio se adaptó un taladro eléctrico para que cumpla la función de mezclado y pueda arrojar resultados confiables.
7. Durante la elaboración de los hormigones se debe evitar que la mezclas estén en contacto directo con el sol, lo que puede producir la evaporación del agua y reducir su trabajabilidad. Además, al presenciar un falso fraguado es recomendable realizar un remezclado manual.
8. Es recomendable que en la máquina de penetración de agua se adapte un equipo para mantener la presión en el rango requerido por la norma y no requiera la operación manual, así mismo se evite al máximo las fugas en el sistema. De modo que, permita evaluar adecuadamente la permeabilidad del hormigón, factor que influye y es determinante en su durabilidad.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. B. Raggiotti, M. J. Positieri, y Á. Oshiro, «Natural zeolite, a pozzolan for structural concrete», *Procedia Struct. Integr.*, vol. 11, pp. 36-43, 2018, doi: 10.1016/j.prostr.2018.11.006.
- [2] A. Dyer, «Zeolites», en *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*, Second., K. J. Buschow, M. Flemings, E. Kramer, P. Veysière, R. Cahn, B. Ilshner, y S. Mahajan, Eds. Salford: Elsevier, 2001, pp. 9859-9863.
- [3] IZA Natural Zeolites Commission, «Index of Natural Zeolites Datasheets». <http://www.iza-online.org/natural/default.htm> (accedido jun. 13, 2021).
- [4] J. L. Costafreda Mustelier *et al.*, *Las zeolitas naturales de Iberoamérica*, Fundación. Madrid, 2018.
- [5] L. Machiels, R. Snellings, F. Morante, J. Elsen, y C. Paredes, «Mineralogía Cuantitativa de los Depositos de Zeolitas en la costa del ecuador», *Rev. Tecnol. ESPOL*, vol. 19, n.º 1, pp. 41-48, 2006.
- [6] B. Ahmadi y M. Shekarchi, «Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, n.º 2, pp. 134-141, 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.10.006.
- [7] 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, pp. 1023-1033, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.038.
- [8] A. A. Ramezani pour, A. Kazemian, M. Sarvari, y B. Ahmadi, «Use of Natural Zeolite to Produce Self-Consolidating Concrete with Low Portland Cement Content and High Durability», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 25, n.º 5, pp. 589-596, 2013, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000621.
- [9] A. A. Ramezani pour, R. Mousavi, M. Kalhori, J. Sobhani, y M. Najimi, «Micro and macro level properties of natural zeolite contained concretes», *Constr. Build. Mater.*, vol. 101, pp. 347-358, 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.10.101.
- [10] K. Samimi, S. Kamali-Bernard, A. Akbar Maghsoudi, M. Maghsoudi, y H. Siad, «Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes», *Constr. Build. Mater.*, vol. 151, pp. 292-311, 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.06.071.
- [11] A. A. Shahmansouri, M. Yazdani, S. Ghanbari, H. Akbarzadeh Bengar, A. Jafari, y H. Farrokh Ghatte, «Artificial neural network model to predict the compressive strength of eco-friendly geopolymer concrete incorporating silica fume and natural zeolite», *J. Clean. Prod.*, vol. 279, p. 123697, ene. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123697.

- [12] M. Valipour, M. Yekkalar, M. Shekarchi, y S. Panahi, «Environmental assessment of green concrete containing natural zeolite on the global warming index in marine environments», *J. Clean. Prod.*, vol. 65, pp. 418-423, 2014, doi: 10.1016/j.jclepro.2013.07.055.
- [13] R. P. Fernández Álvarez, «Estudio comparativo de las propiedades físicas de aluminosilicatos del cantón Guayaquil para sustitución parcial del cemento portland IP», Universidad Técnica de Ambato, 2021.
- [14] D. A. Maldonado Maldonado, «Estudio de la zeolita natural como sustituto parcial del cemento tipo GU en la construcción», Universidad Técnica de Ambato, 2021.
- [15] V. E. Salcedo Rivera, «Estudio de las propiedades físicas de zeolita natural (aluminosilicato) de tipo clinoptilolita para remplazo parcial del cemento portland», Universidad Técnica de Ambato, 2021.
- [16] R. F. Ramos Peñafiel, «Análisis comparativo de las propiedades físicas de aluminosilicatos en relación con el cemento puzolánico tipo IP», Universidad Técnica de Ambato, 2021.
- [17] D. V. Yanchaguano Toapanta, «Análisis de aluminosilicatos como material de sustitución parcial del cemento tipo GU en la construcción», Universidad Técnica de Ambato, 2021.
- [18] ONU, «Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos», ago. 17, 2017. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/> (accedido jun. 17, 2021).
- [19] Naciones Unidas, «Acuerdo de París Naciones Unidas», París, 2015. [En línea]. Disponible en: https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf.
- [20] IEA, «Technology Roadmap for Cement», París, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>.
- [21] R. M. Andrew, «Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018», *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 11, n.º 4, pp. 1675-1710, nov. 2019, doi: 10.5194/essd-11-1675-2019.
- [22] IEA, «Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector», París, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- [23] S. A. Ishak y H. Hashim, «Low carbon measures for cement plant - A review», *J. Clean. Prod.*, vol. 103, pp. 260-274, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.11.003.
- [24] F. Morante, «Las Zeolitas De La Costa De Ecuador (Guayaquil): Geología , Caracterización», Universidad Politécnica de Madrid, 2004.
- [25] E. A. R. Trout, «The History of Calcareous Cements», en *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5.^a ed., Elsevier, 2019, pp. 1-29.

