



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:

**“ESTUDIO DE LA CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y
MECÁNICAS DE ALUMINOSILICATO DE LA CORDILLERA CHONGÓN-
COLONCHE COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO”**

AUTOR: Alvaro Daniel Viteri Acosta

TUTORA: Ing. MSc. Maritza Elizabeth Ureña Aguirre

AMBATO - ECUADOR

Septiembre – 2022


CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutora del Trabajo experimental, previo a la obtención del Título de Ingeniero Civil, con el tema: **“ESTUDIO DE LA CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE ALUMINOSILICATO DE LA CORDILLERA CHONGÓN-COLONCHE COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO”**, elaborado por el Sr. **Alvaro Daniel Viteri Acosta**, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 0502759533, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

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

Ambato, Septiembre 2022



Ing. MSc. Maritza Elizabeth Ureña Aguirre
TUTORA

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, **Alvaro Daniel Viteri Acosta**, con C.I. 0502759533 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Trabajo Experimental con el tema **“ESTUDIO DE LA CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE ALUMINOSILICATO DE LA CORDILLERA CHONGÓN-COLONCHE COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO”**, 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, Septiembre 2022



Alvaro Daniel Viteri Acosta

C.I. 0502759533

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

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

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

Ambato, Septiembre 2022



Alvaro Daniel Viteri Acosta

C.I. 0502759533

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

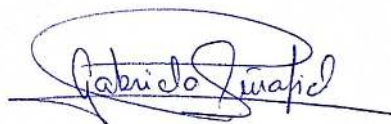
Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por el estudiante Alvaro Daniel Viteri Acosta, de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **“ESTUDIO DE LA CORRELACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE ALUMINOSILICATO DE LA CORDILLERA CHONGÓN-COLONCHE COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO”**.

Ambato, Septiembre 2022

Para constancia firman:



Ing. Mg. Carlos Patricio Navarro Peñaherrera
Miembro Calificador



Ing. Mg. Gabriela Lourdes Peñafiel Valla
Miembro Calificador

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi madre María, la persona que estuvo apoyándome y motivándome incondicionalmente en todo momento de esta etapa de mi vida, con su amor y su paciencia supo ser de gran ayuda en los momentos más difíciles no dejándome solo en ningún momento.

A mi padre César, quien con sus consejos y su ejemplo me brindo los valores necesarios para seguir adelante, confiando siempre en mí y brindándome la seguridad para cumplir esta meta.

A mis hermanas que con su aliento me impulsaron a no decaer en ningún momento.

A todas las personas que creyeron en mí y me brindaron su apoyo en todo este tiempo.

Alvaro Viteri.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento de todo corazón a Dios quien me dio la sabiduría e inteligencia para cumplir esta meta.

A mis padres quienes fueron los pilares para cumplir este logro al sacrificarse día a día para que mis sueños se hagan realidad.

A toda mi familia al brindarme apoyo constante en este trayecto.

A mis amigos y compañeros que con su buena voluntad supimos darnos la mano en los momentos felices y en los más difíciles, apoyándonos y motivándonos día a día en todo el camino compartido.

A mis tutoras PhD. Diana Coello y la Ing. Maritza Ureña, quienes con mucha paciencia y constancia supieron guiarme en este último trayecto de mi carrera compartiendo su experiencia y conocimiento para la elaboración de esta investigación.

A la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica por ser la facultad que me abrió las puertas día tras día para adquirir tan importantes conocimientos.

A los técnicos y ayudantes de los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, por el apoyo brindado en la parte experimental de este trabajo.

A la Dirección de Investigación y Desarrollo por permitirme ser partícipe de tan notable proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
CAPÍTULO I.....	1
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	1
1.1.1. ANTECEDENTES	1
1.1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.1.3. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1.4. HIPÓTESIS.....	43
1.2. OBJETIVOS.....	44
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	44
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	44

CAPÍTULO II	45
2. MATERIALES Y METODOLOGÍA	45
2.1. DEFINICIÓN DE VARIABLES	45
2.2. MATERIALES.....	47
2.2.1. ESPECÍMENES DE HORMIGÓN	47
2.3. EQUIPOS	47
2.3.1. TANQUE DE CURADO.....	47
2.3.2. MÁQUINA PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN	48
2.3.3. BOMBA MANUAL PARA PRUEBAS HIDROSTÁTICAS	49
2.3.4. SOFTWARE EXCEL	50
2.4. METODOLOGÍA	51
2.4.1. TIPOS DE INVESTIGACIÓN	51
2.4.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN	52
2.4.3. RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA	53
2.4.4. ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN... ..	54
2.4.5. INTERPOLACIÓN DE DATOS.....	55
CAPÍTULO III	57
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	57
3.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
3.1.1. DENSIDAD	57
3.1.2. FINURA.....	61
3.1.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB).....	65
3.1.4. ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS)	72
3.1.5. TIEMPO DE FRAGUADO DE PASTA CON MUESTRA ZZ..	75
3.1.6. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN CON MUESTRA ZZ EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO	78

3.1.7. PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN CON ADICIÓN DE MUESTRA ZZ.....	86
3.2. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS	87
CAPÍTULO IV	88
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	88
4.1. CONCLUSIONES.....	88
4.2. RECOMENDACIONES	91
BIBLIOGRAFÍA	92
ANEXOS.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Componentes químicos del cemento Portland.	7
Tabla 2. Compuestos químicos principales del cemento Portland.....	7
Tabla 3. Compuestos químicos secundarios del cemento Portland.	8
Tabla 4. Fórmula común y propiedades físicas de zeolitas más importantes[22], [43], [44].	16
Tabla 5. Datos recopilados.	45
Tabla 6. Características Shimadzu 2000X.	48
Tabla 7. Características bomba HRAL 104.	50
Tabla 8. Resumen datos densidad real.	57
Tabla 9. Resumen de datos de Finura.	61
Tabla 10. Resumen datos microscopía (MEB).	66
Tabla 11. Porcentaje de elementos químicos en las muestras.....	72
Tabla 12. Porcentaje de óxidos en las muestras.	74
Tabla 13. Tiempo de fraguado.	76
Tabla 14. Propiedades del hormigón.....	79
Tabla 15. Penetración de agua bajo presión.....	86
Tabla 16. Fotografías ensayo.	100
Tabla 17. Fotografías ensayo.	102

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de elaboración del cemento[28].	6
Figura 2. Cemento Holcim Fuerte Tipo GU[33].	10
Figura 3. Puzolanas naturales[36].	11
Figura 4. Geología de la Cordillera Chongón-Colonche[37].	12
Figura 5. Cordilleras costeras del Ecuador y su altitud[38].	13
Figura 6. Unidades estructurales básicas de las zeolitas. A) Tetraedro con un átomo de Si (círculo lleno) en el centro y átomos de oxígeno en los vértices. B) Tetraedro con átomo de Al sustituyendo el Si y unido a un catión monovalente para compensar la diferencia de carga entre el Si y Al. C) Átomo Palente para balancear las cargas entre el Al y el Si en una cadena múltiple de tetraedros[40].	14
Figura 7. Cronología estudio de las zeolitas[8], [9], [22].	17
Figura 8. Agregados finos y gruesos[48].	18
Figura 9. Picnómetro 500ml[55].	23
Figura 10. Procedimiento densidad por el método del picnómetro.	23
Figura 11. Frasco Le Chatelier[54].	24
Figura 12. Procedimiento de la determinación de finura por el método de Tamizado seco.	25
Figura 13. Aparato de Blaine y sus partes.	27
Figura 14. Equipos usados en el ensayo[61].	32
Figura 15. Hidrómetro 152-H[62].	33
Figura 16. Aparato de aguja de Vicat manual y sus partes[65].	35
Figura 17. Esquema de un equipo MEB[68].	37
Figura 18. Secuencia del proceso de formación de la imagen[68].	38
Figura 19. Espectro de composición química de muestra de zeolita natural[70].	39
Figura 20. Esquema resistencia a compresión[72].	40
Figura 21. Esquema tracción indirecta.	41
Figura 22. Ensayo de penetración de agua bajo presión[75].	41
Figura 23. Especímenes de hormigón.	47
Figura 24. Tanque de curado.	48
Figura 25. Máquina de compresión.	49

Figura 26. Herramienta para ensayos de compresión diametral.	49
Figura 27. Bomba HRAL 104.	50
Figura 28. Símbolo software Excel.	50
Figura 29. Proceso metodológico aplicado.	52
Figura 30. Diagrama de barras resultados densidad real.	60
Figura 31. Diagrama de barras Finura método tamizado seco.	62
Figura 32. Diagrama de barras superficie específica del cemento Tipo GU y aluminosilicato ZZ.	64
Figura 33. Consistencia normal.	77
Figura 34. Tiempo de Fraguado inicial y final.	77
Figura 35. Ensayo a compresión.	81
Figura 36. Compresión Z10%.	82
Figura 37. Compresión Z15%.	82
Figura 38. Compresión Z20%.	83
Figura 39. Resistencia a la tracción indirecta.	84
Figura 40. Resistencia a tracción indirecta Z10%.	84
Figura 41. Resistencia a tracción Z15%.	85
Figura 42. Resistencia a tracción Z20%.	85

RESUMEN

La industria del cemento produce toneladas de dióxido de carbono a la atmósfera siendo una de las industrias que genera más contaminación en el planeta, actualmente se ha estudiado materiales cementantes suplementarios (MCS) que ayuden a disminuir esta problemática, uno son los aluminosilicatos conocidos como zeolitas naturales.

Se realizó la recopilación de datos de trabajos previos realizados por autores de la institución de caracterización de propiedades físicas como densidad, finura, superficie específica y también de propiedades morfológicas y químicas como microscopía, determinación de elementos y óxidos presentes en el cemento tipo GU e IP, y muestras de aluminosilicatos de la cordillera Chongón-Colonche las cuales son ZA, ZZ, ZI, ZV, ZX, ZCr, ZC, ZR y ZCa, también se realizó la recopilación de datos a los 7, 14, 28, y 56 días y se ensayó a los 267 días las propiedades mecánicas como resistencia a compresión, tracción indirecta y penetración de agua bajo presión de especímenes de hormigón con sustitución parcial de aluminosilicato ZZ en porcentajes de 10, 15 y 20 por ciento, para la elaboración de tablas dinámicas y gráficas que sirven para un mejor análisis de las propiedades.

Se determinó que la sustitución parcial adecuada de aluminosilicato ZZ es 15 por ciento para hormigones que no requieran altas resistencias debido que a los 28 días la compresión alcanza los 18.6 MPa y para hormigones que necesiten impermeabilidad ya que a mayor sustitución la profundidad de penetración de agua va disminuyendo, a mayor lapso de tiempo las propiedades mecánicas van mejorando.

Palabras Clave: Cemento, Aluminosilicatos, Hormigón ecológico, cementantes suplementarios, Resistencia a compresión, Tracción Indirecta, Penetración de agua.

ABSTRACT

The cement industry is responsible for producing tons of carbon dioxide into the atmosphere and is one of the industries that generates the most pollution on the planet. Currently, supplementary cementitious materials (SCM) have been studied to help reduce this problem, one of them are aluminosilicates, better known as natural zeolites.

In this work, data was compiled from previous works done by authors of the institution of characterization of physical properties such as density, fineness, specific surface and also morphological and chemical properties such as microscopy, determination of elements and oxides present in GU and IP cement, and some samples of the Chongón-Colonche mountain range aluminosilicates which are ZA, ZZ, ZI, ZV, ZX, ZCr, ZC, ZR and ZCa. Data was also collected at 7, 14, 28 and 56 days and mechanical properties such as compressive strength, indirect tensile strength and water penetration under pressure of concrete specimens with partial substitution of ZZ aluminosilicate in percentages of 10, 15 and 20 per cent were tested at 267 days, for the preparation of dynamic tables and graphs that serve us for a better analysis of the properties.

The best aluminosilicate ZZ partial substitution is 15 per cent for concretes that don't require high strengths because at 28 days the compressive strength reaches 18.6 MPa and for concretes that need impermeability because at more aluminosilicate substitution the depth of water penetration decreases, at more time lapse mechanical properties are better.

Keywords: Cement, Aluminosilicates, Ecological concrete, Supplementary cementitious materials, Compression strength, Indirect tensile, Water penetration.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1.1. ANTECEDENTES

El cemento portland fue patentado en 1824 por Joseph Aspdin después de mezclar proporciones de piedra caliza pulverizada y arcilla, y calcinar en un horno; generando un cemento clínker de alta resistencia y resistente al agua[1]. La producción y el uso mundial del cemento portland ha crecido constantemente desde mediados del siglo XIX y ahora se producen 4400 millones de toneladas al año[2].

Además, 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 (CO_2), el 60-70% asociado a la descomposición química del carbonato de calcio (CaCO_3) 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[3], [4].

La producción del cemento emite hasta un 8% de las emisiones globales de CO_2 [5]. 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[4]. Además, producir una tonelada de cemento genera una media de 0.6 toneladas de CO_2 [6]. De hecho, la industria del cemento entre los esfuerzos para reducir las emisiones de CO_2 , 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[6], [7].

Gran parte del consumo de cemento involucra al concreto, el material más utilizado en el mundo después del agua. Como se indica en[6], [7] 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.

La zeolita, es una alternativa técnica, ambiental y económica, como un material cementante suplementario MCS (supplementary cementitious material, SCM), al ser

un material puzolánico de origen natural de bajo costo, con altos contenido de reactivos de sílice (SiO_2) y alúmina (Al_2O_3)[8].

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[9], [10].

La producción minera mundial de esta clase de minerales en el 2021 fue de 1.6 millones de toneladas[11]. En Ecuador, la producción reportada por la Agencia de Regulación y Control Minero, ARCOM, 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 industria[12]. Las principales aplicaciones en el Ecuador están enfocadas en la agricultura y tratamiento de aguas residuales.

Autores de la Universidad Técnica de Ambato entre ellos Salcedo. V, Fernández. R, Ramos. R, Maldonado. D y Yanchaguano. D, llevaron estudios acerca de la caracterización física, química y morfológica de varias muestras de aluminosilicatos provenientes de la Cordillera Chongón-Colonche comparándolo con dos tipos de cemento portland. También Panimbosa. R y Rodriguez. G, analizaron la sustitución de aluminosilicato ZZ de la misma procedencia mencionada anteriormente por cemento portland en varios porcentajes y la influencia de estos materiales en propiedades mecánicas como resistencia a compresión, a tracción indirecta y también ensayos de permeabilidad.

1.1.2. JUSTIFICACIÓN

La producción de ciertas materias primas para el campo de la construcción implica un impacto ambiental, e incorporar procesos sostenibles en la industria es un reto que se busca alcanzar, el uso eficiente de los materiales en estos tiempos debería ser una prioridad para disminuir la contaminación que estos procesos causan en nuestro entorno. Uno de los materiales más usados en el campo de la construcción en el mundo es el cemento. La producción de cemento está entre las mayores fuentes de

emisión de gases de efecto invernadero, aproximadamente el 5% de las emisiones globales de CO₂ en el año 2012[13], [14], cantidad que aumento al 7% para el año 2019[15] cifras que generan problemas, ya que en la elaboración del clinker se exponen materiales a altas temperaturas lo que produce la emisión de estos gases al medio ambiente[16].

Existen estudios de materiales alternativos que por su baja tasa de contaminación y por ser renovables han llamado la atención de investigadores a nivel mundial, en países como México, Cuba y España se han llevado estudios de muestras de estos materiales caracterizándolos física y químicamente[17], también en países iberoamericanos entre ellos Ecuador destacándose como uno de los primeros países en usar los aluminosilicatos naturales en la elaboración de cementos puzolánicos[9].

El hormigón es uno de los elementos esenciales en el campo de la construcción actualmente, por lo tanto, sus propiedades juegan un papel importante para emplearlo en diferentes áreas. Las propiedades del hormigón en la gran materia de los casos dependen del tipo de cemento con el que se elabora, que es el principal conglomerante hidráulico que se usa hoy en día, pero con varios avances científicos y tecnológicos de la actualidad se buscan materiales cementantes suplementarios (SCM por sus siglas en inglés) a este conglomerante y se conoce que la sustitución parcial del cemento por puzolanas da lugar a un aumento de ciertas propiedades del hormigón, y en efecto también la vida útil de las estructuras[18].

Por esta razón se han llevado a cabo estudios de la influencia de diferentes tipos de zeolitas que al sustituir parcialmente por el cemento nos ayuden a mejorar las propiedades físicas y mecánicas del hormigón, el aumento de estas propiedades depende de varios factores entre ellos el tipo de MCS que se utiliza, ya que estas presentan propiedades específicas. Varios estudios han reportado el uso de zeolitas naturales como un MCS que ha demostrado producir hormigón con muchos beneficios en las propiedades, medio ambiente y económicamente[17], [19].

La zeolita que contiene SiO₂ reactivo y Al₂O₃ reacciona químicamente con el hidróxido de calcio y se convierte en hidrosilicatos de calcio[19]. Esta composición es la que favorece para sustituir parcialmente al cemento Portland y se lo ha verificado mediante diferentes tipos de ensayos, además que se usa en muchas partes del mundo debido a su costo económico y su accesibilidad en la zona[18].

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]. 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[20], [21]. También, la aplicación en la industria de la construcción, específicamente en la producción de cemento y hormigón es ampliamente investigada en países desarrollados. La ventaja excepcional de este material, la relacionan a una alternativa eco-amigable, segura y sostenible, además de sus propiedades fisicoquímicas[21].

En Ecuador hay gran presencia de zeolitas en la zona costera, al oeste de la ciudad de Guayaquil. Las rocas con zeolita están en la formación de Cayo que forma parte de la cordillera Chongón-Colonche que es la que posee gran potencialidad y diversos tipos de aluminosilicatos[10], [22]. Se han realizado varias investigaciones en el país y se tiene información para poder relacionar estos datos, recopilarlos y analizarlos.

Debido a las ventajas de la incorporación de zeolitas en el concreto en suplantación parcial del cemento Portland, es factible reforzar los estudios de la incorporación de este mineral en el concreto tradicional para disminuir el uso del cemento que es el que ocasiona gran emisión de gases en su producción reduciendo el impacto ambiental del mismo e innovando con materiales amigables con el medio ambiente y sostenibles en la construcción.

1.1.3. MARCO TEÓRICO

1.1.3.1.Cemento Portland

La historia del cemento en el área de la construcción empieza en Egipto proseguido por griegos y romanos, luego Aspdin patentó el cemento Portland en 1824. El cemento Portland es un polvo muy fino básicamente compuesto en mayoría por silicatos de calcio y en menor proporción por aluminatos de calcio[23], es bastante usado en el campo de la construcción por su fraguado rápido adquiere resistencia y durabilidad. El cemento Portland es un conglomerante hidráulico que se da por la molienda del clínker que son silicatos de calcio hidráulicos[24]. El clínker es una mezcla de calizas (CaCO_3) y arcillas ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) que pasan por un

proceso de cambio de temperatura que forma tejidos cristalinos de tipo Si-O-Si-O y del tipo O-Al-O-Si, y estos encierran diferentes tipos de iones característica que tienen en común con las zeolitas, el óxido de hierro (Fe_2O_3) que se encuentran en las arcillas forman parte de este proceso, suplantando al aluminio y ligándose al silicio a través del oxígeno forman O-Si-O-Fe-O-[25]. El cemento Portland es el conglomerante hidráulico más usado en el mundo, al ser hidratado y mezclado con otros agregados y materiales por su capacidad de ligarlos da lugar a morteros y concretos[23].

1.1.3.1.1. Materiales del cemento Portland

A continuación tenemos los materiales que conforman el cemento Portland como menciona Torres[26]:

- **Materiales calcáreos:** Minerales que poseen carbonato de calcio (CaCO_3) entre un 60% y 80%, y no más de 1.5% de magnesio, por lo general se usa la caliza.
- **Arcillas:** Poseen Silicio entre el 60% y 70%. Brindan dióxido de silicio o sílice (SiO_2) y el óxido de aluminio o alúmina (Al_2O_3), pueden ser pizarras o arcillas en general.
- **Minerales de fierro:** Tienen el óxido férrico (Fe_2O_3) en proporciones muy bajas.
- **Yeso:** Brinda sulfato de calcio.

1.1.3.1.2. Elaboración del cemento Portland

La elaboración del cemento tiene una serie de pasos como detalla la fábrica Holcim Ecuador[27] a continuación:

1. Se debe extraer la caliza desde la fuente, ya que es el ingrediente principal por su contenido de carbonato de calcio.
2. Ya extraída la caliza se la transporta al paso de trituración para disminuir el tamaño de esta a piedras que van desde 100 a 100 centímetros y después de eso se las coloca en un montón para la pre-homogeneización, lo que permite reducir variaciones de componentes químicos de las materias primas.

3. Cuando la caliza es molida con arcilla, arena ferrosa y fluorita creando un polvo fino llamada harina o crudo.
4. Luego el curdo se deposita en cilindros de concreto, conocidos como silos de homogeneización y almacenamiento.
5. Esta harina cruda se extrae del sitio de almacenamiento y se envía a la parte de arriba de un pre-calentador para pasar por distintas etapas a través de los ciclones a temperatura de 120°C hasta 880°C en cuestión de segundos.
6. Ya en el horno se calienta hasta 1450°C. Por este proceso el material tiene un cambio físico y químico dando como resultado el clínker, principal componente del cemento este le da sus propiedades hidráulicas.
7. Obtenido el clínker, se disminuye la temperatura en la enfriadora y luego guardados en silos.
8. Se da la molienda del clínker con otros materiales como yeso y puzolanas.
9. Por último, ya se tiene el cemento, una vez que salga de la molienda se almacena para ser enviados al granel o por sacos.

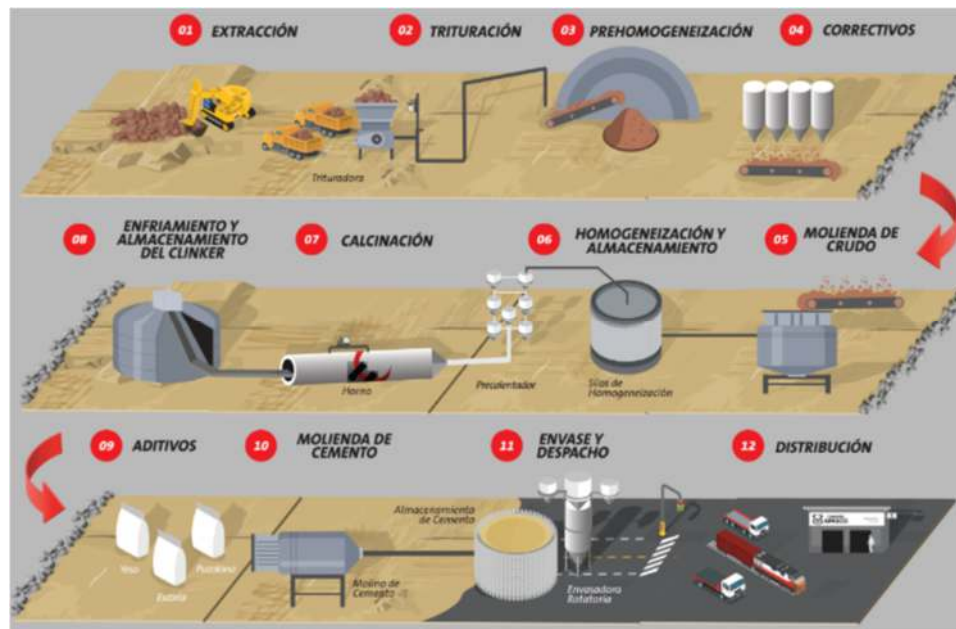


Figura 1. Proceso de elaboración del cemento[28].

1.1.3.1.3. Composición química del cemento Portland

1.1.3.1.3.1. Componentes químicos

Los componentes del cemento se expresan por la cantidad de óxidos. Los principales son la cal, sílice, alúmina y el óxido férrico, estos van del 95% al 97% y otros con cantidades más bajas como lo señala Torre[26] en la Tabla 1.

Tabla 1. Componentes químicos del cemento Portland.

Óxido Componente	Porcentaje Típico
<i>CaO</i>	58% - 67%
<i>SiO₂</i>	16% - 26%
<i>Al₂O₃</i>	4% - 8%
<i>Fe₂O₃</i>	2% - 5%
<i>SO₃</i>	0.1% - 2.5%
<i>MgO</i>	1% - 5%
<i>K₂O y Na₂O</i>	0% - 1%
<i>Mn₂O₃</i>	0% - 3%
<i>TiO₂</i>	0% - 0.5%
<i>P₂O₅</i>	0% - 1.5%
<i>Pérdida x Calcinación</i>	0.5% - 3%

1.1.3.1.3.2. Compuestos químicos

En la calcinación los óxidos se combinan con los componentes de la materia, formando los compuestos que conforman el 90% a 95% del cemento como menciona Torre[26] en la Tabla 2, junto con otros en menores cantidades como menciona Neville[29] en la Tabla 3.

Tabla 2. Compuestos químicos principales del cemento Portland.

Designación	Fórmula	Abreviatura	Porcentaje
<i>Silicato tri cálcico</i>	<i>3CaO.SiO₂</i>	<i>C₃S</i>	<i>30% a 50%</i>
<i>Silicato di cálcico</i>	<i>2CaO.SiO₂</i>	<i>C₂S</i>	<i>15% a 30%</i>
<i>Aluminato tricálcico</i>	<i>3CaO.Al₂O₃</i>	<i>C₃A</i>	<i>4% a 12%</i>
<i>Ferro aluminato tetra cálcico</i>	<i>4CaO.Al₂O₃.Fe₂O₃</i>	<i>C₄AF</i>	<i>8% a 13%</i>

Tabla 3. Compuestos químicos secundarios del cemento Portland.

<i>Designación</i>	<i>Fórmula</i>	<i>Abreviatura</i>
<i>Óxido de calcio (Cal libre)</i>	<i>CaO</i>	<i>C</i>
<i>Óxido de magnesio (Magnesia libre)</i>	<i>MgO</i>	<i>Mg</i>
<i>Óxido de sodio (Álcalis)</i>	<i>Na₂O</i>	<i>Na</i>
<i>Óxido de potasio (Álcalis)</i>	<i>K₂O</i>	<i>K</i>
<i>Trióxido de azufre (Azufre)</i>	<i>SO₃</i>	<i>S</i>

1.1.3.1.4. Propiedades de los compuestos químicos

- **Silicato tri cálcico (C₃S):** Llamado también alita, se hidrata y pasa a endurecerse rápidamente, es el más importante, el fraguado y la resistencia inicial depende de esta, tiene un gran calor de hidratación.
- **Silicato di cálcico (C₂S):** Llamado Belita, esta brinda resistencia a mayor tiempo, es el segundo más importante, su velocidad de hidratación y su endurecimiento es lento, alta resistencia a compresión a largo plazo.
- **Aluminato tri cálcico (C₃A):** Compuesto que se hidrata y fragua muy rápido, alto calor de hidratación, baja incidencia en resistencias mecánicas.
- **Ferro aluminato tetra cálcico (C₄AF):** Baja la temperatura de creación del Clinker, veloz velocidad al hidratarse, está relacionado con el color final del cemento[26].
- **Óxido de Calcio (CaO):** Velocidad de hidratación muy rápida, no apoya con resistencia y su límite es el 5%.
- **Óxido de magnesio (MgO):** Velocidad de hidratación muy baja, no apoya con resistencia y su límite es el 2%.
- **Álcalis (Na₂O y K₂O):** Brindan la alcalinidad y sirven de protección para armaduras en el concreto armado.
- **Tri óxido de azufre (SO₃):** este compuesto debe ser bajo o nulo, ya que al mezclarlo con agua forma ácidos que al reaccionar forma expansiones[30].

