



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

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

TEMA:

**“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL
(ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO
PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND”**

AUTORA: Verónica Elizabeth Salcedo Rivera

TUTORA: PhD. Diana Carolina Coello Fiallos

AMBATO-ECUADOR

Enero - 2021

CERTIFICACIÓN

En mi calidad de Tutora del Trabajo experimental, previo a la obtención del título de Ingeniera Civil, con el tema: **“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND”** elaborado por la Sra. Verónica Elizabeth Salcedo Rivera, portadora de la cédula de ciudadanía: 210033467-7, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil, de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

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

Ambato, Enero 2021

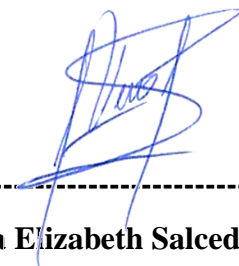


PhD. Diana Carolina Coello Fiallos
TUTORA

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo **Verónica Elizabeth Salcedo Rivera** con C.I. 210033467-7 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente trabajo experimental con el tema **“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva propiedad como autora de la investigación, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Enero 2021



Verónica Elizabeth Salcedo Rivera

C.I. 210033467-7

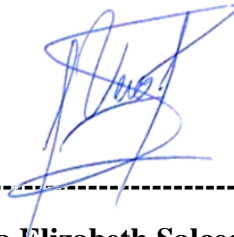
AUTORA

DERECHOS DE AUTOR

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

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

Ambato, Enero 2021



Verónica Elizabeth Salcedo Rivera

C.I. 210033467-7

AUTORA

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por la estudiante Verónica Elizabeth Salcedo Rivera de la carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **“ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND”**.

Ambato, Enero 2021

Para constancia firman:



Ing. Mg. Wilson Santiago Medina Robalino

Miembro del Tribunal



Ing. M.Sc Maritza Elizabeth Ureña Aguirre

Miembro del Tribunal

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico especialmente al amor de mis amores “**Dios Todopoderoso**” creador y autor de mi vida, por haber permitido que cumpla uno más de mis anhelos, por nunca desampararme, dándome las fuerzas cuando he sentido desmayar, con quien he podido superar todos los momentos difíciles y los obstáculos presentados a lo largo de mi carrera. ¡Mi alma te alaba!

A ti **mi amado esposo Fernando** por tu apoyo incondicional, tu esfuerzo y trabajo diario, por haber creído en mí, aunque no ha sido fácil para ninguno de los dos, siempre has estado a mi lado brindándome tu comprensión y amor. ¡Te amo!

A **mis amados hijos Topacio, Salomón y Jedidías**, quienes son mi más grande motivación para superarme y poderles brindar un ejemplo a seguir y un mejor futuro. ¡Los amo;

A mis padres **Bolívar y Luz**, quienes con su amor y dedicación fueron pilares fundamentales en mi formación como persona. ¡Los amo!

A **mis hermanos y demás familiares** por todo el apoyo brindado que de alguna manera permitió que cumpliera mi meta.

A **mis Pastores y hermanos, mi familia en Cristo Jesús**, personas muy especiales en mi vida que han aportado con sus oraciones y cariño de muchísimo valor para mí en este trayecto.

A todos quienes fueron **mis maestros y compañeros** por haber compartido sus conocimientos conmigo durante todos estos años y ser una fuente de apoyo para el logro de este sueño.

Verónica Salcedo

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi sincera gratitud a todas y cada una de las personas e instituciones que han permitido sea posible la culminación de esta tesis de pregrado:

A **MIS MAESTROS Y COMPAÑEROS**, por sus enseñanzas y experiencias vividas.

A **MI TUTORA, PhD. en Física y Tecnologías Cuánticas Diana Coello** por su valiosa ayuda, su conocimiento y tiempo impartido en el desarrollo experimental y de este documento.

A los grupos de investigación, **SciTeM Group** de la Universidad Técnica Ambato y **PRG** de la ESPOCH, por su apoyo y contribución a la parte experimental de esta investigación.

A **LA UTA-FIMC**, por acogerme durante todo mi trayecto estudiantil y permitirme desarrollar el presente trabajo experimental en sus instalaciones y de igual manera a quienes las administran gentilmente.

AL DIDE (Dirección de Investigación y Desarrollo) por hacerme parte del grupo de investigación al que pertenece el presente proyecto.

A los docentes: **Ing. Santiago Medina Magister en Estructuras Sismo-Resistentes y actual Decano de la FICM, Ing. Maritza Ureña Master en Ingeniería de la Construcción e Ing. MSc. Favio Portilla** colaboradores del presente proyecto investigativo, quienes amablemente compartieron sus conocimientos y apoyo moral en el desarrollo de la investigación.

A los compañeros tesisistas **Verónica Yanchaguano, Paúl Fernández, Diego Maldonado y Fabián Ramos** con quienes se desarrolló el trabajo de campo y de laboratorio, compartiendo además sus experiencias y resultados en la ejecución de la investigación.

Principalmente mi agradecimiento a **Papito Dios** por haberlos puesto en mi camino, que él les bendiga grandemente.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN.....	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTO.....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	viii
INDICE DE TABLAS.....	x
INDICE DE FIGURAS.....	xiii
RESUMEN EJECUTIVO.....	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPITULO I.....	1
1.1. Justificación.....	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Enfoque específico.....	4
1.3.2. Cemento	7
1.3.1. Zeolitas naturales	29
1.3.2. Zeolitas en el Ecuador.....	42
1.3.3. Molienda	47
1.3.4. Sistema de Información Geográfica ArcGIS	49
1.4. Hipótesis.....	50
1.5. Objetivos	50
1.5.1. General:.....	50
1.5.2. Específicos:	50
CAPITULO II.....	51
2. MATERIALES Y MÉTODOS	51
2.1. Tipos de Investigación	51
2.2. Población y muestra	52
2.2.1. Población.....	52
2.2.2. Muestra.....	52
2.3. Materiales.....	53

2.4.	Equipos.....	57
2.5.	Método	62
2.5.1.	Proceso de selección de zeolitas naturales	62
2.5.2.	Caracterización Geométrica	63
2.5.3.	Caracterización Morfológica.....	64
2.5.4.	Caracterización química.....	66
2.5.5.	Caracterización Física	66
CAPITULO III		70
3.	RESULTADOS Y DISCUSION.....	70
3.1.	Gráficos y tablas de datos	70
3.1.1.	Selección de zeolitas naturales.....	70
3.1.2.	Caracterización geométrica.....	88
3.1.3.	Resultados de la Caracterización Morfológica	95
3.1.4.	Resultados de la Caracterización Química.....	98
3.1.5.	Resultados de la Caracterización Física	112
3.2.	Verificación de la hipótesis.....	127
CAPITULO IV		128
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	128
4.1.	Conclusiones	128
4.2.	Recomendaciones.....	130
4.3.	Limitaciones del estudio	130
4.4.	Recomendaciones para futuros estudios	131
BIBLIOGRAFÍA.....		133
ANEXOS		140

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estudios Previos con Zeolitas Naturales [3], [4], [7], [19]–[23]	6
Tabla 2. Proceso térmico en el horno rotatorio [30].	15
Tabla 3. Compuestos químicos principales del cemento portland [30].	15
Tabla 4. Compuestos químicos secundarios del cemento portland.....	17
Tabla 5. Límites de composición aproximados para el cemento portland [29], [30].....	18
Tabla 6 Densidad del cemento Tipo GU.....	23
Tabla 7. Requisitos para el Aparato Vicat [49].....	28
Tabla 8. Requisitos Físicos Normalizados_ Norma NTE INEN 2380 [36].	29
Tabla 9. Formula típica y propiedades físicas de las zeolitas más importantes [6]	32
Tabla 10. Clasificación de las zeolitas según sus características físicas [6].	33
Tabla 11. Clasificación de las zeolitas según Breck D., 1974 [6].....	34
Tabla 12. Tipos de Molinos de acuerdo al tamaño del producto final [63].	47
Tabla 13. Distribución de los cuerpos molidores [64].	49
Tabla 14. Datos de envasado de la muestra CGU	54
Tabla 15. Especificaciones Técnicas Zeolita comercial ZZ [67].	55
Tabla 16. Especificaciones técnicas de la Zeolita ZI [68].	56
Tabla 17. Especificaciones técnicas del Molino de Bolas de Tambor [64].	58
Tabla 18. Serie de tamices del Laboratorio de Ensayo de Materiales.	58
Tabla 19. Especificaciones técnicas del microscopio electrónico de barrido [69].	59
Tabla 20. Muestras de ZA para granulometría.....	64
Tabla 21. Catastro de Minas de zeolitas naturales en Ecuador [72].	71
Tabla 22. Información General de las Minas y Proveedoras.	72
Tabla 23. Minas y procesadoras por ubicación.....	79
Tabla 24. Minas y proveedoras contactadas para visitas.	80
Tabla 25. Tabla general de muestras adquiridas por el grupo de investigación.	82
Tabla 26. Coordenadas de la ubicación de las muestras.	83
Tabla 27. Evidencia de la visita In-Situ y muestreo en la provincia del Guayas	85
Tabla 28. Evidencia de la molienda de ZA Etapa 1.....	88
Tabla 29. Resultados de pesos y tamaños de ZA obtenidos en la molienda Etapa 1.....	90

Tabla 30. Evidencia de la molienda de ZA Etapa2.	91
Tabla 31. Resumen de Ensayos Granulométricos.....	92
Tabla 32. Molienda de material restante1.	94
Tabla 33. Molienda de material restante 2.	94
Tabla 34. Porcentaje de elementos químicos en la muestra CGU.	99
Tabla 35. Determinación de la composición química de los óxidos del CGU.	100
Tabla 36. Comparación de óxidos del cemento CGU con requerimientos y composición típica.....	101
Tabla 37. Comparación de porcentajes de óxidos del cemento CGU con otros estudios.	103
Tabla 38. Porcentaje de elementos químicos en la muestra ZA.	104
Tabla 39. Determinación de la composición química de los óxidos de ZA.....	105
Tabla 40. Porcentaje de elementos químicos en la muestra ZZ.	106
Tabla 41. Determinación de la composición química de los óxidos de ZZ.	106
Tabla 42. Porcentaje de elementos químicos en la muestra ZI.	107
Tabla 43. Determinación de la composición química de los óxidos de ZI.	108
Tabla 44. Composición porcentual elemental del cemento y aluminosilicatos.	109
Tabla 45. Composición porcentual de óxidos principales del cemento y aluminosilicatos.	110
Tabla 46. Requerimientos químicos ASTM C-618.....	112
Tabla 47. Resultados de los datos para la calibración del picnómetro.....	113
Tabla 48. Densidad real de CGU.	114
Tabla 49. Densidad real de ZA.	114
Tabla 50. Densidad real de ZZ.....	116
Tabla 51. Densidad real de ZI.	117
Tabla 52. Desviación estándar densidad CGU.....	118
Tabla 53. Desviación estándar densidad ZA.....	118
Tabla 54. Desviación estándar densidad ZZ.	118
Tabla 55. Desviación estándar densidad ZI	119
Tabla 56.Comparación de densidades de cementos Tipo GU.....	119
Tabla 57.Comparación de varios estudios de densidades de zeolitas naturales.....	120

Tabla 58. Resultados del ensayo de densidad de las muestras.....	120
Tabla 59. Evidencia del proceso del ensayo de densidad.	121
Tabla 60. Resultados de Finura_Método Tamizado Seco CGU.	124
Tabla 61. Desviación estándar Finura CGU.	124
Tabla 62. Resultados de Finura_Método Tamizado Seco ZA.	124
Tabla 63. Desviación estándar Finura ZA.....	124
Tabla 64. Resultados de Finura_Método Tamizado Seco ZZ.....	125
Tabla 65. Desviación estándar Finura. ZZ.	125
Tabla 66. Resultados de Finura Método Tamizado Seco ZI.	126
Tabla 67. Resultados de Finura Método Tamizado Seco ZI.....	126
Tabla 68. Resultados del ensayo de finura de las muestras	126
Tabla 69. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA1-G40.....	141
Tabla 70. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA2-G60.....	141
Tabla 71. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA3-G60.....	143
Tabla 72. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA4-M40.....	144
Tabla 73. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA5-M60.....	145
Tabla 74. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA6-P60.	146
Tabla 75. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA7-P60.	147
Tabla 76. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA8-P120.	148
Tabla 77. Ensayo 1_FINURA_Tamizado Seco/ ZA.....	149
Tabla 78 Ensayo 2_FINURA_Tamizado Seco/ ZA.....	150
Tabla 79 Ensayo 3_FINURA_Tamizado Seco/ ZA.....	151
Tabla 80. Ensayo 4_FINURA_Tamizado Seco/ ZA.....	151
Tabla 81. Ensayo 1_FINURA_Tamizado Seco/ ZI	152
Tabla 82. Ensayo 2_FINURA_Tamizado Seco/ ZI	152
Tabla 83. Ensayo 3_FINURA_Tamizado Seco/ ZI	152
Tabla 84. Ensayo 4_FINURA_Tamizado Seco/ ZI	153
Tabla 85. Ensayo 1_FINURA_Tamizado Seco/ ZZ	153
Tabla 86. Ensayo 2_FINURA_Tamizado Seco/ ZZ	153
Tabla 87. Ensayo 3_FINURA_Tamizado Seco/ ZZ	154
Tabla 88. Ensayo 4_FINURA_Tamizado Seco/ ZZ	154

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Principales Productores de cemento [31].	8
Figura 2. Producción mundial del cemento 2012 [2].	9
Figura 3. Producción del cemento en Latinoamérica y el Caribe [2].	10
Figura 4. Producción del cemento en el Ecuador.	11
Figura 5. Etapas del proceso de producción del cemento [33].	12
Figura 6. Química básica del cemento portland [29].	13
Figura 7. Proceso térmico horno vertical y rotatorio para obtención del Clinker [34]. ...	14
Figura 8. Cemento de uso general tipo GU [37]	19
Figura 9. Comparativo de resistencia del cemento Tipo GU [28].	20
Figura 10. Frasco Le Chatelier [38].	22
Figura 11. Picnómetro aforado de 500 ml [40]	22
Figura 12 A) Aparato de Blaine Manual B) Aparato de Blaine Automatizado	25
Figura 13. A) Aparato de Vicat Manual B) Aparato de Vicat Automático [48].	27
Figura 14. Estructura de una zeolita común [51].	30
Figura 15. Estructura típica de una zeolita [6].	30
Figura 16. Unidad estructural secundaria [53].	33
Figura 17. Mecanismos de diferentes tipos de microscopios.	37
Figura 18. Microscopio electrónico de barrido y sus elementos.	38
Figura 19. Imagen SEM de clinoptilolita (Magnificación 8000x) [20].	40
Figura 20. A) Microscopia de clinoptilolita como llega de la mina; B) Microscopia de la clinoptilolita molida y tamizada; C) Análisis EDS de la clinoptilolita [52].	41
Figura 21. Cordilleras Costeras del Ecuador [59].	43
Figura 22 Mapa de litologías de Ecuador por regiones [6].	44
Figura 23. Geología de la Cordillera Chongón-Colonche [60].	45
Figura 24. Producción de zeolitas en el Ecuador [10].	46
Figura 25. Producción de zeolitas en el Ecuador (ARCOM 2015).	46
Figura 26. Elementos del Molino de Bolas de Tambor [64].	48
Figura 27. Proceso de la metodología aplicada en el proyecto.	51

Figura 28. Zeolita Natural en roca (ZA)	54
Figura 29. Zeolita Natural Zeonatec Mineplus (ZZ).....	55
Figura 30. Zeolita Natural Indami 200 (ZI)	56
Figura 31 Máquina de los Ángeles.....	57
Figura 32. Molino de bolas de tambor.	57
Figura 33. Tamizadoras automáticas Controls.....	59
Figura 34. Microscopio Electrónico de Barrido [69].	60
Figura 35. Minisputtering de bajo vacío [70].....	60
Figura 36. Balanza analítica Sartorius M-power AZ 1502.	61
Figura 37. Baño María Humboldt.	61
Figura 38. Interface ArcGIS.....	62
Figura 39. Catastro minas de Zeolitas Naturales en Ecuador.	78
Figura 40. Áreas de Explotación de Zeolita Natural en Hectáreas.	81
Figura 41. Porcentajes de Áreas de explotación de Zeolitas Naturales.	81
Figura 42. Obtención de las muestras según la estratigrafía de una mina del Cantón Isidro Ayora.	82
Figura 43. Estrato 4 de la mina del Cantón Isidro Ayora.....	83
Figura 44. Ubicación de las muestras en el cantón Isidro Ayora.....	84
Figura 45. Ubicación de las muestras en el cantón Guayaquil	84
Figura 46. Fotografía satelital de la ubicación de las muestras seleccionadas.....	85
Figura 47. Visita de la Mina Zeonatec	85
Figura 48. Recolección de muestras en roca.....	86
Figura 49. Almacenamiento de la materia prima.	86
Figura 50. Molienda de las zeolitas naturales.	86
Figura 51. Almacenamiento del producto terminado Zeonatec	86
Figura 52. Oficina Indami	87
Figura 53. Visita procesadora Indami.	87
Figura 54. Visita procesadora Calmosacorp.	87
Figura 55. Visita procesadora Crilarsa.....	87
Figura 56. Visita a la ESPOL.....	88
Figura 57. Laboratorios de materiales ESPOL	88