- [26] R. O. A. Rahman, R. Z. Rakhimov, N. R. Rakhimova, y M. I. Ojovan, *Cementitious Materials for Nuclear Waste Immobilization*, First. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2014.
- [27] J. M. Franco de Carvalho, P. A. M. Campos, K. Defáveri, G. J. Brigolini, L. G. Pedroti, y R. A. F. Peixoto, «Low Environmental Impact Cement Produced Entirely from Industrial and Mining Waste», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 31, n.º 2, p. 04018391, feb. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002617.
- [28] P. del Strother, «Manufacture of Portland Cement», en *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5.ª ed., Elsevier, 2019, pp. 31-56.
- [29] S. Kosmatka y M. Wilson, *Design and Control Design and Control of*, 15th ed. Washington: Portland Cement Association, 2011.
- [30] D. Herfort y D. Macphee, «Components in Portland», en *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5.ª ed., Elsevier Ltd., 2019, pp. 57-86.
- [31] A. M. Harrison, «Constitution and specification of Portland cement», en *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5.ª ed., vol. di, Elsevier Ltd., 2019, pp. 87-155.
- [32] R. H. Bogue, «Calculation of the Compounds in Portland Cement», *Ind. Eng. Chem. Anal. Ed.*, vol. 1, n.º 4, pp. 192-197, oct. 1929, doi: 10.1021/ac50068a006.
- [33] J. Beaudoin y I. Odler, «Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement», en *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5.ª ed., Elsevier, 2019, pp. 157-250.
- [34] W. Kurdowski, «Cement and Concrete Chemistry», en *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.
- [35] INEN, *NTE INEN 152: Cemento portland, requisitos*. Ecuador, 2012, p. 14.
- [36] INEN, *Cementos hidráulicos compuestos. Requisitos*. 2011.
- [37] INEN, *Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*, vol. 1, n.º Primera Edición. 2011, p. 5.
- [38] Z. Li, *Advanced Concrete Technology*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [39] J. C. McCormac y R. H. Brown, *Diseño de Concreto reforzado*, Décima. México: Alfaomega Grupo Editor, S.A., 2018.
- [40] F. Lamus y S. Anadrade, *Concreto reforzado: fundamentos*, 1.ª ed. Bogotá: Ecoe Ediciones, 2015.
- [41] S. Medina, *Hormigón*. Ambato.
- [42] D. S. Coombs *et al.*, «Recommended nomenclature for zeolite minerals: report of the subcommittee on zeolites of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names», *Mineral. Mag.*, vol. 62, n.º 4, pp. 533-571, ago. 1998, doi: 10.1180/002646198547800.

- [43] W. S. Wise, «MINERALS | Zeolites», en *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*, n.º April, Elsevier, 2013, pp. 1-12.
- [44] C. Colella y W. S. Wise, «The IZA Handbook of Natural Zeolites: A tool of knowledge on the most important family of porous minerals», *Microporous Mesoporous Mater.*, vol. 189, pp. 4-10, may 2014, doi: 10.1016/j.micromeso.2013.08.028.
- [45] G. D. Gatta y P. Lotti, «Systematics, crystal structures, and occurrences of zeolites», en *Modified Clay and Zeolite Nanocomposite Materials*, vol. 1, Milan: Elsevier, 2019, pp. 1-25.
- [46] C. Martínez y A. Corma, «Zeolites», en *Comprehensive Inorganic Chemistry II*, vol. 5, Elsevier, 2013, pp. 103-131.
- [47] M. Okrusch y H. E. Frimmel, *Mineralogy*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2020.
- [48] D. Garcés, «Caracterización mineralógica del depósito de zeolitas naturales en el río Guaraguau (Isidro Ayora, provincia del Guayas) y su aplicación en la remoción de amonio», Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2013.
- [49] A. A. Shahmansouri, M. Yazdani, S. Ghanbari, H. Akbarzadeh Bengar, A. Jafari, y H. Farrokh Ghatte, «Artificial neural network model to predict the compressive strength of eco-friendly geopolymer concrete incorporating silica fume and natural zeolite», *J. Clean. Prod.*, vol. 279, p. 123697, ene. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123697.
- [50] R. Crangle, «Zeolites Statistics and Information», 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/zeolites-statistics-and-information>.
- [51] Agencia de Regulación y Control Minero, «Producción de Oro Producción de Caliza Producción Materiales de construcción Producción de Arcilla», Quito, 2019.
- [52] C. Molinari, C. Zanelli, y M. Dondi, «Zeolites and modified clays in environmentally sustainable building materials», en *Modified Clay and Zeolite Nanocomposite Materials*, Faenza: Elsevier, 2019, pp. 289-307.
- [53] C. Shi, A. F. Jiménez, y A. Palomo, «New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement», *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, n.º 7, pp. 750-763, jul. 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.016.
- [54] A. A. Ramezani pour, *Cement Replacement Materials*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [55] M. J. McCarthy y T. D. Dyer, «Pozzolanas and Pozzolanic Materials», en *Lea's Chemistry of Cement and Concrete*, 5.ª ed., Elsevier, 2019, pp. 363-467.
- [56] C. Karakurt y İ. B. Topçu, «Effect of blended cements produced with natural zeolite and industrial by-products on alkali-silica reaction and sulfate resistance of concrete», *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, n.º 4, pp. 1789-1795, abr. 2011, doi:

- 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.087.
- [57] K. Narasimhulu, R. Gettu, y K. G. Babu, «Beneficiation of Natural Zeolite through Flash Calcination for Its Use as a Mineral Admixture in Concrete», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, n.º 1, pp. 24-33, ene. 2014, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000800.
- [58] L. E. Burris y M. C. G. Juenger, «Effect of calcination on the reactivity of natural clinoptilolite zeolites used as supplementary cementitious materials», *Constr. Build. Mater.*, vol. 258, p. 119988, oct. 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119988.
- [59] B. M. Das, *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*, Cuarta. México: Cengage Learning Editores, S.A, 2015.
- [60] L. E. Burris, «Increasing the reactivity of natural zeolites used as supplementary cementitious materials», Universidad de Texas, 2014.
- [61] INVIAS, *Normas y especificaciones 2012 INVIAS*. Colombia: INVIAS, 2013, p. 798.
- [62] K. Narasimhulu, R. Gettu, y K. G. Babu, «Beneficiation of Natural Zeolite through Flash Calcination for Its Use as a Mineral Admixture in Concrete», *J. Mater. Civ. Eng.*, vol. 26, n.º 1, pp. 24-33, 2014, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0000800.
- [63] C. Bilim, «Properties of cement mortars containing clinoptilolite as a supplementary cementitious material», *Constr. Build. Mater.*, vol. 25, n.º 8, pp. 3175-3180, ago. 2011, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.02.006.
- [64] M. Ghasemi, H. Rasekh, J. Berenjian, y H. AzariJafari, «Dealing with workability loss challenge in SCC mixtures incorporating natural pozzolans: A study of natural zeolite and pumice», *Constr. Build. Mater.*, vol. 222, pp. 424-436, oct. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.174.
- [65] NEC-SE-HM, *NEC-SE-HM Estructuras de hormigón armado*. Ecuador: MIDUVI, 2015, p. 122.
- [66] ACI, *ACI 318-19*. USA, 2019, p. 688.
- [67] Zeonatec S.A, «MINEPLUS Absorbente molecular», Guayaquil, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.zeonatec.com/mineplus>.
- [68] Holcim Ecuador, «Holcim Fuerte», Guayaquil/Latacunga, 2015.
- [69] NIST, «Certificate of Analysis SRM 114q». NIST, Gaithersburg, p. 6, 2016.
- [70] Humboldt Mfg. Co., «Specific Gravity Flask (Le Chatelier)», 2022. <https://www.humboldtmfg.com/specific-gravity-flask-le-chatelier.html> (accedido ene. 09, 2022).
- [71] Matest, «Aparato de permeabilidad al aire Blaine», 2017. <https://www.matest.com/en/product/e009-kit-blaine-air-permeability-apparatus>

(accedido ene. 09, 2022).

- [72] Humboldt, «Humboldt Deluxe Water Baths», *Water*. Humboldt Mfg. Co., Elgin, 2022, [En línea]. Disponible en: <https://www.humboldtmg.com/manuals/H-1390-Manual.pdf>.
- [73] INEN 157, *Cemento Hidráulico. Determinación De La Consistencia Normal. Método De Vicat*. Quito, 2009, p. 8.
- [74] Matest, «Aparato Automático Vicat», 2017. <https://www.matest.com/en/product/e044n-vicatronic-automatic-computerized-tropicalized-vicat-recording-apparatus> (accedido ene. 12, 2022).
- [75] S. Rodríguez, «Estudio De Hormigones Impermeables, Según El Origen Local De Materiales Y La Adición De Aditivo Impermeabilizante», Universidad Técnica de Ambato, 2016.
- [76] INEN 196, *Cemento hidráulico. Determinación de la finura mediante el aparato de permeabilidad al aire*. Ecuador: INEN, 2009, p. 18.
- [77] Laboratorios FIC-UNI, «Análisis granulométrico por medio del hidrómetro». Lima, pp. 1-9, 2006.
- [78] AASHTO, *Standard method of test for particle size analysis of soils AAHSTO T88-10*. Washington, 2011, pp. 1-21.
- [79] Vaxasoftware, «Viscosidad dinámica del agua líquida a varias temperaturas». p. 100, 2010, [En línea]. Disponible en: http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/viscoh2o.pdf.
- [80] D. Güngör y S. Özen, «Development and characterization of clinoptilolite-, mordenite-, and analcime-based geopolymers: A comparative study», *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 15, n.º May, p. e00576, dic. 2021, doi: 10.1016/j.cscm.2021.e00576.
- [81] J. L. C. Mustelier, «Granulometría y reacción puzolánica.», *Ponencias y Comun. Present. en el IV Congr. Cuba. Minería (MINERÍA '2011)- IV Conv. Cuba. Ciencias la Tierra*, n.º 1, pp. 1-6, 2011, [En línea]. Disponible en: <http://oa.upm.es/5824/>.
- [82] E. Küçükyıldırım y B. Uzal, «Characteristics of calcined natural zeolites for use in high-performance pozzolan blended cements», *Constr. Build. Mater.*, vol. 73, pp. 229-234, dic. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.09.081.