1.1.3.1.5. Clasificación del cemento

Tenemos la clasificación del cemento de acuerdo con sus requisitos específicos de desempeño como se estipula en la NTE INEN 2380[31] que se basa en la norma ASTM-C1157.

- **Tipo GU:** Construcción en general cuando no se requiere de los tipos especiales.
- **Tipo HE:** Resistencia inicial alta.
- **Tipo MS:** Resistencia a sulfatos moderada.
- **Tipo HS:** Alta resistencia a sulfatos.
- **Tipo MH:** Calor de hidratación moderado.
- **Tipo LH:** Calor de hidratación bajo.

1.1.3.1.6. Cemento Tipo GU (Holcim)

El cemento Portland tipo GU utilizado en esta investigación es el HOLCIM FUERTE TIPO GU uno de los cementos más usados a nivel nacional en construcciones en general, y cumple en exceso con la norma NTE INEN 2380, a continuación, tenemos la descripción y características como nos especifica el proveedor[32] que nos brinda este cemento:

- Resistencia mecánica adecuada para construcciones en general.
- Buena trabajabilidad en pastas.
- Disminuye segregación de partículas y exudación.
- Bajo calor de hidratación y por lo tanto baja posibilidad de fisurarse.
- Buena resistencia a sulfatos, cloruros y álcalis.

Este cemento por tener adiciones de puzolanas naturales reduce el impacto en el ambiente y disminuyen la contaminación por CO₂ hasta en un 35% en comparación de cementos portland tradicionales.



Figura 2. Cemento Holcim Fuerte Tipo GU[33].

1.1.3.2. Materiales cementantes suplementarios (MCS)

El uso de materiales cementantes suplementarios (SCM por sus siglas en inglés) por su riqueza en silicio influye en la cantidad, el tipo de hidratos formados y por lo tanto en el volumen, la porosidad y la durabilidad de los materiales. La composición, la finura y la cantidad de componentes químicos desempeñan un papel importante. Debido a la diversa cantidad de MCS usadas en la actualidad, las relaciones genéricas entre la composición, el tamaño de sus partículas, las condiciones como temperatura o humedad son cada vez más importantes y deben ser controladas[34].

1.1.3.2.1. Puzolanas naturales

Las puzolanas son rocas que poseen silicio o aluminosilicatos que individualmente no presentan ningún valor cementante, pero que, al ser procesado con un medio hidratado a condiciones ambientales comunes, se produce una reacción química con el hidróxido de calcio o con el cemento portland, componiendo un material con características cementantes. Estas puzolanas son de origen mineral formadas principalmente por cenizas volcánicas de erupciones explosivas que han sufrido un enfriamiento muy rápido de vidrios volcánicos o vidrios parcialmente zeolíticos[35].



Figura 3. Puzolanas naturales[36].

1.1.3.3.Cordillera Chongón-Colonche

El Ecuador posee tres regiones que lo subdividen que es Costa, sierra y amazonia.

La ubicación de la cordillera Chongón- Colonche por su geografía y su geología es el sector en Ecuador que presenta mayor potencialidad de zeolitas Naturales. La CCC se desarrolla desde Guayaquil hasta el sector de Olón-Pedro Pablo Gómez, tiene un rumbo de N110°, su geología comprende las rocas de la formación San Mateo, San Eduardo, Guayaquil, Cayo, Piñón y Las Masas como se puede observar en la Figura 4. Esta se encuentra principalmente formada por la formación de Cayo que posee más de 1000 km² ahí existen yacimientos de rocas sedimentarias con una gran presencia de zeolitas naturales del tipo heulandita y clinoptilolita. Una gran demanda para la utilización de aluminosilicatos viene de la producción cementera ya que en la costa la caliza existe en pocas cantidades las zeolitas de este depósito son muy aptas para el uso como puzolanas y puede ser agregado al cemento [10], [22], [37].

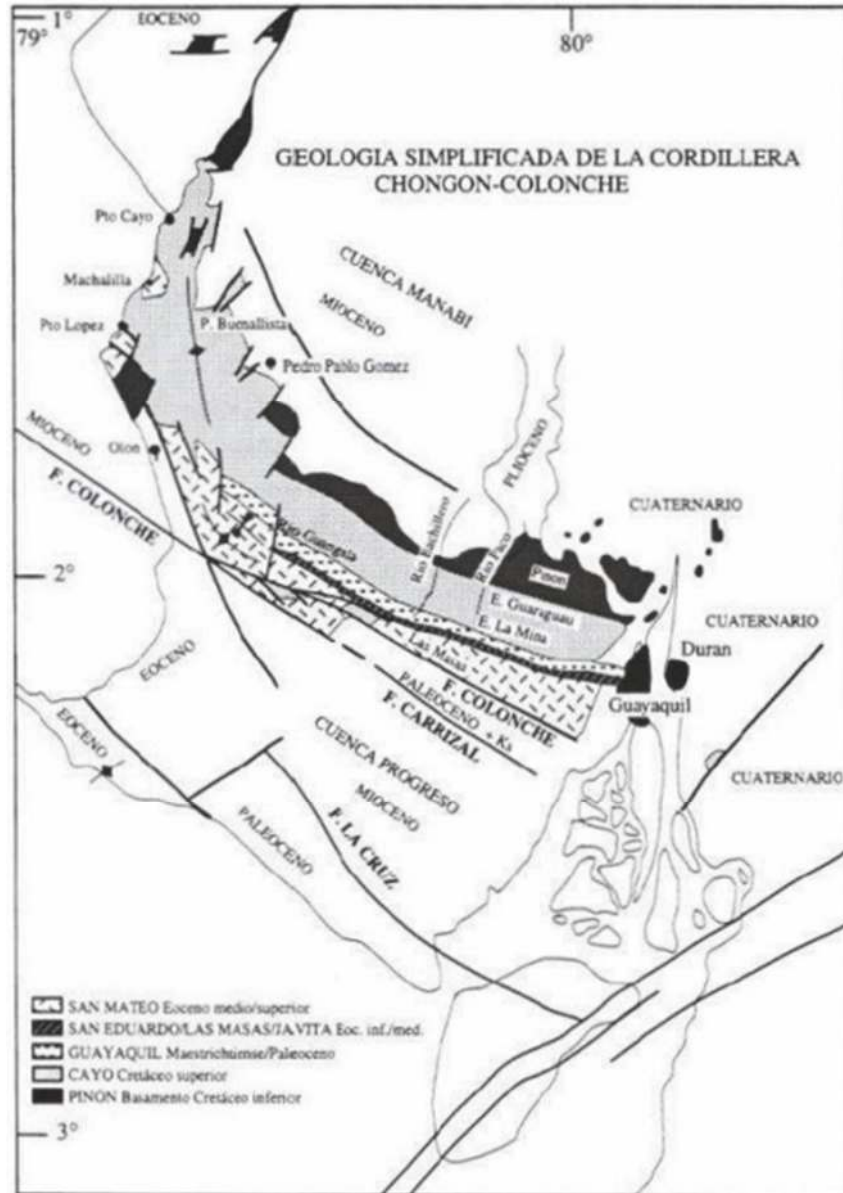


Figura 4. Geología de la Cordillera Chongón-Colonche[37].

La CCC es una cadena montañosa de altitud media, su altitud se encuentra entre los 400 y 600 metros, sin embargo hay picos con una altura mayor a los 700 metros[37], [38], como se observa en la Figura 5.

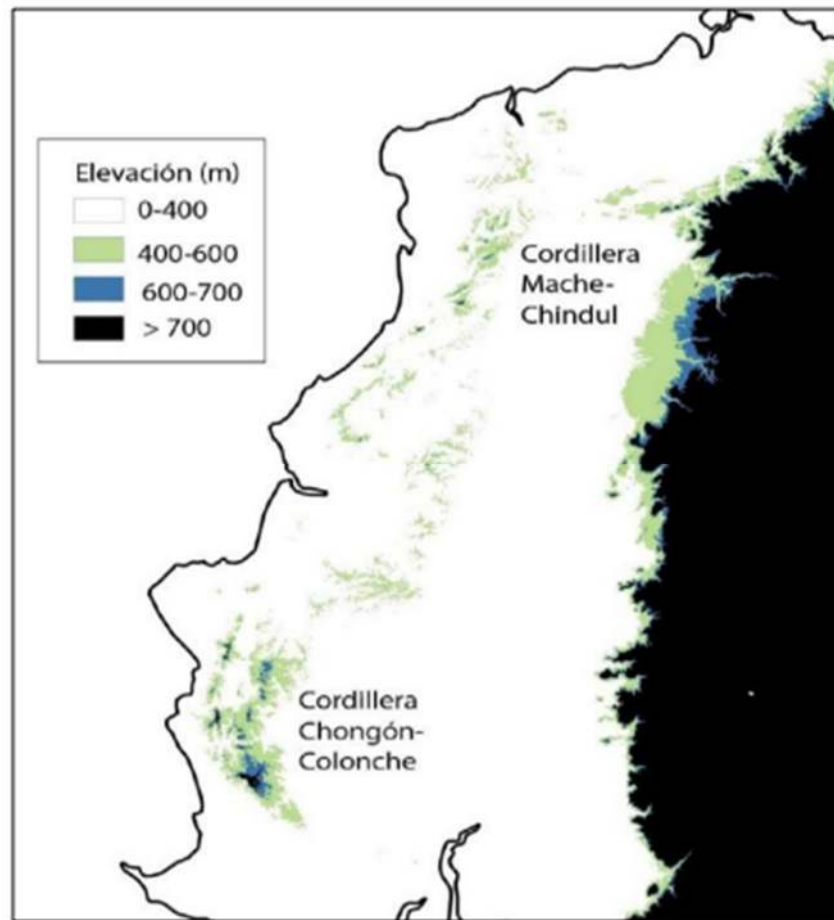


Figura 5. Cordilleras costeras del Ecuador y su altitud[38].

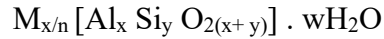
1.1.3.4. Zeolitas Naturales

Las zeolitas son minerales de una especie de aluminosilicatos con forma de cristal y que son hidratados de aluminio, poseen cationes alcalinos y alcalinos térreos, su orden es en tres dimensiones donde domina la composición abierta que tienen una gran facultad para intercambiar iones y agua, sin sufrir cambios en su estructura cristalina. Se forman por procesos hidrotermales o por variación de vidrios volcánicos, diferentes condiciones como presión, temperatura, trabajo iónico y presión de agua son esenciales en su formación. Estos conforman la clase de mineral más variado y en gran cantidad de los que componen la corteza terrestre[39], [40].

1.1.3.4.1. Estructura de las Zeolitas

Su estructura es la de los tectosilicatos, que son elementos en los por cada átomo de silicio o aluminio su estructura está ligada por medio de cuatro átomos de

oxígeno mediante enlaces covalentes, esto implica que cada átomo de oxígeno esta unido a dos átomos diferentes de silicio o aluminio [40]. Las zeolitas tienen la siguiente formula:



Donde:

M= Cation de intercambio de valencia “n” (Na, Ca, K, Ba, Sr, Li, Mg).

x= Número de átomos de aluminio (Cation estructural).

y=Número de átomos de silicio (Cation estructural).

w= Número de moléculas de agua.

2(x+y) = Número de átomos de oxígeno.

Dos átomos de aluminio no pueden compartir el mismo oxígeno, por la estabilidad de su estructura, la cantidad de aluminio en el material, será menor o igual a la cantidad de silicio [41].

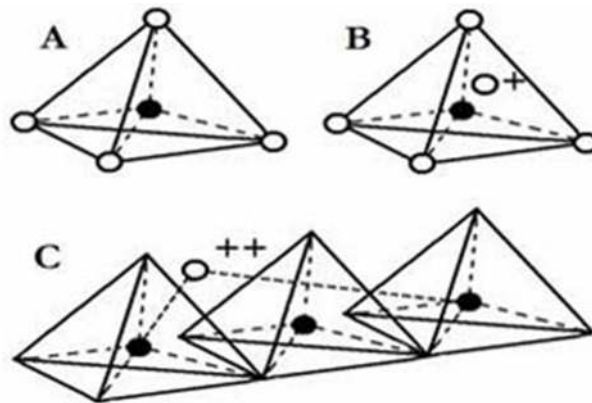


Figura 6. Unidades estructurales básicas de las zeolitas. A) Tetraedro con un átomo de Si (círculo lleno) en el centro y átomos de oxígeno en los vértices. B) Tetraedro con átomo de Al sustituyendo el Si y unido a un catión monovalente para compensar la diferencia de carga entre el Si y Al. C) Átomo Palente para balancear las cargas entre el Al y el Si en una cadena múltiple de tetraedros[40].

1.1.3.4.2. Propiedades de las zeolitas

Curi y Cedillo [40], [41] mencionan las siguientes propiedades de la zeolita según Breck:

- Alto grado de hidratación.
- Baja densidad y un gran volumen cuando se deshidrata.
- Estabilidad.

- Intercambio catiónico.
- Canales moleculares uniformes.
- Adsorbentes.

1.1.3.4.3. Clasificación de las zeolitas

Existen alrededor del mundo más de 40 clases de zeolitas naturales y sintéticos, que poseen diferentes propiedades físicas y químicas [40], [42]. Según su composición química se clasifican en 7 familias: Analcima, chabazita, natrolita, estilbita, heulandita, gismondina y harmotoma de estas familias son las que se obtiene los tipos de zeolita más importantes, detallando a continuación la subdivisión de la familia de la Heulandita como nos menciona Morante [22] a continuación .

- **Clinoptilolita:** aluminio silicato hidratado de sodio, potasio y calcio.
- **Heulandita:** aluminio silicato hidratado de sodio y calcio.
- **Laumontita:** aluminio silicato hidratado de calcio.
- **Levyna:** aluminio silicato hidratado de calcio, sodio y potasio.
- **Mazzita:** aluminio silicato hidratado de potasio, sodio, magnesio y calcio.
- **Merlionita:** aluminio silicato hidratado de potasio, sodio, calcio y bario.
- **Montesomaíta:** aluminio silicato hidratado de sodio, potasio y calcio.

En la tabla 4, tenemos los tipos de zeolitas más importantes, su fórmula química y ciertas propiedades que estas poseen.

Tabla 4. Fórmula común y propiedades físicas de zeolitas más importantes[22], [43], [44].

Tipo de zeolita	Fórmula ^b	Densidad ^a (g/cm ³)	Sistema de cristal ^b	Volumen de Vacíos ^b (%)	Gravedad específica ^b	Capacidad de intercambio Iónico ^b (meq/100g)	Rango de Si/Al ^c
Analcima	Na ₁₆ (Al ₁₆ Si ₃₂ O ₉₆)16H ₂ O	1.85	Cúbico	18	2.24-2.29	4.54	1.00 - 3.00
Chabazita	(Na ₂ Ca ₆)(Al ₁₂ Si ₂₄ O ₇₂) 40H ₂ O	1.45	Hexagonal	47	2.05-2.10	3.81	1.43 – 4.18
Clinoptilolita	(Na ₄ K ₄)(Al ₈ Si ₄₀ O ₉₆)24H ₂ O	1.71	Monocíclico	39	2.16	2.54	2.92 - 5.04
Erionita	NaCa _{0.5} K ₉ (Al ₉ Si ₂₇ O ₇₂)27H ₂ O	1.51	Hexagonal	35	2.02-2.08	3.12	3.05 – 3.99
Faujasita	Na ₅₈ (Al ₅₈ Si ₁₃₄ O ₃₈₄)240H ₂ O	1.27	Cúbico	47	1.91-1.92	3.39	1.00 – 3.00
Ferrierita	(Na ₂ Mg ₂)(Al ₆ Si ₃₀ O ₇₂)18H ₂ O	1.76	Ortorrómico	28	2.14-2.21	2.33	3.79 – 6.14
Heulandita	Ca ₄ (Al ₈ Si ₂₈ O ₇₂)24H ₂ O	1.69	Monoclinico	39	2.10-2.20	2.91	2.85 – 4.31
Laumontita	Ca ₄ (Al ₈ Si ₁₆ O ₄₈) 16H ₂ O	1.77	Monoclinico	34	2.20-2.30	4.25	1.95 – 2.25
Modernita	Na ₈ (Al ₈ Si ₄₀ O ₉₆) 24H ₂ O	1.70	Ortorrómico	28	2.12-2.15	2.29	4.19 – 5.79
Natrolita	Na ₁₆ (Al ₁₆ Si ₂₄ O ₈₀) 16H ₂ O	1.76	Ortorrómico	23	2.20-2.26	5.26	1.50
Phillipsita	(NaK) ₁₀ (Al ₁₀ Si ₂₂ O ₆₄) 20H ₂ O	1.58	Ortorrómico	31	2.15-2.20	3.87	1.45 – 2.87
Wairakita	Ca ₈ (Al ₁₆ Si ₃₂ O ₉₆) 16H ₂ O	-	Monoclinico	20	2.26	4.61	2.00

^a Morante, F; ^bMumpton, F; ^c Montalvo, S.

1.1.3.4.4. Cronología de estudios de zeolitas

Existen estudios previos mencionados por Costafreda[9], Morante[22] y Raggiotti[8] en los que se usa la zeolitas ecuatorianas en ensayos e caracterización como se señala en la Figura 7.

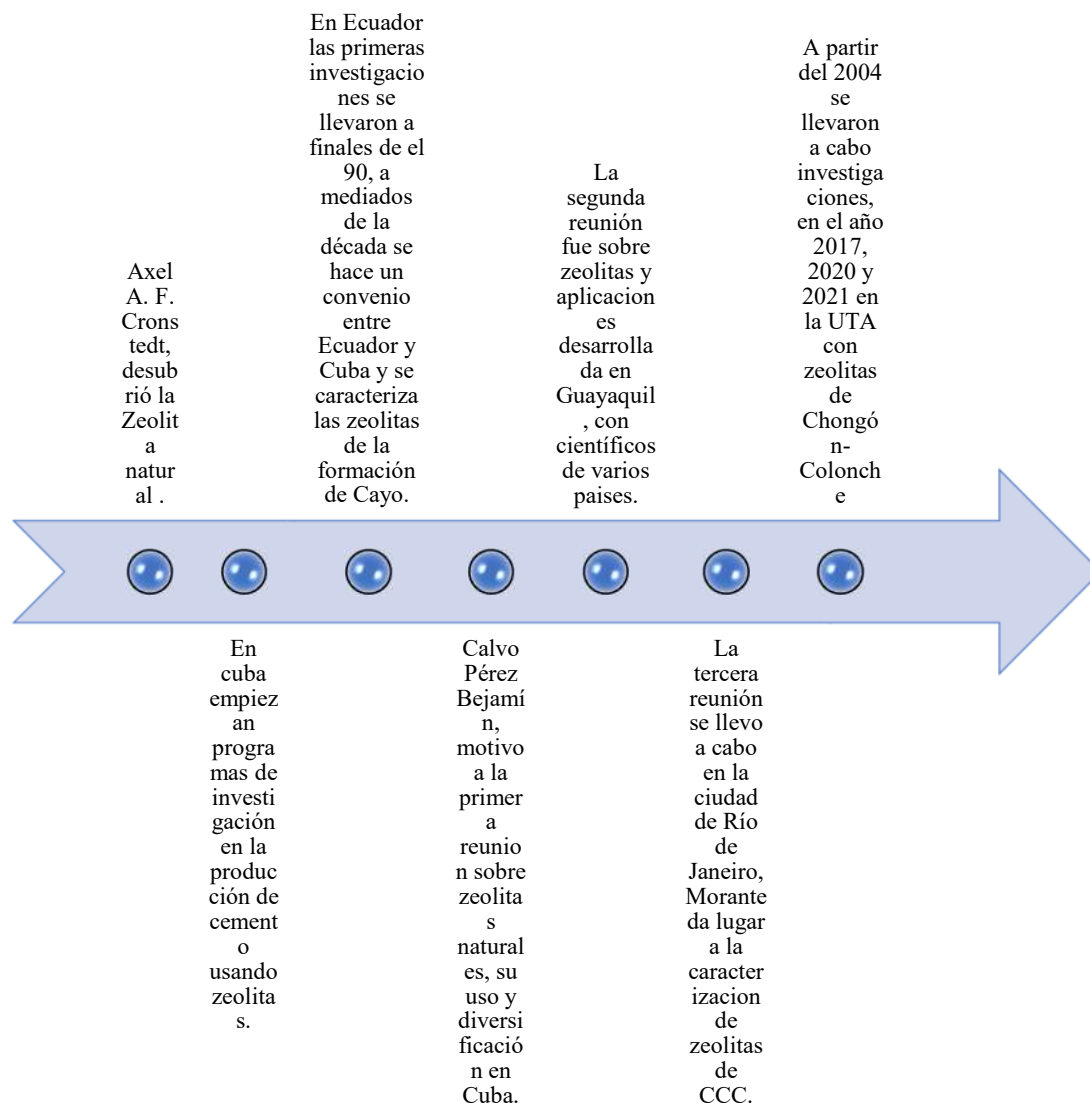


Figura 7. Cronología estudio de las zeolitas[8], [9], [22].

1.1.3.5. El hormigón

El hormigón es una composición homogénea compuesta por una pasta de cemento portland y agua, que mantiene unidas a las partículas de materiales inorgánicos, conformados por agregados finos y gruesos. En resumen, el hormigón está compuesto por cemento, agua, agregado fino (arena) y agregado grueso (piedra)[45].

El hormigón es uno de los materiales más usado por su alta resistencia al agua, además es fácil el moldeado de el mismo para formar gran cantidad de formas y

tamaños, y la última razón es que es un material económico y disponible en todo el mundo[46].

1.1.3.5.1. Agregados del hormigón

Los agregados que se usan en el hormigón ocupan aproximadamente el 75% del volumen total. Ya que su costo es más económico, es más fácil usar mayor cantidad de ellos posible. Se usan agregados finos (arena) y también gruesos (grava o piedra triturada). Cualquier agregado que pasa la Malla No.4 se considera agregado fino. El material que supere el tamaño de la malla No.4 se lo considera agregado grueso.

Los agregados deben ser fuertes, durables y limpios. Si poseen alguna impureza estas pueden interferir en la adherencia entre la pasta de cemento y sus agregados. La resistencia de estos agregados tiene una gran influencia en la resistencia final del hormigón y sus propiedades afectan considerablemente a la durabilidad del hormigón[47].



Figura 8. Agregados finos y gruesos[48].

1.1.3.5.1.1. Tipos de agregados

Tenemos varios tipos de agregados como nos presenta Ortega[49] de acuerdo de donde proviene y a la técnica con la que se han obtenido como se detalla a continuación:

- **Agregados naturales:** Son aquellos que se usan después de una modificación de su distribución de tamaño de partículas para cumplir con los requerimientos solicitados.
- **Agregados de trituración:** Se obtienen con la trituración de rocas. Se incluyen todos los agregados pétreos que puedan ser adecuados físicamente.

- **Agregados artificiales:** Se denominan subproductos de procesos industriales, como desechos o materiales que vienen de procesos de demolición que sean adecuados y reciclables.
- **Agregados marginales:** Son todos los materiales que no cumplen algún requisito.

1.1.3.5.1.2. Propiedades de los agregados

Las principales propiedades de los agregados del hormigón y de qué manera influye en la calidad del hormigón detalla Velarde[50] a continuación:

- **Granulometría:** Es la determinación de la cantidad en porcentajes de los diferentes tamaños de las partículas que constituyen la muestra acorde a intervalos de clasificación, incluyendo tamaños máximos y mínimos. Es fundamental ya que una mala distribución de agregados provoca problemas de huecos, costos elevados en el hormigón e influye en la trabajabilidad.
- **Forma y redondeado de las partículas:** Esta depende del tipo de roca y sus características y como fue procesado.
- **Propiedades superficiales:** Es la rugosidad e irregularidades que presenta el agregado, influye en la adherencia que presentara la pasta con los agregados.
- **Impurezas:** Restos orgánicos que estar adheridos y se pueden mezclar con los agregados provocando deficiencias en el hormigón.
- **Propiedades físicas y mecánicas:** los agregados con su peso volumétrico, solidez, resistencia a la abrasión y sus características térmicas, influyen en la resistencia, endurecimiento, durabilidad y resistencia a agentes climáticos del hormigón.
- **Propiedades químicas y mineralógicas:** Los agregados con ciertos compuestos químicos reaccionan como los álcalis del cemento teniendo como resultado problemas de expansión del hormigón.

1.1.3.5.2. Propiedades del hormigón

El hormigón presenta dos estados básicos en el estado práctico. El estado fresco o plástico en el que el material puede ser moldeado y adaptado a las formas previstas y el estado endurecido es en el que el hormigón ya tiene una rigidez de tal

manera que ya no se le puede manipular o moldear sin ocasionar fracturas irreversibles. Las propiedades del hormigón fresco y endurecido nos detalla Ortega[49] a continuación:

1.1.3.5.2.1. Propiedades del hormigón fresco

El hormigón fresco es el resultado después de amasar los materiales que los componen. Desde el momento que empieza a mezclarse se producen en la masa reacciones químicas que brindaran características finales como material endurecido, es una masa heterogénea de fases sólidas, líquidas y gaseosas que con un buen mezclado se distribuirán de manera efectiva. Las propiedades se describen a continuación:

- **Consistencia:** Capacidad del hormigón en estado fresco de deformarse, se analiza mediante el ensayo de cono de Abrams midiendo el descenso en centímetros.
- **Trabajabilidad:** Capacidad del hormigón para ser colocado en su lugar final con los medios para compactar requeridos.
- **Homogeneidad:** Característica del hormigón que informa la distribución de los componentes en el total del volumen. Se mide por la masa específica de porciones de hormigón fresco separadas entre sí.
- **Masa específica:** Se define como la relación entre la masa del hormigón fresco y el volumen que ocupa. Se puede medir compactado o sin compactar, esta es una medida de la efectividad del método de compactación que se va a emplear. Las unidades son kg/m^3 .

1.1.3.5.2.2. Propiedades del hormigón endurecido

Las características del hormigón endurecido se presentan cuando ocurre el final del fraguado. El hormigón endurecido se compone del árido, la pasta endurecida y una red de poros abiertos o cerrados y el aire ocluido. Las propiedades del hormigón endurecido son las detalladas a continuación:

- **Densidad:** Se define como la relación de la masa y el volumen del hormigón, generalmente se encuentra en el rango de 2300-2500 kg/m^3 .

- **Compacidad:** Es la característica de tener la máxima densidad que los materiales admitan. Cuando el hormigón posee una alta compacidad brinda mayor protección contra el acceso de sustancias dañinas.
- **Permeabilidad:** Es el grado en que un hormigón es accesible a líquidos o a gases. Influye mucho la relación de agua y cemento en el hormigón. Mientras mayor es la relación mayor es la permeabilidad y por consecuencia es más propenso el hormigón a sufrir agresiones.
- **Resistencia:** El hormigón endurecido tiene resistencia a las fuerzas de compresión, tracción y desgaste. La resistencia principal es a las fuerzas de compresión. La resistencia a tracción es menor, pero es importante en determinadas aplicaciones.

1.1.3.5.3. Dosificación del hormigón

El objetivo de los métodos de dosificación del hormigón es el obtener proporciones de materiales para poder mezclar todos estos componentes y así el hormigón adquiera ciertas características de consistencia, compacidad, resistencia, durabilidad, etc.