Figura 58. Material que entra a la MAG.	88
Figura 59. Material que sale de la máquina MAG.	89
Figura 60. Trituración manual de la muestra ZA.	89
Figura 61. Material resultante de la etapa 1.	89
Figura 62. Clasificación del material por tamaños.	90
Figura 63. Limpieza y recubrimiento del molino MBT.	91
Figura 64. Material que entra y sale en las cuatro primeras moliendas.	91
Figura 65. Material que entra y sale en las cuatro últimas moliendas.	91
Figura 66. Tamizado y registro de masas para ensayo granulométrico.	92
Figura 67. Curvas Granulométricas.	93
Figura 68. Micrografía SEM Cemento CGU.	96
Figura 69. Micrografía SEM de la zeolita ZA.	96
Figura 70. Micrografía de la zeolita ZZ.	97
Figura 71. Micrografía SEM de la zeolita ZI.	97
Figura 72. EDS del cemento CGU.	98
Figura 73. Porcentaje estimado de clinker en cada cemento analizado por Garófalo [35].	102
Figura 74. Composición química de los cementos analizados por Garófalo [35].	102
Figura 75. Resistencia a la compresión en cubos de mortero a 1, 3, 7 y 28 días según Garófalo.	103
Figura 76. EDS de la zeolita ZA.	104
Figura 77. EDS de la zeolita ZZ.	105
Figura 78. EDS de la zeolita ZI.	107
Figura 79. Esquema comparativo de la relación Si/Al del cemento y de los aluminosilicatos.	108
Figura 80. Esquema comparativo de la composición elemental del cemento y aluminosilicatos.	109
Figura 81. Comparación de óxidos de las muestras zeolíticas y cemento.	110
Figura 82. Comparación de los óxidos principales.	110
Figura 83. Comparación de los óxidos secundarios.	111
Figura 84. Calibración picnómetro 500 ml.	113

Figura 85. Esquema comparativo de densidades en cementos tipo GU.	120
Figura 86. Esquema comparativo de densidades.	121
Figura 87. Calibración del picnómetro.....	121
Figura 88. Ensayo de densidad (picnómetro).....	122
Figura 89. Esquema comparative de finura.....	126
Figura 90. Visita del grupo de investigación a la ESPOL con el Dr. Morante.	155
Figura 91. Grupo investigativo en la mina Zeonatec cantón Isidro Ayora.	155
Figura 92. Muestras de los estratos de la mina.	155
Figura 93. Muestras analizadas tamaño 75 μm	156
Figura 94. Sacando la muestra del Molino de bolas.	156
Figura 95. Información del Dr. Morante.....	156
Figura 96. Recorrido por la mina Zeonatec.	157
Figura 97. Entrada al Laboratorio de Materiales	157
Figura 98. Muestra ZA en roca.	157
Figura 99. Producto Mine-Si 200 Zeonatec.....	158
Figura 100. Grupo de Investigación.....	158
Figura 101. Explicación del uso del producto.....	158
Figura 102. Registro de puntos en el GPS.	159
Figura 103. Aprendiendo el uso del aparato de Blaine.	159
Figura 104. Aprendiendo el uso del aparato de Vicat.....	159

RESUMEN EJECUTIVO

Este estudio evidencia características físicas y químicas de zeolitas naturales (ZN) denominados ZA, ZZ, ZI procedentes de afloramientos de la Cordillera Chongón Colonche ubicada en la provincia de Guayas del Ecuador y del cemento Tipo GU (CGU) de uso comercial, con la finalidad de determinar si pueden ser material suplementario del cemento (SCM). Se determina características físicas (densidad y finura aplicando normas INEN y ASTM), morfológicas en el Microscopio electrónico de barrido (SEM) y composición elemental mediante espectroscopia de dispersión de rayos X (EDS). Previo a los ensayos se prepara las muestras que requieren molienda hasta obtener gránulos menores de 75 micras. Se obtienen densidades de 3.071, 2.449, 2.511 y 2.494 gramos sobre centímetro cúbico y porcentajes de finura de 99.95, 99.04, 99.51, y 99.35 para CGU, ZA, ZZ y ZI, respectivamente.

Los resultados experimentales, las micrografías SEM y espectros EDS revelan que todas las muestras poseen potencial como SCM, destacándose a ZA y ZZ con características más cercanas al CGU. Todas poseen una alta capacidad puzolánica en el contenido de sílice, alúmina y óxido de hierro superando el mínimo especificado por la norma ASTM C 618. Por otra parte, la relación silicio aluminio entre 2.67 y 4.83 muestran la presencia de clinoptilolitas que han demostrado eficacia como SCM.

Es obvia la compatibilidad en cuanto a su estructura, tamaños y composición química, sin embargo, para estudios posteriores se debe tener en cuenta que el cemento CGU es altamente silícico en comparación con otros cementos usados en estudios con zeolitas.

Palabras clave: zeolita natural, SEM, EDS, densidad, finura y SCM.

ABSTRACT

This study shows physical and chemical characteristics of natural zeolites (ZN) called ZA, ZZ, ZI from outcrops of the Chongón Colonche Mountain range located in the Guayas province of Ecuador and of the cement Type GU (CGU) for commercial use, with the purpose to determine if they can be supplemental cement material (SCM). Physical characteristics (density and fineness applying INEN and ASTM standards), morphological characteristics in the Scanning Electron Microscope (SEM) and elemental composition are determined by X-ray scattering spectroscopy (EDS). Prior to the tests, the samples that require grinding are prepared to obtain granules smaller than 75 microns. Densities of 3,071, 2,449, 2,511 and 2,494 grams per cubic centimeter and fineness percentages of 99.95, 99.04, 99.51, and 99.35 are obtained for CGU, ZA, ZZ and ZI, respectively.

The experimental results, SEM micrographs and EDS spectra reveal that all samples have potential as SCM, highlighting ZA and ZZ with characteristics closer to CGU. All have a high pozzolanic capacity in the content of silica, alumina and iron oxide, exceeding the minimum specified by the ASTM C 618 standard. On the other hand, the silicon-aluminum ratio between 2.67 and 4.83 shows the presence of clinoptilolites that have demonstrated efficacy as SCM.

The compatibility in terms of its structure, sizes and chemical composition is obvious, however, for subsequent studies it should be taken into account that CGU cement is highly silicic compared to other cements used in studies with zeolites.

Keywords: natural zeolite, SEM, EDS, density, fineness and SCM.

CAPITULO I

INTRODUCCION

1.1. Justificación

Las actividades de la construcción si bien es cierto permiten el desarrollo de la sociedad, pero a su vez generan impactos ambientales negativos, muchos de ellos relacionados con los materiales utilizados en la elaboración de productos usados en la construcción, por lo que es relevante la elección sostenible de los mismos teniendo en cuenta que sostenibilidad no implica el desuso de los recursos naturales sino más bien su uso eficiente [1].

Uno de los productos de construcción más usados en Latinoamérica es el hormigón, compuesto básicamente por cemento, áridos y agua, de los cuales el elemento primordial en su elaboración sin duda es el cemento, sin el cual la mayoría de las infraestructuras que aportan al crecimiento de las poblaciones no serían posibles, sin embargo, el informe de la FICEM (Federación Interamericana del Cemento) atribuye a la industria cementera la responsabilidad de la emisión del 5 % del CO₂ generado por el hombre [2].

En consecuencia, de lo antes mencionado la investigación de sustitución de materiales convencionales por materiales amigables al medio ambiente en la elaboración del hormigón cada vez va en aumento, entre estos materiales se encuentran a las zeolitas naturales como un material muy usado en remplazo parcial del cemento y que en la elaboración del hormigón, da como resultado la mejora de sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, aumentando su durabilidad [3]. Los resultados de las propiedades de las zeolitas naturales pueden ser variables dependiendo de su tipo y procedencia como lo reportan Costafreda et al. [4], quienes en su investigación tomaron muestras de zeolitas naturales de diferentes afloramientos ubicados en México, Cuba y España. Por otra parte se han detectado indicios geológicos influenciados por procesos volcánicos, principales fuentes de formación de yacimientos de zeolitas naturales, en países Iberoamericanos como Chile, Argentina, Bolivia, Perú, Ecuador, Colombia, Panamá, Costa Rica,

Nicaragua, El Salvador, Honduras, Guatemala, México, Estados Unidos, Canadá y países orientales entre ellos Japón, mencionándose además a Ecuador junto a Cuba y España como pioneros en usar zeolitas naturales en la elaboración de cementos puzolánicos [5].

En el Ecuador por su geología y encontrarse en el llamado “Cinturón de Fuego”, se ha podido inferir la presencia de varios afloramientos de zeolitas naturales, estos afloramientos se han formado específicamente por procesos volcanosedimentarios y se los ha localizado principalmente en la Cordillera Chongón-Colonche perteneciente a la Formación Cayo, donde hay gran presencia de heulandita y clinoptilolita, así como mordenita, laumontita y en menor cantidad, estilbita, erionita y faujasita; cabe recalcar que no todos los sectores donde hay indicios de la presencia de zeolita natural han sido estudiados como lo especifica Morante en [6], por otro lado, cita estudios realizados con zeolitas naturales ecuatorianas que atribuyen una gran capacidad de su aplicación por sus excelentes propiedades reportando su uso en el área agrícola y el área de la construcción.

Con esta información es conveniente realizar estudios que permitan ampliar el uso de este mineral (aluminosilicatos) presente en la geografía ecuatoriana y usarlo para reemplazo parcial del cemento, que es uno de los responsables de la contaminación atmosférica durante su producción. El uso de aluminosilicatos procedentes del Ecuador permitirá fortalecer investigaciones similares sugiriendo una modalidad de construcción sostenible que reduzca el impacto negativo al ambiente por la producción del cemento convencional.

1.2. Antecedentes

Varias investigaciones con zeolitas naturales en diferentes partes del mundo han demostrado que estos minerales poseen propiedades benéficas para ser aplicados en diferentes áreas, aportando valiosos resultados que se han convertido en puntales para investigaciones recientes y el desarrollo tecnológico actual.

Una de las propiedades que destaca a las zeolitas naturales es su alta capacidad de intercambio iónico [5], [6], [7], [8], propiedad que ha llamado la atención de muchos

investigadores y científicos por lo que ha sido estudiada en el área médica como desintoxicante, antioxidante, antidiarreico, coadyuvante entre otros, reportándose su uso tanto en animales como en humanos [9]. Se la ha estudiado también en el área de la agricultura [5], [6], [10], como mejoramiento de suelos y como parte de fertilizantes demostrando efectividad en el incremento de la productividad de diferentes tipos de cultivos de importancia económica [11], en zootecnia se usa para mejorar la crianza y nutrición de animales [5], [6], [10].

Además de la propiedad de intercambio iónico, los aluminosilicatos tienen una estructura porosa alcanzando un alto porcentaje de poros, semejante a un tamiz del cual toma el nombre de “tamiz molecular” y posee una gran capacidad de absorción [6], [12], [13]; se reporta que puede absorber agua hasta un tercio de su masa [4], [5].

Con todas estas características las zeolitas naturales no han pasado desapercibidas en el campo de la ingeniería civil, considerándose un material adecuado que puede ser aplicado en el área de hidráulica en tratamientos de aguas industriales con metales pesados [14], remoción de plomo [15], remoción de materia orgánica en el agua potable [16] y como material filtrante que cumple con especificaciones del TULSMA y normas de calidad, quedando demostrada su eficiencia en el tratamiento de aguas residuales lo que se debería a su propiedad de intercambio iónico [13]. En el área de vías se reportan estudios con zeolitas naturales para la estabilización de suelos [17], en pavimentos para el diseño de mezclas asfálticas de mayor eficiencia energética y menor impacto ambiental, mostrándose resultados de desempeño similares a una mezcla convencional [18].

Otra de las características que la hacen muy llamativas en la rama de la ingeniería civil, son sus propiedades puzolánicas como lo evidencian Raggiotti et al. en su estudio [7], por lo que también han sido analizadas como posible material de construcción y solución a problemas ambientales generados en la producción del cemento portland, una problemática que ha orillado a nivel mundial a que se realicen nuevas investigaciones de este material, para ser usado ya sea en la producción del cemento o su remplazo parcial en la elaboración tanto de hormigones como morteros, así Jacob y Das en su estudio [19], lo consideran un hormigón ecológico debido a la capacidad de absorción de dióxido de

carbono de la zeolita natural (1 mol de CO₂ en 50 días). Por otra parte, se observa también eficacia de la zeolita natural en la penetración de iones de cloruro, velocidad de corrosión, contracción por secado y la penetración de agua [20], por lo tanto, el uso de zeolita natural no solo minimiza el impacto ambiental, sino que aporta a la durabilidad del hormigón [3],[7], [19], [20], [21], [22].

Finalmente, acorde a los resultados obtenidos en estudios previos realizados se demuestra la factibilidad de su uso de las zeolitas naturales en el sector de la construcción como remplazo parcial del cemento por las nobles propiedades que presentan.

1.3.Enfoque específico

Los remplazos de zeolita natural por cemento en hormigón y morteros se los ha realizado en base a porcentajes entre el 10% y 40% analizando sus propiedades químicas, físicas y mecánicas para luego ser comparadas con una mezcla de referencia (sin adición de zeolita natural) y destacar el porcentaje adecuado que presente mejoras en la resistencia a la compresión, propiedades de durabilidad entre otros, ajustándose a los requerimientos de las normativas vigentes en cada país o normativas internacionales [4], [7], [20], [21], [22] . En Cuba, Rodríguez, Espinoza y García para su evaluación realizaron ensayos físicos y mecánicos en base a normas cubanas e internacionales como la ASTM y concluyeron su eficacia para adiciones hasta el 30%, destacando el reemplazo del 10% que superó a la probeta de referencia [23].

Resultados experimentales en Vejmelková et al. [22] muestran que el reemplazo del 20% por zeolita natural es la opción más adecuada; por otro lado, Jacob y Das [19] concluyen que la resistencia a la compresión a 28 días fue mayor a un reemplazo de 25% de cemento respecto del concreto convencional. De manera similar los resultados obtenidos en varias investigaciones difieren unas de otras lo que se debería a la amplia variedad de zeolitas y diferencias mínimas en su composición, sin embargo, en lo que si concuerdan muchos de ellos como lo demuestran en las siguientes investigaciones [24], [21], es que las propiedades mecánicas disminuyen a mayores cantidades de zeolita

natural en reemplazo parcial del cemento; es por eso que debido a la gran variedad de zeolitas naturales se aplican técnicas para la caracterización de estos minerales y de esta manera conocer su composición química, estructura y morfología para que pueda ser aplicada como reemplazo parcial del cemento en la elaboración del hormigón [3], [4], [7], [20]. La Tabla 1, muestra algunos de los estudios realizados con zeolitas naturales como sustituto parcial del cemento portland.

Tabla 1. Estudios Previos con Zeolitas Naturales [3], [4], [7], [19]–[23] .

Referencia (material)	% Adición % Destaca *	Análisis químico	Propiedades físicas		Ensayos durabilidad	Resistencia a la compresión (MPa)			
			Cemento	Zeolita Natural		1-7	8	90	180
Jacob & Das 2017 Cemento portland ordinario, ZN NR	0, 15, 20, 25*, 30	NR	Consistencia normal Tiempos de fraguado Gravedad específica Finura	Consistencia normal Tiempos de fraguado Gravedad específica Finura	Propiedades de Resistencia Propiedades de transporte (Trabajabilidad del hormigón) Absorción de CO2	5.80	2.66	-	-
Markiv et al. 2016 Cemento portland CEM I 42.5R 60% Clinoptilolita	0+S, 0+S +A, 10+S, 10+S +A S= plastificante A=incorporador de aire	ERX DRX SEM	Superficie específica Tiempos de fraguado	Distribución tamaño de partículas	Propiedades de resistencia Absorción de agua Penetración de agua Hielo-deshielo Contracción por secado	>15	>50	>55	60
Najimi et al. 2012 Cemento portland tipo II, Clinoptilolita iraní	0, 15, 30, A mayores edades la diferencia es mínima al 15%	SEM	Tiempos de fraguado Superficie específica Gravedad específica Pérdida por ignición Residuo insoluble Expansión en autoclave	Granulometría Tiempos de fraguado Finura Requerimiento de agua Análisis termogravimétrico Expansión en autoclave	Propiedades de resistencia Penetración de agua Absorción de agua Penetración de iones de cloruro Mediciones electroquímicas de corrosión Contracción por secado Deterioro por ácido sulfúrico	14.50	36.60	39.70	-
Raggiotti et al. 2015 Cemento portland ordinary y compuesto OPC 40, ZN 51 %Clinoptilolita- Na Argentina	0*, 5, 10, 15, 20 (OPC 40) A mayores edades la diferencia es mínima al 20% con cemento portland OPC 40	XRD XRF SEM EDS	Superficie específica Densidad	Granulometría Densidad (picnómetro) Superficie específica	Propiedades de resistencia Consistencia del hormigón Absorción de agua Succión capilar Velocidad de succión capilar permeabilidad al aire	> 30	> 45	> 50	60
Rodríguez et al. 2016 Cemento P-35, ZN Cubana	0*, 10, 20, 25, 30, 35, 40	NR	Peso Específico Consistencia normal Tiempos de fraguado Módulo de finura	Peso Específico	Propiedades de resistencia	> 35	> 40	-	-
Sedlmajer et al. 2015 Cemento portland CEM I 42.5R, 45 % Clinoptilolita Zeobau 200	0, 7, 15, 22, 30 después de 90 días el resto de edades diferencia mínima	SEM		superficie específica granulometría	Propiedades de resistencia Consistencia del hormigón Contenido de aire Módulo de elasticidad Hielo-deshielo Porosimetría	> 45	> 50	> 65	-
Vejmelková et al. 2012 Cemento portland CEM I 42.5R, ZN (NR)	0*, 10, 20, 40 diferencia mínima en todas las edades al 10 %	NR	Superficie específica	Densidad aparente Porosidad abierta Densidad de la matriz	Propiedades de resistencia Hielo-deshielo Absorción de agua Transporte de vapor de agua Isotermas de sorción Propiedades térmicas	48.9	-	63.7	-
Costafreda et al. 2011 Cemento portland Tipo I, ZN: México (Clinoptilolita-heulandita), Cuba (mordenita-clinoptilolita) y España (mordenita)	3 variedades de ZN Cem Ref.* Diferencia no considerable en todas las variedades destacando entre ellas la de España	FRX	Densidad real Densidad aparente Absorción de agua Tiempos de fraguado	Granulometría Densidad real Densidad aparente Absorción de agua Tiempos de fraguado	Propiedades mecánicas	30.3	43.7	55.5	-

NR, No Reportado

1.3.1.1. Marco Teórico

1.3.2. Cemento

El cemento, su nombre de origen romano “opus caementum” data desde la antigüedad y fue patentado por Aspdin en 1824 [25]. El cemento es un material cementante que en contacto con el agua actúa como una goma permitiendo adherir entre sí otros materiales como el ripio y la arena para formar una masa sólida. Es un material que se ha usado en la construcción desde épocas antiguas por los romanos así se conoce como el cemento romano que consistía en la cal apagada o hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) [26].