ANEXOS

A.1. LECTURAS DE PENETRACIÓN DEL VICATRONIC PARA LA PASTA DE CEMENTO

ID.	Penetración (mm)	Tiempo (min)
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
28	40	328.3
29	40	340.3
30	40	352.3
31	40	364.3

**A.2. LECTURAS DE PENETRACIÓN DEL VICATRONIC PARA LA PASTA
CON 10% DE SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR ZEOLITA**

ID.	Penetración (mm)	Tiempo (min)
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
30	40	352.2
31	40	364.2

**A.3. LECTURAS DE PENETRACIÓN DEL VICATRONIC PARA LA PASTA
CON 15% DE SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR ZEOLITA**

ID.	Penetración (mm)	Tiempo (min)
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
33	40	388.52
34	40	400.52

**A.4. LECTURAS DE PENETRACIÓN DEL VICATRONIC PARA LA PASTA
CON 20% DE SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR ZEOLITA**

ID.	Penetración (mm)	Tiempo (min)
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

A.5. ENSAYO DE DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO

DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO				
ORIGEN:	Cantera La Playa-Salcedo			
NORMA:	NTE INEN 856			
CÁLCULO DE LA DENSIDAD REAL				
DATOS	DENOMINACIÓN	UNIDAD	VALOR	
M1	Masa del picnómetro	g	163.00	
M2	Masa del picnómetro+ muestra SSS	g	543.60	
M3	Masa del picnómetro+ muestra SSS+ agua	g	895.70	
M4=M3-M2	Masa agua añadida	g	352.10	
M5	Masa del picnómetro + 500 cm ³ de agua	g	661.10	
M6=M5-M1	Masa de 500 cm ³ de agua	g	498.10	
DA=M6/500cm ³	Densidad del agua	g	1.00	
M7=M6-M4	Masa del agua desalojada por la muestra	g	146.00	
Msss=M2-M1	Masa del agregado	g	380.60	
Vsss=M7/DA	Volumen del agua desalojada	cm ³	146.56	
DRA=Msss/Vsss	Densidad real del agregado fino	g/cm ³	2.597	
CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN				
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR	
M7	Masa del recipiente	g	31.90	30.60
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	g	155.00	148.30
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	g	123.10	117.70
M10	Masa del recipiente + muestra seca	g	152.90	146.00
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	g	121.00	115.40
CA=((M9-M11)/M11)*100	Capacidad absorción	%	1.74	1.99
P2=(CA1+CA2) /2	Capacidad absorción promedio	%	1.86	

A.6. ENSAYO DE DENSIDAD REAL Y CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO

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

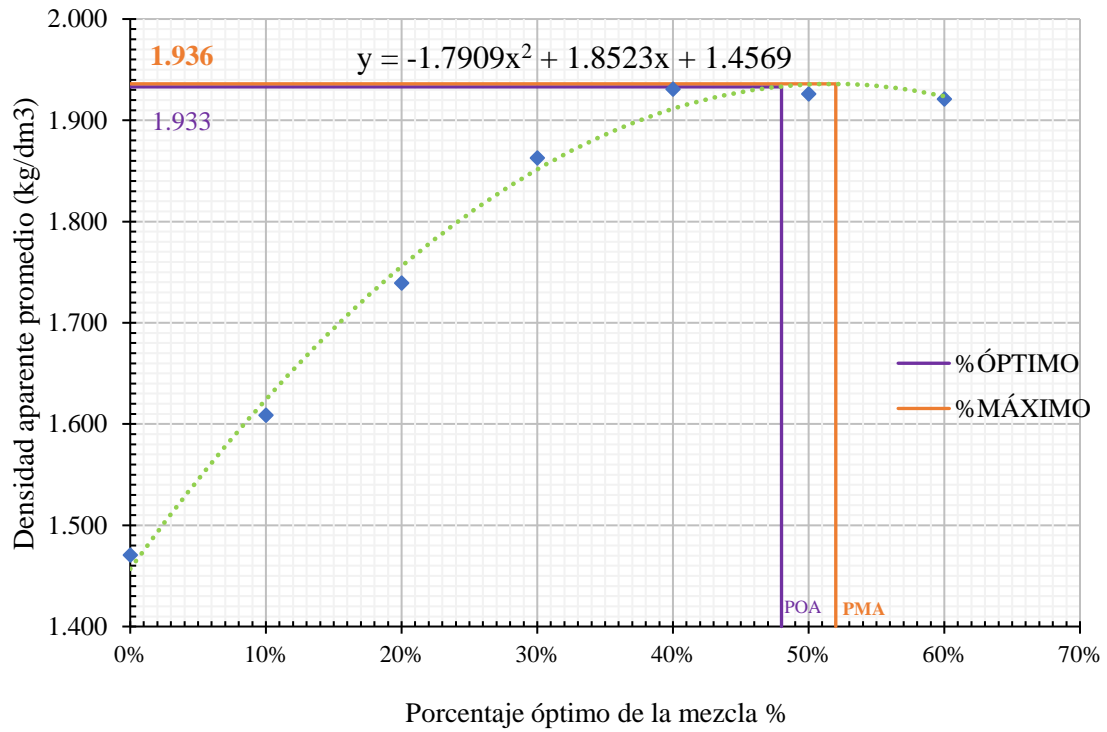
**A.7. ENSAYOS DE DENSIDAD APARENTE Y DENSIDAD APARENTE
COMPACTADA DE LOS AGREGADOS**

<i>DENSIDAD APARENTE COMPACTADA DEL AGREGADO FINO Y GRUESO</i>				
ORIGEN:	Cantera La Playa-Salcedo			
MASA RECIPIENTE (kg)	9.70			
VOLUMEN RECIPIENTE (dm ³)	20.64			
NORMA:	NTE INEN 858:2010			
AGREGADO	Agregado + Recipiente (kg)	Agregado (kg)	Densidad aparente (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	
<i>DENSIDAD APARENTE SUELTA DEL AGREGADO FINO Y GRUESO</i>				
ORIGEN:	Cantera La Playa-Salcedo			
MASA RECIPIENTE (kg)	9.70			
VOLUMEN RECIPIENTE (dm ³)	20.64			
NORMA:	NTE INEN 858:2010			
AGREGADO	Agregado + Recipiente (kg)	Agregado (kg)	Densidad aparente (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	

A.8. ENSAYO DE DENSIDAD APARENTE COMPACTADA DE LA MEZCLA

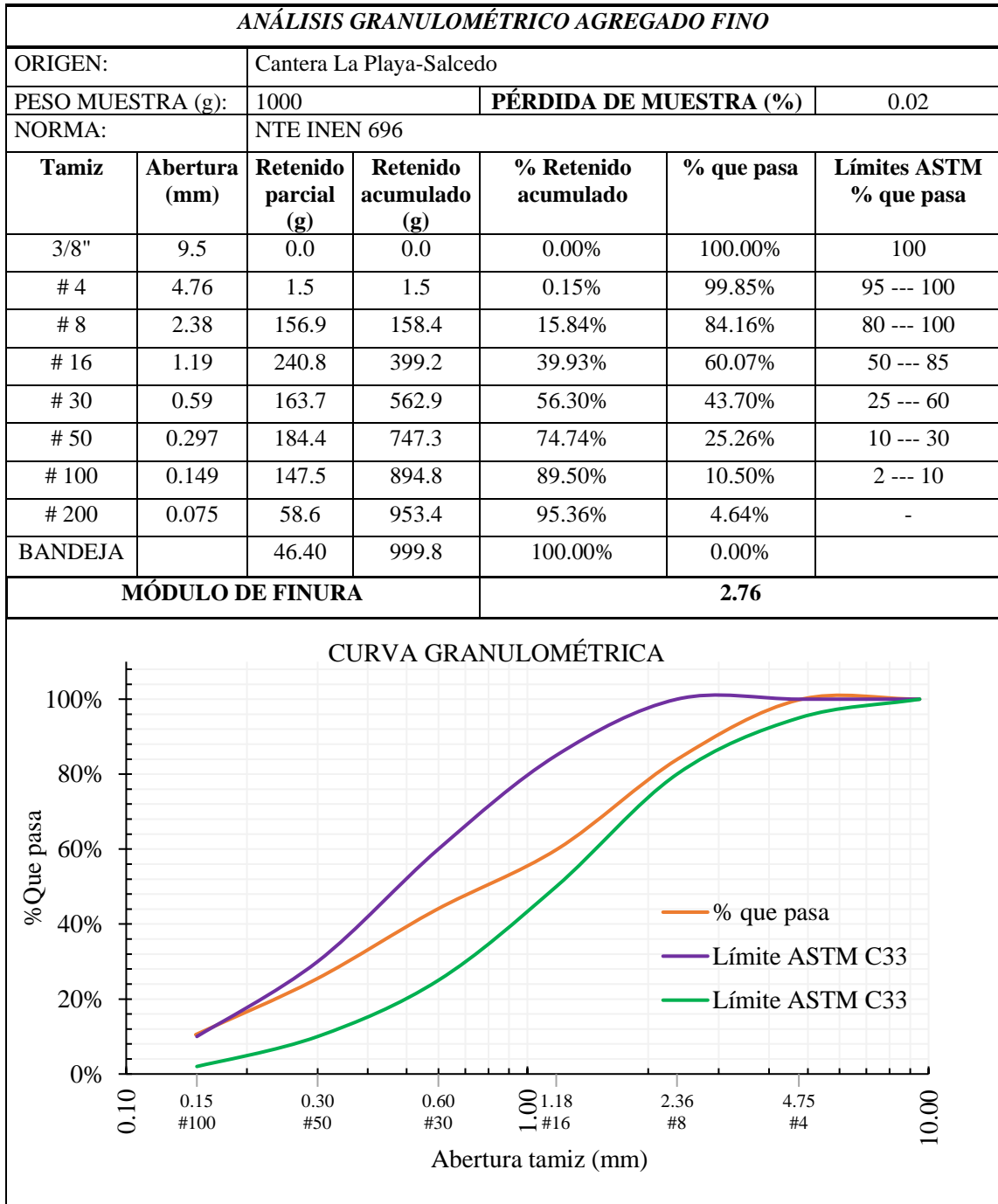
<i>DENSIDAD APARENTE COMPACTADA DE LA MEZCLA</i>								
ORIGEN:			Cantera La Playa-Salcedo					
MASA RECIPIENTE (kg)			9.70					
VOLUMEN RECIPIENTE (dm ³)			20.64					
NORMA:			NTE INEN 858:2010					
% Mezcla		Cantidad (kg)		Fino añadido (kg)	Agregado + Recipiente (kg)	Agregado (kg)	Peso unitario mezcla (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	