El cálculo teórico de las proporciones para la mezcla de los componentes no excluye a la comprobación práctica para comprobar las características de la composición realizada, debido a que ningún método de dosificación podría tener en cuenta un gran número de factores que pueden influir en las propiedades del hormigón que se busca conseguir.

No existe un método único de dosificación, depende de las condiciones que deba reunir el hormigón, el diseñador podrá escoger entre varios métodos que existen y los resultados que se obtengan serán satisfactorios cuando se haya hecho la elección correcta y se hayan realizado las correcciones mediante ensayos[51].

1.1.3.5.3.1. Método de la densidad óptima

Los fundamentos de este método de diseño de mezclas de hormigón, es la de usar una mínima cantidad de pasta requerida para conseguir un hormigón de buena calidad para el cual debemos determinar una composición de granulados que nos

brinde el menor porcentaje de vacíos posible. El procedimiento nos detalla Coro[52] a continuación:

- a) Escoger la relación agua/cemento (w/c) que está relacionada a la resistencia a compresión que se busca en el hormigón mediante el uso de tablas.
- b) Calcular la densidad real de la mezcla de agregados, el porcentaje óptimo de vacíos.
- c) Determinar la cantidad de pasta de cemento mediante el uso de tablas.
- d) Determinar la cantidad de cemento, agua, agregado fino y grueso para obtener 1m^3 de hormigón.
- e) Obtener la dosificación al peso y al volumen.

1.1.3.6. Técnicas de caracterización física

1.1.3.6.1. Densidad Real

Según la NTE INEN 151[24], la densidad del cemento hidráulico está definida como la masa de un volumen unitario de los sólidos. En esta investigación determinaron la densidad real por medio de dos métodos:

- Método del picnómetro.
- Método del frasco Le Chatelier.

1.1.3.6.1.1. Método del picnómetro (NTE INEN 156)

Para determinar el valor de densidad se utilizó el método del picnómetro que es un frasco de vidrio como se indica en la Figura 9 que usa el mismo para determinar el volumen desplazado o densidad de un material sólido o líquido con gran precisión [53], brinda resultados en unidades de g/cm^3 y kg/m^3 . Se basa en la norma ASTM C188-03 y se encuentra estandarizado en la norma NTE INEN 156[54] siempre y cuando el instrumento cumpla con lo mencionado en la sección 4.2.5 de la norma.

- El reactivo para los ensayos de densidad es la nafta (gasolina de 85 octanos) de densidad mayor a $0.73 \text{ g}/\text{cm}^3$ a 23°C .
- Picnómetro de vidrio de $500\pm 0.25 \text{ ml}$.
- Realizar al menos dos ensayos.



Figura 9. Picnómetro 500ml[55].

Para obtener datos seguros se realiza la calibración del picnómetro según la norma AASHTO T-100, se lo somete a varias temperaturas y se realiza la curva de calibración. A continuación, en la Figura 10 tenemos el procedimiento para realizar este ensayo.

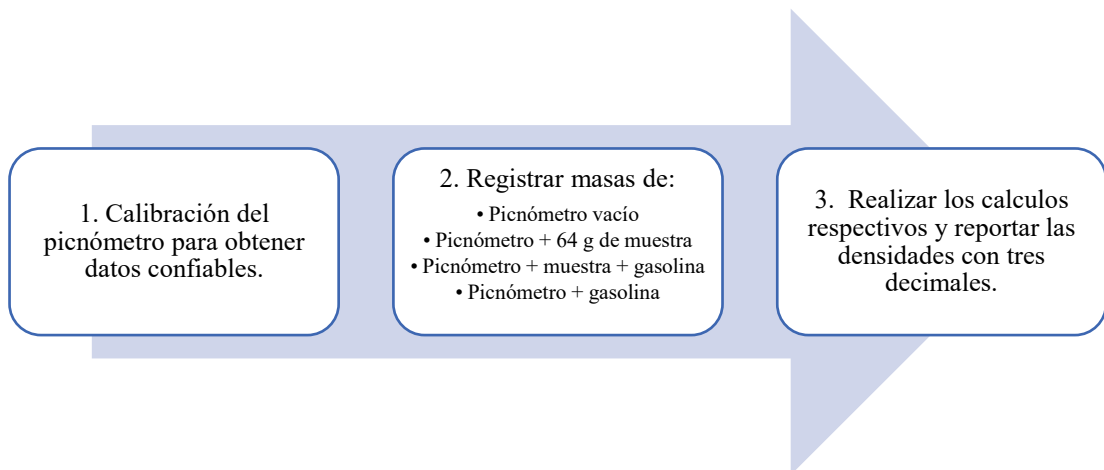


Figura 10. Procedimiento densidad por el método del picnómetro.

1.1.3.6.1.2. Método del frasco Le Chatelier (NTE INEN 156)

Se encuentra estandarizado por la norma NTE INEN 156[54] que se basa en la norma ASTM C188-03, utiliza el frasco Le Chatelier que es un frasco normalizado de alta precisión como se observa en la Figura 11, que similar a otro método

establece la relación entre una masa de cemento y el volumen de un líquido no reactivo que la masa desplaza en el frasco Le Chatelier.

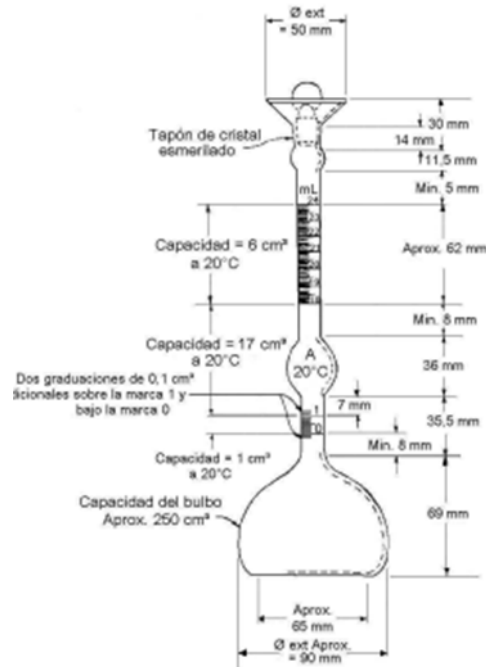


Figura 11. Frasco Le Chatelier[54].

- Después de preparar la muestra, se pesa 64 g de muestra con una aproximación de 0.05g, se llena el frasco en este caso con la gasolina hasta un punto entre la marca 0 y 1 cm³.
- Se registra el peso de el frasco con gasolina. Sumergir el frasco en agua a temperatura de 23°C ± 2. Registrar la lectura en cm³.
- Introducir por incrementos la muestra del material. Registrar el peso del frasco con gasolina y la muestra.
- Inclinando el frasco retiramos burbujas o aire retenido. Sumergir el frasco en el agua a la temperatura antes mencionada.
- Registrar la segunda lectura en cm³.
- Calcular mediante las siguientes formulas.
- **Densidad:**

$$\rho = \frac{\text{Masa cemento}}{\text{Volumen desplazado}} = \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

- **Gravedad específica:**

$$G. \text{ esp} = \frac{\text{Densidad cemento}}{\text{Densidad agua a } 4^{\circ}\text{C}}$$

1.1.3.6.2. Finura

Según Neville[29] la finura es una propiedad muy importante del cemento que expresa el grado de molienda e influye en la hidratación temprana y el desarrollo de la resistencia, que por ser un material que tiene partículas muy pequeñas, no pueden ser separadas por mallas. Por tal razón se usan otros métodos entre ellos:

- Método del tamizado seco.
- Método del aparato de Blaine.

1.1.3.6.2.1. Método del tamizado seco (NTE INEN 489-1)

Está regido por la norma NTE INEN 489-1 que se basa en la norma internacional ASTM C184-82. Este método utiliza tamices de 150 μm y 75 μm , solo nos ayuda a determinar el tamaño de las partículas, pero no la superficie específica. El procedimiento nos da la norma[56] y es como se lo detalla en la Figura 12 y nos da resultados en términos de porcentaje (%).

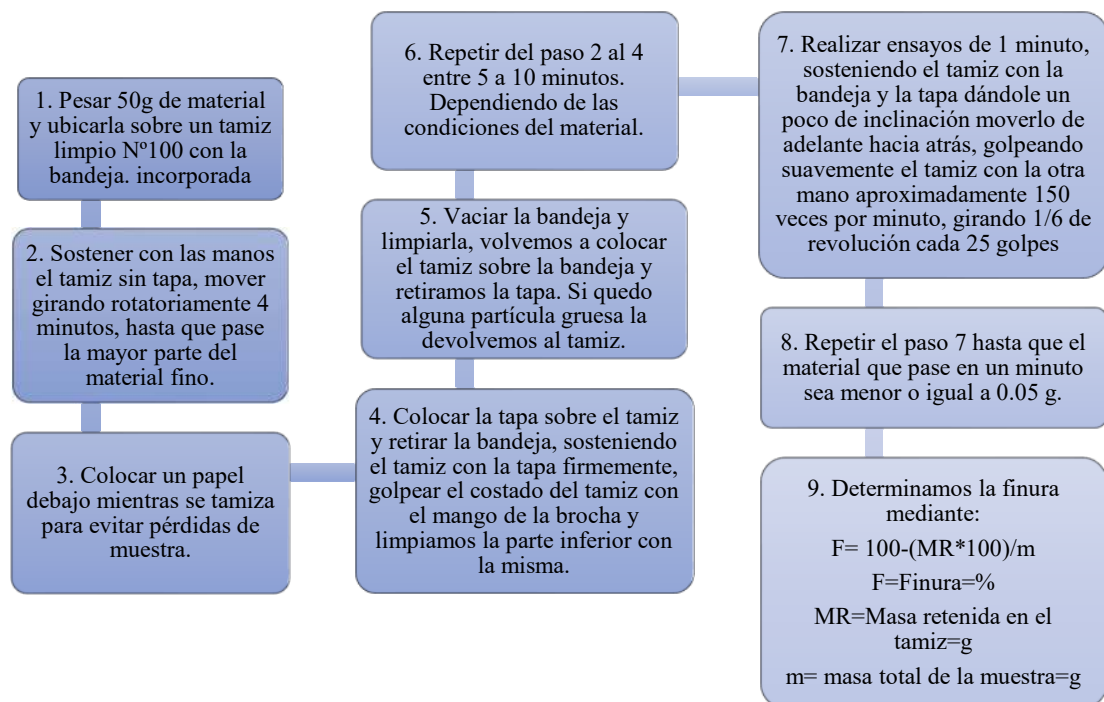


Figura 12. Procedimiento de la determinación de finura por el método de Tamizado seco.

1.1.3.6.2.2.Método del aparato de Blaine (NTE INEN 196)

Este método es de permeabilidad al aire se encuentra normado por la NTE INEN 196 que se basa en la norma ASTM C-204. La superficie específica se mide haciendo pasar una cantidad de aire por una muestra previamente preparada, la cantidad de aire es en función del tamaño y de la distribución de tamaños de las partículas, arroja resultados en cm^2/g [57].

El aparato de Blaine consiste esencialmente en un mecanismo que permite pasar una cantidad de aire de una muestra preparada con una porosidad definida. El número de poros se dan en función del tamaño de las partículas y determina la velocidad del flujo de aire, este aparato presenta diferentes partes como nos señala la NTE INEN 196[58] en la Figura 13.

Equipos

- ✓ Aparato de Blaine
- ✓ Celda de permeabilidad
- ✓ Disco
- ✓ Émbolo
- ✓ Papel filtro
- ✓ Manómetro
- ✓ Cronómetro
- ✓ Balanza analítica

Materiales

- Líquido del manómetro
- Muestra (Material de referencia Estándar No. 114)
- Mercurio

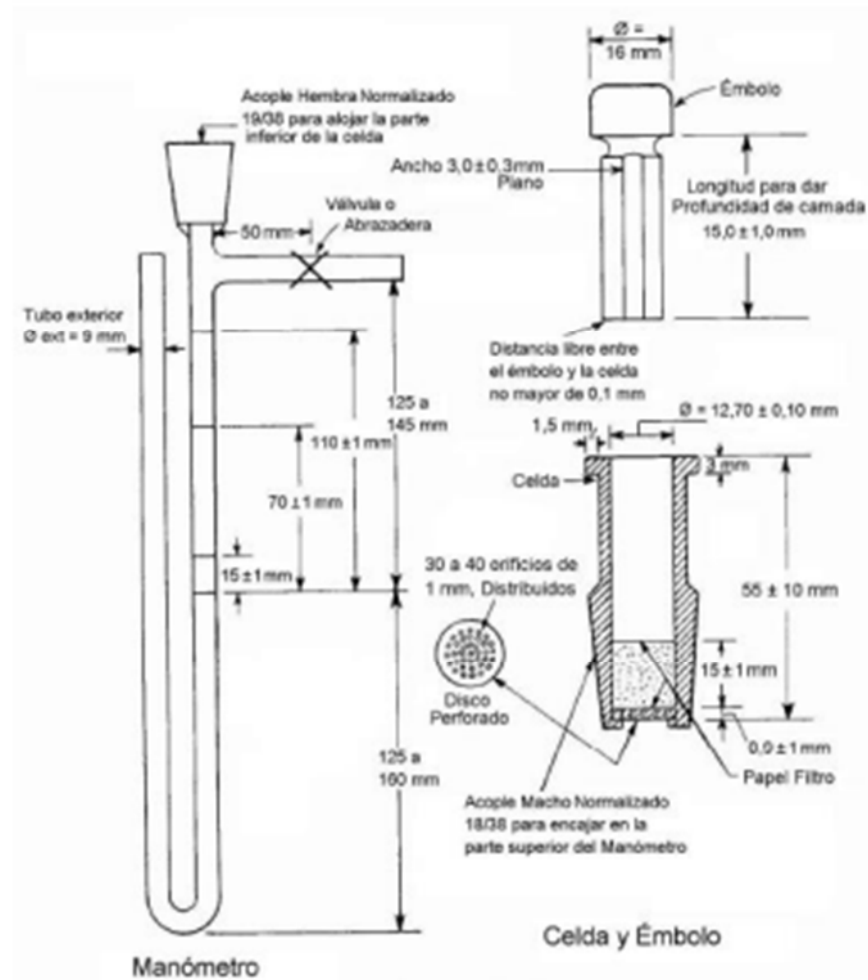


Figura 13. Aparato de Blaine y sus partes.

El procedimiento por seguir se encuentra detallado en la norma mencionada y es el que se detalla a continuación:

a) Se debe calibrar el aparato y preparar la muestra, mediante una muestra estandarizada registrando los datos usados y usándolos en la siguientes formulas:

- Agitar el cemento muestra por 2 minutos para remover los grumos.
- Reposar el cemento por 2 minutos más y para esparcir en una fracción fina
- Poner el disco de metal perforado y discos de papel filtro en la celda de permeabilidad, sin alterar el orden y registrar el dato de masa.
- Colocar mercurio en la celda, retirando partículas de aire de la celda y nivelándolo, luego se toma su masa y se lo registra (WA).
- Remover uno de los papeles filtro de la celda.
- Pesar 2.8 g de cemento muestra y colocar en la muestra.

- Nivelar la muestra de cemento con golpes ligeros y poner un disco de papel filtro en el cemento.
- Aumentar mercurio dentro del espacio vacío y volver a nivelar para luego tomar dato de su masa (WB).
- Obtenidos estos datos usamos las siguientes fórmulas:
- **Volumen aparente del cemento**

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

Donde:

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

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

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

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

- **Masa de la muestra**

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

Donde:

W= gramos de muestra requerida [gr].

ρ = densidad de la muestra de ensayo.

V= volumen aparente [cm³]

E= porosidad deseada de la camada de cemento [cm³].

b) Ensayo de permeabilidad

- Colocar el disco perforado en la base de la celda de permeabilidad.
- Poner el disco de papel filtro encima del disco metálico y aplastar suavemente los bordes en dirección abajo con el émbolo.
- Registrar los datos de la muestra (W).
- Poner la masa de muestra que se requiere en la celda.
- Dar golpes ligeros para nivelar la muestra y poner un disco de papel filtro sobre la muestra.

- Prensar el cemento con el émbolo hasta que el collarín alcance el borde superior de la celda.
- Subir el émbolo suavemente, girar 90° y volver a prensar.
- Remover el embolo muy lento y luego aplicar un poco de grasa a la celda.
- Armar la celda con el manómetro.
- Remover el aire en el manómetro de tubo U hasta que el líquido se situé en la marca superior y cerrar la válvula.
- Cuando la base de líquido del manómetro llegue a la marca dos empezar el cronometraje y detener el cronometraje cuando la base del líquido llegue a la marca tres.
- Registrar el tiempo tomado en unidades de segundos (Ts) y la temperatura en grados centígrados.
- Obtenidos los datos previos aplicamos las siguientes fórmulas:
- **Finura del cemento portland**

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

Donde:

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

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

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

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

c) Constante “b” del aluminosilicato

Para muestras diferentes al cemento, se debe obtener la constante “b” para la muestra de aluminosilicato mediante el siguiente proceso:

- Colocar el disco perforado en la base de la celda.
- Insertar el disco de papel filtro en el disco metálico y aplastar los bordes con el embolo.

- Tomar 4 valores de porosidad (E) del grupo preparado de la muestra con un intervalo máximo de 0.06 entre el primer y último valor.
- Calcular la masa de muestra del aluminosilicato (W) usando la densidad para cada porosidad.
- Dar golpes suavemente en la celda para nivelar la muestra y poner un disco de papel filtro sobre la muestra.
- Prensar la muestra con el embolo hasta que el collarín alcance el borde superior de la celda.
- Subir el émbolo suavemente, girar 90° y volver a prensar.
- Remover el embolo muy lento y luego aplicar un poco de grasa a la celda.
- Armar la celda con el manómetro.
- Remover el aire en el manómetro de tubo U hasta que el líquido se situé en la marca superior y cerrar la válvula.
- Cuando la base de líquido del manómetro llegue a la marca dos empezar el cronometraje y detener el cronometraje cuando la base del líquido llegue a la marca tres.
- Registrar el tiempo tomado en unidades de segundos (T) y la temperatura en grados centígrados.
- Volver a realizar los pasos para las muestras por cada valor de porosidad.
- Graficar en un sistema cartesiano la porosidad en el eje (y) y la porosidad elevada a la tercera potencia multiplicado por el tiempo ($\sqrt{(E^3 * T)}$) en el eje (x), al realizar el corte en el eje (y) la tendencia por regresión lineal señalará el valor de “b”.

d) Ensayo de permeabilidad aluminosilicato

- Después de encontrar “b” se usa la siguiente fórmula para obtener la superficie específica del material.

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

Donde:

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

S_s = superficie específica de la muestra normalizada usada en la calibración del aparato [m²/kg].

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

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

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

E_s = porosidad de la camada preparada de muestra estándar, utilizada en la calibración.

ρ = densidad de la muestra de ensayo aluminosilicato [g/cm^3]

ρ_s = densidad de la muestra estándar, utilizada en la calibración.

b = constante específica de la muestra de material.

$b_s = 0.9$, la constante de la muestra estándar.

1.1.3.6.3. Análisis Granulométrico

El análisis granulométrico o granulometría de un material se comprenderá todo proceso manual o mecánico por el que se pueda clasificar las partículas de estas muestras del material según su tamaño, de forma que se pueda conocer la cantidad de masa de cada tamaño de partícula que aporta en el total de la muestra. Al separar por los tamaños de la muestra se usan diferentes medios que proporciona el tamaño máximo de agregado en cada uno. En el área practica la masa de cada tamaño se expresan como porcentajes con respecto al total de la muestra y con estos datos se grafica la curva granulométrica del material[59]. Para determinar el análisis granulométrico en esta investigación usaron dos métodos:

- Método por tamices normalizados.
- Método del hidrómetro.

1.1.3.6.3.1. Método del hidrómetro (ASTM D-422)

Este método está regido por la norma internacional ASTM D-422, y permite obtener cuantitativamente es decir en porcentaje la distribución del tamaño de las partículas de suelos finos como limos y arcillas que pasan el tamiz de 0.075 mm (Nº 200). El principio de este método es la sedimentación de un material en suspensión en un líquido[60].



Figura 14. Equipos usados en el ensayo[61].

Equipos:

- Balanza de sensibilidad.
- Agitador.
- Hidrómetro 152-H.
- Cilindros de vidrio.
- Termómetro.
- Cronometro.
- Horno.
- Tamices.

Materiales:

- Agente defloculante (tripolifosfato de sodio).
- Agua[61].



Figura 15. Hidrómetro 152-H[62].

Es común este método debido a la simplicidad y el costo mínimo en materiales, es sencillo ya que no requiere un tratamiento previo de la muestra, el hidrómetro mide la densidad del medio que cambia con la cantidad de partículas presentes en la suspensión[63]. A continuación, tenemos el proceso de este ensayo:

- La muestra será 60 gramos de aluminosilicato que pase el tamiz de 0.075 mm.
- Colocar la muestra en un contenedor y agregar 125ml de tripolifosfato de sodio (40g/l) y dejarlos remojar por 24 horas.
- Esta muestra se coloca en una probeta de 1 litro y con un agitador mezclar por 1 minuto.
- Colocar la probeta en agua a temperatura de 20°C constante y luego llenarlo con agua destilada hasta la marca de 1 litro.
- Volver a agitar el contenido por 1 minuto o 60 vueltas, después de esto poner en marcha el cronometro.
- Insertar el hidrómetro en a probeta evitando contacto con las paredes.
- Registrar la lectura en los tiempos 2, 5, 15, 30, 60, 120, 250 y 1440 minutos, registrar temperatura de la mezcla y retirar y lavar el hidrómetro por cada lectura.

- Para proceder con los cálculos el hidrómetro deberá ser corregido (menisco, temperatura, defloculante y punto cero).

1.1.3.6.4. Tiempo de fraguado - Método de Vicat (NTE INEN 158)

Cuando se mezcla el agua y el cemento, empieza una reacción química exotérmica que da el endurecimiento de la mezcla. En el proceso de endurecerse se da el estado en el que la mezcla disminuye considerablemente su plasticidad y comienza a perder su trabajabilidad ese estado es el fraguado inicial de la mezcla. Cuando ya comienza a endurecerse normalmente la mezcla surge un nuevo estado denominado fraguado final.

El tiempo que comprende entre ambos estados se llama tiempo de fraguado de la mezcla es decir el tiempo requerido para que pase del estado fluido a estado sólido ya que es una parte del proceso de endurecimiento. El fraguado inicial no debe ocurrir muy pronto y el fraguado final no puede pasar muy tarde[64].

Este método se encuentra estandarizado por la norma NTE INEN 158[65] y se realiza en pastas de cemento hidráulico de consistencia normal, realizando penetraciones en la pasta usando la aguja de Vicat de 1mm de diámetro. El tiempo inicial de fraguado es el momento cuando la penetración de la aguja alcanza los 25 mm y el tiempo final es el momento en que la aguja no deja ninguna marca en la superficie de la pasta.

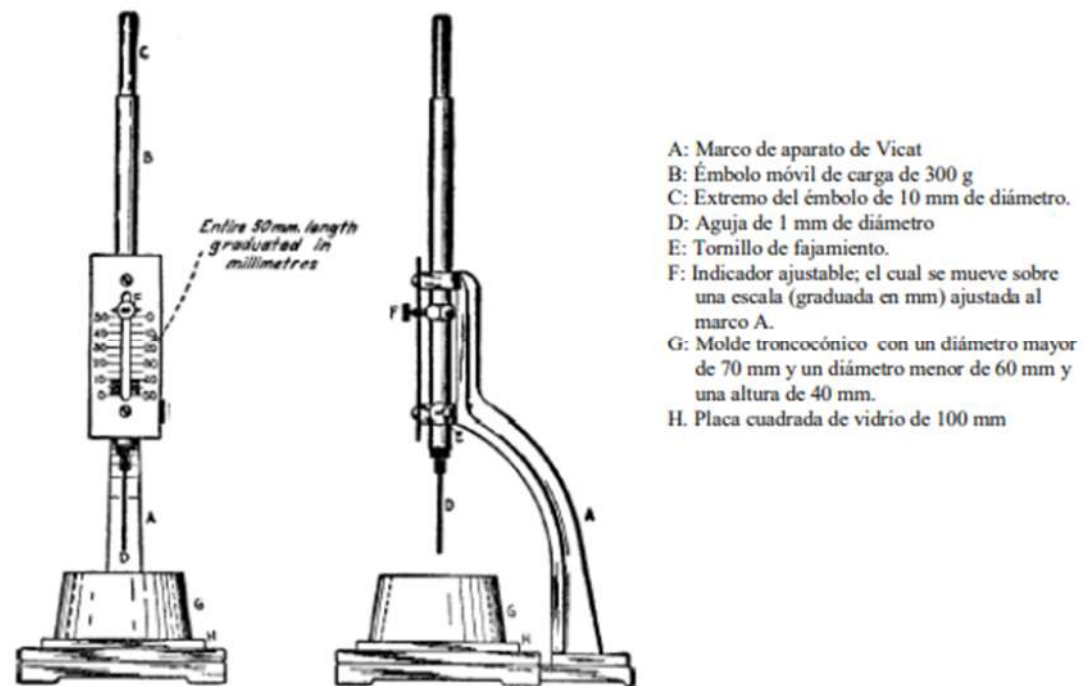


Figura 16. Aparato de aguja de Vicat manual y sus partes[65].

El procedimiento para la consistencia y el tiempo fraguado de este ensayo nos lo detalla Rodríguez[66] en su investigación:

- a. Consistencia normal:** Determinar la consistencia normal de la pasta de cemento, palabra que refiere a la resistencia que opone la pasta a la penetración de la aguja en un tiempo normalizado y es cuando la aguja penetra 10mm bajo la superficie original.
- Pesar 650 gramos de cemento + agregados.
 - Tomar agua en una probeta y registrar su volumen.
 - Colocar el agua en el recipiente donde se va a mezclar y añadir el cemento.
 - Hacer una bola con las manos y lanzarla de una mano a otra a una distancia de 15 centímetros aproximadamente.
 - Introducir la mezcla en el anillo de Vicat por el extremo más abierto y colocar el anillo sobre la placa de vidrio dejando libre el extremo menor.
 - Enrazar la superficie sin comprimir la pasta y luego colocar en el centro la pasta bajo la aguja del aparato manual de Vicat, ajustando la altura para que tenga contacto con la superficie y colocando el indicador móvil en cero.

- Soltar la aguja dentro de la mezcla, esperar medio minuto y registrar la penetración
- Repetir desde el paso 1 hasta obtener una penetración de 10mm.
- Calcular la consistencia mediante las siguientes formulas:

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

Donde:

C= consistencia normal.

Ma= masa agua (gr).

Mc= masa cemento (gr).

b. Tiempo de fraguado: Después de obtener la consistencia normal seguir los siguientes pasos:

- Con la consistencia obtenida en los pasos anteriores, realizar una bola y lanzarla de una mano a otra a una distancia de 15 centímetros aproximadamente.
- Introducir la mezcla en el anillo de Vicat por el extremo más abierto y colocar el anillo sobre la placa de vidrio dejando libre el extremo menor.
- Enrazar la superficie sin comprimir la pasta y luego colocar en el centro la pasta bajo la aguja del aparato automático de Vicat, e iniciar el ensayo.
- El tiempo que transcurre entre el contacto del agua y el cemento y cuando la aguja penetra 25 mm es el tiempo de fraguado inicial y se calcula mediante:

$$\left(\frac{h - e}{c - d} * (c - 25) \right) + e$$

Donde:

e= tiempo de la última penetración mayor que 25mm (min).

h= tiempo de la primera penetración menor que 25 mm (min).

c= lectura de penetración al tiempo e.

d= lectura de penetración al tiempo h.