El cemento hidráulico es el cemento que al mezclarse con el agua reacciona químicamente fraguando y endureciendo al aire y es capaz de hacerlo aún bajo el agua [27], [28], [29]. Este cemento más conocido actualmente como cemento portland ha sido el resultado de un largo y lento proceso de estudio y experimentación por miles de años [26]. Los silicatos y aluminatos de cal son los constituyentes principales de los cementos hidráulicos y en base a esto pueden clasificarse en cementos naturales, cementos portland y cementos de alta alumina.

1.3.2.1. Cemento Portland

El cemento portland es un polvo muy fino de color verdoso, mezclado con agua forma una pasta plástica y moldeable que al fraguar y endurecer adquiere gran resistencia y durabilidad [30]. El cemento portland es un cemento hidráulico producto de la pulverización del Clinker básicamente compuesto de silicatos cálcicos hidráulicos [27], [28], el Clinker es el resultado de una mezcla variable de caliza CaCO_3 y arcillas ($\text{K}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) fundido y enfriado luego de un proceso térmico, el Clinker forma redes cristalinas Si-O-Si-O y del tipo O-Al-O-Si-, que encierra iones K^+ ó Ca^{2+} , semejante a las zeolitas naturales, de igual manera el óxido de hierro Fe_2O_3 como parte de las arcillas también participa en estas redes, sustituye al aluminio y se une al silicio a través del oxígeno formando redes O-Si-O-Fe-O-[26]. Cabe recalcar que el cemento portland dado que sus componentes existen en todo el mundo es el más usado a nivel

mundial, por ser un conglomerante hidráulico ya que en combinación con otros materiales como los áridos, por su capacidad de adherirlos, funciona como un pegante que da lugar al mortero y al hormigón.[25]

Este estudio se centra en torno al cemento portland, debido a que el cemento en estudio está dentro de esta clasificación.

1.3.2.2. *Producción del cemento Portland*

Según el International Cement Review entre los países que lideran la producción del cemento en el año 2012 a nivel mundial destaca China en primer lugar, mientras que a nivel latinoamericano en primer lugar se encuentra Brasil seguido por México como se muestra en la Figura 1.

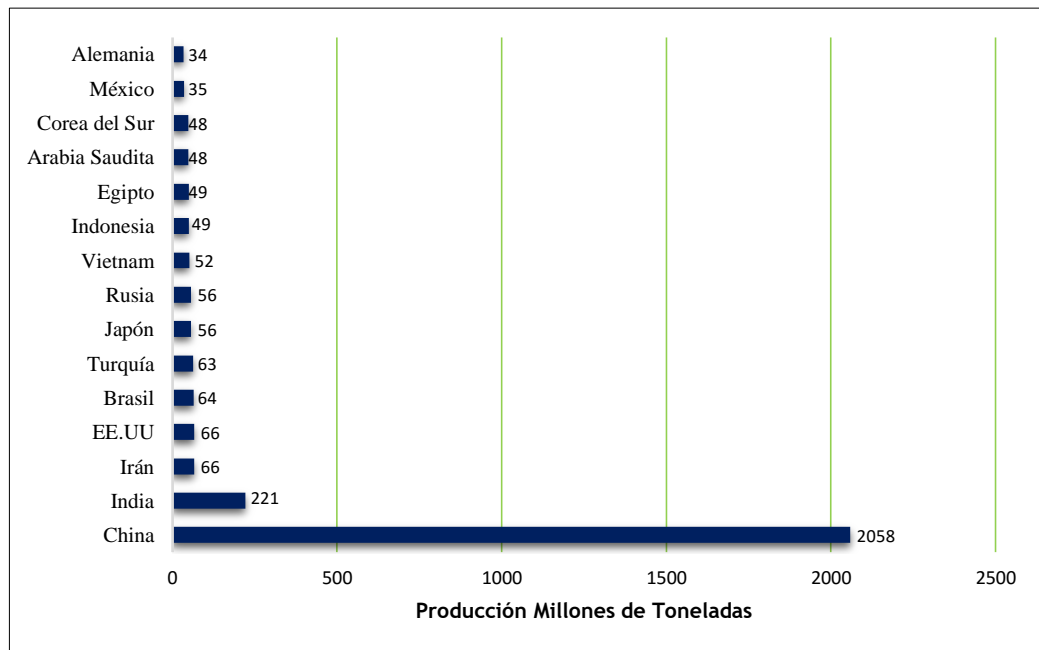


Figura 1. Principales Productores de cemento [31].

En base a un valor estimado sobre la producción mundial del cemento portland en el 2012 de 3.8 billones de toneladas de cemento, América Latina y el Caribe alcanza un valor de 4.7% del total, siendo el Norte de Asia los que concentran más de la mitad de la producción mundial con un 61.42 % del total (Figura 2).

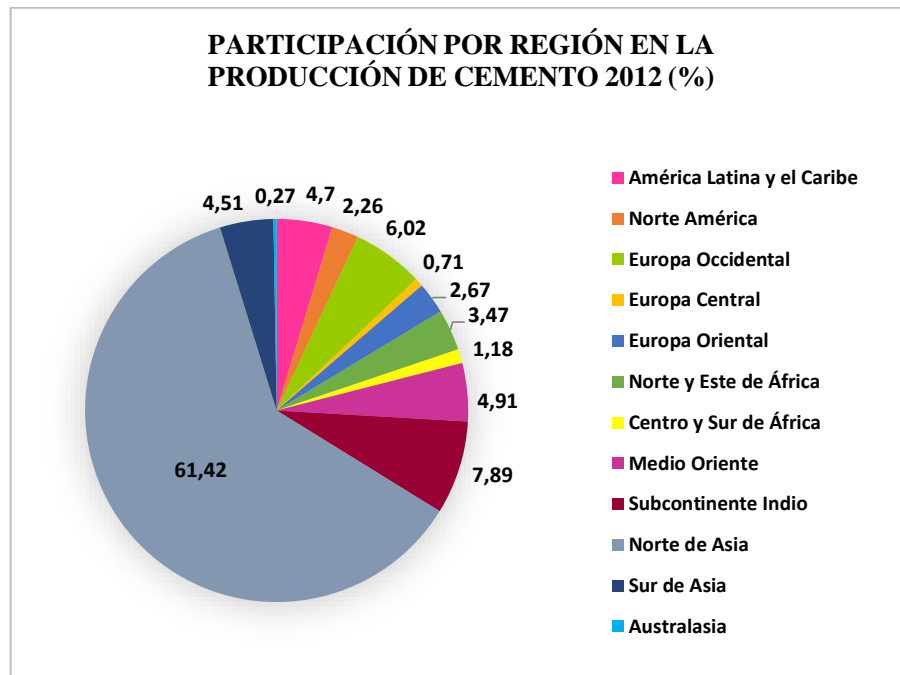


Figura 2. Producción mundial del cemento 2012 [2].

Según datos aproximados de la Federación Interamericana del Cemento (FICEM), durante el año 2012 la mayor producción del cemento se concentra en Brasil, México, Argentina y Colombia con una producción que sobrepasa los 10 millones de toneladas. Ecuador, Perú, Chile y Venezuela no se quedan atrás con una producción aproximada de 5 a 10 millones de toneladas, mientras que los países de menor producción reportan menos de un millón de toneladas entre los que se encuentran Nicaragua, Paraguay, Uruguay y países caribeños (Figura 3).

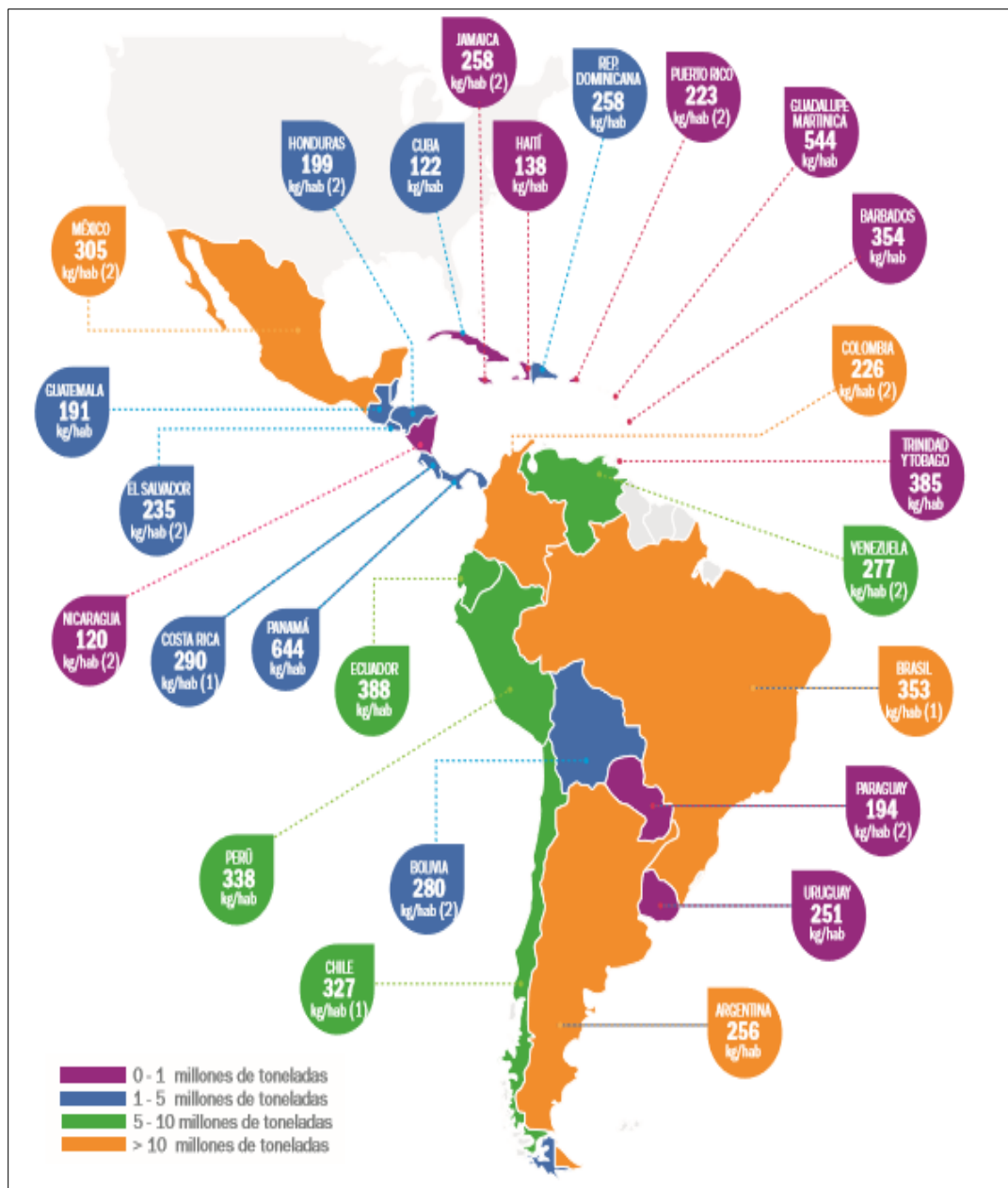


Figura 3. Producción del cemento en Latinoamérica y el Caribe [2].

De acuerdo con la Figura 4, la industria cementera en el Ecuador se radica mayormente en la provincia de Azuay y Pichincha con el 17.74 % y 16.79 %, respectivamente.

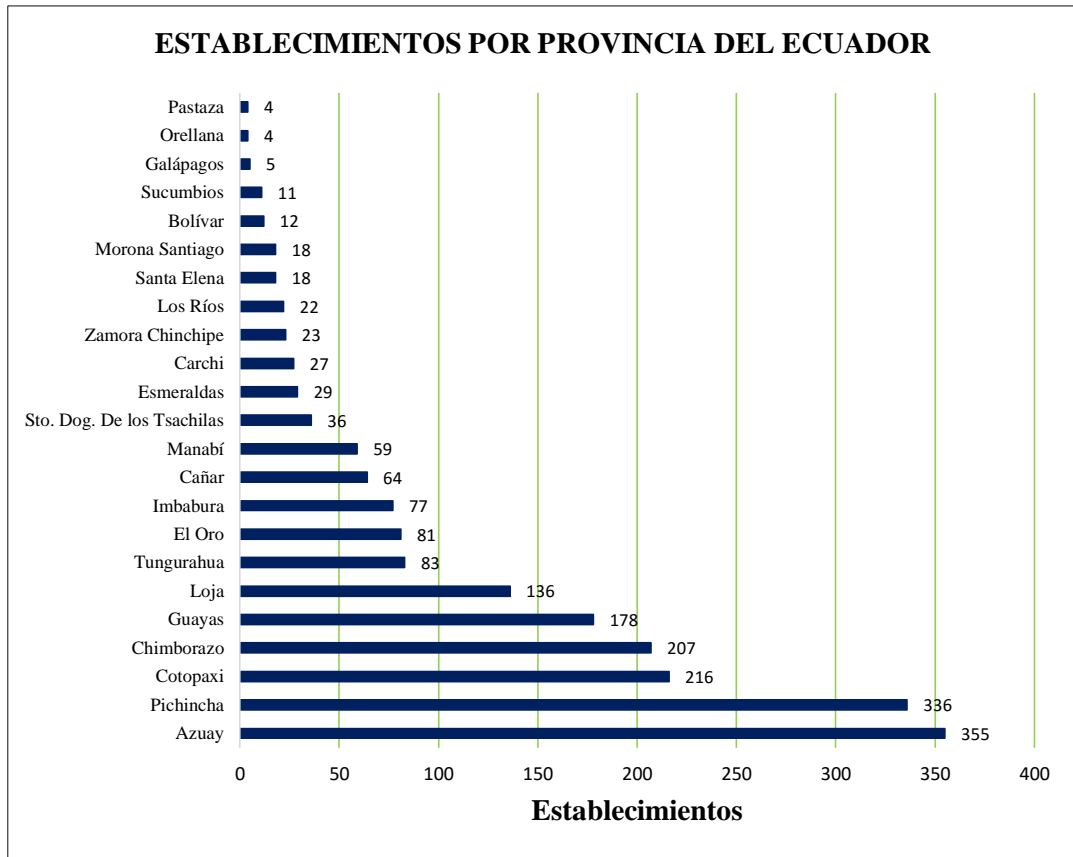


Figura 4. Producción del cemento en el Ecuador.

1.3.2.2.1. Proceso de producción del cemento portland

Para la fabricación del cemento portland es necesario una serie de etapas [32], como se observan en la Figura 5 y se describen a continuación:

1. Extracción y trituración de la piedra caliza y arcilla; principales materias primas para la elaboración del crudo. Mediante la trituración de la piedra caliza de hasta 1 metro se reduce a fragmentos de 100 milímetros, que son apilados para la prehomogenización.
2. Prehomogenización y almacenamiento de las materias primas que permite reducir variaciones de composición química de las mismas.
3. Molienda de las materias primas junto con arena ferrosa y fluorita para obtener un polvo muy fino llamada harina cruda o crudo que es homogenizado y almacenado en

grandes silos (cilindros de concreto).

4. Precalentamiento del crudo por un tiempo muy corto a una temperatura de 120 °C a 880 °C antes de su ingreso al horno rotatorio.
5. Obtención del Clinker a través del horno rotatorio a temperaturas de hasta 1450 °C, donde el crudo sufre una transformación físico- química dando como resultado el clinker principal componente del cemento debido a que le aporta sus características hidráulicas.
6. Enfriamiento del Clinker y almacenamiento en silos.
7. Molienda del Clinker junto a otros aditivos minerales como el yeso o puzolanas obteniendo el cemento portland.
8. Finalmente, el cemento obtenido es almacenado en silos para su comercialización al granel o en sacos
9. Expedición del producto final.