DENSIDAD APARENTE PROMEDIO VS. PORCENTAJE ÓPTIMO DE LA MEZCLA



Porcentaje máximo de agregado fino (%)	52%
Porcentaje máximo de agregado grueso (%)	48%
Porcentaje óptimo de agregado fino (%)	48%
Porcentaje óptimo de agregado grueso (%)	52%
Densidad aparente máximo (g/cm³)	1.936
Densidad aparente óptima (g/cm³)	1.933

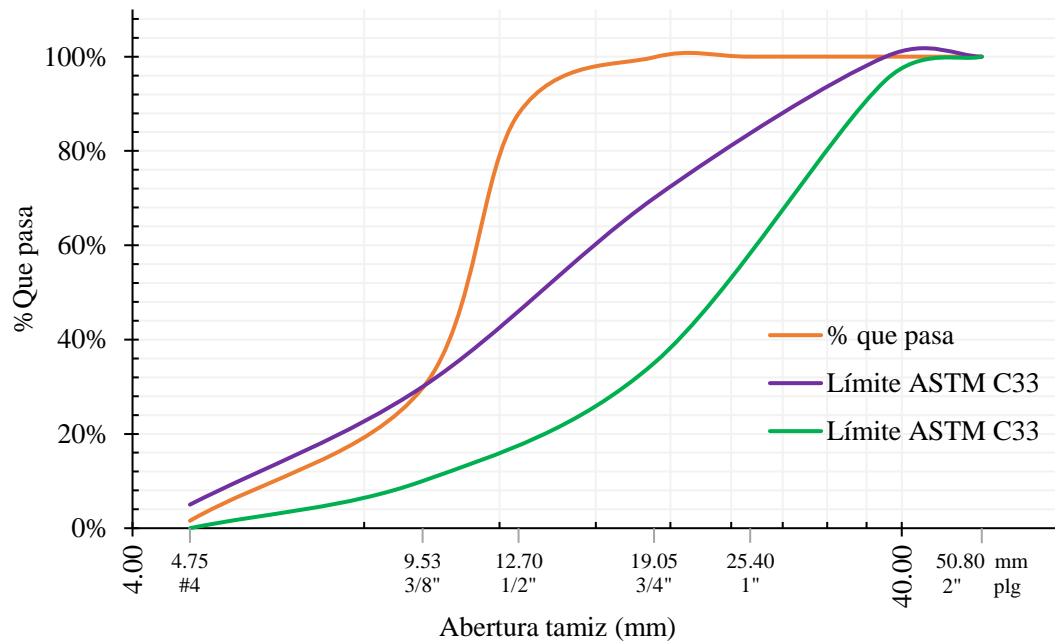
A.9. ENSAYOS GRANULOMÉTRICOS DE LOS AGREGADOS



ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO AGREGADO GRUESO

ORIGEN:		Cantera La Playa-Salcedo				
PESO MUESTRA (gr):		10000	PÉRDIDA DE MUESTRA (%)		0.26	
NORMA:		NTE INEN 696				
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	% Retenido acumulado	% que pasa	Límites ASTM % que pasa
2"	50.80	0	0	0.00%	100.00%	100
1 1/2"	38.10	0	0	0.00%	100.00%	95 --- 100
1"	25.40	0	0	0.00%	100.00%	-
3/4"	19.05	12	12	0.12%	99.88%	35 --- 70
1/2"	12.70	1194	1206.00	12.09%	87.91%	-
3/8"	9.53	5802.7	7008.70	70.27%	29.73%	10 --- 30
# 4	4.75	2808.2	9816.90	98.42%	1.58%	0 --- 5
BANDEJA		157.4	9974.30	100.00%	0.00%	
TAMAÑO NOMINAL MÁXIMO			1/2"			

CURVA GRANULOMÉTRICA









A.10. ENSAYO DE CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

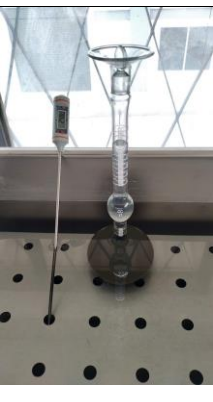

CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS				
ORIGEN:	Cantera La Playa-Salcedo			
NORMA:	ASTM D2216			
CÁLCULO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL AGREGADO FINO				
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR	
M7	Masa del recipiente	g	32.60	32.30
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	g	154.60	126.70
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	g	122.00	94.40
M10	Masa del recipiente + muestra seca	g	153.40	125.80
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	g	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 AGREGADO GRUESO				
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	VALOR	
M7	Masa del recipiente	g	31.90	30.10
M8	Masa del recipiente + muestra SSS	g	152.20	159.60
M9=M8-M7	Masa de la muestra SSS	g	120.30	129.50
M10	Masa del recipiente + muestra seca	g	151.50	158.60
M11=M10-M7	Masa de la muestra seca	g	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	

A.11. MATERIALES



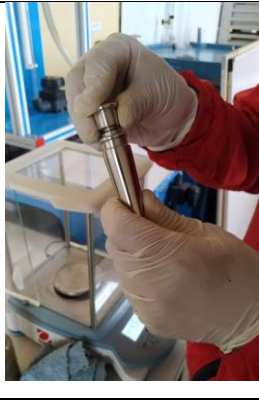

	
<p>Zeolita natural comercial (ZZ) fabricado por Zeonatec S. A</p>	<p>Cemento para construcción general Tipo GU (Holcim Fuerte)</p>
	
<p>Agregado gruesos y finos de la mina La Playa, Salcedo, provincia de Cotopaxi</p>	<p>Grava triturada de 3/4" utilizada como agregado grueso</p>
	
<p>Polvo de roca utilizado como agregado fino</p>	<p>Aditivo plastificante (Sikament® N-100)</p>

A.12. PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE DENSIDAD

	
<p>Peso de 64g de cemento en una balanza de analítica de precisión de 0.0001g</p>	<p>Peso del frasco con gasolina, M_a</p>
	
<p>Frasco sumergido en baño maría antes de la lectura inicial del volumen</p>	<p>Lectura del volumen inicial por debajo del menisco, V_o</p>
	
<p>Extracción del aire al girar en posición inclinada</p>	<p>Peso del frasco con muestra y gasolina, M_t</p>

	
<p>Frasco sumergido antes de la lectura final del volumen</p>	<p>Lectura del volumen final por debajo del menisco, V_f</p>

A.13. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DEL APARATO DE PERMEABILIDAD AL AIRE

	
<p>Peso de la celda y mercurio, W_A</p>	<p>Peso de 2.8g de cemento normalizado</p>
	
<p>Compactación de la camada</p>	<p>Peso de la celda de permeabilidad con la camada y mercurio, W_B</p>

A.14. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE PERMEABILIDAD CON EL APARATO BLAINE







	
<p>Peso de la muestra de ensayo (cemento normalizado)</p>	<p>Compactación de la camada mediante la presión del émbolo</p>
	
<p>Recubrimiento con vaselina a las paredes de la celda</p>	<p>Ajuste hermético entre la celda y el acople del manómetro</p>
	
<p>Evacuación del aire en el manómetro al comprimir la bombilla</p>	<p>Cierre de la válvula del manómetro</p>





	
<p>Medición del tiempo de caída del líquido manométrico entre marcas intermedias</p>	<p>*Aparato Blaine de permeabilidad al aire fabricado por Matest</p>
	
<p>*Ejemplo de camada no compactada</p>	<p>*Camada compactada al finalizar el ensayo</p>

A.15. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR HIDRÓMETRO

	
<p>Preparación de 1 galón de agente dispersante</p>	<p>Colocación de 60g de zeolita en 125mL de agente dispersante durante 24 horas</p>
	
<p>Control de la temperatura de solución a 20°C en el baño maría</p>	<p>Introducción del hidrómetro 152-H en la probeta de 1000mL para tomar la lectura</p>
	
<p>Medida de la temperatura en la solución después de cada lectura del hidrómetro</p>	<p>Peso de la solución antes y después secar al horno</p>