- La primera lectura de penetración que no dañe la superficie de la pasta se denomina tiempo de fraguado final.

1.1.3.7. Técnicas de caracterización química

Para conocer los compuestos y componentes químicos de las muestras analizadas y poder caracterizar dichas muestras los autores en investigaciones previas han usado dos métodos los cuales son:

- Microscopia Electrónica de Barrido (MEB)
- Microanálisis Dispersivo en Energía de Rayos X (EDS)

1.1.3.7.1. Microscopia electrónica de barrido (MEB)

Uno de los métodos para caracterizar materiales esta la microscopia electrónica de barrido conocidas como SEM (Scanning Electron Microscopy) por sus siglas en inglés. Este es un método para la caracterización química y morfológica del cemento y las zeolitas que usa microscopios ópticos electrónicos para magnificar hasta 2000 veces el tamaño de un objeto en este caso los cementos y zeolitas, y obtener detalles de hasta 0.2 μm . El microscopio electrónico de barrido (MEB) provee de imágenes mediante la detección, el procesamiento y la visualización de las señales resultantes de interacciones entre un haz de electrones de alta energía con la materia, estas interacciones brindan información topográfica, de composición y de estructura de manera tridimensional y orientarlo de manera bidimensional[67].

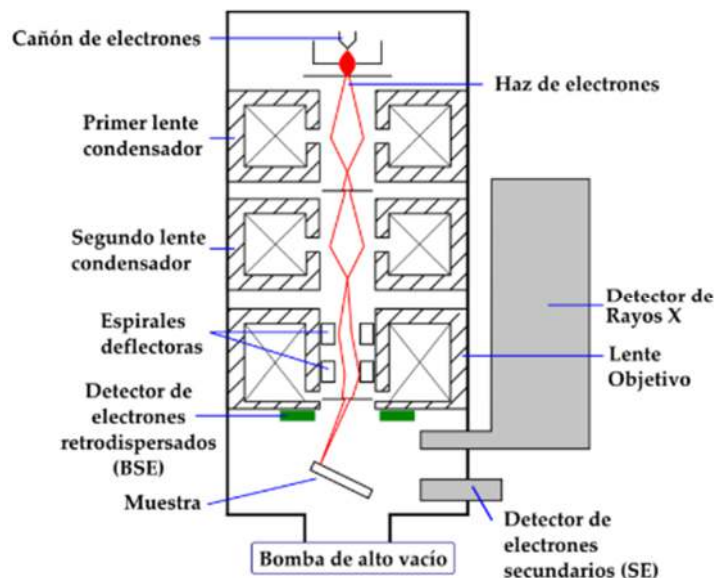


Figura 17. Esquema de un equipo MEB[68].

El procedimiento es el detallado por Salcedo[69] a continuación:

- Se preparan muestras de los materiales, conservándolos en ambientes herméticos, para luego secarlos en un horno a 40°C por un día, para posteriormente ser recubiertas con un material conductor (sputtering de oro) para mejorar la cantidad de electrones secundarios y obtener una imagen mejor.
- Las muestras deben ser bien registradas para un mejor manejo.
- Colocar las muestras en el porta muestras del microscopio y configurar el equipo de acuerdo con el material.
- Variar los enfoques cambiando el aumento para analizar de mejor manera su morfología.

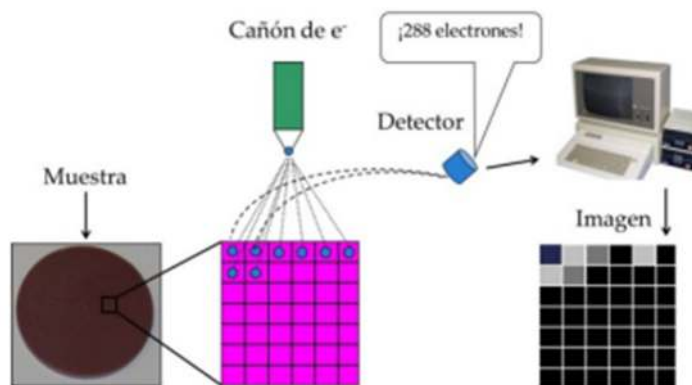


Figura 18. Secuencia del proceso de formación de la imagen[68].

1.1.3.7.2. Microanálisis dispersivo en energía de rayos X (EDS)

Este método se lo realiza con un detector de rayos X que en casi todos los casos viene adaptado al microscopio electrónico de barrido, determina el espectro de composición química y los elementos de las muestras que son propios de cada elemento. Cada uno emite una radiación propia en magnitudes de energía o longitud de onda.

Los rayos X de cada elemento se detectan por un sistema que emite pulsos con diferente magnitud que dependen de la energía incidente, para luego formar un espectro como se observa en la Figura 19 que relaciona la cantidad de pulsos y la energía de cada uno, por lo que son identificados rápidamente.

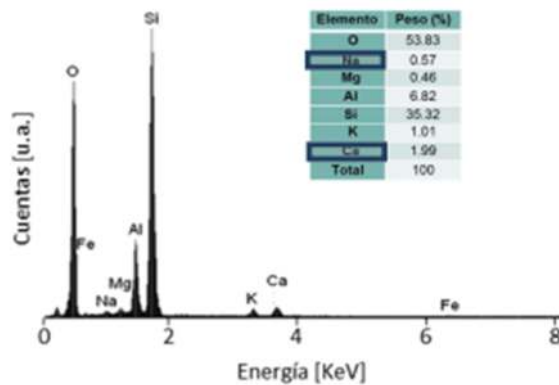


Figura 19. Espectro de composición química de muestra de zeolita natural[70].

El procedimiento nos lo detalla Salcedo[69], a continuación:

- Después de realizar el análisis MEB, se obtiene los espectros químicos y su composición porcentual de los elementos de cada muestra, señalando sobre áreas en las que nos interese analizar.
- Realizar cálculos para obtener relación silicio-aluminio, porcentajes de óxidos por elemento.
- Determinar compuestos principales mediante ecuaciones de Bogue.
- Análisis de resultados.

1.1.3.8. Técnicas de caracterización mecánica

1.1.3.8.1. Resistencia a compresión (NTE INEN 1573)

Este método de ensayo se emplea para obtener la resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico. Este método de ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión como se observa en la Figura 20, a los especímenes de cemento hidráulico a una velocidad que se encuentra dentro del rango hasta que ocurra la falla del material. La resistencia a la compresión se obtiene dividiendo la carga máxima para el área transversal del espécimen. Estos resultados se los usan para controlar y evaluar los parámetros de calidad y resistencia y así aceptar este material[71].

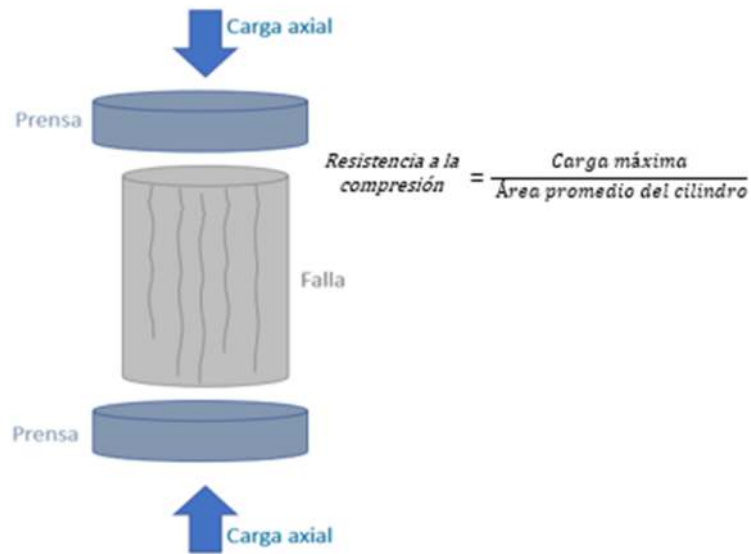


Figura 20. Esquema resistencia a compresión[72].

1.1.3.8.2. Resistencia a tracción indirecta (NTE INEN 2648)

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 21. 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[73]. Las normativas correspondientes son NTE INEN 2648 que se basa en la norma internacional ASTM496.

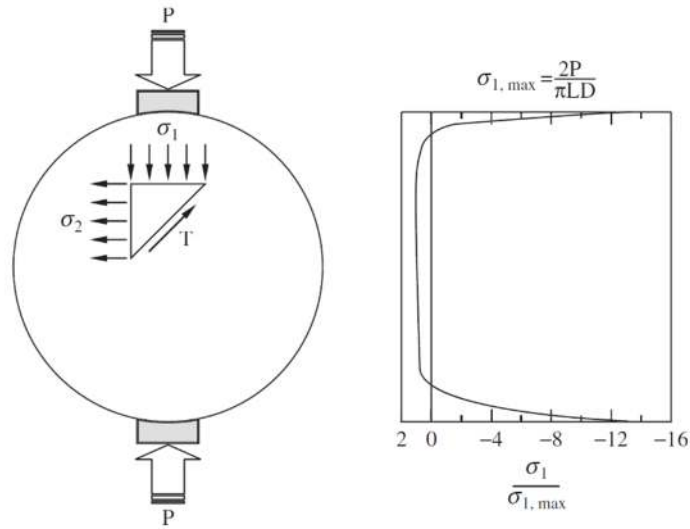


Figura 21. Esquema tracción indirecta.

1.1.3.8.3. Profundidad de penetración de agua bajo presión

Este ensayo se usa para determinar la profundidad que penetra el agua inducida a presión en hormigones ya fraguados y posteriormente curados en agua. El agua es aplicada a presión a la superficie del hormigón ya endurecido durante un rango de tiempo[74]. Para este ensayo vamos a usar la norma española UNE-EN 12390-8 ya que en nuestro país no existe una norma que estandarice este tipo de ensayos.



Figura 22. Ensayo de penetración de agua bajo presión[75].

1.1.3.9. Análisis de Datos

1.1.3.9.1. Línea de tendencia

Las líneas de tendencia, de ajuste o de regresión, señalan gráficamente cual es la tendencia de una cantidad de datos y se las usan para realizar predicciones mediante el uso de gráficos. Una línea de tendencia es una línea o curva que une o pasa a través de dos o más cantidades de datos de una serie y nos muestra la tendencia que esta tiene.

Se pueden mostrar de varios tipos de gráficos pueden ser de dispersión, de burbujas, de áreas y de gráficos predeterminados, y se pueden especificar varios tipos de líneas de tendencia entre los cuales IBM nos detalla los siguientes:

- **Lineal:** Se usa este tipo de línea cuando los valores de los datos aumentan o disminuyen en una línea recta y constantemente.
- **Polinomial:** Esta se usa cuando los valores de los datos aumentan y disminuyen.
- **Logaritmo:** Este tipo de línea de tendencia logarítmica si los valores de los datos aumentan y disminuyen luego estabilizándose.
- **Promedio móvil:** Se utiliza cuando los valores de datos cambian y se desean suavizar para observar la tendencia.

Cuando no se sabe exactamente qué tipo de línea usar se debe ir comprobando con cada una de ellas y verificar cual tiene mayor similitud o se ajusta más a los datos que se tienen.

1.1.3.9.2. Interpolación de datos

La interpolación de datos permite analizar valores que presentan un alto grado de confianza. Se utiliza para estimar valores de una variable dependiente a partir del valor de una variable independiente que no consta en los datos con los que se tiene.

El proceso es construir una curva o superficie que enlace los puntos donde se han realizado los ensayos y con valores conocidos. Hay que asumir que el punto de la variable independiente se encuentre dentro de los límites de los puntos que se tienen y así obtener el valor aproximado de la variable dependiente[76].

- **Interpolación lineal:** Es el método más sencillo y se interpola mediante el uso de líneas rectas entre una serie de datos o puntos. El principio básico es unir estos dos puntos mediante líneas rectas.
- **Interpolación polinómica:** La interpolación polinómica está formado por varios polinomios, cada uno definido sobre sub-intervalos que se enlazan entre si formando curvas.

1.1.4. HIPÓTESIS

- El estudio de la correlación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de aluminosilicatos de la Cordillera Chongón-Colonche permite identificar la mejor zeolita para utilizarla como sustituto parcial del cemento.

1.2.OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

- ❖ Correlacionar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de hormigones elaborados con aluminosilicatos de la cordillera Chongón-Colonche como sustituto parcial del cemento.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Interpolar los resultados obtenidos de la caracterización de muestras de aluminosilicatos provenientes de la cordillera Chongón-Colonche.
- ✓ Analizar las variaciones resultantes en el hormigón con sustitución parcial del cemento por zeolita natural ZZ.
- ✓ Determinar la influencia de la sustitución parcial del cemento portland por la zeolita natural en la elaboración del hormigón.

CAPÍTULO II

2. MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1.DEFINICIÓN DE VARIABLES

Tabla 5. Datos recopilados.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO													
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA													
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL													
Autor	Muestra	Característica	Proveedor	Finura		Densidad		MEB	EDS	Tiempo de Fraguado	Resistencia a compresión	Resistencia a tracción indirecta	Penetración de agua bajo presión
				Tamizado Seco	Aparato de Blaine	Picnómetro	Le chatelier						
Salcedo^a	CGU	Tipo GU	Holcim	X		X		X	X				
	ZA	Zeolita Azul	Zeonatec	X		X		X	X				
	ZZ	Mineplus	Zeonatec	X		X		X	X				
	ZI	Zeolita Indami	Indami	X		X		X	X				
Fernández^b	CIP	Tipo IP	Selvalegre	X		X		X	X				
	ZA	Zeolita Azul	Zeonatec	X		X		X	X				
	ZZ	Mineplus	Zeonatec	X		X		X	X				
	ZI	Zeolita Indami	Indami	X		X		X	X				
Ramos^c	CIP	Tipo IP	Selvalegre	X		X		X	X				
	ZV	Zeolita Verde	Zeonatec	X		X		X	X				
	ZX	Zeolita Elena	Mina Elena	X		X		X	X				
	ZCr	Zeolita Crilarsa C.A	Crilarsa	X		X		X	X				

Maldonado ^d	CGU	Tipo GU	Holcim	X		X		X	X				
	ZV	Zeolita Verde	Zeonatec	X		X		X	X				
	ZX	Zeolita mina Elena	Mina Elena	X		X		X	X				
	ZCr	Zeolita Crilarsa C.A	Crilarsa	X		X		X	X				
Yanchaguano ^e	CGU	Tipo GU	Holcim	X		X		X	X				
	ZC	Zeolita café	Zeonatec	X		X		X	X				
	ZR	Zeolita Roja	Zeonatec	X		X		X	X				
	ZCa	Zeolita Calmosa	Calmosa Corp. S.A	X		X		X	X				
Rodríguez ^f	CGU	Tipo GU	Holcim		X		X			X	X		
	ZZ	Mineplus	Zeonatec		X		X						
Panimbosa ^g	CGU	Tipo GU	Holcim		X		X			X		X	X
	ZZ	Mineplus	Zeonatec		X		X						

En la Tabla 5 tenemos detalles de los autores, características y proveedores de cada una de las muestras y los ensayos realizados por los mismos para caracterizar los diferentes cementos y también aluminosilicatos pertenecientes a la Cordillera Chongón-Colonche física, química, morfológica y mecánicamente.

Los autores Salcedo[69], Fernández[77], Ramos[78], Maldonado[79] y Yanchaguano[80], fueron los encargados de caracterizar el cemento tipo GU e IP, y también los aluminosilicatos ZA, ZZ, ZI, ZX, ZV, ZCr, ZC, ZR, y ZCa, física, química y morfológicamente respetivamente como se observa en la tabla.

Los autores Rodríguez[66] y Panimbosa[81] fueron los encargados de analizar muestras de cemento tipo GU y aluminosilicato ZZ físicamente y también mecánicamente al realizar especímenes de concreto con sustituciones de ZZ en porcentajes de 0%, 10%, 15% y 20% y realizando ensayos a diferentes edades como

se lo señala posteriormente. Cabe recalcar que en los trabajos de estos autores al aluminosilicato se lo denomina con ZV, pero al relacionarlo con el aluminosilicato de investigaciones anteriores es el mismo material que la muestra Mineplus por lo que en esta investigación se lo denomino ZZ.

2.2. MATERIALES

2.2.1. ESPECÍMENES DE HORMIGÓN

Se utilizó 22 especímenes de hormigón con sustitución de 10%, 15% y 20% de aluminosilicato ZZ por cemento portland elaborados previamente por Rodríguez[66] con fecha 08 de junio de 2021, 18 muestras con diámetro 100 mm y altura 200 mm y 4 con diámetro de 150 mm y altura 200 mm, posteriormente almacenados en el tanque de almacenamiento de curado del laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.



Figura 23. Especímenes de hormigón.

2.3. EQUIPOS

2.3.1. TANQUE DE CURADO

Tanque grande elaborado de plástico de polietileno, posee una reja de metal en el fondo que sirve como base y en el interior del tanque posee un calefactor digital por termostato de marca Matest con características 230V 1F 50/60Hz 2000W, que

brinda con gran exactitud la temperatura, el volumen del tanque es de 0.65 metros cúbicos y sus medidas internas son 1.05 x 1.05 x 0.6 m.



Figura 24. Tanque de curado.

2.3.2. MÁQUINA PARA ENSAYOS DE COMPRESIÓN

La máquina SHIMADZU 2000X es una máquina para ensayos de compresión que puede realizar ensayos de una manera seguro y efectiva sin causar fracturas explosivas en las muestras de hormigón usados en distintos tipos de proyectos[82].

Tabla 6. Características Shimadzu 2000X.

<i>Características</i>	
<i>Capacidad de prueba</i>	<i>40 a 2000 kN</i>
<i>Método de control</i>	<i>Tipo servo hidráulico</i>
<i>Diámetro de las placas</i>	<i>22 cm</i>



Figura 25. Máquina de compresión.



Figura 26. Herramienta para ensayos de compresión diametral.

2.3.3. BOMBA MANUAL PARA PRUEBAS HIDROSTÁTICAS

La bomba manual compacta para pruebas hidrostáticas HELBERT HRAL 104 es un aparato para trabajo liviano que puede alcanzar presiones máximas de 400 PSI con su cuerpo de aluminio y acero, y con un manómetro que nos ayudara a controlar la presión es la bomba usada para el ensayo de penetración de agua bajo presión en el hormigón[83].

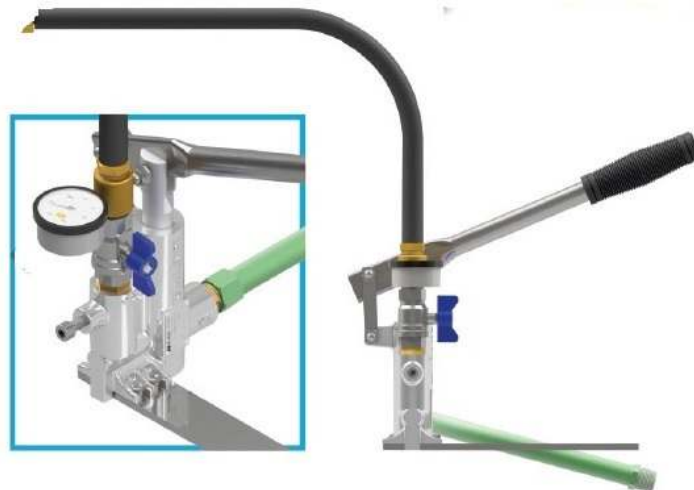


Figura 27. Bomba HRAL 104.

Tabla 7. Características bomba HRAL 104.

<i>Características</i>	
<i>Conexión</i>	<i>1/2" NPS</i>
<i>Presión máxima de trabajo</i>	<i>400 PSI</i>
<i>Peso total</i>	<i>2.9 Kg</i>

2.3.4. SOFTWARE EXCEL

Excel es un programa de Microsoft, es una hoja de cálculo que nos permite manejar datos numéricos y de texto en tablas formadas por la unión de filas y columnas. Al ingresar datos numéricos y alfanuméricos en las hojas de cálculo, se puede realizar múltiples cálculos matemáticos básicos y de funciones más complejas incluyendo también datos estadísticos o funciones lógicas. Las hojas de cálculo vuelven más fáciles en gran magnitud trabajar con información para realizar análisis y reportes mediante gráficos y tablas dinámicas[84].



Figura 28. Símbolo software Excel.

2.4. METODOLOGÍA

2.4.1. TIPOS DE INVESTIGACIÓN

- **Investigación documental:** Este tipo de investigación se lo uso al recopilar información bibliográfica de varios trabajos de investigación y caracterización de aluminosilicatos de la Cordillera Chongón-Colonche de autores de la Universidad Técnica de Ambato y de artículos científicos de diversas fuentes nacionales e internacionales con un enfoque en propiedades físicas, químicas y morfológicas de materiales cementantes suplementarios MCS (SCM, por sus siglas en inglés) principalmente los aluminosilicatos para la elaboración de tabla dinámicas en Excel y el posterior análisis de dichos datos de propiedades mecánicas con adición parcial de aluminosilicato ZZ en especímenes de hormigón. Se tomo en cuenta para la recopilación de estos datos:
 - Tipo de ensayo y la variación de resultados dependiendo del método seleccionado.
 - Precisión del ensayo.
 - Número de veces que se realizó el ensayo.
 - Procedencia de la Zeolita.

- **Investigación experimental:** Se lo realizó en los ensayos respectivos en los especímenes de hormigón y en los análisis de los resultados obtenidos mediante los mismos. Los ensayos comprenden la determinación de resultados de propiedades mecánicas de hormigón como compresión, tracción indirecta y penetración de agua bajo presión en muestras previamente elaboradas y con un tiempo conocido de curado para así poder interpolar estos datos con los resultados previos y así realizar el debido análisis aplicando normas nacionales como NTE INEN e internacionales como ASTM vigentes en la actualidad.
 - ❖ El ensayo a compresión de los especímenes se lo realizó siguiendo los pasos y parámetros mencionados en la norma nacional NTE INEN 1573 que nos sirve para realizar pruebas de la resistencia a compresión.

- ❖ El ensayo a tracción indirecta se lo desarrolló con referencia a la norma nacional NTE INEN 2648 que está fundamentada en la norma internacional ASTM 496.
- ❖ El ensayo a penetración de agua bajo presión en el hormigón se lo realizó siguiendo la norma española UNE-EN 12390-8, ya que nuestro país carece de una norma que regule este parámetro en el hormigón.
- En la parte final se realizará un análisis de los datos recopilados de las tablas dinámicas de propiedades físicas, químicas, morfológicas de las muestras de zeolitas caracterizadas de la cordillera Chongón-Colonche comparadas con el cemento Portland y un análisis de las propiedades mecánicas de los especímenes con la suplantación parcial en diferentes porcentajes de zeolita por cemento Portland y su influencia en los resultados mecánicos.

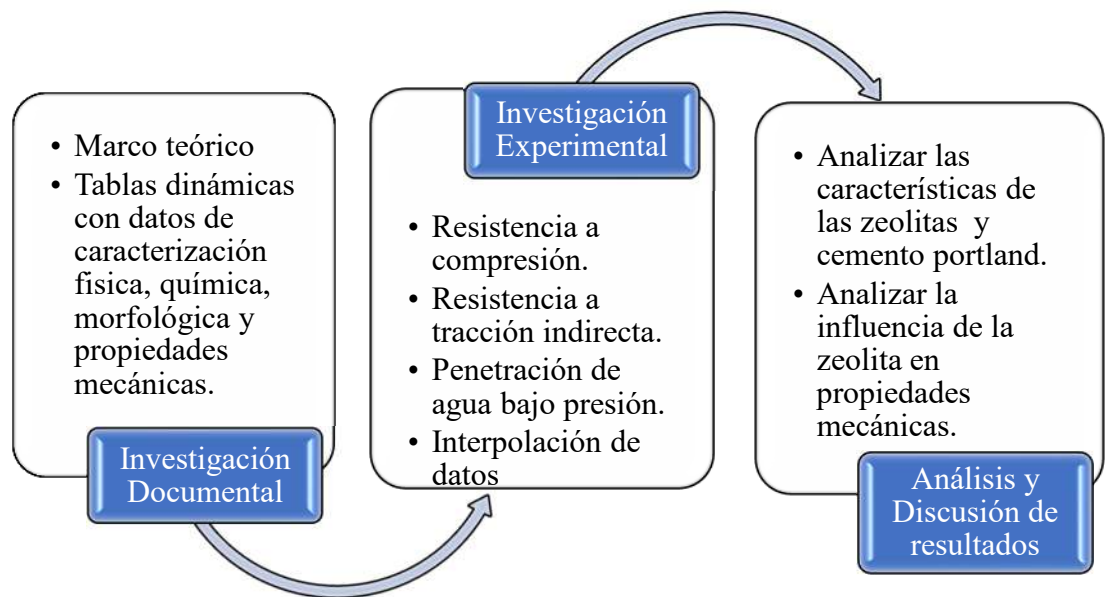


Figura 29. Proceso metodológico aplicado.

2.4.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Este ensayo se lo realizó en los Laboratorios de Ensayos de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica con la máquina SHIMADZU 2000X para obtener resultados de la resistencia a compresión de los especímenes previamente elaborados con suplantación parcial de aluminosilicato ZZ en porcentajes de 10%,

15% y 20% y con dimensiones de 100 mm de diámetro y de 200 mm de altura con un tiempo de curado de 267 días a partir de su elaboración se lo realizo tomando en cuenta todos los parámetros mencionados en la norma NTE INEN 1573[71]. El procedimiento es el siguiente:

- 1) Extraer los especímenes a ser ensayados por lo menos 24 horas antes de realizar el ensayo.
- 2) Antes de empezar con el ensayo tomar la masa de cada espécimen y registrarlo.
- 3) Ya encendida la máquina, medir y colocar los datos necesarios de los especímenes para realizar el ensayo.
- 4) Colocar el espécimen en el plano inferior en la parte más centrada posible.
- 5) Verificar que el indicador de carga se encuentre en cero.
- 6) Empezar a aplicar la carga continuamente y sin generar impactos de ningún tipo, la velocidad de la carga debe ser de 0.25 MPa/s y esta debe ser constante.
- 7) Aplicar la carga hasta que el indicador de carga empiece a decrecer de manera constante y que el espécimen falle de manera bien definida y así se obtenga la carga ultima de resistencia.
- 8) Registrar la carga máxima y la resistencia a compresión.

2.4.3. RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA

Este ensayo se lo realizo en los Laboratorios de Ensayos de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica con la máquina SHIMADZU 2000X, es un ensayo destructivo y se lo realiza con la herramienta para comprimir los cilindros diametralmente y así inducir esfuerzos de tracción obteniendo la fuerza a tracción aplicada en los especímenes hasta que la muestra falle y luego calcular la resistencia mediante la fórmula. Para distribuir la carga aplicada correctamente se debe aplicar sobre pedazos de madera delgados. La falla por tracción siempre ocurre antes que la falla por compresión. Los especímenes fueron previamente elaborados con suplantación parcial de aluminosilicato ZZ en porcentajes de 10%, 15% y 20% y con dimensiones de 100 mm de diámetro y de 200 mm de altura con un tiempo de curado de 267 días a partir de su elaboración, este ensayo se lo realizo tomando en cuenta

todos los parámetros mencionados en la norma NTE INEN 2648. El procedimiento que se realizó es el siguiente:

- 1) Extraer los especímenes a ser ensayados por lo menos 24 horas antes de realizar el ensayo.
- 2) Antes de empezar con el ensayo tomar la masa de cada espécimen y registrarlo.
- 3) Dibujar con la ayuda de un marcador y un flexómetro las líneas diametrales procurando que la línea se encuentre en el mismo plano.
- 4) Ya encendida la máquina, colocar las tablas sobre el marco inferior y superior en el centro de la herramienta.
- 5) Medir el espécimen y colocar los datos en la computadora previo a empezar con el ensayo.
- 6) Colocar el espécimen previamente marcado sobre el marco inferior centrado y posteriormente colocar el marco superior con la tabla sobre la línea diametral centrada. De manera que la línea del espécimen quede alineada con el centro de ambas tablas.
- 7) Aplicar la carga a una velocidad constante y sin producir golpes, hasta observar la falla del espécimen.
- 8) Registrar la carga máxima aplicada y observar el tipo de falla en la muestra.
- 9) Calcular la resistencia a la tracción por compresión diametral mediante la siguiente fórmula:

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

Donde:

T= Resistencia a tracción (MPa).