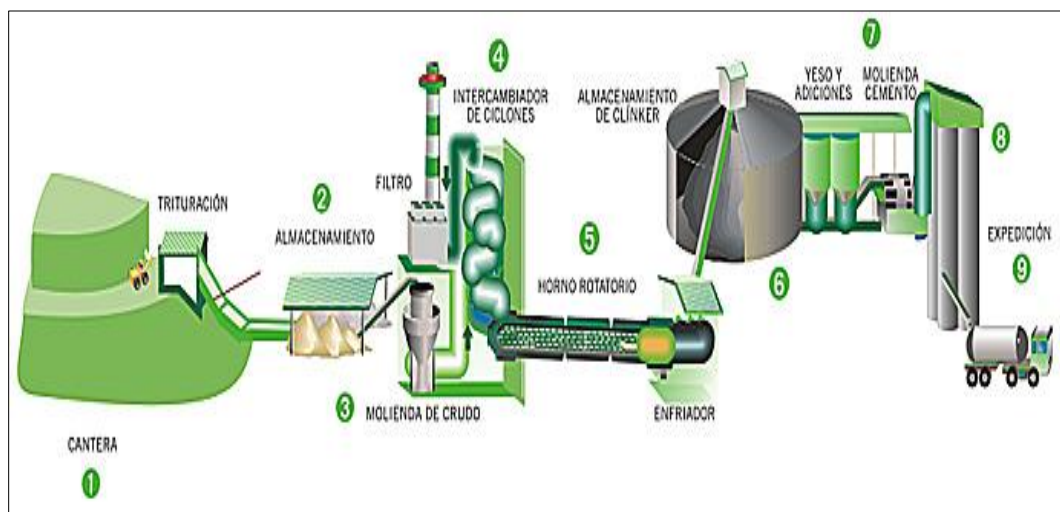


Figura 5. Etapas del proceso de producción del cemento [33].

1.3.2.2.2. Materias primas del cemento portland y su composición química

Las materias primas básicas para la producción del cemento portland son:

- **Materiales calcáreos:** dentro de estos materiales están las margas, cretas o calizas, las cuales deben contener carbonato de calcio CaCO_3 entre 60% y 80% y no más de 1.5% de magnesia.

- **Materiales arcillosos:** Conforman las pizarras esquistos y arcillas en general, estos materiales deben tener entre 60% y 70% de sílice. De esta manera el óxido de silicio o sílice y también el óxido de aluminio o alumina son provistos por estos materiales.
- **Minerales de hierro:** Proveen en pequeñas cantidades el óxido férrico o en algunos casos vienen con las arcillas.
- **Yeso:** provee el sulfato de calcio [30].

1.3.2.2.3. *Compuestos químicos principales del cemento portland*

La piedra caliza y la arcilla, como se observa en la Figura 6, reúnen entre sí los elementos y óxidos que se requieren para la elaboración del cemento ($\text{CaO} = \text{C}$; $\text{SiO}_2 = \text{S}$; $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ y $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$). A través del proceso térmico en el horno rotatorio se produce una serie de reacciones químicas a diferentes temperaturas formándose los compuestos fundamentales del Clinker que posteriormente molido y mezclado con yeso darán lugar al cemento portland.

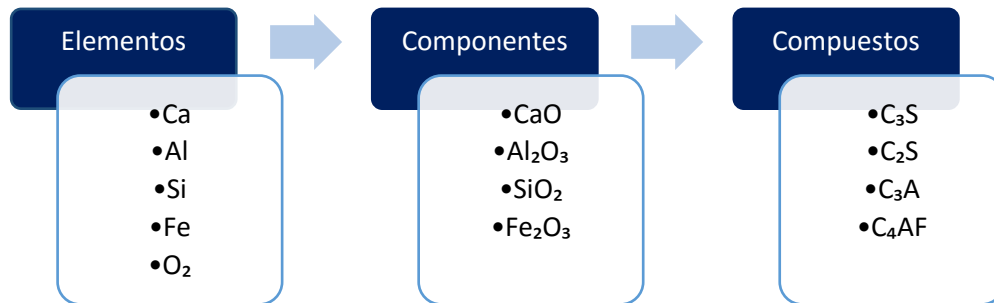


Figura 6. *Química básica del cemento portland [29].*

Las reacciones químicas inician desde la fase de precalentamiento mediante el calor residual proveniente del horno rotatorio, el crudo es calentado induciendo a la decarbonatación y la transformación termoquímica del mismo. Se inicia con temperaturas de 280 °C desde la parte alta del precalentador alcanzando hasta 850 °C en la entrada del horno. Luego viene la fase de obtención del Clinker también conocida como clinkerización, misma que se produce dentro del horno rotatorio constituido por un tubo

cilíndrico de acero entre 70 y 80 metros de longitud y un diámetro de 4 a 5 metros revestido en su interior con material refractario que es calentado mediante la combustión de carbón o petróleo que permiten alcanzar temperaturas de 1400 °C a 1450°C óptimas para la obtención del Clinker [30].

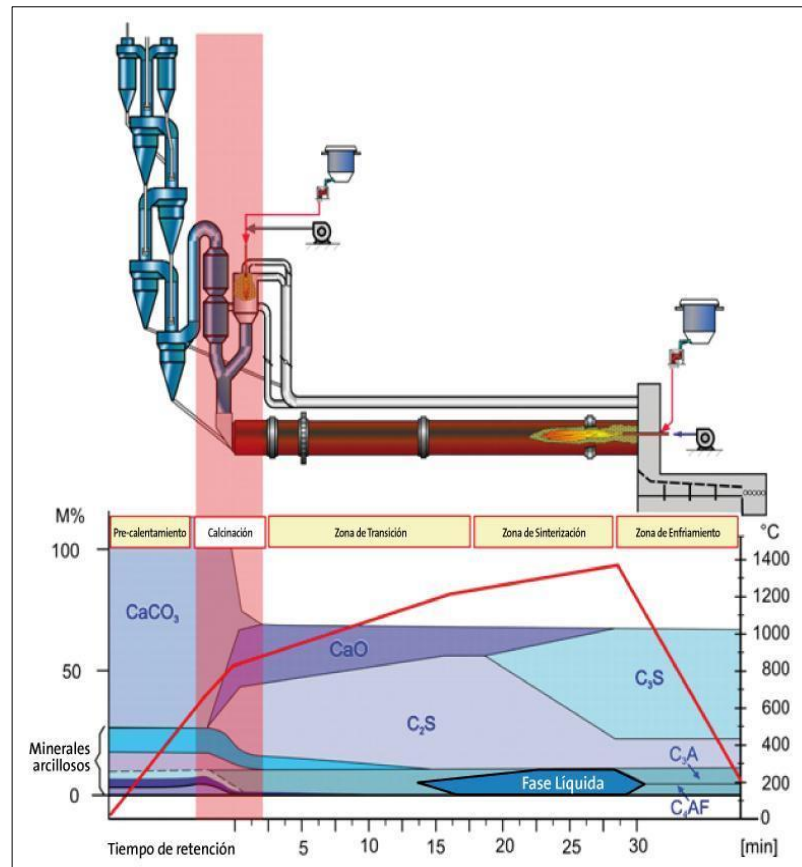


Figura 7. Proceso térmico horno vertical y rotatorio para obtención del Clinker [34].

Como se puede ver en la Figura 7, el CaCO_3 (piedra caliza) a una temperatura aproximada de 1000 °C se transforma en CaO lo que se debería a la descarbonatación es decir, el desprendimiento del CO_2 , este CaO se combina con los componentes de la arcilla (sílice, alumina y óxidos de hierro) para los diferentes compuestos del Clinker, en una fase sólida constituida por C_3S (Alita) y C_2S (Belita) en mayor proporción y una fase líquida constituida por C_3A (Aluminato) y C_4AF (Ferrito) en menor proporción. A continuación, se describen las diferentes fases del proceso térmico en la Tabla 2, y se resume los compuestos químicos en la Tabla 3.

Tabla 2. Proceso térmico en el horno rotatorio [30].

HORNO ROTATORIO	
Temperatura (°C)	Reacción
110	Secado de los materiales.
110-450	Deshidratación de los materiales.
600-750	Formación del Silicatodivale (C ₂ S) y compuestos intermedios como el aluminato cálcico y ferrocálita (CA y C ₂ F).
900	Conversión de la caliza en cal viva debido al desprendimiento de gas carbónico, la cal viva es llevada a la zona de sinterización de inmediato evitando que reaccione con el medio ambiente.
1200	Descomposición de las arcillas en sílice, alumina y óxidos de hierro. Formación de C ₂ S (Belita) por la combinación del sílice y la cal.
1300	Comienzo de la fase líquida con la formación del C ₄ AF, que actúa como fundente disolviendo los materiales restantes.
1340	Formación completada del C ₂ S y comienzo de la formación del C ₃ A debido a la reacción de los materiales disueltos con el C ₄ AF.
1400	Formación completada del C ₃ A (Fase líquida).
1450	Formación completa de los compuestos del Clinker.

Tabla 3. Compuestos químicos principales del cemento portland [30].

Compuestos	Fórmula	Abreviatura	Porcentaje (%)
Silicato tricálcico	3CaO.SiO ₂	C ₃ S	30-50
Silicato dicálcico	2CaO.SiO ₂	C ₂ S	15-30
Aluminato tricálcico	3CaO.Al ₂ O ₃	C ₃ A	4-12
Ferro aluminato tetracálcico	4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃	C ₄ AF	8-13

Seguidamente se definen los compuestos principales del cemento Portland:[30], [35].

C₃ S (Alita). - El silicato tricálcico constituye el 50 al 70% del Clinker, es el compuesto más importante del cemento tiene una velocidad de hidratación muy alta, endurece rápidamente adquiriendo resistencias a las primeras edades. Tiene un alto desprendimiento de calor alcanzando 120 cal/gr siendo de gran importancia en el calor de

hidratación de los cementos, además presenta buena estabilidad de volumen y contribuye a la resistencia al intemperismo.

C_2S (Belita).- El silicato dicálcico constituye el 15% al 30% del Clinker, es el segundo compuesto de más importancia en el cemento por ser alto su porcentaje en el cemento portland su hidratación y endurecimiento es lenta con un valor de 63 cal/gr, sin embargo, aporta elevadas resistencias a largo plazo. Contribuye regularmente a la estabilidad de volumen, pero aporta a la resistencia al intemperismo. Este compuesto junto con el silicato tricálcico son los principales responsables de las resistencias mecánicas ya que representan el 75% del cemento.

$C_3 A$ (Aluminato). - El aluminato tricálcico constituye el 5% al 10% del Clinker, es el compuesto por el que es necesario añadir regulador de fraguado ya que su velocidad de hidratación es violenta, fragua instantáneamente por ende es el primero en hidratarse; tiene un desprendimiento de hidratación muy alto 207 cal/gr, aporta poca resistencia mecánica, poca resistencia al intemperismo, poca resistencia al ataque de sulfatos y ataques químicos, así como una mala estabilidad de volumen.

$C_4 AF$ (Ferrito). – El ferro aluminato tetracálcico constituye el 5% al 15% del Clinker, reduce la temperatura de formación del Clinker, da la tonalidad verde-grisáceo al cemento, tiene una velocidad de hidratación igual a 100 cal/gr , no aporta resistencias apreciables y tiene mala estabilidad de volumen.

A partir de cantidades precisas de óxidos en el cemento se puede determinar aproximadamente los compuestos principales del mismo mediante las ecuaciones de Bogue [29], como se enuncian a continuación:

- $C_3S = 4.07(CaO) - 7.60(SiO_2) - 6.72(Al_2O_3) - 1.43(Fe_2O_3) - 2.85(SO_3)$
- $C_2S = 2.87(SiO_2) - 0.754(3CaO.SiO_2)$
- $C_2S = 2.65(Al_2O_3) - 1.69(Fe_2O_3)$
- $C_4AF = 3.04(Fe_2O_3)$

1.3.2.2.4. *Compuestos químicos secundarios del cemento portland*

También denominados compuestos menores no porque se les reste importancia en la constitución del cemento portland, sino por la cantidad tan pequeña que representan en porcentaje de la masa del mismo [29]. La Tabla 4 muestra los óxidos minoritarios del cemento portland.

Tabla 4. *Compuestos químicos secundarios del cemento portland*

Compuestos	Fórmula	Abreviatura
Óxido de calcio (Cal libre)	CaO	C
Óxido de magnesio (Magnesia libre)	MgO	Mg
Óxido de sodio (Álcalis)	Na ₂ O	Na
Óxido de potasio (Álcalis)	K ₂ O	K
Trióxido de azufre(Azufre)	SO ₃	S

CaO (Óxido de calcio). - Posee una velocidad de hidratación muy alta con desprendimiento de calor de 280 cal/gr. No aporta a la resistencia y se limita al 5% fuera de este límite produce expansión.

MgO (Óxido de magnesio). - Tiene velocidad de hidratación muy lenta 205 cal/gr. No aporta resistencias se limita al 2% fuera de este límite produce expansión.

Na₂ O y K₂ O (Álcalis). - Aportan alcalinidad al cemento para la protección de armaduras en el hormigón armado, junto con agregados álcali-reactivos producen compuestos expansivos.

SO₃ (Trióxido de azufre). - El contenido de este óxido debe ser muy bajo o nulo, hidratado da como resultado ácido sulfúrico el mismo que al reaccionar con la portlandita da como resultado sulfato cálcico éste reacciona con el aluminato tricálcico que todavía no ha fraguado formando la ettringita que es expansiva.

La Tabla 5, muestra los límites aproximados de la composición química en óxidos del cemento portland realizados en Estados Unidos así como porcentajes de una composición típica de un cemento de 1960.

Tabla 5. Límites de composición aproximados para el cemento portland [29], [30].

Óxido	Contenido (%)		Composición típica (%)
CaO	60-67	58-67	63
SiO ₂	17-25	16-26	20
Al ₂ O ₃	3.0-8.0	4-8	6
Fe ₂ O ₃	0.5-6.0	2-5	3
MgO	0.5-4.0	1-5	1.5
Na ₂ O y K ₂ O (Álcalis)	0.3-1.2	0-1	1
SO ₃	2.0-3.5	0.1-2.5	2
Mn ₂ O ₃		0-3	(Otros) 1
TiO ₂		0-0.5	
P ₂ O ₅		0-1.5	
Pérdida x calcinación		0.5-3	2

1.3.2.3. Clasificación del cemento por desempeño

La norma NTE INEN 2380 [36] que equivale a la norma internacional ASTM-C1157 clasifica a los cementos en base a requisitos de desempeño y propiedades específicas, además muestra la nomenclatura con la que deben ser designados. A continuación, la clasificación:

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

1.3.2.4. Cemento Tipo GU

El cemento Tipo GU es el cemento de mayor consumo, compuesto de Clinker de cemento portland, sulfato de calcio y la adición de una o varias puzolanas naturales, este tipo de cemento puede ser usado en cualquier tipo de construcción (cimentaciones,

elementos estructurales, obras viales, obras hidráulicas entre otros), siempre y cuando no se requiera propiedades especiales; además este cemento se considera amigable con el medio ambiente ya que en comparación con el cemento tradicional puede reducir hasta un 35% la emisión de CO₂ [28]. A continuación, se describen algunas de sus ventajas:

- Excelente resistencia mecánica para todo tipo de construcciones
- Mejora la trabajabilidad de las mezclas
- Reduce la segregación y exudación
- Reduce el calor de hidratación y por consiguiente la tendencia a la fisuración.
- Tiempos de fraguado favorables para la construcción en general.
- Proporciona resistencia química al ataque de sulfatos, difusión de cloruros y reacción álcali-agregado.
- Ahorros significativos en el consumo de cemento por metro cúbico de hormigón [28].



Figura 8. Cemento de uso general tipo GU [37]

De acuerdo a la ficha Técnica de una productora de cementos en Ecuador, se puede observar en la Figura 9, que el cemento tipo GU cumple y llega a exceder propiedades de resistencia y durabilidad exigidas por las normas NTE INEN 2380, 152 y 490.

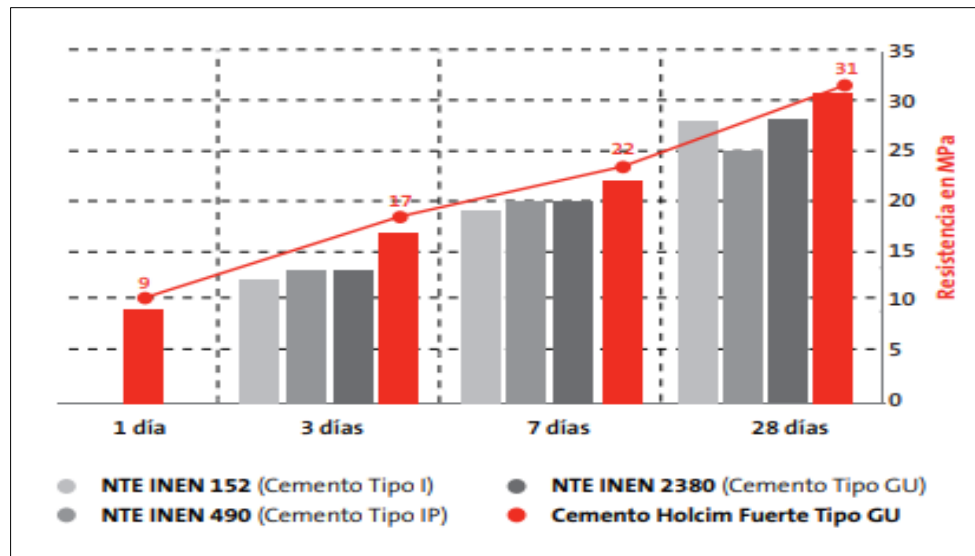


Figura 9. Comparativo de resistencia del cemento Tipo GU [28].