A.16. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE CONSISTENCIA NORMAL Y TIEMPO DE FRAGUADO

	
<p>Peso del cemento y zeolita en el caso del porcentaje de sustitución</p>	<p>Medición de la cantidad de agua para alcanzar la consistencia</p>
	
<p>Mezclado por 30s a velocidad lenta, 15s de limpieza y 60s velocidad media</p>	<p>Formación y lanzamiento de la bola de mano a mano, 6 veces</p>
	
<p>Introducción de la bola en el anillo cónico del diámetro mayor a menor</p>	<p>Asentamiento del anillo sobre la placa de vidrio después del alisamiento</p>

	
<p>Lectura de la penetración de la varilla de 10mm en el aparato de Vicat manual</p>	<p>Preparación del espécimen de tiempo de fraguado al comprobar la consistencia</p>
	
<p>Ensayo de tiempo de fraguado en el aparato automatizado de Vicat</p>	<p>*Especímenes de las pastas ensayadas con la configuración de la ASTM C 191</p>

**A.17. PROCEDIMIENTO DE ELABORACIÓN, MEDICIÓN DEL
ASENTAMIENTO Y CURADO DE ESPECÍMENES PARA ENSAYO**

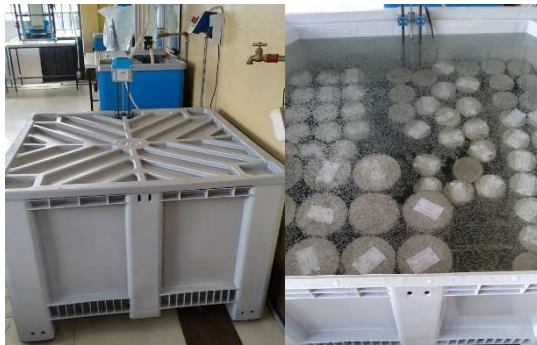
	
<p>Peso y preparación de los equipos para la elaboración de la mezcla de hormigón</p>	<p>Colocación de los componentes del hormigón</p>
	
<p>Compactación del hormigón previo a la medición del asentamiento</p>	<p>Medición del asentamiento en el cono de Abrams</p>
	
<p>Colocación y compactación del hormigón en los moldes cilíndricos</p>	<p>Registro de la masa del hormigón en estado fresco</p>



Identificación y acabado de los especímenes


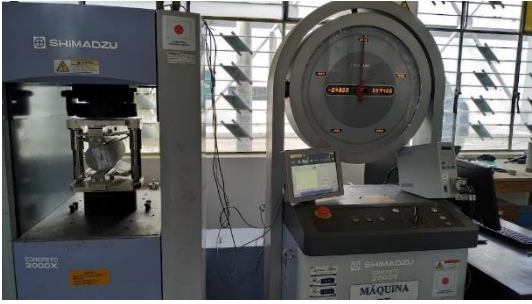

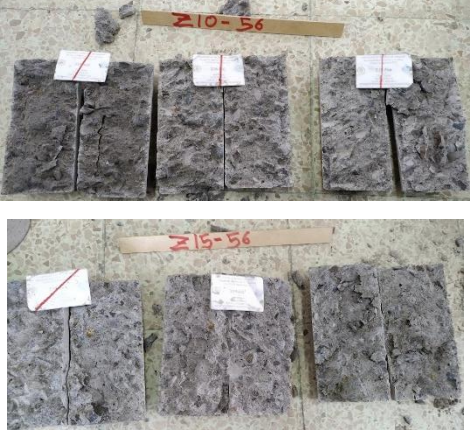


Desenfofrado de los especímenes después de 24 horas



Curado de los especímenes en el tanque de almacenamiento de agua a $22\pm 2^{\circ}\text{C}$





A.18. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE TRACCIÓN INDIRECTA

	
<p>Marcación, colocación y centrado del espécimen en el dispositivo de acero</p>	<p>Ejecución del ensayo en la máquina universal Shimadzu Concrete 2000X</p>
	
<p>*Especímen ensayado a tracción indirecta</p>	<p>*Especímenes ensayados a la edad de 56 días del hormigón Z10 y Z15</p>

A.19. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN

	
<p>Cepillado de la superficie en el extremo no acabado del espécimen</p>	<p>Montaje de los especímenes en la máquina de penetración de agua bajo presión</p>
	
<p>Aplicación de agua a presión durante 72 ± 2 horas de 500 ± 50 kPa (72.5 ± 7.25 psi)</p>	<p>Ensayo de tracción indirecta al espécimen después del desmontaje de la máquina</p>
	
<p>Marcado de la coloración producida por la penetración de agua (Hormigón Z10)</p>	<p>Medición de la penetración de agua (Hormigón CEM)</p>

A.20. ESPECÍMENES ENSAYADOS MEDIANTE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN

	
<p>Especímenes del hormigón de control</p>	<p>Especímenes del hormigón con el 10% de sustitución</p>
	
<p>Especímenes del hormigón con el 15% de sustitución</p>	<p>Especímenes del hormigón con 20% de sustitución</p>