P= Carga máxima (N).

L= Longitud (mm).

D= Diámetro (mm).

2.4.4. ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN

Este ensayo se lo realizó en los laboratorios de ensayos de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica con la Bomba Manual para Pruebas Hidrostáticas de marca Helbert modelo HRAL-104 que alcanza presiones de hasta

400 psi y también se usó la mesa de permeabilidad para colocar los especímenes de 150 mm de diámetro y de 300 mm de longitud. Debido a que nuestro país no posee una norma que estandarice este ensayo se utilizó la norma española UNE-EN 12390-8 que es la que sirve para ensayos de hormigón endurecido en específico para determinar la profundidad de penetración de agua bajo presión. El procedimiento realizado es el siguiente:

- 1) Retirar la probeta del tanque de curado antes de realizar el ensayo.
- 2) Proceder a desbastar la cara del espécimen donde va a ser aplicada el agua a presión con un cepillo metálico.
- 3) Colocar el espécimen en la mesa que se va a realizar el ensayo y ajustar la tapa superior fuerte.
- 4) Cebado la bomba siguiendo los pasos detallados en el instructivo de la bomba y proceder a conectar al sistema de la mesa.
- 5) Ya cebado el sistema aplicar la presión hasta llegar a los 500 kPa o que equivalen a 72.52 psi durante 72 horas.
- 6) Revisar periódicamente que no se reduzca la presión con los manómetros de la bomba y del sistema que no exista fugas en el sistema para garantizar la presión.
- 7) Después de las 72 horas, quitar la presión de la bomba hasta que se reduzca a cero.
- 8) Aflojar la tapa superior, retirar el espécimen y proceder a realizar el ensayo a tracción indirecta siguiendo los pasos del punto 2.3.3.
- 9) Observar la falla, medir la profundidad que el agua penetra y registrarla.

2.4.5. INTERPOLACIÓN DE DATOS

Después de obtener los valores de los ensayos de propiedades mecánicas y recopilar con los resultados de ensayos previos se realizó gráficos que ayuden a interpretar, comprender y analizar la adición del aluminosilicato ZZ en la suplantación parcial del cemento portland en el concreto en sus propiedades mecánicas como resistencia a compresión y tracción indirecta, después de haber pasado cierto tiempo en el tanque de curado. Se realizó el proceso siguiente:

- 1) Realizar gráficos relacionando el tiempo de curado y la resistencia adquirida con el software Excel.
- 2) Mediante las líneas de tendencia buscar la que más se acople o tenga más similitud a la del gráfico formado por los valores.
- 3) Ya obtenida la ecuación que representa a esta curva proceder a reemplazar los valores para obtener la resistencia en el tiempo requerido.

CAPÍTULO III



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1.1. DENSIDAD

En la Tabla 8 y Figura 30 tenemos la recopilación de datos de densidad presentados en trabajos previos por varios autores y por dos métodos para así contrastarlos, se observa el número de veces realizados el ensayo y los resultados obtenidos individualmente y promediados, también se tiene que los resultados deben diferir con valores menores a 0.03 como señala la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 156.

Tabla 8. Resumen datos densidad real.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 											
MÉTODO DEL PICNÓMETRO											
NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 156											
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD											Desviación Estándar
UNIDADES = (g/cm³)											
CEMENTO											
CGU^a	3.086	3.041	3.067	3.055	3.085	3.084	3.084	3.066	-	3.071	0.017
CIP^b	2.862	2.847	-	-	-	-	-	-	-	2.855	-
CIP^c	2.847	2.833	2.825	-	-	-	-	-	-	2.835	0.022
CGU^d	2.805	2.800	2.815	-	-	-	-	-	-	2.807	-
CGU^e	3.086	3.041	3.067	3.055	3.085	3.084	3.084	3.066	-	3.071	0.017
ALUMINOSILICATOS											
ZA^a	2.449	2.453	2.469	2.446	2.443	2.445	2.448	2.443	2.443	2.449	0.008
ZZ^a	2.507	2.511	2.509	2.507	2.531	2.503	-	-	-	2.511	0.010

ZI^a	2.485	2.484	2.525	2.482	2.485	2.481	2.511	2.496	-	2.494	0.016
ZA^b	2.429	2.402	2.393	-	-	-	-	-	-	2.408	0.002
ZZ^b	2.357	2.355	2.348	-	-	-	-	-	-	2.353	0.011
ZI^b	2.229	2.236	2.234	-	-	-	-	-	-	2.233	0.018
ZV^c	2.572	2.569	2.559	-	-	-	-	-	-	2.567	0.013
ZX^c	2.256	2.241	2.234	-	-	-	-	-	-	2.244	0.022
ZCr^c	2.214	2.224	2.228	-	-	-	-	-	-	2.222	0.004
ZV^d	2.572	2.569	2.559	-	-	-	-	-	-	2.567	-
ZX^d	2.241	2.234	2.256	-	-	-	-	-	-	2.244	-
ZCr^d	2.224	2.227	2.228	-	-	-	-	-	-	2.226	-
ZC^e	2.382	2.372	-	-	-	-	-	-	-	2.377	0.012
ZR^e	2.305	2.299	2.307	-	-	-	-	-	-	2.304	0.027
ZCa^e	2.203	2.211	-	-	-	-	-	-	-	2.207	0.021
MÉTODO LE CHATELIER											
CEMENTO											
CGU^f	2.892	2.890	2.895	-	-	-	-	-	-	2.892	-
CGU^g	2.892	2.890	2.895	-	-	-	-	-	-	2.892	-
ALUMINOSILICATOS											
ZZ^f	2.407	2.403	2.401	-	-	-	-	-	-	2.404	-
ZZ^g	2.401	2.404	2.412	-	-	-	-	-	-	2.406	-

^a Salcedo. V, ^b Fernández. P, ^c Ramos. F, ^d Maldonado. D, ^e Yanchaguano. D, ^f Rodríguez G, ^g Panimbosa. R.

El cemento portland generalmente tiene densidades que oscilan entre los 2.90 a los 3.15 g/cm³[85], sin embargo estos pueden variar disminuyendo debido a las adiciones que poseen[86], en los resultados recopilados por el método del picnómetro para el cemento tipo GU tenemos 3.071 y 2.807 g/cm³ con una variación de 0.264 g/cm³ y para el cemento IP tenemos 2.855 y 2.835 g/cm³ con una variación de 0.020 g/cm³, podemos observar que los valores de densidad del CGU fluctúan más que los del CIP. Por el segundo método del frasco Le Chatelier para el CGU tenemos un valor de 2.892 g/cm³ por ambos autores. Estos resultados se encuentran

cerca y dentro del rango antes mencionado, y las variaciones de esta propiedad se dan debido a la adición puzolánica y composición de cada tipo de cemento, observando que a mayor cantidad de adiciones la densidad es menor.

Para los aluminosilicatos por el método del picnómetro se obtuvieron los siguientes resultados:

- El aluminosilicato ZA tiene densidad obtenida de 2.449 y 2.408 g/cm³, resultados que varían con 0.041 g/cm³.
- Para el aluminosilicato ZZ tenemos densidades de 2.511 y 2.353 g/cm³, resultados que varían en 0.158 g/cm³.
- Para el aluminosilicato ZI tenemos valores de 2.494 y 2.233 g/cm³, resultados que varían en 0.261 g/cm³.
- Para el aluminosilicato ZV y ZX tenemos valores de 2.567 y 2.244 g/cm³ respectivamente.
- Para la muestra ZCr tenemos resultados de 2.222 y 2.226 g/cm³, resultados que varían en 0.004 g/cm³.
- Para las muestras ZC, ZR y ZCa se obtuvieron valores de 2.377, 2.304 y 2.207 g/cm³ respectivamente, valores que no varían debido a que se ensayaron solo por un autor.

Para los aluminosilicatos por el método de Le Chatelier tenemos los siguientes resultados:

- Para la muestra ZZ tenemos valores por este método de 2.404 y 2.406 g/cm³, valores que varían en 0.002 g/cm³.

En el caso del cemento los valores que fluctúan en mayor proporción por el método del picnómetro son los valores de densidad del tipo GU con 0.264 g/cm³ a comparación del IP con 0.020 g/cm³, y por el método Le Chatelier no existen variaciones.

Para las zeolitas tenemos valores que oscilan entre 2.20 y 2.60 g/cm³, todos estos valores cambian debido a la composición y la estructura de cada uno de los aluminosilicatos sin embargo son valores cercanos entre sí, la densidad de la muestra ZI varía más con 0.261 g/cm³ y la densidad de la muestra ZV es el valor que más se acerca a la del rango del cemento Portland con 2.567 g/cm³.

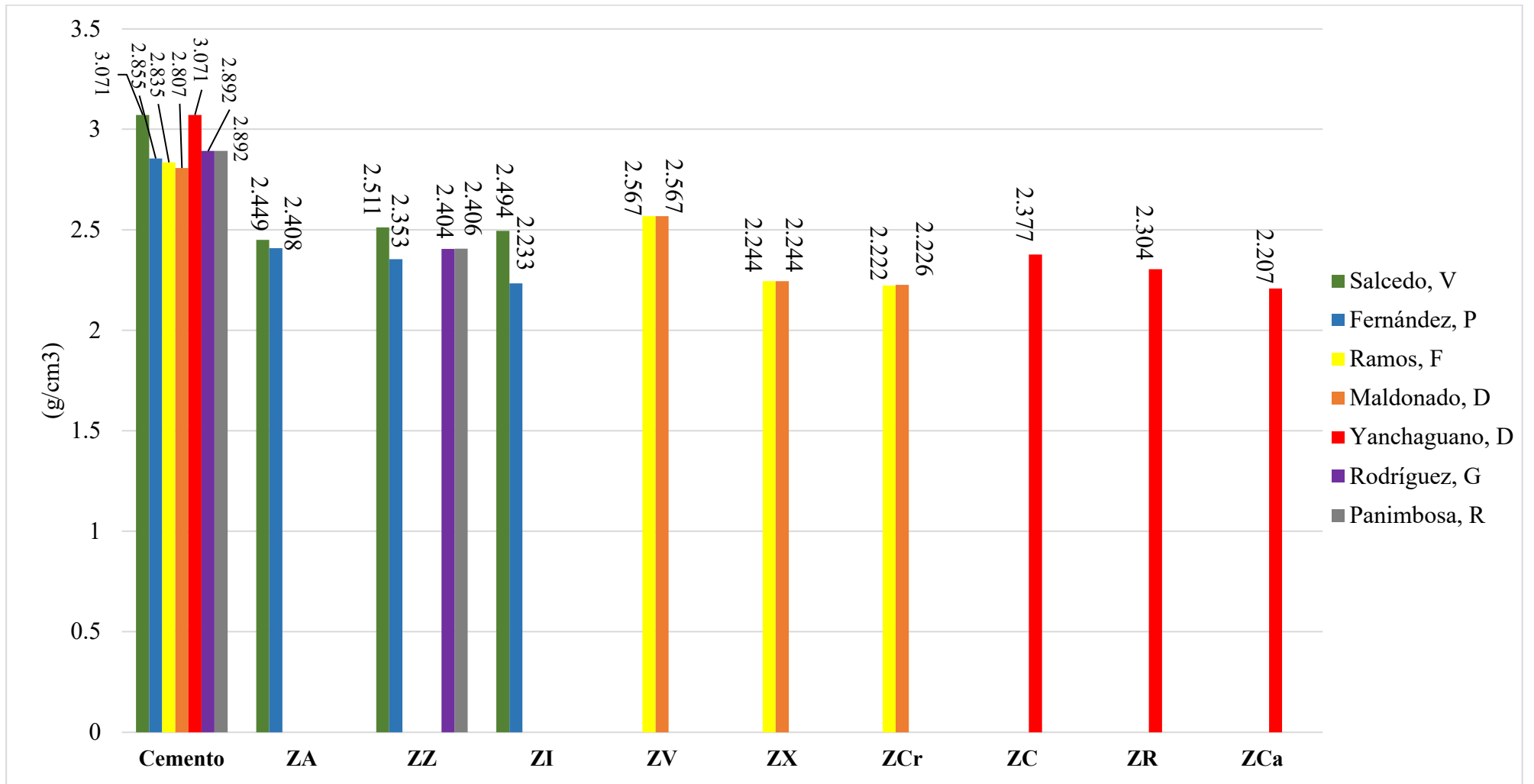




Figura 30. Diagrama de barras resultados densidad real.

3.1.2. FINURA

Tabla 9. Resumen de datos de Finura.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 							
FINURA MÉTODO DEL TAMIZADO SECO CON EL TAMIZ N° 100 (SIN CORRECCIÓN) NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 489 UNIDADES = %							
CEMENTO							
CGU^a	99.96	99.94	99.94	99.96	-	-	99.95
CIP^b	99.72	-	-	-	-	-	99.72
CIP^c	99.72	-	-	-	-	-	99.72
CGU^d	99.94	99.94	99.96	99.94	-	-	99.95
CGU^e	99.96	99.94	99.94	99.96	-	-	99.95
ALUMINOSILICATOS							
ZA^a	99.58	98.82	98.5	99.24	-	-	99.04
ZZ^a	99.52	99.78	99.68	99.04	-	-	99.51
ZI^a	98.34	99.6	99.66	99.8	-	-	99.35
ZA^b	99.58	98.82	98.50	99.24	-	-	99.04
ZZ^b	99.52	99.78	99.68	99.04	-	-	99.51
ZI^b	98.34	99.6	99.66	99.8	-	-	99.35
ZV^c	99.78	99.82	99.89	-	-	-	99.83
ZX^c	99.98	99.94	99.96	-	-	-	99.96
ZCr^c	99.7	99.84	99.74	-	-	-	99.76
ZV^d	99.78	99.78	99.82	99.86	-	-	99.81
ZX^d	99.98	99.98	99.94	99.96	-	-	99.97
ZCr^d	99.96	99.7	99.84	99.74	-	-	99.81
ZC^e	99.82	99.92	-	-	-	-	99.87
ZR^e	99.84	99.82	99.80	99.86	-	-	99.83
ZCa^e	99.74	99.78	99.56	99.74	-	-	99.71
APARATO DE BLAINE							
NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 196							
UNIDADES = m²/kg							
CEMENTO							
CGU^f	477.23	477.21	475.40	475.34	476.53	476.12	476.30
CGU^g	477.23	477.21	475.40	475.34	476.53	476.12	476.30
ALUMINOSILICATO							
ZZ^f	569.34	568.45	568.96	-	-	-	568.92
ZZ^g	562.42	562.73	563.07	-	-	-	562.74

^a Salcedo. V, ^b Fernández. P, ^c Ramos. F, ^d Maldonado. D, ^e Yanchaguano. D, ^f Rodríguez G, ^g Panimbosa. R.

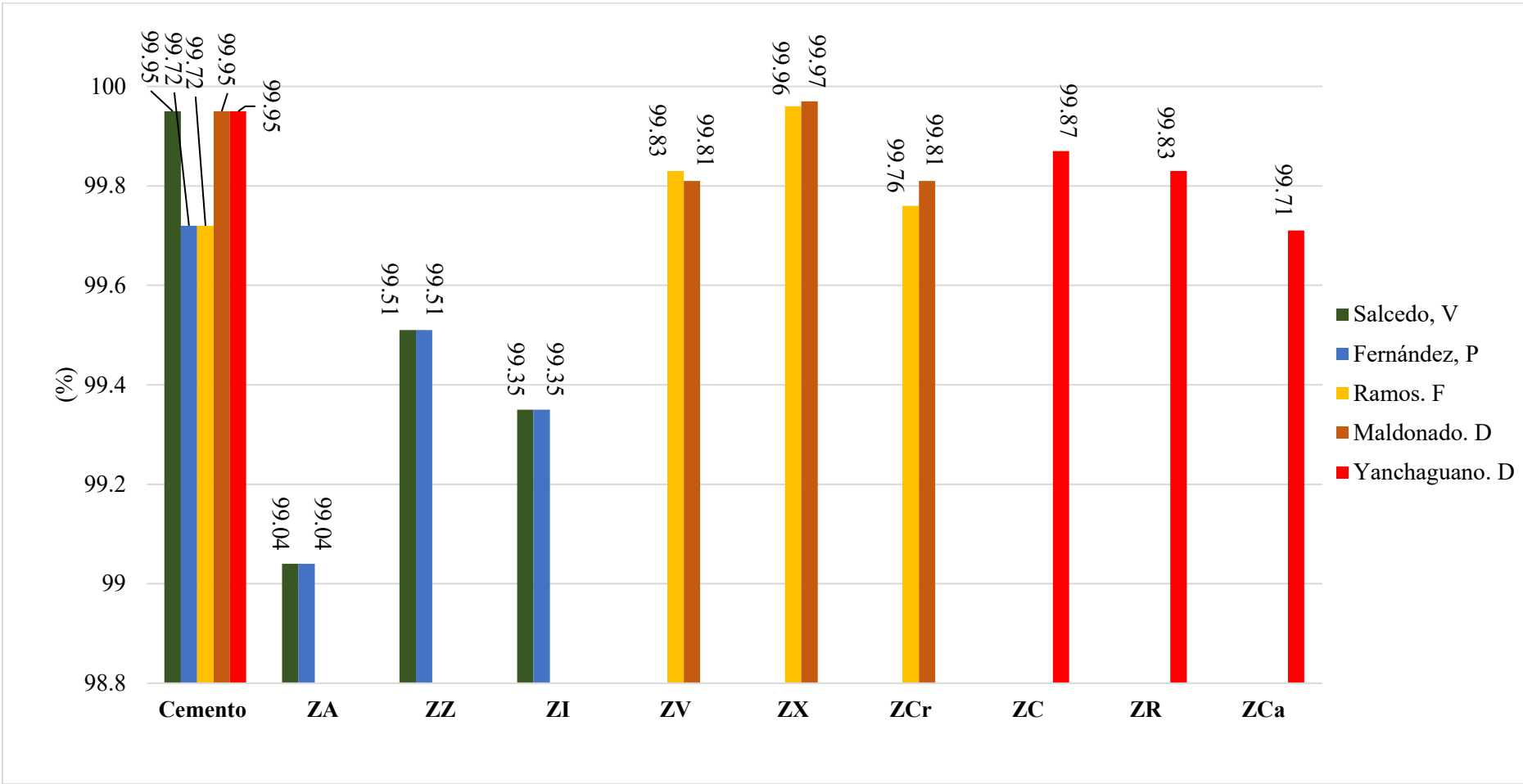


Figura 31. Diagrama de barras Finura método tamizado seco.

En la Tabla 9 se presentan la recopilación de datos de finura de todas las muestras analizadas en donde se puede observar la cantidad de veces que se realizó cada ensayo por muestra y el promedio de todas estas por dos métodos expresados en términos de porcentaje y superficie específica. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y Figura 32 tenemos los resultados ilustrados en diagramas de barras para una mejor comprensión y análisis. Las normas citadas en base a las que se realizaron los métodos no contemplan la desviación estándar para este tipo de ensayo.

El método de tamizado seco nos expresa el grado de finura de los materiales cementantes, deben tener máximo el 5% de impurezas. Mientras que el ensayo de Blaine nos indica la superficie específica del material característica importante en las reacciones químicas que sufre el cemento y esta es dependiente del diámetro de las partículas y la porosidad que existe entre partículas, nos indica que a mayor superficie específica las partículas son de menor tamaño. Ambas propiedades no guardan relación directa entre sí.

En el caso del cemento tipo GU tenemos una finura de 99.95% con un 0.05% de impurezas en los tres resultados y en el caso del tipo IP tenemos una finura de 99.72% con un 0.28% de impurezas en los dos valores, característica que cumple en ambos casos al poseer menos de 1% de impurezas.

En los aluminosilicatos tenemos la finura expresada en porcentaje como se muestra a continuación:

- El aluminosilicato ZA tiene una finura de 99.04% con 0.96% de impurezas.
- El aluminosilicato ZZ tiene una finura de 99.51% con 0.49% de impurezas.
- El aluminosilicato ZI tiene una finura de 99.35% con 0.65% de impurezas.
- El aluminosilicato ZV tiene una finura de 99.83% y 99.81% con 0.17% y 0.19% de impurezas respectivamente y difieren con 0.02% entre autores.
- El aluminosilicato ZX tiene una finura de 99.96% y 99.97% con 0.04% y 0.03% de impurezas respectivamente y difieren con 0.01% entre autores.

- El aluminosilicato ZCr tiene una finura de 99.76% y 99.81% con 0.24% y 0.19% de impurezas respectivamente y difieren con 0.05% entre autores.
- El aluminosilicato ZC tiene una finura de 99.87% con 0.13% de impurezas.
- El aluminosilicato ZR tiene una finura de 99.83% con 0.17% de impurezas.
- El aluminosilicato ZCa tiene una finura de 99.71% con 0.29% de impurezas.

Los resultados nos muestran que en todas las muestras de los aluminosilicatos analizados cumplen con el requisito de no poseer más de 5% de impurezas con valores que no pasan el 1%, incluso la muestra ZX posee menor cantidad de impurezas que el cemento tipo GU.

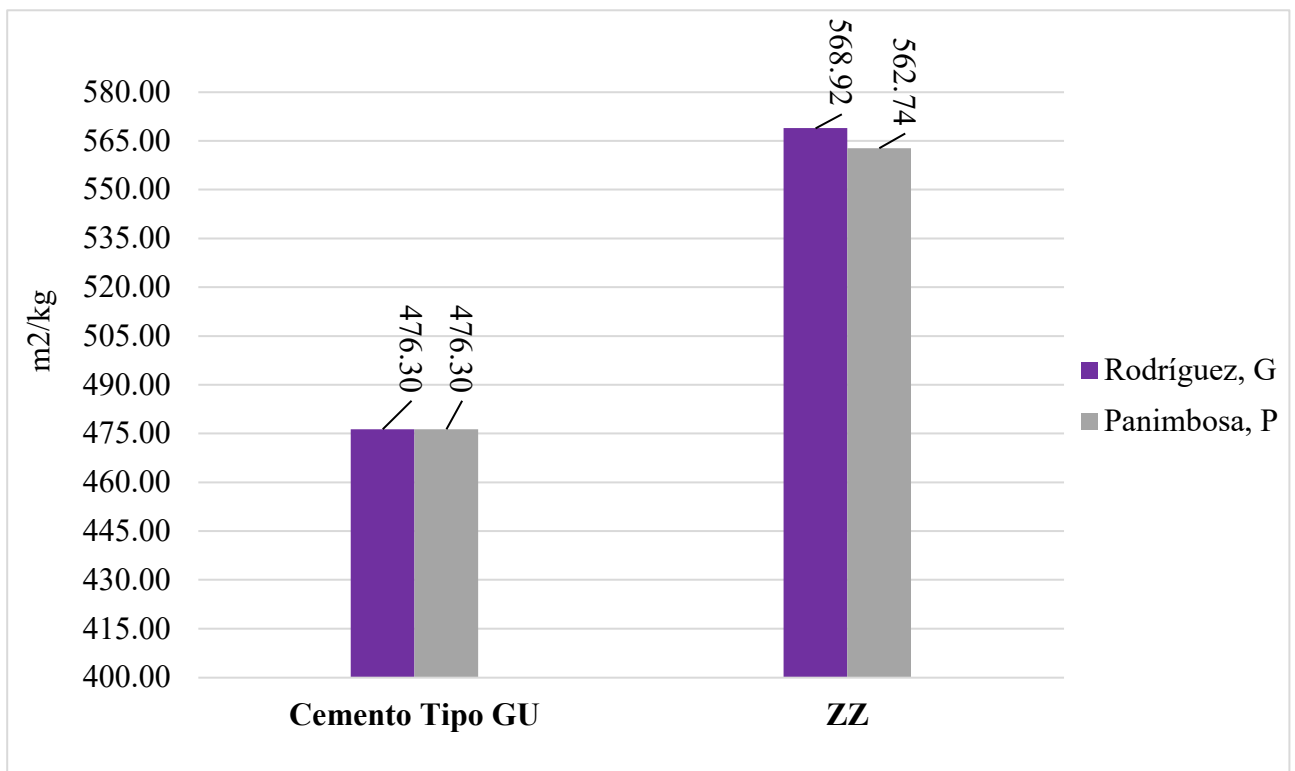


Figura 32. Diagrama de barras superficie específica del cemento Tipo GU y aluminosilicato ZZ.

El cemento tipo GU tiene una superficie específica de 476.30 m²/kg resultado obtenido por ambos autores que realizaron este ensayo, y el aluminosilicato ZZ con valores de superficie específica de 568.92 m²/kg y 562.74 m²/kg estos resultados

difieren en $6.18 \text{ m}^2/\text{kg}$ valor que sobrepasa los $5 \text{ m}^2/\text{kg}$ sin embargo esto se debería debido a la muestra. Estos valores se encuentran arriba de los límites inferiores que se establece la norma para el cemento hidráulico en la norma nacional con valor promedio de $260 \text{ m}^2/\text{kg}$. El cemento y el aluminosilicato al tener una superficie específica alta influye directamente al hidratar el cemento y en las reacciones que se producen al curarlo, mezclarlo y a largo plazo mejorando su durabilidad.

3.1.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO (MEB)

En la Tabla 10 encontramos los análisis de micrografía de todas las muestras de cemento y aluminosilicatos con una magnificación de 2000 veces, con su tamaño mínimo, máximo y promedio de las partículas que se encuentran presentes, y con una descripción de su forma y estructura aparente que conforma la morfología de la muestra.



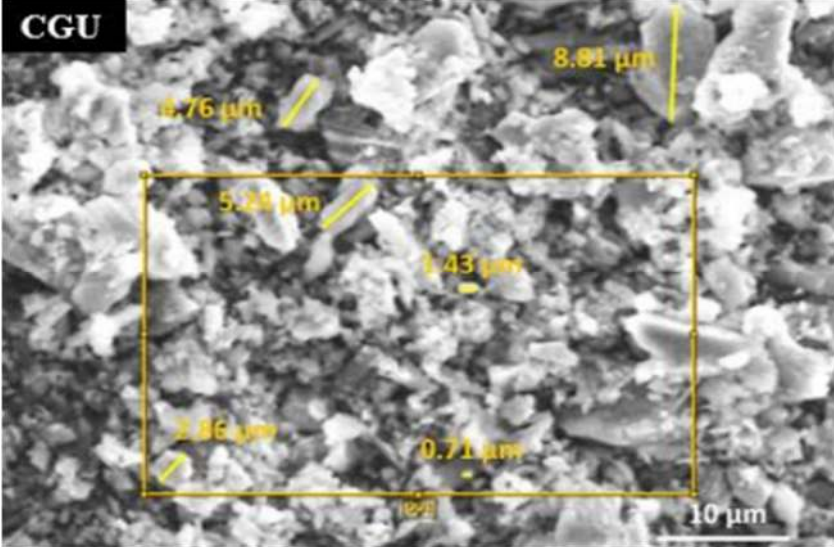
En el caso de los cementos para el tipo GU y el IP ambos tienen características de láminas irregulares y con varias aristas, la diferencia entre ambos es que el tipo GU posee algunas partículas redondeadas. Las muestras de cemento por lo general la mayor cantidad de partículas son menores a $45 \mu\text{m}$ [31], características que cumplen ambos con valores máximos de $8.81 \mu\text{m}$ y $20.00 \mu\text{m}$ respectivamente.