1.3.2.5. *Propiedades Químicas del Cemento Tipo GU*

Según la norma NTE INEN 2380 no se especifican requisitos químicos para los cementos por desempeño, sin embargo, deben ser analizados durante su producción con fines informativos [36].

Para el presente estudio se sustentará con estudios realizados al cemento portland donde los componentes químicos del cemento se obtienen con las técnicas de caracterización química aplicadas a las zeolitas naturales descritas más adelante y estudios realizados a este tipo de cemento.

1.3.2.6. *Propiedades Físicas del Cemento Tipo GU*

Las propiedades físicas del cemento se determinan mediante ensayos de laboratorio de las fábricas de cementos, con el propósito de cumplir con los estándares de las normativas vigentes en cada país asegurando su calidad, sin embargo, conviene realizar pruebas de aceptación cuando este va a tener una aplicación especial [29]. Los ensayos se aplican sobre cemento puro, pasta de cemento y mortero, evaluándose propiedades como:

1.3.2.6.1. Densidad real del cemento

La densidad del cemento es la relación entre la masa del cemento y el volumen que esta desplaza en un frasco normalizado, se determina en g/cm^3 y oscila en el rango de 2.9 g/cm^3 y 3.15 g/cm^3 , dependiendo del tipo de cemento. La importancia de determinar la densidad del cemento radica en el diseño y control de mezclas de hormigón para lo cual es necesario expresarlo como gravedad específica.

Las normas INEN establecen dos métodos para determinar la densidad:

- Método del frasco de Le Chatelier
- Método del Picnómetro.

Método del frasco de Le Chatelier

Este método se encuentra establecido en la norma NTE INEN 156 [38], y ASTM C-188 donde para obtener la densidad del cemento relaciona la masa del cemento y el volumen del líquido no reactivo que esta masa desplaza del frasco Le Chatelier.

Fórmulas de cálculo:

- Densidad

$$\rho = \frac{\text{Masa del cemento (gr)}}{\text{Volumen desplazado (cm}^3\text{)}}$$

- Gravedad específica (Control de mezclas de hormigón)

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

El frasco Le Chatelier tiene un diseño estandarizado y dimensiones como se muestra en la Figura 10.

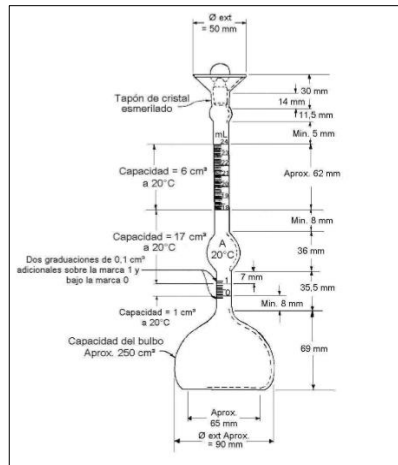


Figura 10. Frasco Le Chatelier [38].

Método del Picnómetro

Consiste en usar un picnómetro (Figura 11) para determinar el volumen o densidad de un material sólido o líquido. El picnómetro es un instrumento de laboratorio de mucha precisión su forma asemeja a un balón con cuello, se fabrican en diferentes materiales y varios tamaños, generalmente de vidrio dependiendo de la sustancia que se va a ensayar. Existe una variedad de estos instrumentos algunos poseen un tapón esmerilado para evitar derrames, sin embargo, otros no poseen este tapón, pero cuentan con un cuello largo aforado con un engrase marcado, en cuanto a su estándar están regidos bajo la norma ASTM D-854 y arrojan resultados en unidades de g/cm^3 y kg/m^3 [39]. Este método se sujeta a la norma NTE INEN 156 al igual que el método Le Chatelier siempre que se cumpla con especificaciones del numeral 4.2.5 de mencionada norma.

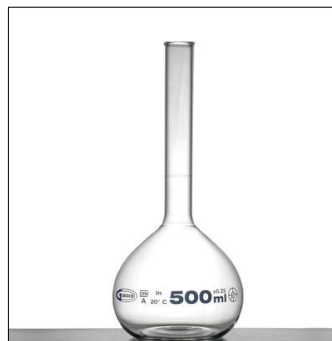


Figura 11. Picnómetro aforado de 500 ml [40]

Se reportan resultados de la densidad del cemento tipo GU mediante el uso del frasco Le chatelier y picnómetro que varían entre 2,80 g/cm³ y 3,00 g/cm³ (Tabla 6).

Tabla 6 Densidad del cemento Tipo GU

Estudio (Tesis)	Anasi 2013 [41]		Hidalgo 2018 [42]	Martínez 2016 [43]	Caiza 2017 [44]	Vivas 2016 [45]
Frasco normalizado	<i>picnómetro</i>	<i>Le chatelier</i>	<i>Le chatelier</i>	<i>picnómetro</i>	<i>picnómetro</i>	<i>picnómetro</i>
Densidad (g/cm ³)	2.80-2.85	2.89-2.91	2.927	2.95	2.912	3.00

1.3.2.6.2. Finura del cemento

Tiene que ver con el grado de molienda del polvo, se expresa por la superficie específica m²/kg. Entre más fino es el cemento la resistencia aumenta, sin embargo, también aumenta el calor de hidratación y cambios de volumen. La superficie específica es una de las propiedades determinantes en las reacciones de hidratación del cemento, puesto que es en las superficies de los granos de cemento donde se inicia la hidratación, mientras más fino es el grano se hidratará con mayor rapidez, sin embargo, una finura excesiva en el cemento lo deteriorará al exponerse a la atmósfera, además de que experimentan una reacción más fuerte con los agregados reactivos alcalinos, requieren mayor contenido de agua, mayor cantidad de yeso y su costo aumenta [29]. Por estas razones la finura del cemento debe ser controlada por lo que actualmente se realizan pruebas para determinar la superficie específica.

La finura del cemento se puede determinar por los siguientes métodos:

- Tamizado (húmedo y seco).
- Método de Blaine.
- Método de Wagner.

Los métodos que preveían aplicarse en la presente investigación se definirán seguidamente:

Tamizado seco

Para determinar la finura del cemento se utiliza el método de tamizado seco que establece la norma NTE INEN 489-13 (ASTM-C 184-94), este método consiste en el material retenido en tamices de 150 μm ó 75 μm , sin embargo, este método ayuda a determinar el tamaño de las partículas más no la superficie específica. La norma especifica el procedimiento a seguir paso a paso y las fórmulas para su cálculo según el tamiz a utilizarse.

Fórmulas de cálculo:

- Sin corrección (Tamiz 150 μm)

$$F = \frac{100 - (MR * 100)}{M}$$

- Con corrección (Tamiz 75 μm)

$$F = 100 - MRC$$

$$MRC = \left(\frac{MR * 100}{M} \right) * C$$

Donde:

F = Finura del cemento que pasa a través del tamiz 150 μm o 75 μm (%).

MR = Masa retenida en el tamiz 150 μm o 75 μm (gr).

M = Masa de la muestra ensayada (gr).

C = Factor de corrección del tamiz (%).

MRC = Masa de la muestra retenida corregida (%).

Método de Blaine

Este método determina la finura del cemento en términos de la superficie específica, expresada en cm^2/g o m^2/kg mediante el aparato de permeabilidad al aire Blaine, se basa en que la velocidad de paso del aire a través de una capa de dicho material con determinada porosidad, es función del número y tamaño de los poros existentes en la capa, los mismos

que dependen del tamaño de las partículas del material y por lo tanto de su superficie específica [46]. Dentro del mismo se establecen dos métodos de ensayo (Figura 12):

- Ensayo A: uso del aparato de Blaine manual.
- Ensayo B: uso del aparato de Blaine automatizado.

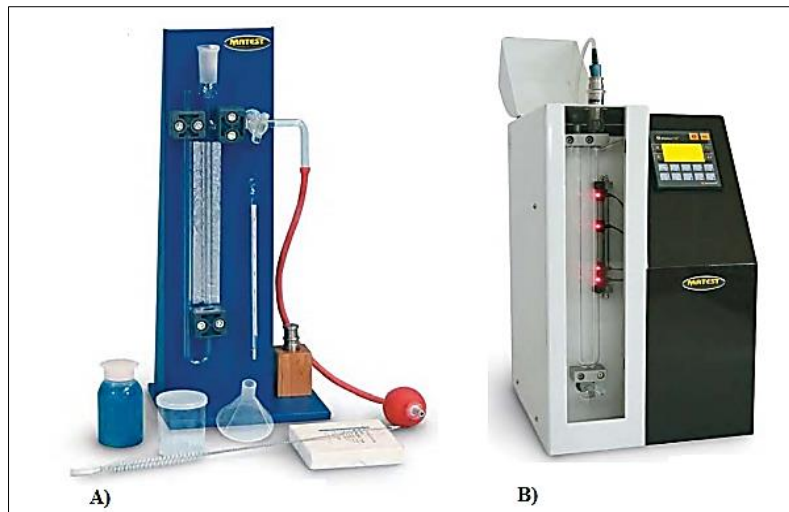


Figura 12 A) Aparato de Blaine Manual B) Aparato de Blaine Automatizado

No existen especificaciones de valores mínimos de superficie específica del cemento, ya que depende del requerimiento de resistencia temprana, sin embargo, es útil expresar que un cemento portland común presenta alrededor de 350 o 380 m²/kg de superficie específica pudiendo ser ésta más alta en el cemento portland de endurecimiento rápido [29].

El método empleado en el presente proyecto investigativo es el de tamizado seco por motivos de fuerza mayor no se realiza el ensayo Blaine.

1.3.2.6.3. Tiempos de fraguado

El fraguado del cemento consiste en un cambio de un estado fluido a un estado rígido que se lo debe distinguir del endurecimiento ya que este último tiene que ver con el incremento de la resistencia del cemento fraguado, se indican dos etapas de fraguado “fraguado inicial” y “fraguado final” [29]. Estas dos etapas están relacionadas con el

tiempo transcurrido entre el mezclado del agua con el cemento y la redificación de la pasta; estos tiempos se expresan en minutos y se lo puede determinar mediante dos métodos:

- Aguja de Vicat
- Aguja de Gillmore

Determinar estos tiempos fija una correcta puesta en obra y endurecimiento de concretos y morteros [30].

Método del Aguja de Vicat

Según la norma NTE INEN 158 [47], correspondiente a la norma ASTM C151 , este método se aplica sobre pastas de cemento de consistencia normal las cuales deben estar preparadas de acuerdo a la norma NTE INEN 157, las mismas que se mantienen en un cuarto de curado donde empieza el fraguado, durante el proceso periódicamente se realizan penetraciones sobre la pasta de cemento mediante la aguja de Vicat de 1mm de diámetro. El tiempo de fraguado inicial se mide desde que se mezcla el cemento con el agua y la penetración medida de 25 mm en la aguja de Vicat con una aproximación de 1 minuto, su fórmula de cálculo es la siguiente:

$$\textit{T tiempo de fraguado inicial} = \left[\left(\frac{H - E}{C - D} \right) * (C - 25) \right] + E$$

Donde:

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

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

C: lectura de penetración al tiempo E.

D: lectura de penetración al tiempo H.

Por último, el tiempo de fraguado final se determina mediante el tiempo que transcurre desde que se mezcla el cemento con el agua y el tiempo en el que la aguja de Vicat no marca visiblemente la pasta con una aproximación de 5 min. Dentro de este método se especifican un método A con el Aparato Manual de Aguja de Vicat y un método B con el

Aparato Automático de Aguja de Vicat (Figura 13), por lo que los resultados deben indicarse de la siguiente manera:

Tiempo de fraguado inicial Vicat (A o B) ____ min

Tiempo de fraguado final Vicat (A o B) ____ min

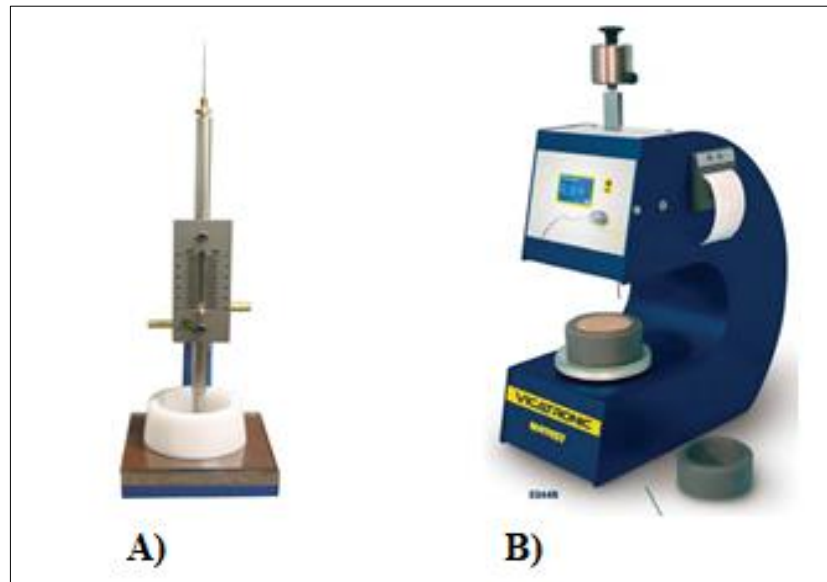


Figura 13. A) Aparato de Vicat Manual B) Aparato de Vicat Automático [48].

Consistencia Normal

Como se especifica en la norma INEN 158, la consistencia normal en pastas de cemento es un prerequisite para el ensayo de tiempos de fraguado, de acuerdo a la norma NTE INEN 157 [49], está determinada por la resistencia que opone la pasta de cemento a la penetración de la varilla del aparato Vicat en un tiempo normalizado. Los equipos y reactivo que se usan en este ensayo deben estar sujetos a normas ASTM, al igual el aparato Vicat debe cumplir los requisitos que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Requisitos para el Aparato Vicat [49].

Masa de la varilla desmontable	300 g ± 0.5 g
Diámetro del extremo de penetración de la varilla	10 mm ± 0.05 mm
Diámetro de la aguja	1 mm ± 0.05 mm
Diámetro del interior del anillo en la base	70 mm ± 3 mm
Diámetro del interior del anillo en la parte superior	60 mm ± 3 mm
Altura del anillo	40 mm ± 1 mm
Escala graduada	La escala graduada y normalizada con precisión de 0.1 mm en todos los puntos, desviación máx. 0.25 mm en cualquier punto

Para determinar la consistencia normal se realizan pruebas experimentales con pastas de cemento a distintos porcentajes de agua hasta lograr la consistencia deseada la que se logra cuando la varilla penetra 10 mm ± 1 mm bajo la superficie original de la pasta en 30 segundos después de haber sido soltada. El contenido de agua en la pasta normalizada se expresa en porcentaje por masa de cemento seco el cual puede estar comprendido entre 26 % y 33 % [29].

Fórmula de cálculo:

$$C (\%) = \frac{m_a}{m_c} * 100$$

Donde:

C= Consistencia normal, en %.

m_a = Masa del agua, en g.

m_c = Masa del cemento en g.

Los cementos por desempeño incluido el cemento Tipo GU tiene parámetros físicos que deben cumplir con la Tabla 1 de la norma NTE INEN 2380-11 [36], basada en la norma ASTM C 1157-10 (Tabla 8)

Tabla 8. Requisitos Físicos Normalizados_ Norma NTE INEN 2380 [36].

Ensayo		INEN	Cemento GU	
			INEN 2380	Ficha técnica
Finura		196	A	-
Cambio de longitud por autoclave, (% máx).		200	0.80	-0.06
Tiempos de fraguado ^B	Inicial (min)	158	45	190
	Final (min)		420	
<p>^A El porcentaje retenido en el tamiz 45 um (Nº 325) por vía húmeda y el área de la superficie específica determinada en el equipo de permeabilidad al aire en m²/kg, ambos deben ser informados en todos los certificados de resultados requeridos al fabricante.</p> <p>^B El tiempo de fraguado se refiere al tiempo de fraguado inicial en la NTE INEN 158.</p>				

Por motivos de fuerza mayor los ensayos físicos que se aplican en esta investigación son la densidad y finura por tamizado seco.

1.3.1. Zeolitas naturales

1.3.1.1. Definición y estructura de la zeolita natural

Las zeolitas naturales son rocas sedimentarias que se forman de un proceso volcánico en reacción con aguas salinas a través del paso del tiempo, estructuralmente se conocen como tectosilicatos hidratados de aluminio con cationes alcalinos y alcalinotérreos que dependen de la sustitución de Silicio (Si) por Aluminio (Al) formando estructuras abiertas de naturaleza variada de donde surgen las diferentes familias de este mineral [50]. A más de la relación Si/Al se consideran factores determinantes para la formación de las diferentes especies, la temperatura, la presión, el tiempo de reacción, los cationes de intercambio y la presión parcial del agua [21].

Las zeolitas naturales poseen cristales que describen estructuras en forma de panel, con poros y canales extremadamente pequeños [19], estos cristales microporosos están compuestos de tetraedros TO₄ (T = Si, Al) con átomos de oxígeno que conectan tetraedros vecinos [21], por lo que la tipología de las zeolitas no es única. Como se puede observar en la Figura 14, los átomos de silicio o aluminio están rodeados de cuatro átomos de

oxígeno formando tetraedros y la suma de los mismos indicará el número de tetraedros por celda unitaria dando lugar a estructuras tridimensionales de donde proceden las diferentes clases de zeolita.