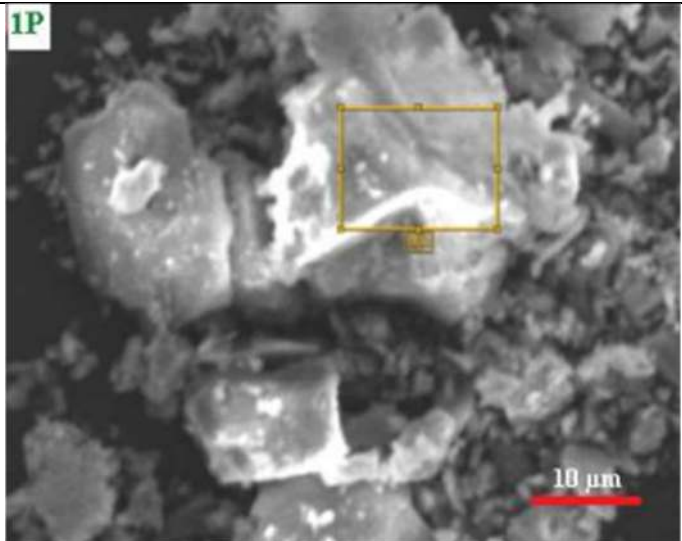
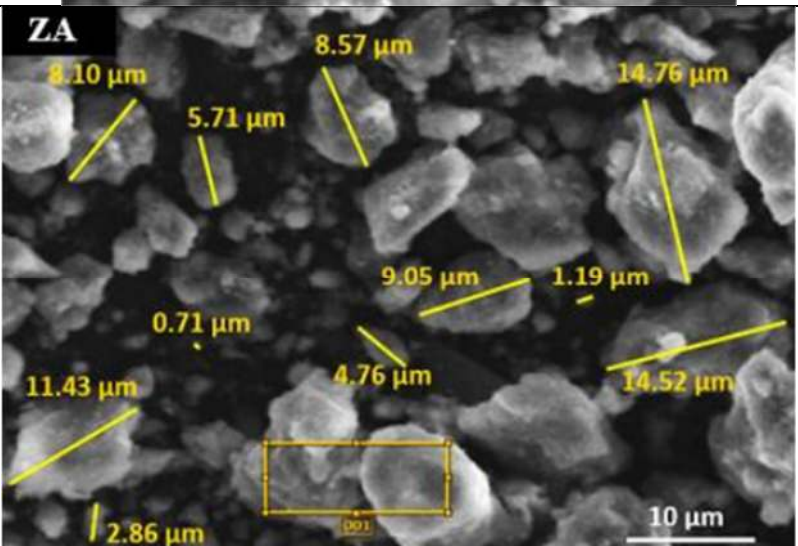
En el caso de los aluminosilicatos todas las muestras tienen una estructura suelta irregular poliédrica con pequeñas diferencias cada una en características de tamaño, la que más se parece al tipo GU es la muestra ZX con un tamaño promedio de $5.50 \mu\text{m}$, sin embargo, todas las muestras poseen características similares a las del cemento portland.

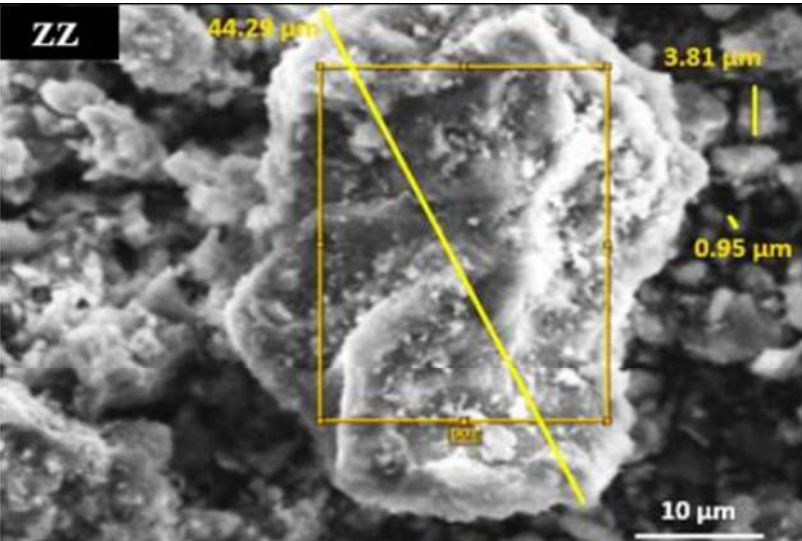
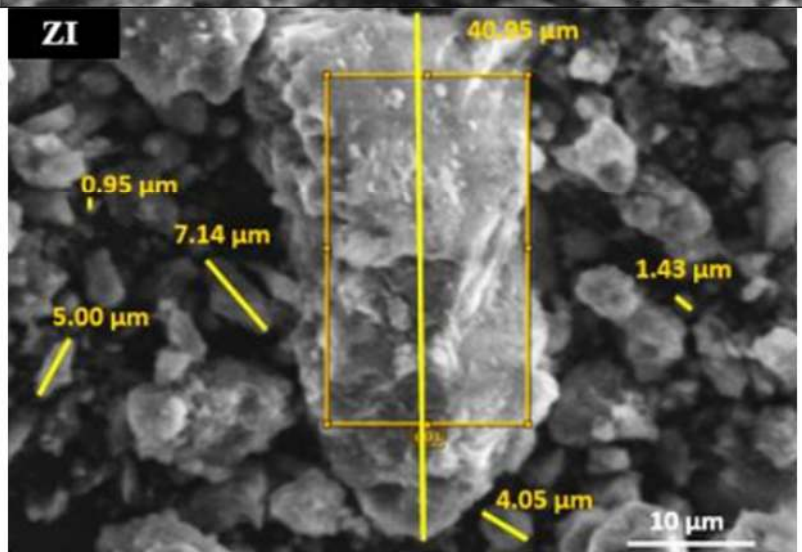
En los gráficos de la Tabla 10 se observa claramente la similitud que existe entre la estructura del cemento y los aluminosilicatos, encontrando diferencias insignificantes de tamaño y morfología de las muestras debido al procesamiento de cada uno de los aluminosilicatos, a los tamices que utilizaron para poder clasificar las muestras, al tipo de molienda y el tiempo que se tomaron en triturar el material para posteriormente empaquetarlo y sacarlo a la venta.

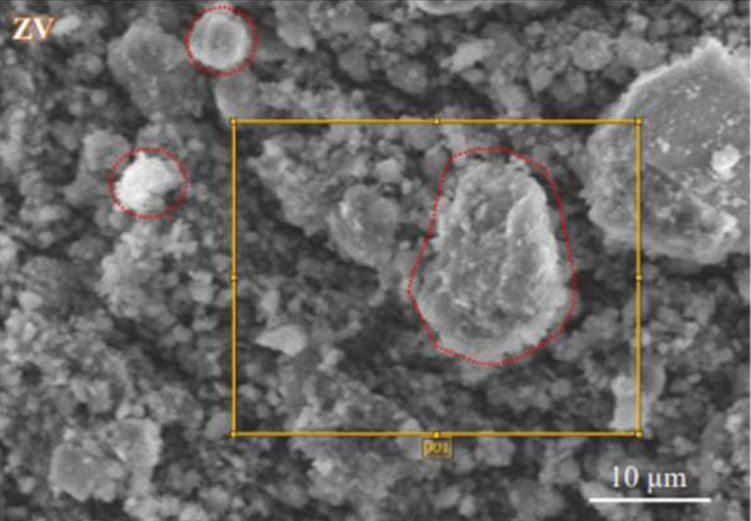
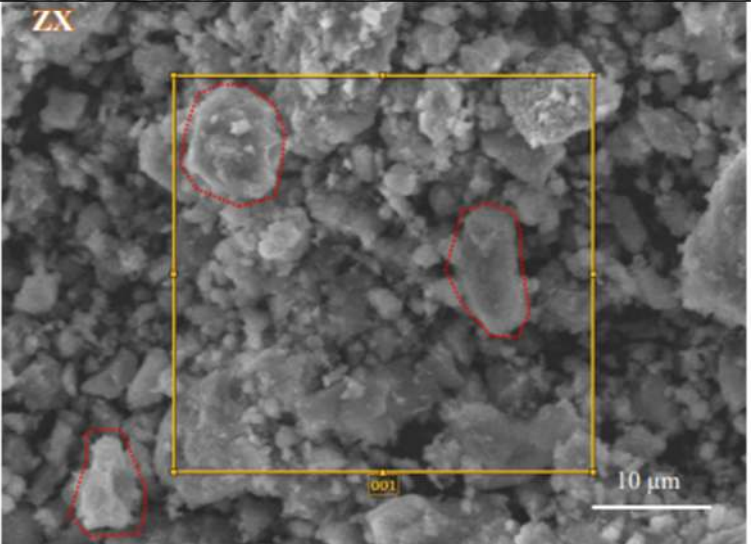
La estructura, tamaño y morfología de todos los aluminosilicatos son aptos para cumplir el papel de un material cementante suplementario.

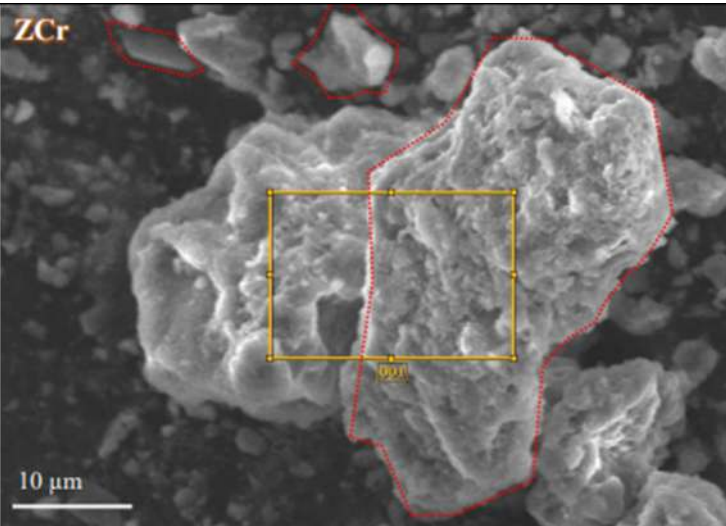
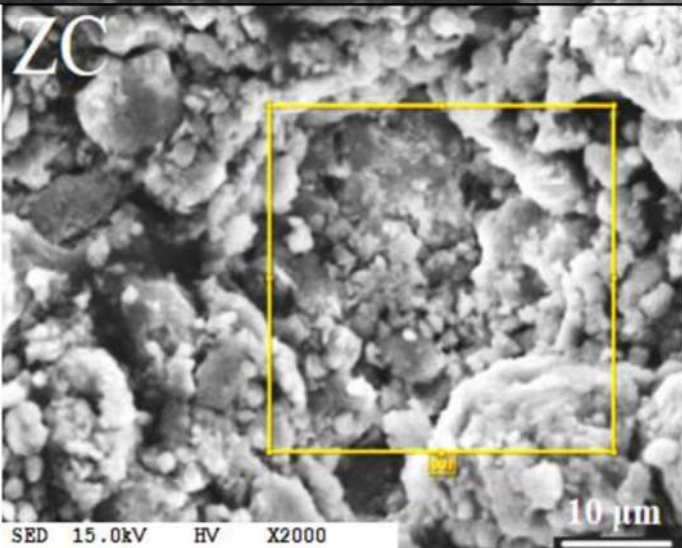
Tabla 10. Resumen datos microscopía (MEB).

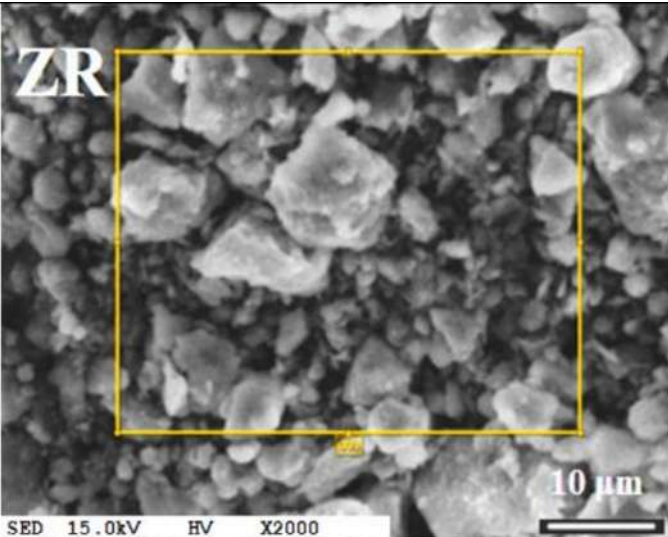
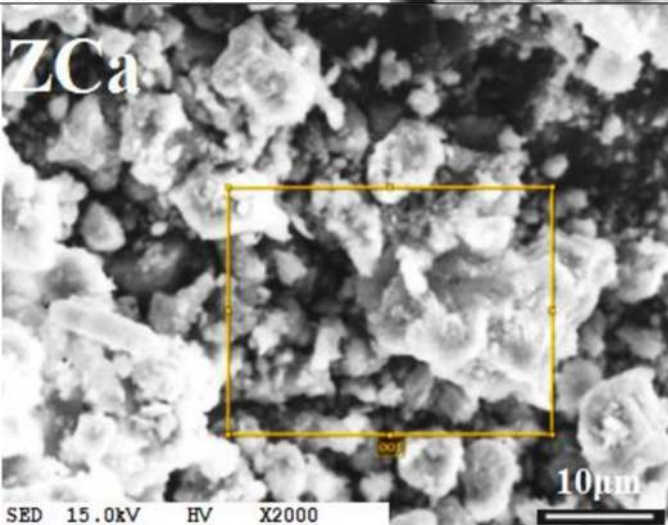
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
MICROGRAFÍA MEB Microscopio electrónico de barrido - 15 KEV - Magnificación de 2000x					
Material	Imagen	Tamaño			Forma
		Mín	Máx	Prom	
µm					
Cemento Portland Tipo GU (CGU)^{a,d,e}		0.71	8.81	3.97	Láminas planas, sueltas e irregulares con aristas en parte agudas y otras sutilmente redondeadas

<p>Cemento Selva Alegre Portland Tipo IP <i>b,c</i></p>		<p>10.00</p>	<p>20.00</p>	<p>15.00</p>	<p>Láminas irregulares con diferentes tipos de aristas.</p>
<p>ZA^{<i>a,b</i>}</p>		<p>0.71</p>	<p>14.76</p>	<p>7.42</p>	<p>Estructuras poliédricas sueltas, despejadas y dispersas, se observan partículas con superficies irregulares de apariencia vidriosa con aristas sutilmente redondeadas</p>

<p><i>ZZ^{a,b}</i></p>		<p>0.95</p>	<p>44.29</p>	<p>16.35</p>	<p>Gránulos sueltos amorfos de textura vidriosa cuya superficie está cubierta de partículas muy pequeñas</p>
<p><i>ZI^{a,b}</i></p>		<p>0.95</p>	<p>40.95</p>	<p>9.92</p>	<p>Granos cristalinos amorfos sueltos con superficie rugosa y aglomeraciones de partículas más finas en su superficie, estos gránulos muestran bordes en su mayoría redondeados</p>

$ZV^{c,d}$	 <p>SEM image of ZV particles. The image shows a dense field of small, irregular particles. A yellow rectangular box highlights a region of interest. Within this box, a larger, more rounded particle is outlined in red. A scale bar at the bottom right indicates 10 μm. The label 'ZV' is in the top left corner, and '(001)' is at the bottom center of the yellow box.</p>		1.00	16.00	8.50	<p>Granos cristalinos amorfos sueltos con superficie rugosa y aglomeraciones de partículas más finas en su superficie, estos gránulos muestran bordes en su mayoría redondeados</p>
$ZX^{c,d}$	 <p>SEM image of ZX particles. The image shows a dense field of small, irregular particles. A yellow rectangular box highlights a region of interest. Within this box, two larger, more rounded particles are outlined in red. A scale bar at the bottom right indicates 10 μm. The label 'ZX' is in the top left corner, and '(001)' is at the bottom center of the yellow box.</p>		1.00	10.00	5.50	<p>Granos pequeños con estructura poliédrica con forma redondeada y agrupados entre sí.</p>



<p>ZCr^{c,d}</p>			<p>1.00</p>	<p>40.00</p>	<p>13.25</p>	<p>Estructura poliédrica, tamaño grueso de sus granos y superficie irregular en su mayoría aglomerados entre sí.</p>
<p>ZC^e</p>			<p>1.00</p>	<p>15.00</p>	<p>8.00</p>	<p>Estructura poliédrica, tamaño muy fino de sus granos y superficie irregular en su mayoría aglomerados entre sí</p>

ZR ^e			1.00	12.00	6.50	Estructuras cristalinas cúbicas poliédricas de sus granos, al igual que la primera descrita presenta superficie irregular
ZCa ^e			1.00	21.00	11.00	Estructura cúbica poliédrica de tamaño fino y perspectiva de superficie irregular aglomerados entre tamaños grandes y los gránulos del fondo con superficie prácticamente homogénea.

^a Salcedo. V, ^b Fernández. P, ^c Ramos. F, ^d Maldonado. D, ^e Yanchaguano. D, ^f Rodríguez G, ^e Panimbosa. R.

3.1.4. ESPECTROSCOPIA DE ENERGÍA DISPERSIVA (EDS)

Tabla 11. Porcentaje de elementos químicos en las muestras.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 									
Análisis EDS (Espectroscopia de energía dispersiva). Porcentaje de elementos químicos									
Elemento	CGU ^{a, c, e}			IP ^{b, d}			ZA ^{a, b}		
	Masa %	Átomos %	Si/Al	Masa %	Átomos %	Si/Al	Masa %	Átomos %	Si/Al
C	4.92	17.35	3.40	5.67	20.29	5.04	-	-	4.83
O	21.12	55.87		18.06	48.52		17.98	65.33	
Na	0.86	1.58		0.53	0.99		0.86	2.18	
Mg	0.38	0.66		0.64	1.12		-	-	
Al	2.34	3.67		1.02	1.62		2.53	5.45	
Si	7.95	11.98		5.14	7.86		12.23	25.32	
S	0.40	0.52		-	-		-	-	
K	1.02	1.11		-	-		-	-	
Ca	6.16	6.50		18.27	19.59		1.19	1.73	
Fe	1.00	0.76		-	-		-	-	
Total	46.15	100.0		49.32	100.0		34.79	100.0	
Porcentaje de elementos químicos									
Elemento	ZZ ^{a, b}			ZI ^{a, b}			ZV ^{c, d}		
	Masa %	Átomos %	Si/Al	Masa %	Átomos %	Si/Al	Masa %	Átomos %	Si/Al
C	-	-	3.83	-	-	2.67	2.85	16.15	7.03
O	18.54	66.12		16.42	60.44		13.54	57.63	
Na	0.57	1.42		2.95	7.55		0.27	0.79	
Mg	0.32	0.76		-	-		0.32	0.91	
Al	2.98	6.29		4.03	8.79		1.17	2.95	
Si	11.42	23.2		10.76	22.55		8.22	19.93	
S	-	-		-	-		-	-	
K	0.41	0.59		-	-		0.48	0.84	
Ca	1.13	1.61		0.45	0.66		0.47	0.81	
Fe	-	-		-	-		-	-	
Total	35.37	100.0		34.61	100.0		27.32	100.0	

Porcentaje de elementos químicos									
Elemento	ZX ^{c, d}			ZCr ^{c, d}			ZC ^e		
	Masa %	Átomos %	Si/Al	Masa %	Átomos %	Si/Al	Masa %	Átomos %	Si/Al
C	-	-	4.76	2.61	10.69	5.62	3.53	15.96	2.73
O	13.57	64.43		19.54	60.13		17.1	58.03	
Na	0.4	1.29		0.49	1.06		0.56	1.32	
Mg	0.26	0.81		0.25	0.5		0.63	1.4	
Al	1.93	5.35		2.11	3.84		2.77	5.56	
Si	9.19	24.55		11.85	20.77		7.56	14.62	
S	-	-		-	-		-	-	
K	0.37	0.7		0.6	0.76		0.26	0.37	
Ca	0.74	1.39		0.83	1.02		0.39	0.53	
Fe	1.1	1.48		1.41	1.24		2.28	2.22	
Total	27.56	100.0		39.69	100.0		35.08	100.0	
Porcentaje de elementos químicos									
Elemento	ZR ^e			ZCa ^e					
	Masa %	Átomos %	Si/Al	Masa %	Átomos %	Si/Al			
C	-	-	2.69	2.71	15.1	4.52			
O	5.88	61.18		13.35	55.92				
Na	-	-		0.45	1.3				
Mg	-	-		-	-				
Al	1.46	8.99		1.79	4.44				
Si	3.93	23.28		8.09	19.29				
S	-	-		-	-				
K	0.16	0.68		-	-				
Ca	0.62	2.58		1.33	2.22				
Fe	1.11	3.30		1.44	1.73				
Total	13.16	100.0		29.16	100				

^a Salcedo. V, ^b Fernández. P, ^c Ramos. F, ^d Maldonado. D, ^e Yanchaguano. D.

En la Tabla 11 se encuentra el resultado de los análisis químicos el mismo que contiene la cantidad de elementos en porcentaje masico y atómico que se encuentran presentes en las muestras de cemento y aluminosilicatos. Se tomará en cuenta la relación silicio/aluminio debido a que esta influye en las reacciones químicas del cemento.

En el cemento tipo GU tenemos presencia de todos los minerales enlistados, pero en especial de silicio y aluminio con una relación de estos minerales de 3.40 ya que este tipo de cemento tiene altos porcentajes de silicio por sus adiciones puzolánicas, a diferencia del tipo IP que carece de minerales como azufre, potasio y hierro, pero aumenta la cantidad de calcio debido a que este tipo de cemento que como compuesto principal lleva este mineral y su relación silicio/aluminio a 5.04.

En el caso de los aluminosilicatos observamos que ninguna muestra posee azufre y algunas carecen de minerales como el carbono, sodio, magnesio, potasio y hierro estos últimos minerales se los encuentran en los aluminosilicatos en cantidades muy bajas. La muestra que más se acerca al cemento tipo GU es la ZZ con una relación Si/Al de 3.83, y la que más similitudes tiene con el cemento tipo IP es la muestra ZA con una relación Si/Al de 4.83.

En la Tabla 12 observamos el porcentaje de cada óxido en porcentaje de masa y de átomos que se presenta en todas las muestras.

Tabla 12. Porcentaje de óxidos en las muestras.

Óxido		CGU ^{a, c, e}	IP ^{b, d}	ZA ^{a, b}	ZZ ^{a, b}	ZI ^{a, b}	ZV ^{c, d}
		Átomos %	Átomos %	Átomos %	Átomos %	Átomos %	Átomos %
Na ₂ O		3.30	1.77	3.43	2.30	11.28	1.66
MgO		1.79	2.64	-	1.59	-	2.42
Al ₂ O ₃		12.57	4.79	14.16	16.84	21.61	10.08
SiO ₂		48.35	27.31	77.48	73.07	65.32	80.20
K ₂ O		3.49	-	-	1.48	-	2.64
CaO		24.50	63.49	4.93	4.73	1.79	3.00
Fe ₂ O ₃		3.16	-	-	-	-	-
SO ₃		2.84	-	-	-	-	-
Total		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

Óxidos					
Óxido	ZX ^{c, d}	ZCr ^{c, d}	ZC ^e	ZR ^e	ZCa ^e
	Átomos %	Átomos %	Átomos %	Átomos %	Átomos %
Na ₂ O	2.00	1.95	2.84	-	2.45
MgO	1.60	1.22	3.93	-	-
Al ₂ O ₃	13.52	11.77	19.68	20.50	13.66
SiO ₂	72.87	74.86	60.80	62.46	69.91
K ₂ O	1.65	2.13	1.18	1.43	-
CaO	3.84	3.43	2.05	6.45	7.52
Fe ₂ O ₃	4.53	4.63	9.53	9.16	6.46
SO ₃	-	-	-	-	-
Total	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

^a Salcedo. V, ^b Fernández. P, ^c Ramos. F, ^d Maldonado. D, ^e Yanchaguano. D.



El cemento tipo GU lleva adiciones puzolánicas como se puede verificar en la Tabla 12 el porcentaje más alto se lleva el óxido de silicio con 48.35% constatando lo mencionado anteriormente que señala que este tipo de cemento es con altos contenidos de silicio. El cemento IP se destaca por su alto contenido de calcio como se puede observar con un valor de 63.49% de óxido de calcio verificando así que este tipo de cementos el óxido principal es el anteriormente mencionado.

Los aluminosilicatos al ser puzolanas tienen un alto contenido de dióxido de silicio (SiO₂) y óxido de aluminio (Al₂O₃) como se pueden constatar en los datos, la muestra ZV es la que tiene más porcentaje de SiO₂ con un valor de 80.20% característica importante debido a que brinda mayor durabilidad ante agentes químicos y la zeolita que reaccionara de mejor manera en resistencia mecánica es la muestra ZCa debido a su mayor contenido en óxido de calcio con un porcentaje de 7.52%.

3.1.5. TIEMPO DE FRAGUADO DE PASTA CON MUESTRA ZZ

En la Tabla 13 se encuentran los resultados de consistencia y tiempos de fraguado registrados por Rodríguez. G[66] y Panimbosa. R[81], en conjunto con las cantidades de materiales usados referente al porcentaje de sustitución de aluminosilicato e igualmente la penetración de la aguja de Vicat en las muestras.

Tabla 13. Tiempo de fraguado.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 							
Tiempo de Fraguado- Consistencia normal Método de Vicat NTE INEN 158 /ASTM C 191 - 07							
Sustitución ZZ	Cemento	Zeolita	Agua	Penetración	Consistencia	Fraguado Inicial	Fraguado Final
(%)	(g)	(g)	(g)	(mm)	(%)	(min)	(min)
0	650.0	0.0	200	9	30.80	53	280
10	585.0	65.0	205	9	31.50	107	305
15	552.5	97.5	208	9	32.00	117	340
20	520.0	130.0	211	10	32.50	127	390

En el caso de la consistencia normal para sustituciones de 0%, 10%, 15% y 20% tenemos porcentajes de consistencia normal de 30.80%, 31.50%, 32.00%, y 32.50% respectivamente, detallando que para llegar al porcentaje de consistencia normal se requiere de mayor volumen de agua y más esfuerzo para trabajar el hormigón, quiere decir que el hormigón con menor trabajabilidad y más fluidez es el que no lleva sustitución de aluminosilicatos y el que lleva una sustitución del 20% es más trabajable es decir posee menos fluidez, tomando en cuenta que los valores comunes de consistencia se encuentran del 23% al 33%, característica que cumple a cabalidad todas las muestras.

El tiempo de fraguado como se observa en la Tabla 13 tiene tiempos de fraguado inicial que van desde los 53 minutos hasta los 127 minutos, valores que se encuentran en el rango que nos señala la norma NTE INEN 2380 que señala que para los cementos tipo GU el fraguado inicial debe estar en el rango de 45 minutos a 420 minutos, todos los valores de fraguado inicial se encuentran en este rango por lo que son aceptables. Para el fraguado final tenemos valores de 280 minutos a 390 minutos valores aceptables ya que el tiempo estimado del fraguado final es de 600 minutos[64]. Los valores de consistencia, fraguado inicial y final a medida que se le

añade la sustitución de aluminosilicato ZZ estas tres características van aumentando como se observa en la Figura 34 y Figura 34.

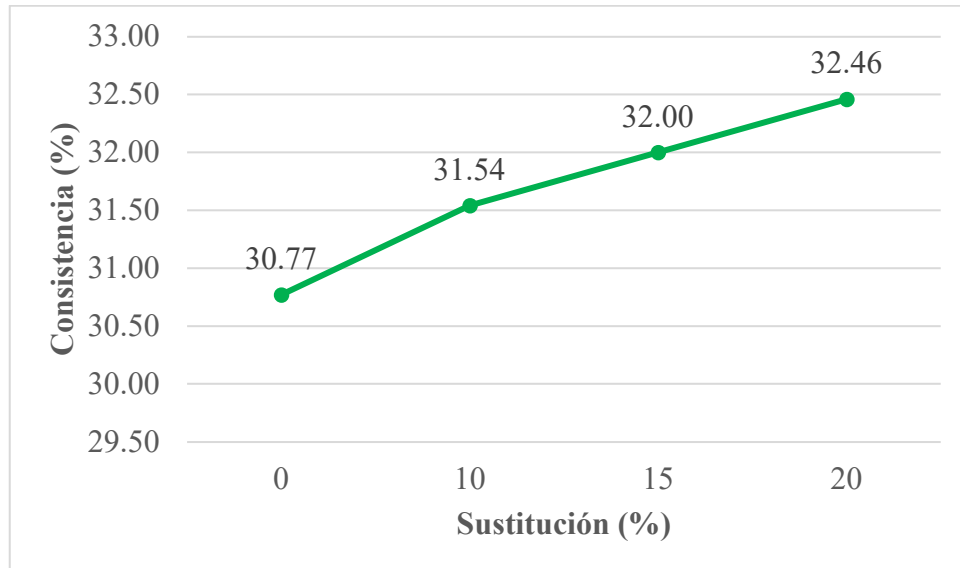


Figura 33. Consistencia normal.

La consistencia normal a medida que se va aumentando la sustitución de aluminosilicato ZZ esta tiende a aumentar, por lo tanto, se requiere mayor cantidad de agua como se indica en la Tabla 13 en la que detalla la cantidad de agua requerida para llegar a esta consistencia.

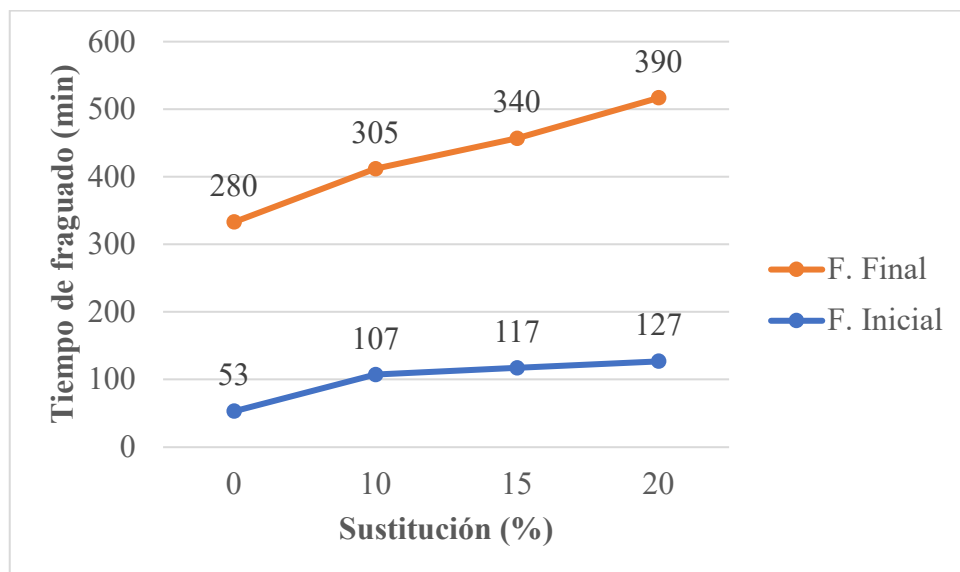


Figura 34. Tiempo de Fraguado inicial y final.

El tiempo de fraguado inicial y final aumentan a medida que la sustitución también es mayor, lo que brinda al hormigón más tiempo de transporte y moldeo. Hay que tomar en cuenta que los tiempos de fraguado finales tienden a aumentar más que los tiempos de fraguado iniciales en todos los casos.

3.1.6. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN CON MUESTRA ZZ EN ESTADO FRESCO Y ENDURECIDO

En la Tabla 14 tenemos un resumen de los resultados de ensayos realizados para obtener la densidad en sus dos estados y resistencia a compresión por Rodríguez. G[66] y tenemos resultados de tracción indirecta determinados por Panimbosa. R[81], estos resultados se tienen para 7, 14, 28, 56 y 267 días, la resistencia de diseño para los especímenes fue de 24 MPa.

Como se observa en la tabla tenemos que la trabajabilidad y homogeneidad son buenas para todos los tiempos y sustituciones, no existiendo cambios en esta característica.

El asentamiento de diseño de estas mezclas se encuentra entre 60mm y 90mm y para 0%, 10%, 15% y 20% tenemos asentamientos de 50mm, 40mm, 30mm y 30mm respectivamente, característica que para el primer porcentaje está muy cerca del límite del rango de diseño, a comparación de las muestras con sustitución este asentamiento disminuye a medida que aumenta la cantidad de aluminosilicato, debido a la finura en términos de superficie específica del aluminosilicato requiere mayor cantidad de agua como se denota en el tiempo de fraguado al observar que la cantidad de agua aumenta.

Tabla 14. Propiedades del hormigón.

Sustitución ZZ		HORMIGÓN FRESCO				HORMIGÓN ENDURECIDO		
		Asentamiento ^{f,g} mm	Trabajabilidad ^{f,g}	Homogeneidad ^{f,g}	Días	Densidad hormigón fresco ^f kg/m ³	Densidad hormigón endurecido ^f kg/m ³	Resistencia a compresión Promedio ^f MPa
0	50	Buena	Buena	7	2362	2335	16.8	1.9
				14	2362	2338	21.7	2.4
				28	2362	2343	28.9	2.2
				56	2362	2346	31.2	3.1
10	40	Buena	Buena	7	2355	2325	11.8	1.3
				14	2355	2327	16.3	1.7
				28	2356	2332	19.5	2.2
				56	2354	2336	23.3	2.7
				267	2356	2342	30.4	3.5
15	30	Buena	Buena	7	2351	2322	11.6	1.3
				14	2351	2323	15.0	1.4
				28	2351	2328	18.6	2.1
				56	2352	2332	20.3	2.4
				267	2351	2328	27.8	2.9
20	30	Buena	Buena	7	2349	2316	11.4	1.1
				14	2349	2320	15.0	1.9
				28	2348	2326	19.5	2.1
				56	2347	2330	21.7	2.8
				267	2338	2300	25.9	3.0

^f Rodríguez G, ^g Panimbosa. R.

3.1.6.1. Densidad hormigón fresco con adición de muestra ZZ

- Para los especímenes que no llevan sustitución parcial de aluminosilicato la densidad en estado fresco para todos los tiempos es de 2362 kg/m³ si existir variabilidad.

- En la sustitución de 10% tenemos densidades que oscilan entre los 2354 kg/m³ y 2356 kg/m³, sufriendo cambios imperceptibles en todas las muestras.
- La sustitución de 15% tiene densidades para 7, 14, 28, y 267 días densidad en estado fresco de 2351 kg/m³ y para los 56 días 2352 kg/m³ sin un mayor cambio en los resultados.
- La sustitución del 20 % los resultados para los 7, 14, 28 y 56 días van de 2347 kg/m³ a 2349 kg/m³, sin mayor cambio a comparación del resultado de la última muestra que su densidad disminuye a 2338 kg/m³.

3.1.6.2. Densidad hormigón endurecido con adición de muestra ZZ

- Se observa en todas las muestras a excepción de la muestra con sustitución de 20% que la densidad endurecida va aumentando conforme van pasando la cantidad de días en la cámara de curado, sin embargo, no es una variación alta en valores.
- Tenemos para las muestras sin sustitución densidades que van de 7 a 56 días con valores de 2335 kg/m³, a 2346 kg/m³ respectivamente con un aumento de 11 kg/m³, con resultados
- En la sustitución de 10% con resultados que van de los 7 a 267 días con valores de 2325 kg/m³ y 2342 kg/m³ respectivamente con un aumento de 17 kg/m³.
- Para las muestras con el 15% de sustitución tenemos resultados de 7 a 267 días con valores de 2322 kg/m³ a 2338 kg/m³ con un aumento de 16 kg/m³.
- Los especímenes con 20% de sustitución van de 7 a 56 días con resultados de 2316 kg/m³ a 2330 kg/m³ sin embargo para los 267 días disminuye a 2300 kg/m³, se presume que sea por las características de los agregados.

3.1.6.3. Resistencia a compresión con adición de muestra ZZ

En la Figura 35 tenemos un resumen de los ensayos a compresión realizados, tomando en cuenta que ninguno de los valores con adición parcial de zeolita cumple con las resistencias comunes para un hormigón de 24 MPa, sin embargo, con el pasar del tiempo el hormigón aumento su resistencia incluso sobrepasando la resistencia de diseño.

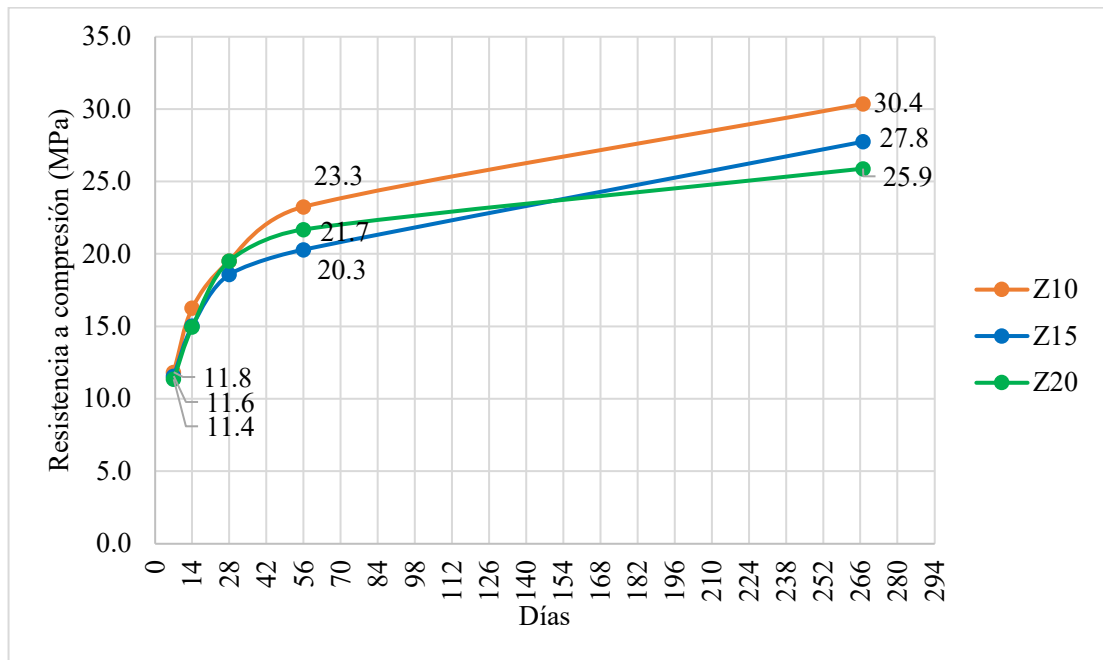


Figura 35. Ensayo a compresión.

- Para la sustitución del 10%, después de 239 días la resistencia a compresión aumento 7.1 MPa.

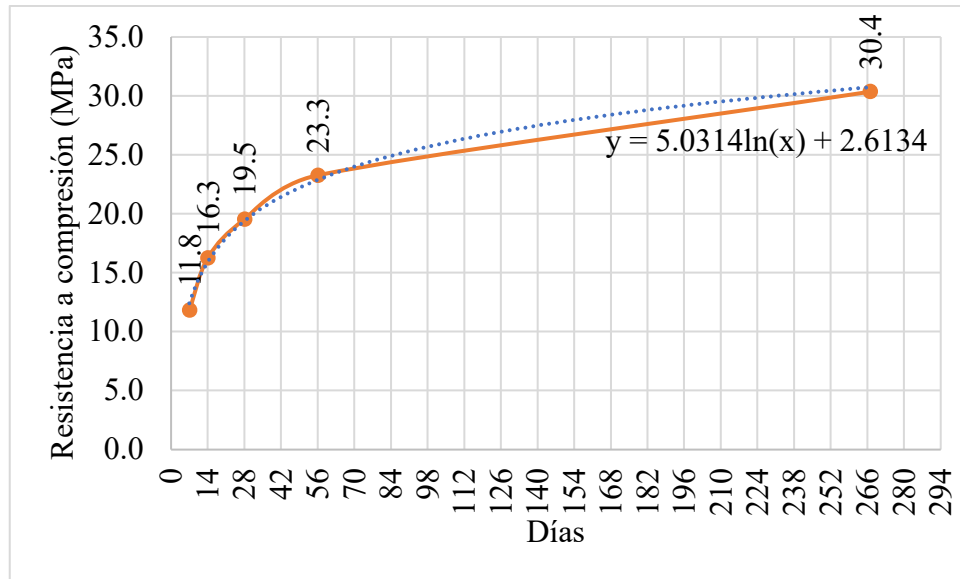


Figura 36. Compresión Z10%.

- Para la sustitución del 15%, después de 239 días la resistencia a compresión aumento en 7.5 MPa.

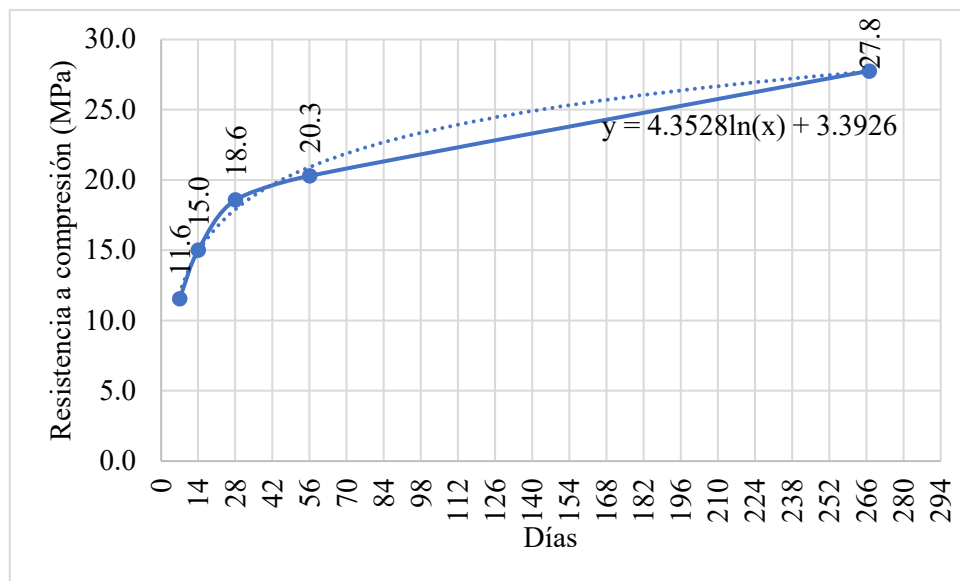


Figura 37. Compresión Z15%.

- Para la sustitución del 20%, después de 239 días la resistencia a compresión aumento en 4.2 MPa.

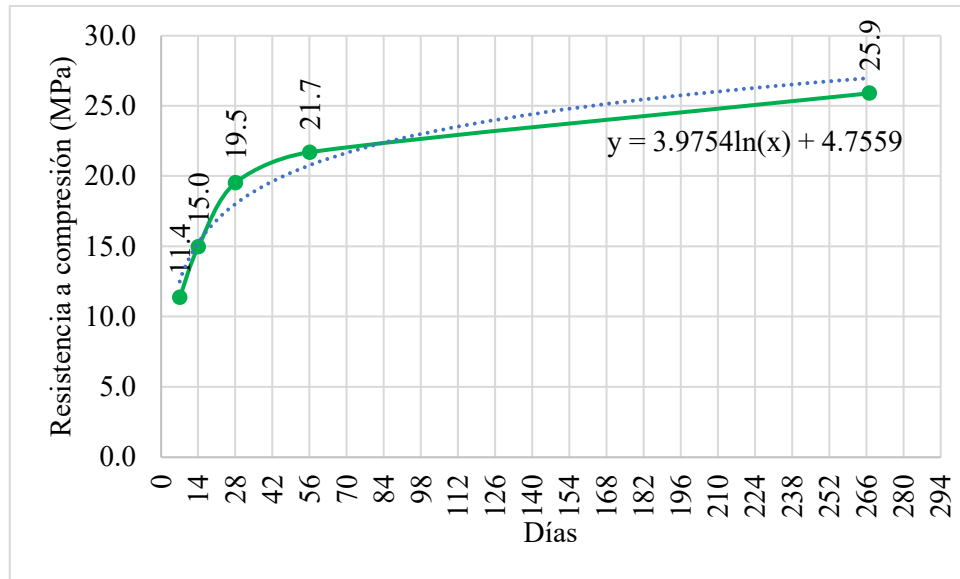


Figura 38. Compresión Z20%.

Tenemos que un mayor aumento de resistencia se produjo en la muestra con la sustitución de 15% en el mismo lapso de tiempo, sin embargo, los resultados que más se acercan a valores referenciales para la resistencia de diseño es con la sustitución de 10%, ya que como se observa a mayor porcentaje de sustitución disminuye la resistencia.

3.1.6.4. Resistencia a tracción indirecta con adición de muestra ZZ

En la Figura 39 tenemos todos los resultados de resistencia a la tracción indirecta de los especímenes con 10%, 15% y 20%, resultados que para los 28 días son valores muy cercanos a los de los especímenes sin adición de aluminosilicatos.

Por lo general la resistencia a tracción del hormigón se encuentra alrededor del 10% de la resistencia a compresión de las probetas[87].

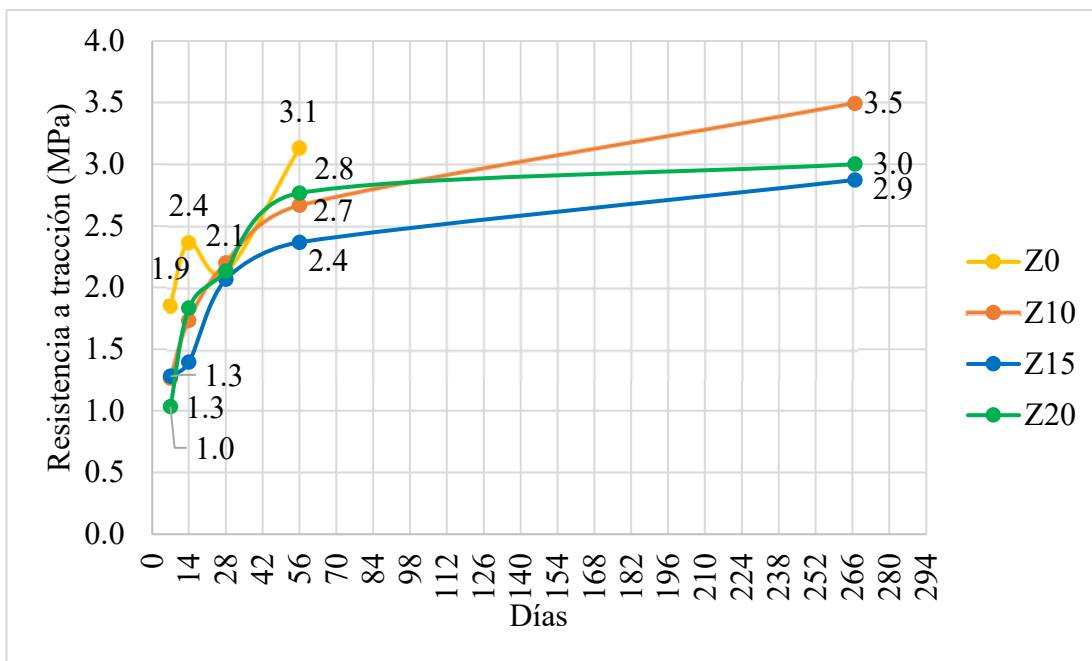


Figura 39. Resistencia a la tracción indirecta.

- Para la sustitución de 10% de 28 a 267 días tuvo un aumento de resistencia a la tracción indirecta de 0.8 MPa.

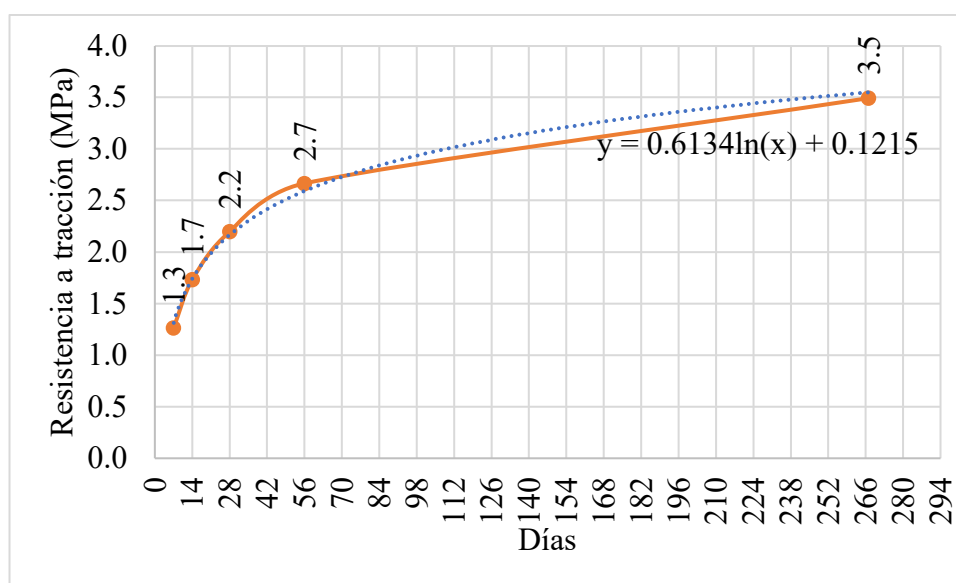


Figura 40. Resistencia a tracción indirecta Z10%.

- Para la sustitución de 15% de 28 a 267 días tuvo un aumento de resistencia a la tracción indirecta de 0.5 MPa.

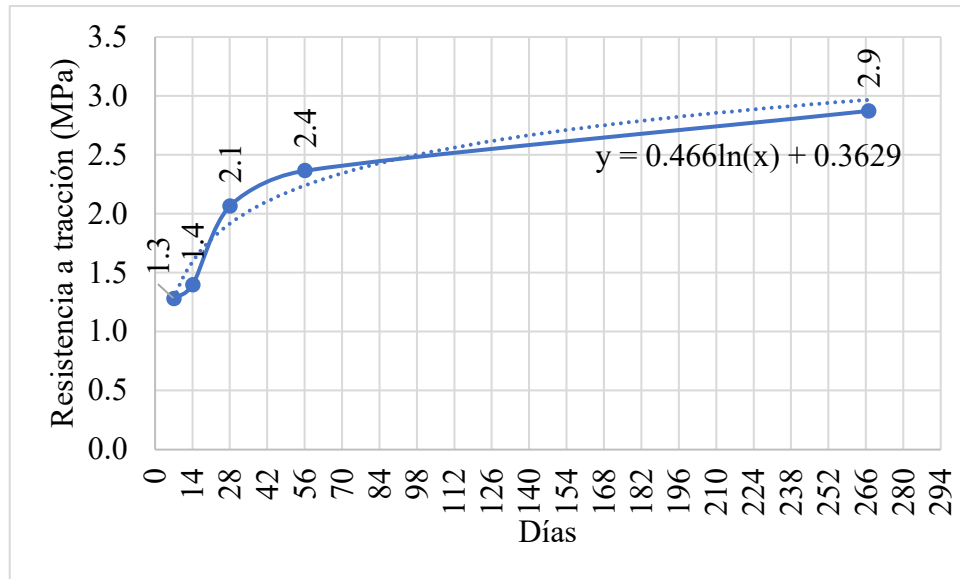


Figura 41. Resistencia a tracción Z15%.

- Para la sustitución de 20% de 28 a 267 días tuvo un aumento de resistencia a la tracción indirecta de 0.2 MPa.

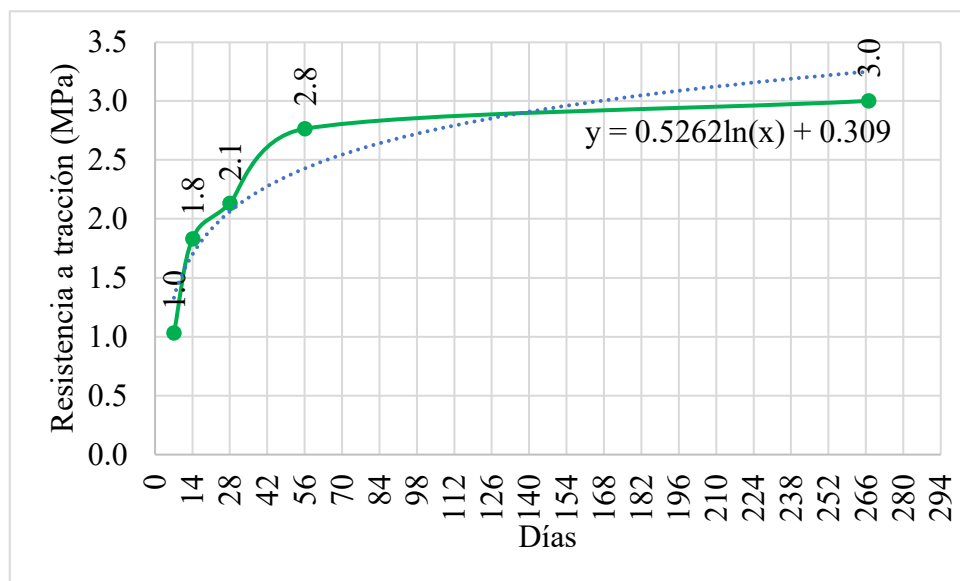


Figura 42. Resistencia a tracción Z20%.

En la muestra que más aumento se obtuvo de 28 a 267 días es en la muestra con sustitución del 10%, y se sigue manteniendo la característica que a mayor porcentaje de sustitución la resistencia a tracción indirecta disminuye.

3.1.7. PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN CON ADICIÓN DE MUESTRA ZZ

En la Tabla 15 tenemos los datos de este ensayo proporcionados por Panimbosa. R[81], en la cual se encuentran los resultados de profundidad penetración de agua bajo presión registrados a los 35 y a los 267 días junto a los resultados de tracción indirecta que se realizaron en estas probetas para poder medir la profundidad.