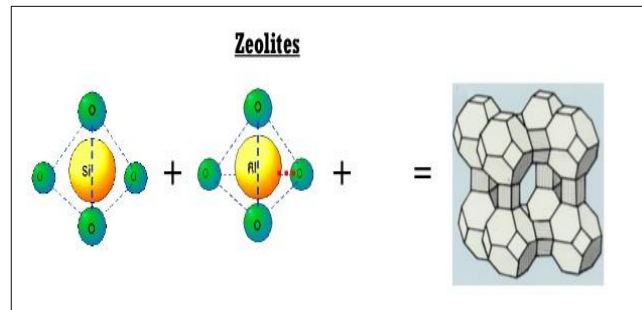


Figura 14. Estructura de una zeolita común [51].

La carga de un tetraedro con silicio en el centro es neutra similar al cuarzo (SiO_2), por otro lado, dentro de la estructura zeolítica tetraedros de aluminio trivalentes tienden a desplazar a tetraedros tetravalentes de silicio lo que origina una disminución de cargas positivas que son equilibradas con las cargas positivas de los cationes de intercambio (Na, K, Li, Ca, Mg, Ba, Sr) [32]. Aunque los cationes de intercambio se consideran factores importantes que definen los diferentes tipos de zeolitas naturales, no forman parte de su armazón estructural, los denominados “cationes estructurales” son los cationes T (silicio o aluminio) que en combinación con el oxígeno construyen la estructura del armazón tetraédrico TO_4 . A continuación, se muestra la disposición de cada elemento que constituye una zeolita y sus cargas (Figura 15).

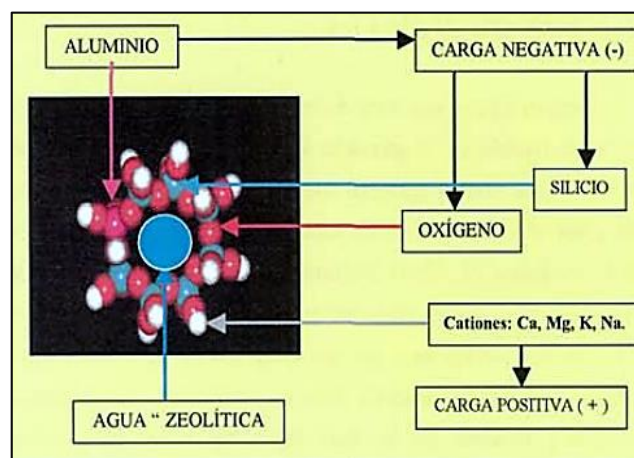


Figura 15. Estructura típica de una zeolita [6].

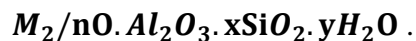
1.3.1.2. Clasificación de las zeolitas

Todos los factores antes mencionados dan lugar a más de 40 variedades de zeolitas naturales conocidas, de diferentes características físicas y químicas. Se podría decir que existen dos tipos de clasificaciones la una que se basa en sus características químicas y la otra basada en sus características estructurales físicas.

Según la composición química, Morante en [6] muestra los grupos de zeolitas naturales de la clasificación de Mumpton 1978, distribuidos en siete familias: Analcima, Chabazita, Natrolita, Estilbita, Heulandita, Gismondina, Harmotoma. Cada una de estas familias se clasifica en diferentes especies mencionándose un total de 46. Para el presente trabajo se muestra a continuación la clasificación de la familia de la Heulandita:

- **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.

Esta clasificación describe los átomos que constituyen la composición química de cada variedad zeolítica en su forma más sencilla. Benvindo da Luz citado por Costafreda [12], muestra la fórmula empírica de una zeolita:



Donde:

M: catión de intercambio metal alcalino o alcalino térreo de valencia n (Na, K, Li, Ca, Mg, Ba, Sr).

x: número de átomos de aluminio con valores entre 2 y 10 (cationes estructurales).

y: número de átomos de silicio con valores entre 2 y 8 (cationes estructurales).

A continuación en la Tabla 9, se describen características de las zeolitas más importantes así como la fórmula que las identifica.

Tabla 9. Fórmula típica y propiedades físicas de las zeolitas más importantes [6]

Zeolitas	Fórmula Típica de la Celda Unitaria	Volumen de Poro	Gravedad Específica	Dimensión de los Canales	Estabilidad Térmica	Capacidad de Intercambio Iónico
Analcima	$Na_{16}(Al_{16}Si_{32}O_{96}) * 16H_2O$	18	2.24-2.29	2.6 Å	Alto	4.54
Chabazita	$(Na_2Ca_6)(Al_{24}Si_{24}O_{72}) * 40H_2O$	47	2.05-2.10	3.7x4.2	Alto	3.81
Clinoptilolita	$(Na_4K_4)(Al_8Si_{40}O_{96}) * 24H_2O$	39?	2.16	3.9x5.4	Alto	2.54
Erionita	$(NaCa_{0.5}K)_9(Al_9Si_{27}O_{72}) * 27H_2O$	35	2.02-2.08	3.6x5.2	Alto	3.12
Faujasita	$Na_{58}(Al_{58}Si_{134}O_{384}) * 240H_2O$	47	1.91-1.92	7.4	Alto	3.39
Ferrierita	$(Na_2Mg_2)(Al_6Si_{30}O_{72}) * 18H_2O$	-	2.14-2.21	4.3x5.5 3.4x4.8	Alto	2.33
Heulandita	$Ca_4(Al_8Si_{28}O_{72}) * 24H_2O$	39	2.10-2.20	4.0x5.5 4.4x7.2 4.1x4.7	Bajo	2.91
Laumontita	$Ca_4(Al_8Si_{16}O_{48}) * 16H_2O$	34	2.20-2.30	4.6x6.3	Bajo	4.25
Mordenita	$Na_8(Al_8Si_{16}O_{48}) * 24H_2O$	28	2.12-2.15	2.9x5.7	Alto	2.29
Natrolita	$Na_{16}(Al_{16}Si_{24}O_{80}) * 16H_2O$	23	2.20-2.26	6.7x7.0 2.6x3.9	Bajo	5.26
Phillipsita	$(Na, K)_{10}(Al_{10}Si_{22}O_{64}) * 20H_2O$	31	2.15-2.20	4.2x4.4 2.8x4.8 3.3	Bajo	3.87
Wairakita	$Ca_8(Al_{16}Si_{32}O_{96}) * 16H_2O$	20?	2.26	-	Alto	4.61
Linde A	$Na_{12}(Al_{12}Si_{12}O_{48}) * 27H_2O$	47	1.99	4.2	Alto	5.48
Linde X	$Na_{86}(Al_{86}Si_{106}O_{384}) * 264H_2O$	50	1.93	7.4	Alto	4.73

Morante en [6], también describe la clasificación según Breck 1974, en siete grupos, como se muestra en la Tabla 10 y Tabla 11, la cual se basa en el tipo de unidad estructural secundaria (Figura 16), estas unidades secundarias a la vez se unen entre sí para formar estructuras más complejas (poliedros) que en conjunto forman finalmente las estructuras tridimensionales características de las diferentes especies de zeolitas naturales.

La estructura de la zeolita está conformada por unidades primarias (tetraedros, TO_4) que unidos entre sí forman las unidades secundarias (SBU, por sus siglas en inglés), conformadas en anillos sencillos de 4, 5, 6, 8, 10, 12 tetraedros y anillos dobles de 4, 6 y 8 tetraedros y poliedros más grandes. A más de las estructuras especificadas en la Tabla 10, la Figura 16 muestra una estructura de ocho anillos simples denominada con las siglas S8R o C8.

Generalmente la estructura de ocho anillos forma parte de las zeolitas naturales del tipo clinoptilolitas [52].

Tabla 10. Clasificación de las zeolitas según sus características físicas [6].

Grupo	Unidades de estructuras secundarias
1	4 anillos simples (S4R)
2	6 anillos simples (S6R)
3	4 anillos dobles (D4R)
4	6 anillos dobles (D6R)
5	Unidad compleja 4-1, T ₅ O ₁₀
6	Unidad compleja 5-1, T ₈ O ₁₆
7	Unidad compleja 4-4-1, T ₁₀ O ₂₀

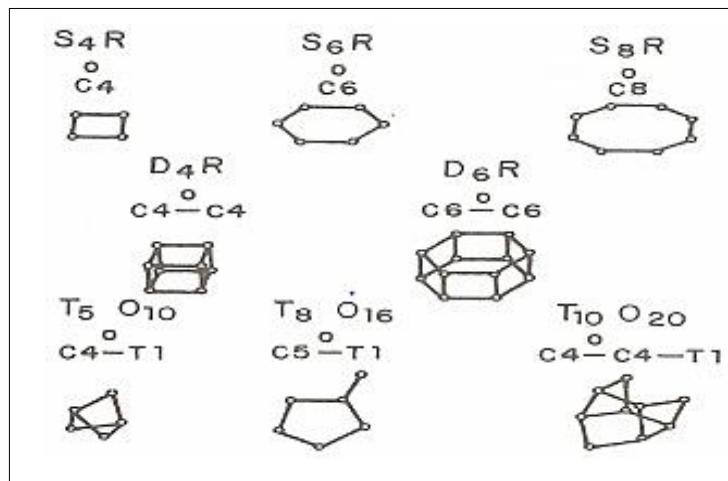
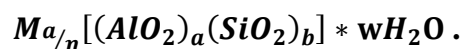


Figura 16. Unidad estructural secundaria [53].

La forma de expresar esta clasificación según su composición física es la fórmula cristalográfica que relaciona toda la estructura de una zeolita dispuestos en tres partes: el armazón del aluminosilicato, los cationes de intercambio (M) que se encuentran contenidos en los espacios vacíos de las interconexiones del armazón y las moléculas de agua semejante a la fórmula empírica como se muestra a continuación:



Donde:

M: catión de intercambio valencia n.

w: número de moléculas de agua.

a y b: números enteros pequeños.

De donde también:

a+b: es el número total del tetraedro en la celda unidad.

b/a: el cociente comprendido de 1 a 5.

Tabla 11. Clasificación de las zeolitas según Breck D., 1974 [6].

Nombre	Contenido Típico de la Celda Unidad	Densidad (g/cm ³)	F. de poro	Tipo de canal
<i>Grupo 1 (SAR)</i>				
Analcima	$Na_{16}[(AlO_2)_{16}(SiO_2)_{32}] * 16H_2O$	1.85	0.18	1
Harmotoma	$Ba_2[(AlO_2)_4(SiO_2)_{12}] * 12H_2O$	1.59	0.31	3
Phillipsita	$(K, Na)_{10}[(AlO_2)_{10}(SiO_2)_{22}] * 20H_2O$	1.58	0.31	3
Gismondina	$Ca_4[(AlO_2)_8(SiO_2)_8] * 16H_2O$	1.52	0.46	3
P	$Na_6[(AlO_2)_6(SiO_2)_{10}] * 15H_2O$	1.57	0.41	3
Paulingita	$(K_2, Na, Ca, Ba)_{76}[(AlO_2)_{152}(SiO_2)_{520}] * 700H_2O$	1.54	0.49	3
Laumontita	$Ca_4[(AlO_2)_8(SiO_2)_{46}] * 16H_2O$	1.77	0.34	1
Yugawaralita	$(K, Na)_{10}[(AlO_2)_{10}(SiO_2)_{22}] * 20H_2O$	1.81	0.27	2
<i>Grupo 2 (S6R)</i>				
Erionita	$(Ca, Mg, K_2, Ca_2)_{4.3}[(AlO_2)_9(SiO_2)_{27}] * 27H_2O$	1.51	0.35	3
Offretita	$(K_2, Na)_{2.7}[(AlO_2)_{5.4}(SiO_2)_{12.6}] * 15H_2O$	1.55	0.40	3
T	$(Na_{1.2}, K_{2.8})[(AlO_2)_4(SiO_2)_{14}] * 14H_2O$	1.50	0.40	3
Levynita	$Ca_3[(AlO_2)_6(SiO_2)_{12}] * 18H_2O$	1.54	0.40	2
Omega	$(Na_{6.8}TMA_{1.6})[(AlO_2)_8(SiO_2)_{28}] * 21H_2O$	1.65	0.38	1
Sodalita	$Na_6[(AlO_2)_6(SiO_2)_6] * 7.5H_2O$	1.72	0.35	3
Hidratada Losod	$Na_{12}[(AlO_2)_{12}(SiO_2)_{12}] * 19H_2O$	1.58	0.33	3
<i>Grupo 3 (D4R)</i>				
A	$Na_{12}[(AlO_2)_{12}(SiO_2)_{12}] * 27H_2O$	1.27	0.47	3
N-a	$(Na_4TMA_3)[(AlO_2)_7(SiO_2)_{17}] * 21H_2O$	1.3	0.5	3
ZK-4	$(Na_8TMA_{1.6})[(AlO_2)_8(SiO_2)_{15}] * 28H_2O$	1.3	0.47	3
<i>Grupo 4 (D6R)</i>				
Faujasita	$(Na_2K_2, Ca, Mg)_{29.5}[(AlO_2)_{59}(SiO_2)_{133}] * 235H_2O$	1.27	0.47	3
X	$Na_{86}[(AlO_2)_{86}(SiO_2)_{105}] * 264H_2O$	1.31	0.5	3
Y	$Na_{56}[(AlO_2)_{56}(SiO_2)_{136}] * 250H_2O$	1.27	0.48	3
Chabazita	$Ca_2[(AlO_2)_4(SiO_2)_8] * 13H_2O$	1.45	0.47	3
Gmelinita	$Na_8[(AlO_2)_8(SiO_2)_{16}] * 24H_2O$	1.46	0.44	3
ZK-5	$(R, Na_2)_{15}[(AlO_2)_{30}(SiO_2)_{66}] * 98H_2O$	1.46	0.44	3
LR	$K_9[(AlO_2)_9(SiO_2)_{27}] * 22H_2O$	1.61	0.32	1
<i>Grupo 5 (T₅O₁₀)</i>				
Natrolita	$Na_{16}[(AlO_2)_{16}(SiO_2)_{24}] * 16H_2O$	1.76	0.23	2
Scolecita	$Ca_8[(AlO_2)_{16}(SiO_2)_{24}] * 16H_2O$	1.75	0.31	2
Mesolita	$(Na_{16}Ca_{16})[(AlO_2)_{48}(SiO_2)_{72}] * 64H_2O$	1.75	0.30	2
Thomsonita	$(Na_4Ca_8)[(AlO_2)_{20}(SiO_2)_{20}] * 24H_2O$	1.76	0.32	2
Gonnardita	$(Na_4Ca_2)[(AlO_2)_8(SiO_2)_{12}] * 14H_2O$	1.74	0.31	2
Edingtonita	$Ba_2[(AlO_2)_4(SiO_2)_6] * 8H_2O$	1.68	0.36	2
<i>Grupo 6 (T₈O₁₆)</i>				

Mordenita	$Na_8[(AlO_2)_8(SiO_2)_{40}] * 24H_2O$	1.70	0.28	2
Dachiardita	$Na_5[(AlO_2)_5(SiO_2)_{19}] * 12H_2O$	1.72	0.32	2
Ferrierita	$(Na_{1.5}Mg_2)[(AlO_2)_{5.5}(SiO_2)_{30.5}] * 18H_2O$	1.76	0.28	2
Epistilbita	$Ca_3[(AlO_2)_6(SiO_2)_{18}] * 18H_2O$	1.76	0.25	2
Bikitaita	$Li_2[(AlO_2)_2(SiO_2)_4] * 2H_2O$	2.02	0.23	1
<i>Grupo 7 (T₁₀O₂₀)</i>				
Heulandita	$Ca_4[(AlO_2)_8(SiO_2)_{28}] * 24H_2O$	1.69	0.39	2
Clinoptilolita	$Na_6[(AlO_2)_6(SiO_2)_{30}] * 24H_2O$	1.71	0.34	?
Stilbita	$Ca_4[(AlO_2)_8(SiO_2)_{28}] * 28H_2O$	1.64	0.39	2
Brewsterita	$(Sr, Ba, Ca)_2[(AlO_2)_4(SiO_2)_{12}] * 10H_2O$	1.77	0.26	2

1.3.1.3. Zeolitas naturales clinoptilolitas

Una de las familias de zeolitas naturales son las heulanditas a la que pertenece la clinoptilolita conformada por aluminosilicatos cristalinos que forman una red en 3D de tetraedros SiO_4 y AlO_4 , en estos tetraedros los átomos de oxígeno se ubican en los vértices y los de aluminio y silicio en el centro. Este tipo de zeolita natural tiene capacidad de intercambio catiónico (CIC), que depende de su composición química así una baja relación de SiO_2/Al aumenta la CIC [52], [6].

Las clinoptilolitas tienen cationes de intercambio principalmente el Na y Ca pero pueden presentar otros como potasio, magnesio, estroncio, y bario cuyo contenido y variación como ya se dijo antes depende de la cantidad de aluminio presente relacionado a su CIC y química. Esta CIC que varía entre 1.6 y 2.2 meq/g, y su capacidad de adsorción a conllevado a estudios de separación de gases como el realizado por Montes et al en [52] donde también se reporta un valor de la densidad de 2,23 g/cm³, valor que no cambia a pesar de ser modificada. La estabilidad térmica es otra de las propiedades de la zeolita y un método seguro para clasificarlas dentro de este grupo según lo reporta Morante, las clinoptilolitas son muy estables hasta los 700 °C, esta verificación se lo realiza mediante el análisis térmico diferencial sin embargo, una manera rápida con las que se las puede clasificar es su relación Si/Al el cual suele estar en el rango mayor a 2 y menor a 5 De acuerdo a Caputo et al, citado por Sedlmajer et al [21].