Tabla 15. Penetración de agua bajo presión.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 				
Profundidad de penetración de agua bajo presión				
Días	35		267	
Muestra	Tracción indirecta (MPa)	Penetración (mm)	Tracción indirecta (MPa)	Penetración (mm)
Z0	3.1	28	3.7	17
Z10	2.2	44	3.5	22
Z15	2.1	40	2.9	14
Z20	2.2	32	2.8	11

- Para la mezcla de control tenemos una disminución de la profundidad de penetración de 28 mm a 17 mm disminuyendo 11 mm en 232 días.
- Para la sustitución de 10% tenemos una disminución de la profundidad de penetración de 44 mm a 22 mm disminuyendo 22 mm en 232 días.
- Para la sustitución de 15% tenemos una disminución de la profundidad de penetración de 40 mm a 14 mm disminuyendo 26 mm en 232 días.
- Para la sustitución de 20% tenemos una disminución de la profundidad de penetración de 32 mm a 11 mm disminuyendo 21 mm en 232 días.

A los 35 días la muestra que tiene mejor resistencia a la penetración de agua bajo presión es la muestra de control ya que posee una profundidad de 28 mm seguido de la muestra con sustitución del 20% que se le acerca con una profundidad

de 32 mm, y a los 267 días la muestra que mejor resistencia opone a la penetración de agua es la que tiene 20% de sustitución con una profundidad de 11 mm seguido por la muestra con el 15% con una profundidad de 14 mm ambas superando a la muestra de control que tiene una profundidad de 17 mm, esto se debe a la porosidad de los aluminosilicatos y debido a que son materiales cementantes e impiden la penetración del agua en el hormigón es decir son más impermeables.

Podemos observar en los resultados que a mayor porcentaje de sustitución de zeolita disminuye la penetración de agua mejorando la impermeabilidad, así como también lo demuestra Ramezaniapour[88] y Gowram[89] en estudios realizados previamente señalando que, a mayor sustitución, mejor impermeabilidad.

3.2. VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

Una vez realizada la recopilación de datos, organización en tablas dinámicas y el análisis de los resultados de esta investigación señalan que la hipótesis “El estudio de la correlación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas de aluminosilicatos de la Cordillera Chongón-Colonche permite identificar la mejor zeolita para utilizarla como sustituto parcial del cemento” es verdadera ya que al analizar y relacionar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de varios aluminosilicatos de la Cordillera Chongón Colonche encontramos la similitud que tienen con el cemento Portland y por ende la factibilidad para ser usado como material cementante suplementario en el hormigón, la mejor sustitución es la de 10% y podría ser utilizada en hormigones que no requieran altos valores de resistencia y en hormigones que necesiten impermeabilidad ya que al aumentar la sustitución de aluminosilicatos aumenta la impermeabilidad del hormigón debido a la microporosidad del aluminosilicato.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- La muestra ZV es el aluminosilicato con el valor de densidad más cercano a la del cemento portland con un valor de 2.567 g/cm^3 , sin embargo, todos los resultados de las muestras se encuentran en valores típicos para cada material, recalcando que ya que los aluminosilicatos poseen densidades más bajas que las del cemento evitamos que los valores no sobrepasen los valores requeridos para los cementos.
- La muestra ZX es la muestra de aluminosilicato con el porcentaje más alto de finura con un valor de 99.97% incluso superando a la del cemento portland con un valor de 99.95%, ninguna muestra supera el 5% de impurezas característica que deben cumplir los cementos.
- Se concluyó para la finura en términos de superficie específica tenemos para el CGU un valor de $476.30 \text{ m}^2/\text{kg}$ y para el aluminosilicato ZZ un valor de $568.92 \text{ m}^2/\text{kg}$ superando al valor del cemento, ambos cumpliendo el requisito de límites inferiores de finura para cementos con un valor mínimo de $260 \text{ m}^2/\text{kg}$.
- Los aluminosilicatos tienen en su morfología grandes semejanzas contrastándolo con el cemento portland ambos tienen formas irregulares, estructuras poliédricas y partículas finas, el tamaño de las partículas oscilan desde $1 \mu\text{m}$ hasta los $44.29 \mu\text{m}$ es decir todas las muestras cumplen con la condición para cementos de que las partículas deben ser menores a $45 \mu\text{m}$, siendo morfológicamente todas las muestras de cemento y aluminosilicatos compatibles entre sí.
- El cemento tipo IP y GU ambos tienen adiciones puzolánicas, los elementos químicos que destacan en el cemento tipo GU es el silicio y aluminio con una relación 3.40 seguido por el calcio estos resultados debido a la adiciones

puzolánicas que este tiene, el cemento tipo IP se destaca el calcio dejando en menor proporciones el silicio y aluminio con una relación de 5.04, la muestra ZZ es la que más se acerca al GU con una relación Si/Al de 3.83 y al IP la muestra ZA con una relación Si/Al de 4.83.

- El óxido que predomina en el cemento tipo GU es el dióxido de silicio (SiO_2) ya que es un cemento altamente silíceo con valor de 48.35% a comparación del tipo IP que es un cemento que lleva adiciones puzolánicas en menor proporciones para cementos portland comunes demostrando esto en su contenido de óxido de calcio (CaO) con un porcentaje de 63.49%, el aluminosilicato que brindaría beneficios ante ataques químicos es la muestra ZV con un porcentaje de óxido de silicio de 80.20% y la muestra ZCa debido a su mayor contenido de calcio con un valor de 7.52% es la que mejor reaccionaría para conservar la resistencia común de un cemento portland.
- Al aumentar el porcentaje de sustitución de aluminosilicato requiere mayor porcentaje de agua para llegar a la consistencia normal, también los tiempos de fraguado iniciales aumentan brindando mayor tiempo para transportar y moldear el hormigón cumpliendo los tiempos que señala la norma.
- El asentamiento a medida que va aumentando la sustitución de aluminosilicato ZZ va disminuyendo, para 0%, 10%, 15% y 20% con resultados de asentamiento de 50mm, 40mm, 30mm y 30 mm respectivamente, manteniéndose el asentamiento en las dos últimas sustituciones.
- La trabajabilidad y homogeneidad es buena en todos los casos y no existe variación alguna.
- La densidad en estado fresco y endurecido a medida que se va aumentando la sustitución de aluminosilicato ZZ los valores de densidad en ambos casos van disminuyendo tenemos para los resultados a los 28 días en estado fresco para 0%, 10%, 15% y 20% de sustitución con resultados de 2362 kg/m^3 , 2356 kg/m^3 , 2351 kg/m^3 y 2348 kg/m^3 respectivamente, y para el estado endurecido valores de 2343

kg/m³, 2332 kg/m³, 2328 kg/m³ y 2326 kg/m³, observando así lo mencionado anteriormente.

- A medida que aumentan la sustitución de aluminosilicato ZZ en el hormigón la resistencia a compresión del hormigón disminuye. La resistencia a compresión no cumple con las resistencias esperadas para un hormigón de 24 MPa a los 28 días, con la sustitución de 10% y 15% por aluminosilicato ZZ superó los 18MPa con resultado de 19.5 MPa y 18.6 MPa cumpliendo con los requisitos para hormigones que no requieran resistencias altas, sin embargo con un mayor lapso de tiempo sobrepasan la resistencia de diseño con resultados a los 267 días para 10%, 15% y 20% con valores de 30.4 MPa, 27.8 MPa y 25.9 MPa respectivamente demostrando que con el tiempo aumenta la durabilidad.
- A medida que el porcentaje de sustitución aumenta en el hormigón la resistencia a tracción indirecta disminuye en valores muy bajos, con valores a los 28 días para 0% y 10% con resultado de 2.2 MPa y para 15% y 20% un valor de 2.1 MPa resultados que varían muy poco y se conserva la característica que estos valores aumentan con un mayor lapso de tiempo.
- En el ensayo de penetración de agua, a medida que la sustitución de aluminosilicato ZZ aumenta en el hormigón la impermeabilidad también aumenta, ya que los resultados en todos los casos material recomendado para aumentar la impermeabilidad en hormigones que se requieran y por su alto contenido silícico brindaría protección ante ataques químicos.
- La sustitución parcial de zeolita ZZ por cemento portland mejora la durabilidad a largo plazo debido a que los aluminosilicatos mejora la estructura de los poros del hormigón.
- La sustitución de 15% de ZZ es la mejor opción para hormigones que no requieran resistencias altas dado que a los 28 días alcanzó resistencia de 18.6 MPa y también para hormigones que necesiten buena impermeabilidad dado que

a los 267 días alcanza una penetración de agua de 14 mm superando a la muestra de control.

- La muestra ZZ con densidad 2.406 g/cm³, finura de 99.51%, superficie específica promedio 565 m²/kg, tamaño promedio de partículas 16.35 μm con estructura poliédrica e irregular, con relación Si/Al de 3.83, con alto contenido silícico, resistencias a compresión que superan los 18 MPa y con aumento progresivo de la impermeabilidad, cumple con todas las características para materiales cementantes, es recomendada para hormigones que no necesiten altas resistencias y para hormigones impermeables.

4.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda fabricar más hormigones con adiciones de diferentes aluminosilicatos para el análisis de la mejor opción para sustitución parcial por cemento portland en el país.
- Se recomienda analizar la sustitución parcial del cemento portland por aluminosilicatos en mezclas de menores requerimientos como los morteros.
- Se recomienda analizar la permeabilidad en hormigones al añadir aluminosilicatos, ya que debido a las características de estos materiales mejoran notablemente esta propiedad.
- Se recomienda analizar como influyen los óxidos minoritarios en las propiedades finales del hormigón con sustitución parcial de aluminosilicatos.
- Se recomienda analizar cómo influye la sustitución parcial de aluminosilicatos por cemento en la resistencia a ataques químicos en el hormigón.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. A. R. Trout, “The History of Calcareous Cements,” in *Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*, 5th ed., Elsevier, 2019, pp. 1–29.
- [2] A. K. Hatfield, “Cement Statistics and Information,” Reston, 2022. [Online]. Available: <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cement-statistics-and-information>.
- [3] IEA, “Technology Roadmap for Cement,” París, 2018. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry>.
- [4] A. A. Shahmansouri, M. Yazdani, S. Ghanbari, H. Akbarzadeh Bengar, A. Jafari, and 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, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123697.
- [5] R. M. Andrew, “Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018,” *Earth Syst. Sci. Data*, vol. 11, no. 4, pp. 1675–1710, Nov. 2019, doi: 10.5194/essd-11-1675-2019.
- [6] IEA, “Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector,” París, 2021. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>.
- [7] S. A. Ishak and 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.
- [8] B. B. Raggiotti, M. J. Positieri, and Á. Oshiro, “Natural zeolite , a pozzolan for structural concrete,” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 11, no. November, pp. 36–43, 2018, doi: 10.1016/j.prostr.2018.11.006.
- [9] J. L. Costafreda Mustelier, D. A. Martín Sánchez, and J. L. Costafreda Velázquez, *Las Zeolitas naturales de iberoamérica*. Madrid, 2018.
- [10] L. Machiels, S. Ruben, F. Morante, J. Elsen, and C. Paredes, “Mineralogía cuantitativa de los depósitos de zeolitas en la Costa del Ecuador,” *Rev. Tecnológica ESPOL*, vol. 19, no. 1, pp. 41–48, 2006.

- [11] R. D. Crangle, “Zeolites Statistics and Information,” 2021.
- [12] Agencia de Regulación y Control Minero, “Producción de Oro Producción de Caliza Producción Materiales de construcción Producción de Arcilla,” Quito, 2019.
- [13] A. Gessa Perera and M. del P. Sancha Dionisio, “Alternativas de reducción de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en la producción de cemento . Propuesta de un modelo de evaluación.,” *INNOVAR*, vol. 26, no. 60, pp. 51–66, 2016, doi: 10.15446/innovar.v26n60.55532.citaci.
- [14] F. Mata Cabrera, “La selección sostenible de los materiales de construcción,” *Tecnol. y Desarro.*, vol. 8, pp. 1–16, 2010.
- [15] Diario Financiero, “Sustentabilidad en la industria del cemento,” Santiago de Chile, 2019.
- [16] A. Enseñat De Villalonga, “La industria del cemento dentro de la problemática de la contaminación atmosférica,” *Mater. construcción*, vol. 27, no. 167, pp. 221–241, 1977, doi: <https://doi.org/10.3989/mc.1977.v27.i166-167.1180>.
- [17] J. L. Costafreda Mustelier, J. J. Díaz Domínguez, and B. Calvo Pérez, “Propiedades físicas, mecánicas y químicas de algunas zeolitas naturales procedentes de México, Cuba y España,” vol. 2010, no. 1, pp. 1–9, 2010.
- [18] T. Markiv, K. Sobol, and W. Franus, “Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 554–562, 2016, doi: 10.1016/j.acme.2016.03.013.
- [19] K. Toklu, “Investigation of Mechanical and Durability Behaviour of High Strength Cementitious Composites Containing Natural Zeolite and Blast-furnace Slag,” *Silicon*, vol. 13, pp. 2821–2833, 2021.
- [20] G. D. Gatta and P. Lotti, “Systematics, crystal structures, and occurrences of zeolites,” in *Modified Clay and Zeolite Nanocomposite Materials*, vol. 1, Milan: Elsevier, 2019, pp. 1–25.
- [21] C. Martínez and A. Corma, “Zeolites,” in *Comprehensive Inorganic Chemistry II*, vol. 5, Elsevier, 2013, pp. 103–131.
- [22] F. Morante Carballo, “Las zeolitas de las costa de Ecuador (Guayaquil): Geología, caracterización y aplicaciones,” 2004.
- [23] Á. Sanjuán and S. Chinchón, *Introducción a la fabricación y normalización*

- del Cemento Portland*, vol. 34, no. 11. 2014.
- [24] Instituto Ecuatoriano de Normalización, “Cemento hidráulico. Definición de términos,” *NTE INEN 151*, 2010.
- [25] Romulo Ochoa L. y Elena Flores B, “Química Del Cemento: Parte 1,” *Rev. química*, vol. 8, no. 2, pp. 207–214, 1994.
- [26] A. Torre, “Curso Básico de Tecnología Del Concreto para Ingenieros Civiles,” *Univ. Nac. Ing.*, 2004.
- [27] Holcim Ecuador, “Nuestros procesos de producción: Cemento, hormigón y agregados.”
<https://holcimecuador.com/sites/default/files/NuestrosProcesosDeProduccion.pdf>.
- [28] Holcim México, “Proceso del cemento.”
<https://www.holcim.com.mx/proceso-del-cemento>.
- [29] A. Neville, *Tecnología Del Concreto: Curado Del Concreto*. 2013.
- [30] Á. Sanjuán and S. Chinchón, *Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland*, vol. 34, no. 11. 2014.
- [31] Instituto Ecuatoriano de Normalización, “Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos: NTE-INEN-2380,” *INEN*, vol. 1, no. Primera Edición, p. 5, 2011, [Online]. Available: <http://181.112.149.203/buzon/normas/2380.pdf>.
- [32] Holcim Ecuador S.A., “Ficha técnica - Cemento hidráulico Tipo GU para la construcción en general,” *Holcim*, vol. 1, p. 17, 2015, [Online]. Available: https://www.portaldirecta.com/portaldirecta/ec/CEMENTO_GU_G.pdf.
- [33] Holcim Ecuador S.A., “Ficha técnica - Cemento hidráulico Tipo GU para la construcción en general,” *Holcim*, vol. 1, p. 17, 2015.
- [34] B. Lothenbach, K. Scrivener, and R. D. Hooton, “Supplementary cementitious materials,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, no. 12, pp. 1244–1256, 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.12.001.
- [35] G. Guamán, “Tobas puzolánicas para elaborar material que abarate la construcción de viviendas populares,” *Reportaje la Rev. Perspect. Investig. junio-julio 2021*, vol. 7, no. 59, pp. 6–7, 2021, [Online]. Available: https://issuu.com/utplcatolica/docs/perspectivas_junio_julio_2021_descarga.

- [36] Petrofísica Ibérica S.A, “La puzolana,” 2021. <https://www.petrofisicaiberica.com/la-puzolana/> (accessed Mar. 03, 2022).
- [37] C. Sánchez, N. Lucas, and J. Rivadeneira, “Levantamiento Geológico ESPOL Campus Gustavo Galindo,” 2017. doi: 10.13140/RG.2.2.12806.27208.
- [38] A. Varela and S. Ron, “Geografía y clima del Ecuador,” *BIOWEB. Pontificia Universidad Católica del Ecuador*, 2018. <https://bioweb.bio/geografiaClima.html> (accessed Dec. 03, 2021).
- [39] J. L. Costafreda Mustelier, *Tectosilicatos con características especiales: Las zeolitas naturales*. 2011.
- [40] A. Curi, W. J. V Granda, H. M. Lima, and W. T. Sousa, “Las Zeolitas y su Aplicación en la Descontaminación de Efluentes Mineros,” *Inf. tecnológica*, vol. 17, no. 6, pp. 111–118, 2006, doi: 10.4067/S0718-07642006000600017.
- [41] M. J. Jiménez Cedillo, “Caracterización de minerales zeolíticos mexicanos,” Universidad Autónoma del Estado de Mexico, 2004.
- [42] L. F. Cortés Henao, “Zeolitas I,” *Rev. del Dep. ciencias*, pp. 101–112, 2001.
- [43] S. Montalvo, “Aplicación de las zeolitas naturales al tratamiento biológico de residuos,” in *Congreso latinoamericano de prevención de riesgos y medio ambiente*, 2013, pp. 1–10.
- [44] F. Mumpton, *Mineralogy and Geology of Natural Zeolites*. 1977.
- [45] P. Perles, *Hormigón Armado*, 1st ed. Buenos Aires, 2005.
- [46] P. Monteiro and K. Mehta, *Concreto: Estructura, propiedades y materiales*, 2nd ed. 2014.
- [47] J. McCormac and R. Brown, *Diseño de concreto reforzado*, 10th ed. 2017.
- [48] Arquitectura21, “Que son agregados para concreto,” 2020. <https://www.arquitectura21.com/que-son-agregados-para-concreto/> (accessed Mar. 07, 2022).
- [49] A. Ortega, “La calidad de los agregados de tres canteras de la ciudad de ambato y su influencia en la resistencia del hormigón empleado en a construcción de obras civiles,” Universidad Técnica de Ambato, 2013.
- [50] J. Velarde, “Estudio de banco de materiales para concreto,” Universidad de Sonora.
- [51] Universidad de Cantabria, “Dosificación de hormigones,” pp. 1–8, [Online].

Available:

[https://ocw.unican.es/pluginfile.php/811/course/section/869/Dosificacion de Hormigones.pdf](https://ocw.unican.es/pluginfile.php/811/course/section/869/Dosificacion%20de%20Hormigones.pdf).

- [52] M. Coro, “Determinación del módulo de rotura en vigas de hormigón, fabricado con materiales procedentes de la cantera San Roque, para $f_c=28\text{MPa}$,” Universidad Central del Ecuador, 2014.
- [53] E. De Las Heras, “Disoluciones, diluciones y densidad 9,” in *McGraw Hill*, vol. 2, no. 261545, 2001, pp. 10–20.
- [54] Instituto Ecuatoriano de Normalización, “Cemento hidráulico. Determinación de la densidad,” *NTE INEN 156*, 2009.
- [55] Laboratorio Cevallos, “Matraz aforado 500ml.” <https://labcevallos.com/matraz-aforado-500-ml-c-tapa-plastica/14100>.
- [56] Instituto Ecuatoriano de Normalización, “Determinación de la finura por tamizado seco,” *NTE INEN 489*, pp. 1–11, 1987, [Online]. Available: <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/489.pdf>.
- [57] Universidad Centroamericana, “Determinacion de la finura del cemento portland usando el aparato de permeabilidad al aire de blaine,” *Mater. Construcción*, no. 01, pp. 1–15, 1988, [Online]. Available: [https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoCemento/DETERMINACION DE LA FINURA DEL CEMENTO PORTLAND.pdf](https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoCemento/DETERMINACION%20DE%20LA%20FINURA%20DEL%20CEMENTO%20PORTLAND.pdf).
- [58] Instituto Ecuatoriano de Normalización, “Determinación de Finura mediante el aparato de permeabilidad al aitr,” *NTE INEN 196*, 2016, [Online]. Available: https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/nte_inen_196.pdf.
- [59] Universidad Centroamericana, “Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz No. 200 ($75\mu\text{m}$) en agregado mineral por lavado,” *Mater. Construcción*, vol. 1, no. 1, p. 15, 2017, [Online]. Available: <https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoAgregados/GRANULOMETRIA.pdf>.
- [60] J. Aguilar Torres, “Análisis granulométrico mediante el método del

- hidrómetro,” *Mente Mater.*, vol. 4, no. 1, p. 29, 2013.
- [61] Ministerio de Infraestructura, “Granulometría de los suelos finos método hidrométrico,” *Man. Vis.*, vol. 1, no. 2, pp. 1–12, 2003.
- [62] JMR Equipos, “Hidrómetro para suelo ASTM 152-H,” *Equipos para laboratorios de suelos, concreto y asfalto*. <https://www.jmrequipos.com/tienda/hidrometro-para-suelo-astm-152h-de-5-a-60-g-l-gilson/>.
- [63] D. Gabriels and D. Lobo, “Métodos para determinar granulometría y densidad aparente del suelo,” *Venesuelos*, vol. 14, pp. 37–48, 2011.
- [64] Universidad Centroamericana, “Determinación del tiempo de fraguado inicial y final del cemento,” *Mater. Construcción*, no. 01, pp. 1–9, [Online]. Available: [https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoCemento/Fraguado inicial y final del cemento.pdf](https://www.uca.edu.sv/mecanica-estructural/materias/materialesCostruccion/guiasLab/ensayoCemento/Fraguado%20inicial%20y%20final%20del%20cemento.pdf).
- [65] Instituto Ecuatoriano de Normalización, “Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat,” *NTE INEN 158*, 2009.
- [66] G. D. Rodríguez Villavicencio, “Efectos de la zeolita como material suplementario del cemento portland en la resistencia a compresión del concreto estructural,” Universidad Técnica de Ambato, 2021.
- [67] M. Ipohorski and P. B. Bozzano, “Microscopía electrónica de barrido en la caracterización de materiales,” *Cienc. Invest.*, vol. 63, no. 3, pp. 43–53, 2013.
- [68] J. Clavijo, “Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM),” *Elementos*, vol. 3, no. 3, pp. 133–146, 2013, doi: 10.15765/e.v3i3.420.
- [69] V. E. Salcedo Rivera, “Estudio de las propiedades físicas de zeolita natural (aluminosilicato) de tipo clinoptilolita para reemplazo parcial del cemento Portland,” Universidad Técnica de Ambato, 2021.
- [70] A. D. J. Montes-Luna *et al.*, “Caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca²⁺ por distintos métodos físico-químicos para su posible aplicación en procesos de separación de gases,” *Superf. y Vacío*, vol. 28, no. 1, pp. 5–11, 2015.
- [71] Instituto Ecuatoriano de Normalización, “Determinación de la resistencia a la

compresión de especímenes cilíndricos de hormigón de cemento hidráulico.,” *NTE INEN 1573*, 2010.





- [72] Cemento Alion, “Calidad y propiedades del concreto en estado endurecido.” <https://alion.com.co/calidad-y-propiedades-del-concreto/>.
- [73] Z. Li, *Advanced Concrete Technology*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [74] E. González and A. M. Alloza, “Ensayos de hormigón endurecido . Profundidad de penetración de agua bajo presión,” *Libr. Ses. prácticas*, pp. 81–84, [Online]. Available: https://campusvirtual.ull.es/ocw/pluginfile.php/2093/mod_page/content/1/FichasTemas/tema14-penetracionaguahormigon.pdf.
- [75] Universidad de Cantabria, “Materiales de construcción: Sesión 5,” *Lab. la Div. Cienc. e Ing. los Mater*.
- [76] J. Olivas *et al.*, “Laboratorio de regresión integración interpolación y derivación (RiidLab),” *Memorias Congr. Int. Investig. Científica Multidiscip.*, vol. 5, no. 1, pp. 201–218, 2017, [Online]. Available: <http://www.chi.itesm.mx/icm/memorias2017/Ingenieria.pdf>.
- [77] 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.
- [78] 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.
- [79] D. A. Maldonado Maldonado, “Estudio de la zeolita natural como sustituto parcial del cemento tipo GU en la construcción,” Universidad Técnica de Ambato, 2021.
- [80] D. Yanchaguano, “Análisis de aluminosilicatos como material de sustitución parcial del cemento tipo GU en la construcción,” Universidad Técnica de Smbato, 2021.
- [81] R. Panimbosa, “Efectos de la zeolita como material suplementario del cemento portland en la resistencia a tracción indirecta del concreto estructural,” Universidad Técnica de Ambato, 2022.

- [82] Shimadzu, “Shimadzu 2000X.”
<https://www.shimadzu.com/an/products/materials-testing/uni-ttm/concreto-2000x3000x/index.html> (accessed Mar. 21, 2022).
- [83] Helbert, “Bomba HRAL 104,” 2021.
<https://www.helbertycia.com/producto/bomba-de-pruebas-compacta---400-psi#profile> (accessed Mar. 21, 2022).
- [84] Excel para todos, “¿Qué es Excel y para qué sirve?”
<https://excelparatodos.com/que-es-excel/#:~:text=Excel se distingue de los,complejidad y utilizar funciones de> (accessed Apr. 08, 2022).
- [85] R. Rodríguez, “Comportamiento del hormigón añadido metacaolín como sustituto del cemento, utilizando los agregados existentes en la provincia de Pastaza,” Universidad Técnica de Ambato, 2016.
- [86] E. Cortes and J. Perilla, “Estudio comparativo de las características físico-mecánicas de cuatro cementos comerciales Portland tipo I,” Universidad Militar Nueva Granada, 2014.
- [87] R. Imaz Gutiérrez, “Cap 3. Tracción y Compresión Simple,” in *Resistencia de Materiales*, Cantabria, 2013, pp. 1–8.
- [88] A. Ramezani pour Akbar, R. Mousavi, M. Kalhori, J. Sobhani, and 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.
- [89] G. Iswarya and M. Beulah, “Use of zeolite and industrial waste materials in high strength concrete – A review,” *Mater. Today Proc.*, vol. 46, no. 1, pp. 116–123, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.329.

ANEXOS

A. Archivos Fotográficos

Tabla 16. Fotografías ensayo.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL RESISTENCIA A TRACCIÓN INDIRECTA	
	
1. Dibujando líneas diametrales en el espécimen.	2. Pesando el espécimen a ser ensayado.
	
3. Colocando las tablas de madera en el marco superior e inferior del molde	4. Colocando el espécimen entre el marco superior e inferior.








	
<p>5. Realizando el ensayo a tracción indirecta.</p>	<p>6. Registrando las cargas aplicadas.</p>
	
<p>7. Retirando el espécimen.</p>	<p>8. Observando la falla producida.</p>

Tabla 17. Fotografías ensayo.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL	
ENSAYO DE PENETRACIÓN DE AGUA BAJO PRESIÓN	
	
<p>1. Desbastando con el cepillo metálico la superficie que va a tener contacto con el agua a presión.</p>	<p>2. Colocando el espécimen a ensayar en la mesa de ensayo de permeabilidad</p>
	
<p>3. Cebando la bomba manual para pruebas hidrostáticas.</p>	<p>4. Revisando en los manómetros la presión aplicada.</p>
	
<p>5. Revisando periódicamente por 72 horas.</p>	<p>6. Realizando el ensayo de tracción indirecta para verificar la penetración de agua.</p>



7. Verificando la profundidad de penetración de agua bajo presión