Las zeolitas naturales del tipo clinoptilolita han demostrado eficacia en la sustitución del cemento como es el caso Sedlmajer et al.[21] en su investigación concluyeron que la zeolita natural (clinoptilolita) puede ser sustituida parcialmente en el concreto ya que a

menores cantidades de reemplazo pueden alcanzar propiedades similares al cemento portland, aportando beneficios ecológicos y económicos. La mezcla de hormigón con zeolita natural (clinoptilolita) y aditivos químicos muestran la formación de una cantidad adicional de productos de hidratación como los hidrosilicatos de calcio, ettringita e hidrogelenita como concluyen Markiv et al. [3], además de las mejoras en la penetración de agua, contracción por secado y la resistencia al hielo- deshielo en los hormigones.

1.3.1.4. *Técnicas de caracterización química en zeolitas naturales*

Debido a la gran variedad de zeolitas naturales se aplican técnicas para la caracterización de estos minerales y de esta manera conocer su composición química, estructura y morfología para que pueda ser aplicada como reemplazo parcial del cemento en la elaboración del hormigón. [3], [4], [54]. Entre las técnicas básicas reportadas para la caracterización de las zeolitas naturales están las siguientes:

Método de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB)

Una de las técnicas básicas que se usan en el estudio de las zeolitas naturales es la microscopía electrónica de barrido (MEB) más conocida como SEM (Scanning Electron Microscopy, por sus siglas en inglés), el equipo funciona mediante un conjunto de lentes por los que se emite un haz de electrones que al incidir sobre la muestra responde con otros electrones secundarios y al ser detectados estos se convierten en señal digital generando una imagen que permite conocer los detalles de la morfología, química y estructura del material analizado [21], [55], estas imágenes de alta resolución se visualizan en un monitor. Para comprender mejor su funcionamiento, Ipohorski y Bozzano en [56] hacen una breve introducción contrastando la percepción del ojo humano a una distancia de 30 cm con buena iluminación el cual es capaz de distinguir dos puntos separados a 0.1 mm, más allá de esto no sería posible para lo cual sería necesario instrumentos como una lupa o un microscopio óptico con el que es posible magnificar hasta 2000 veces (2000x) el tamaño de un objeto, alcanzando resoluciones de hasta 0.2 um límite que está relacionado con la naturaleza ondulatoria de la luz visible que puede ser detectado por el ojo humano, por lo que el MEB es un instrumento que está diseñado para sobrepasar este

límite de resolución ya que utiliza radiaciones diferentes a la de la luz visible para formar una imagen, estas radiaciones se basan en un haz de electrones acelerados en el vacío que recorren trayectorias rectas comportándose de manera similar a la onda de la luz visible pero con una longitud de onda 100.000 veces más pequeña, por lo que se usan medidas de longitud muy pequeñas como: micrómetros (μm), nanómetros (nm). Un MEB moderno permite visualizar muestras con una resolución de 4 nm con aumentos de hasta 300.000x, para esto las muestras deben estar limpias, secas, deben ser resistentes al alto vacío del equipo y deben ser buenas conductoras eléctricas de no tener una buena conductividad eléctricas se hace necesario recubrirlas con una capa metálica muy fina (sputtering de oro) para mejorar la emisión de los electrones secundarios y obtener una mejor calidad en la imagen [56]. En la Figura 17, se muestran tres mecanismos de funcionamiento diferentes en los microscopios donde uno es óptico y los otros dos electrónicos pero con diferencias en su constitución y funcionamiento.

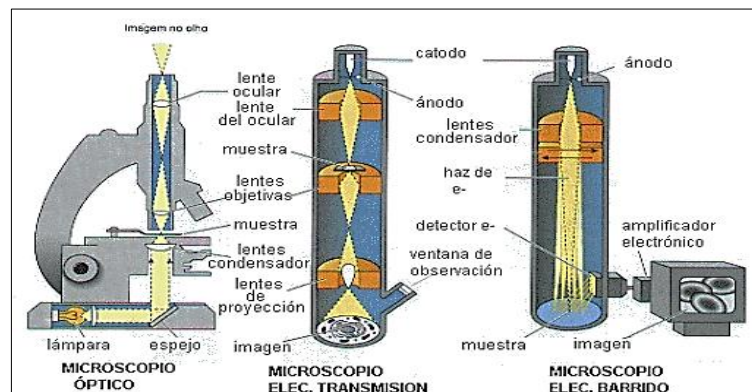


Figura 17. Mecanismos de diferentes tipos de microscopios.

La interacción de barrido continuo del haz de electrones de alta energía sobre la muestra analizada genera información sobre su topografía, composición y estructura morfológica mediante diferentes tipos de detectores dependiendo del instrumento, en su mayoría básicamente poseen detectores de electrones secundarios de alto y bajo vacío, así como detectores de electrones retrodispersados que funcionan en alto y bajo vacío. Los detectores de electrones secundarios poseen una rejilla en la parte frontal del mismo la cual tiene potencial positivo por lo que atrae y acelera los electrones secundarios de baja energía que se generan de la superficie de la muestra analizada enfocándolos en un

centellador que da como resultado destellos de luz que se transfieren a través de la guía de luz al fotomultiplicador fuera de la cámara del microscopio, por otro lado el detector de electrones retrodispersados poseen un centelleador anular de monocristales con superficie conductora colocado debajo del objetivo los electrones retrodispersados inciden sobre este centelleador sin ninguna aceleración adicional emitiendo fotones de radiación visible que son procesados al igual que en los electrones secundarios [57].

La diferencia entre el detector de electrones secundarios y el detector de electrones retrodispersados radica en que en el primero los electrones son dispersados inelásticamente, con energía bajas que van de 20 a 50 eV y son más superficiales a la muestra, mientras que en el segundo los electrones son dispersados elásticamente por los átomos de la muestra con energías cercanas a la del haz incidente 10 a 30 KeV y se generan en zonas más profundas del volumen de la muestra mostrándose más brillantes en la imagen las cuales están asociadas a los diferentes pesos atómicos[56]. En la Figura 18, se puede observar una fotografía del microscopio electrónico de barrido y en la parte inferior un esquema donde se aprecia la función de los detectores antes mencionados además de un detector de rayos x que también puede venir acoplado al microscopio.

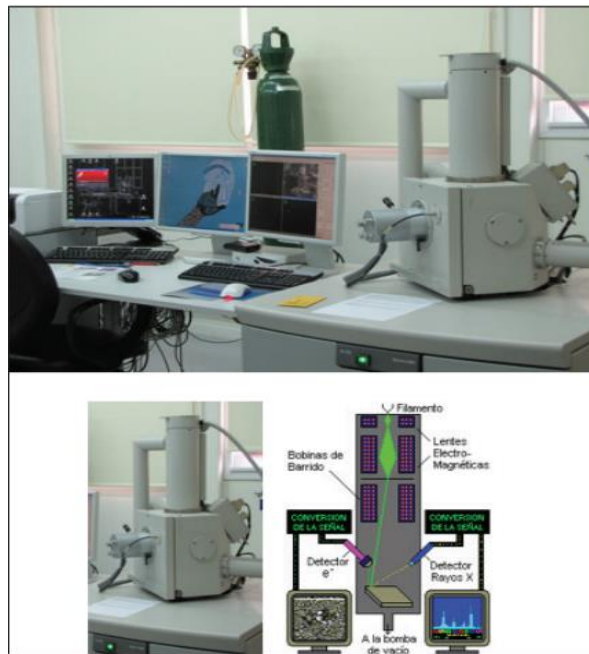


Figura 18. Microscopio electrónico de barrido y sus elementos.

A más de los detectores los parámetros que son de importancia para obtener una imagen de calidad son:

- **Lentes electró-magnéticas y aperturas.** - las lentes electro-magnéticas son las encargadas de desviar la trayectoria del haz de electrones de manera análoga a una lente óptica que desvía un haz de luz, generan un campo magnético con la finalidad de que las trayectorias de los electrones converjan en un punto con dimensiones mínimas. Estas lentes presentan aberraciones semejantes a la de las lentes ópticas lo que causaría que no todos los electrones podrían converger sobre un mismo punto de la muestra por lo que para minimizar este efecto se requiere un diámetro óptimo de las aperturas que son las encargadas de definir el diámetro final del haz de electrones que va a incidir sobre la muestra.
- **Diámetro del haz (Resolución).** - constituye el parámetro más importante en un microscopio, debido a que tiene que ver con la mínima distancia entre dos puntos que este puede detectar. La resolución se mide en nanómetros (nm) o unidades Angstrom (Å) ($1\text{Å}=1\text{nm}$).
- **Volumen de interacción.** - volumen debajo de la superficie de la muestra cuya forma y dimensiones son determinantes en la resolución del microscopio.
- **Tensión de aceleración del haz.** - este parámetro determina la energía con la que inciden los electrones sobre la muestra generalmente en el orden de 30 kV por lo que está relacionado con el volumen de interacción, así electrones con mayores energías pueden penetrar a mayor profundidad la muestra generando mejor información en la imagen sin embargo esto no debe ser muy profundo ya que puede deteriorar la resolución de la imagen [56].

En la Figura 19 se aprecia una micrografía de una zeolita clinoptilolita, magnificada 8000 veces su tamaño, donde se aprecia su morfología en escala de grises típica de este tipo de imágenes.

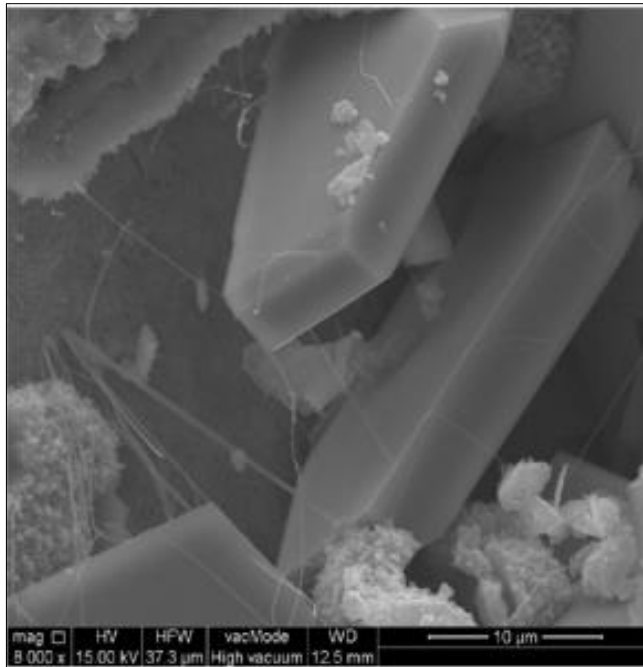


Figura 19. Imagen SEM de clinoptilolita (Magnificación 8000x) [20].

Mediante el método de Difracción de Rayos x y la Microscopia Electrónica de Barrido (MEB) se ha realizado la caracterización en zeolitas, demostrando su actividad puzolánica que han permitido obtener hormigones de altas prestaciones [54].

Método Microanálisis Dispersivo en Energía de Rayos X (EDS)

Para el desarrollo de esta técnica es necesario un detector de rayos X, el cual puede venir adaptado al microscopio electrónico de barrido, este método se basa en un haz de electrones de alta energía que al incidir sobre una muestra genera rayos X que son característicos para cada elemento que compone dicha muestra. Cada elemento emite una radiación característica en magnitudes de energía E o longitud de onda λ de los fotones X, esta radiación está relacionada con la expresión que se muestra a continuación:

$$E(keV) = \frac{12.398}{\lambda (\text{Å})}$$

Los rayos X propios de cada elemento son detectados por un sistema que produce pulsos con diferentes alturas dependiendo de la energía de cada foton incidente procesados por un analizador multicanal para visualizar un espectro que relaciona la cantidad de pulsos y

la energía de cada uno de ellos, por lo que los elementos que constituyen la muestra son identificados instantáneamente mientras su concentración sea mayor al 1%, este método también permite analizar cuantitativamente la composición química de la muestra.

En la Figura 20, se puede ver las micrografías de una clinoptilolita directo de la mina y luego de su proceso de molienda y tamizado; También se aprecia el espectro y la composición química elemental para este caso los cationes detectados son Na, Ca, Mg y K, con porcentajes de peso de 0,57, 1,99, 0,46, y 1,01, respectivamente.

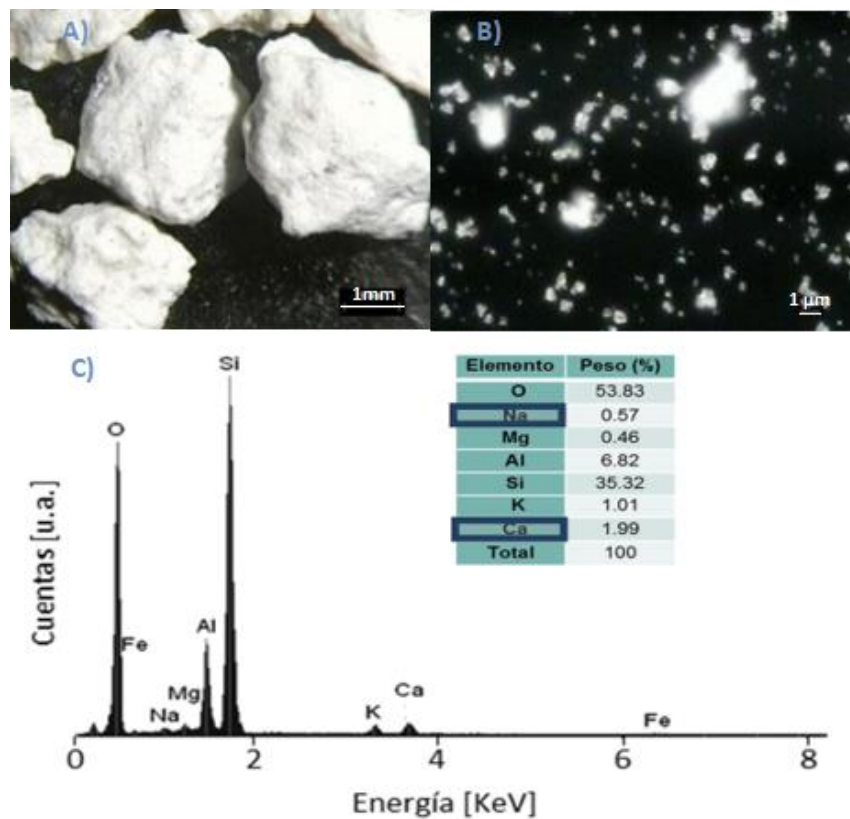


Figura 20. A) Microscopia de clinoptilolita como llega de la mina; B) Microscopia de la clinoptilolita molida y tamizada; C) Análisis EDS de la clinoptilolita [52].

1.3.1.5. Técnicas de Caracterización Física en Zeolitas Naturales

Tomando en cuenta que las zeolitas naturales constituyen un “material cementante suplementario” (SMC, por sus siglas en inglés), se determinan propiedades físicas

similares a las de las puzolanas naturales considerando métodos de ensayo estandarizados para los cementos tales como se describen en [58], para determinar la densidad, la finura, área específica, ya que estas propiedades además de ser variables, influyen en las propiedades del hormigón fresco y en la resistencia del hormigón endurecido. También se determinan otras propiedades físicas como son: el tiempo de fraguado y la estabilidad de volumen con la finalidad de conocer la idoneidad de las zeolitas naturales como reemplazo parcial del cemento [4].

La caracterización tanto química como física es primordial en el estudio de materiales con propiedades cementantes ya que permiten compararlos con el cemento tradicional, como es el ejemplo de Najimi et al. en su estudio [20], en el cual se realizaron ensayos para determinar propiedades químicas, físicas y mineralógicas que fueron comparadas con un cemento de referencia en cumpliendo de los requerimientos de la ASTM C618, por lo que en Ecuador se puede hacer uso de la Norma Técnica Ecuatoriana presentada por el Instituto Ecuatoriano de Normalización basadas en normas internacionales ASTM.

1.3.2. Zeolitas en el Ecuador

La ubicación geográfica del Ecuador y su geología brindan el ambiente adecuado para la formación de zeolitas naturales (aluminosilicatos), principalmente la zona costera. Morante en [30], recopila varias investigaciones describiendo el origen de las formaciones de las cordilleras costeras ecuatorianas (Cordillera Chongón-Colonche y Cordillera Costera), formadas principalmente de sedimentos volcánicos que dan lugar a uno de los mayores depósitos de zeolitas naturales en el Ecuador, además Morante resalta que la mayor parte de estudios realizados con zeolitas naturales tienen origen en la Cordillera de Chongón-Colonche conocida también como Cerros Colonche.

La Cordillera Chongón-Colonche forma un arco en dirección NNO-SSE que se extiende desde la ciudad de Guayaquil hasta Olón-Pedro Gómez y llega a conectarse con la Cordillera Costera (CCO) [10], en su mayor parte posee altitudes entre 400 y 600 metros, alcanzando picos altos que sobrepasan los 700 metros (Figura 21).

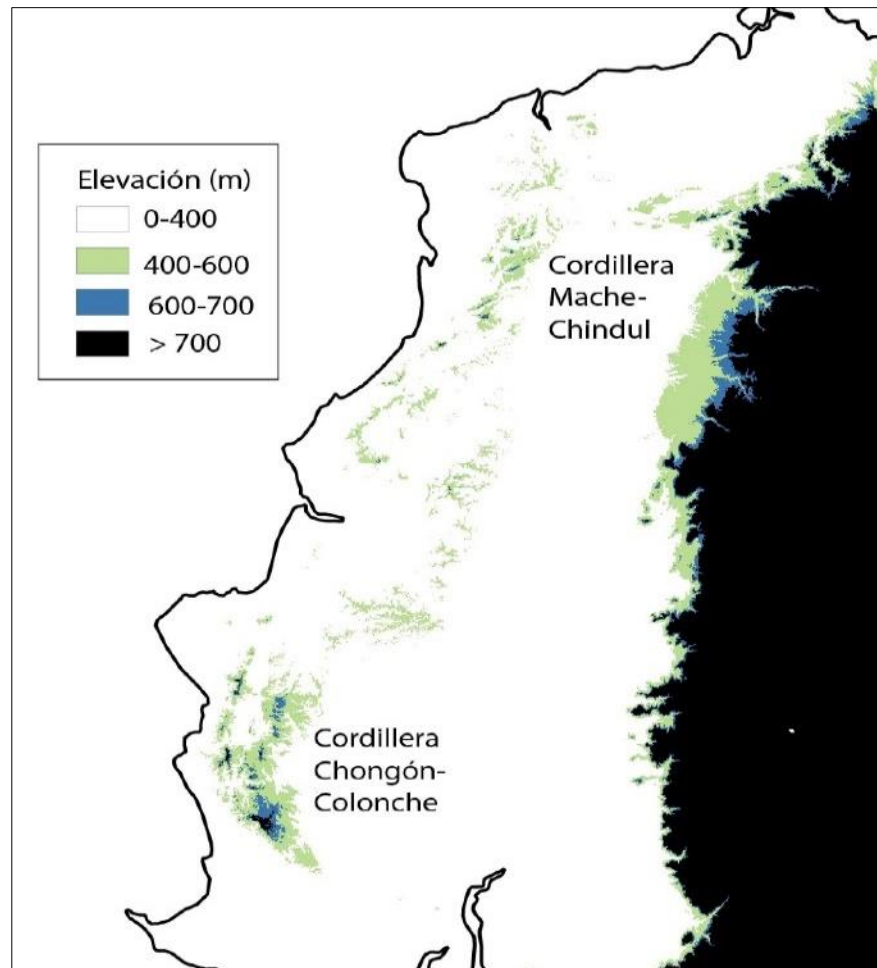


Figura 21. Cordilleras Costeras del Ecuador [59].

En la Figura 22, se muestra la litología de todo el Ecuador incluyendo la Cordillera de Chongón-Colonche (CCC) la cual está formada de rocas ígneas volcánicas y volcano-sedimentarias.

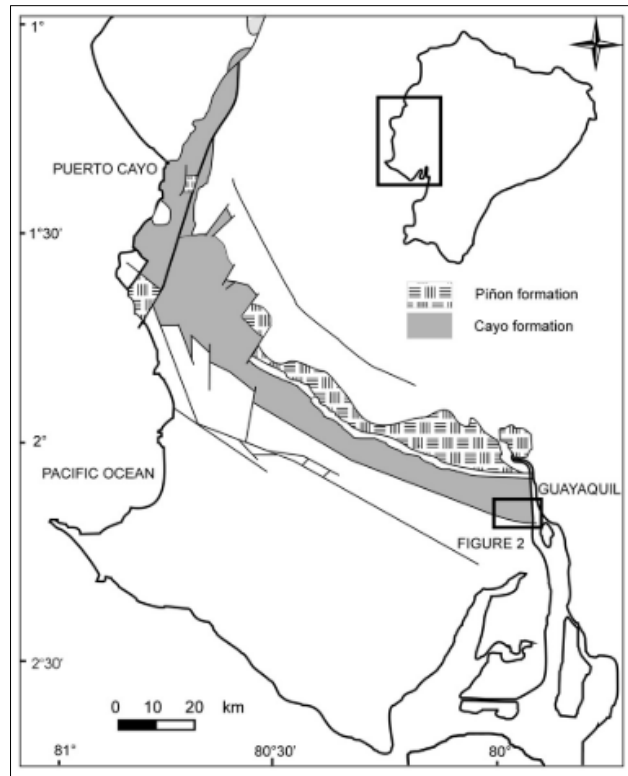


Figura 23. Geología de la Cordillera Chongón-Colonche [60].

La descripción de zeolitas naturales en el Ecuador inicialmente la realizan investigadores cubanos; en el año 2000 se realizan investigaciones en la ESPOL con la finalidad de conocer su aplicabilidad en el área local, destacándose su aplicación en la agricultura y acuicultura, debido a sus características también se reporta su potencial para depuración de aguas y como material en la construcción. Actualmente casi la totalidad de la producción de zeolita natural esta direccionada al área agrícola que en conjunto con fertilizantes es aplicada en el cultivo de productos de importancia en Ecuador, de la misma manera se usa en agropecuaria en la crianza de animales un ejemplo es la acuicultura en la producción de camarones; industria que tiene una alta demanda de este mineral, debido a que ha sido ampliamente estudiada para este fin. En la industria de la construcción también es usada como material cementante, sin embargo, no se usa en todo su potencial debido a las políticas de control minero, que dificultan el acceso a los permisos de explotación.

De acuerdo a la historia de producción de la Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM) citado por Morante, la Figura 24, muestra un excelente comienzo de la producción de zeolitas naturales en el año 1999, sin embargo, en el siguiente año se observa un decremento que según Morante [10] se relacionaría con una disminución en la producción agrícola y acuícola; principales consumidores de la zeolita natural. Para el año 2005, se aprecia una significativa recuperación en la producción de este mineral.

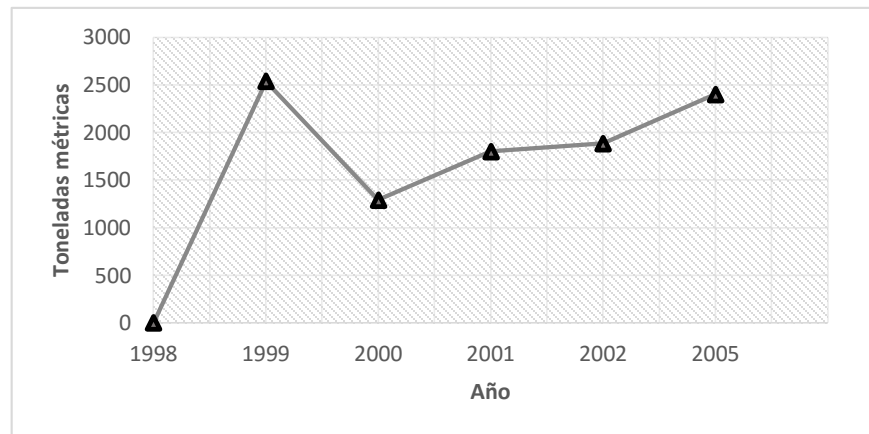


Figura 24. Producción de zeolitas en el Ecuador [10].

Acorde a lo citado por Valenzuela en [61] según el ARCOM 2015, existe un decremento en la producción del aluminosilicato a partir del 2005 (Figura 25).

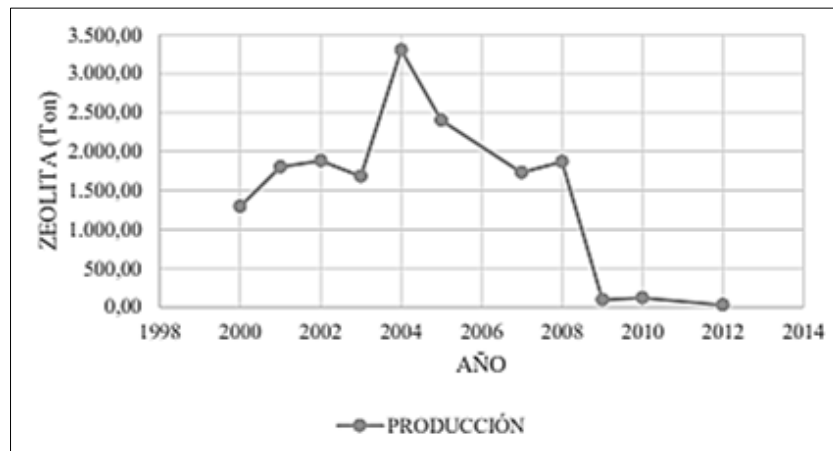


Figura 25. Producción de zeolitas en el Ecuador (ARCOM 2015).

En la base de datos del ARCOM de los últimos diez años el registro cuantitativo de la producción de zeolitas naturales es casi nulo, sin embargo, del 2017 al 2019 se reporta su uso y exportación al país vecino Colombia [62].

1.3.3. Molienda

La producción de las zeolitas naturales es muy simple consta de tres etapas principales:

- 1) Extracción a cielo abierto
- 2) Molienda
- 3) Envase

La molienda al igual que en el proceso de producción del cemento portland se usa para reducir el tamaño de los minerales en roca, en el caso de las zeolitas naturales es el proceso fundamental para la elaboración de productos a base de la misma, ya que la molienda proporciona la granulometría requerida según el uso que se le va a dar. Como se muestra en la Tabla 12, existen diversos tipos de molinos que se usan de acuerdo al tamaño del producto final.

Tabla 12. Tipos de Molinos de acuerdo al tamaño del producto final [63].

Rango de reducción de tamaño	Nombre genérico del equipo	Tipo de equipo
Grueso e intermedio	Molinos de gruesos: <i>"Crushers"</i>	De rodillos
Intermedio y fino	Molinos de finos <i>"Mill o Grinders"</i>	De martillos Discos de atrición De rodillos
Fino y ultrafino	Molinos de ultrafinos: <i>"Ultrafine grinders"</i>	De martillo De bolas

De los molinos antes mencionados se describe a detalle el molino de bolas debido a que es el que se usa para la reducción de las zeolitas naturales en roca del presente proyecto.

Molino de Bolas de Tambor (MBT)

El sistema de un molino de bolas consiste en utilizar un conjunto de esferas que giran en el interior de un cilindro donde el material que también es puesto en su interior sufre una combinación de impacto y frotamiento por acción de las revoluciones del cilindro que dan como resultado un material pulverizado [64].

El molino de bolas usado para moler la zeolita natural obtenida directamente de la mina en forma de roca, es un diseño elaborado como proyecto de tesis (

Figura 26), donde se consideran los siguientes parámetros:

- Tamaño de grano obtenido
- Tiempo de molienda
- Tipo de molienda
- Potencia requerida
- Costo

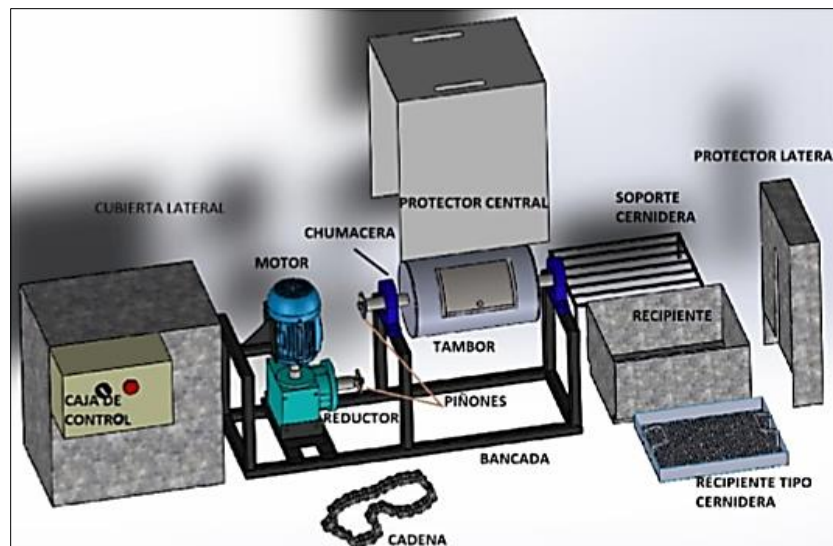


Figura 26. Elementos del Molino de Bolas de Tambor [64].

El molino MBT consta de un tambor de acero inoxidable de diámetro 0.21 m, longitud de 0.33 m y espesor 4 mm. Posee un conjunto de bolas de diámetros y masas variadas como se describen en la Tabla 13.

Tabla 13. Distribución de los cuerpos molidores [64].

Diámetro de la bola (mm)	Nº de bolas	Masa (kg)
22	90	3.65
20	45	1.45
15	25	1.7
12	15	0.1
Total	175	6.97

La capacidad del material a moler es de 2 kg, debido a que el tambor puede soportar una masa total en estado seco de 8.97 kg y en estado húmedo de 16.4 kg.

1.3.4. Sistema de Información Geográfica ArcGIS

Es un software de sistema de información geográfica que trabaja a nivel multiusuario usando la tecnología para capturar, editar, analizar, diseñar, publicar en la web e imprimir información que pueda tener una referencia geográfica, esta información puede ser mostrada en forma de mapas, tablas y gráficos.

Este sistema emplea tres aplicaciones conjuntas ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox que permiten se pueda realizar cualquier tarea SIG. El objeto con el que se trabaja puede ser de dos tipos de formatos: raster (archivo de imagen) y vectorial (cobertura). El formato raster captura información mediante medios satelitales y digitales, posee celdas de igual tamaño de las que depende los detalles de la información mientras que el formato vectorial (shape) esta representado por puntos, líneas y polígonos puede ser creado a partir de fuentes de información espacial existente, o pueden ser generados desde ArcGIS, donde se puede añadir elementos [65].

1.4.Hipótesis

Las zeolitas naturales del Ecuador tienen características morfológicas, físicas y químicas que las hacen un material idóneo como remplazo en el cemento tipo GU.

1.5. Objetivos

1.5.1. General:

Determinar que aluminosilicato procedente del Ecuador tiene las propiedades necesarias para sustituir parcialmente el cemento.

1.5.2. Específicos:

- Seleccionar tres muestras representativas de zeolitas naturales existentes en el Ecuador.
- Comparar la morfología y composición química de las muestras (clinoptilolita) con el cemento portland.
- Determinar las propiedades físicas (densidad y finura) en las zeolitas naturales que sean necesarias para sustituir parcialmente al cemento portland tipo GU.
- Establecer que muestra presenta las mejores propiedades en comparación con las propiedades del cemento portland tipo GU.

CAPITULO II

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Tipos de Investigación

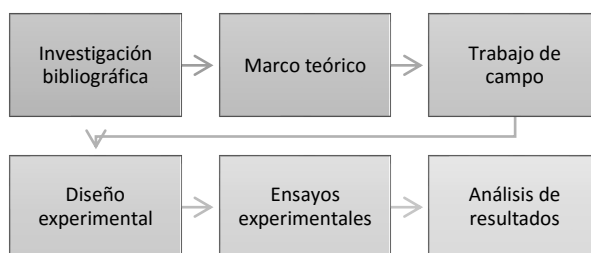
Para el alcance de los objetivos propuestos en el presente estudio se procede a emplear tres tipos de investigación:

Investigación bibliográfica, al usar literatura en línea y en físico (especialmente del Dr. Morante).

Investigación de campo, con la visita *in-situ* a los yacimientos, procesadoras u oficinas para obtención de las zeolitas a utilizar.

Investigación experimental, para realizar los análisis y las pruebas a los materiales a investigar. Los experimentos incluyen ensayos de caracterización geométrica mediante la máquina MAG y posteriormente el molino MBT, caracterización morfológica mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM), caracterización química mediante la determinación del espectro de composición química con el espectrofotómetro de dispersión de rayos X, caracterización física mediante la determinación de propiedades físicas de densidad, finura y tiempos de fraguado realizados de igual manera que al cemento aplicando normas internacionales ASTM y normas INEN vigentes en el Ecuador. La Figura 27 muestra el proceso metodológico que se aplica al proyecto de tesis.

Figura 27. Proceso de la metodología aplicada en el proyecto.



El nivel de investigación durante este trabajo es exploratorio ya que se obtienen datos nuevos sobre las propiedades de zeolita natural (aluminosilicato) de tipo clinoptilolita para remplazo parcial del cemento portland.

2.2. Población y muestra

2.2.1. Población

La población del presente proyecto investigativo es el universo de las zeolitas naturales existentes en el Ecuador, ya sea yacimientos, procesadoras u oficinas que los proveen, las cuales se detallan en un catastro realizado más adelante en el punto 3.1.1. Selección de zeolitas naturales.

2.2.2. Muestra

Una de las muestras se adquieren *In-situ* en forma de roca directamente extrayendo de una mina ubicada en el cantón Isidro Ayora y las otras dos se adquieren de procesadoras finamente molidas a 75 μm y 45 μm , cuyas características se detallan en el punto 2.3.

Tratamiento de datos

Los errores son muy comunes en las mediciones realizadas a nivel de laboratorio, ya que es muy probable que los resultados entre dos mediciones en las mismas condiciones y por un mismo operador difieran en su valor, mucho más si las condiciones varían, por lo que es de mucha ayuda el tratamiento de datos mediante parámetros estadísticos para descartar medidas dudosas

Existen dos tipos de errores:

- **Sistemáticos o determinados:** generan una desviación de las medidas siempre en un mismo sentido en referencia al valor de aceptación, se expresa como error absoluto E. Si su valor es pequeño entonces se considera el método de medición exacto.

- **Aleatorios o indeterminados:** generan resultados de mediciones dispersos aleatoriamente en torno al valor medio, no se pueden reconocer con facilidad y son difíciles de corregir, pero se pueden reducir a valores aceptables. En mediciones experimentales estos errores pueden corregirse mediante la calibración de los instrumentos o materiales. Habitualmente se toman medidas varias veces en las mismas condiciones y se determina el valor medio de los valores obtenidos [66].

Desviación Estándar

La desviación estándar expresa la dispersión de los datos en torno al valor medio del conjunto de esos datos. En estadística la desviación estándar es un parámetro muy usado para minimizar los niveles de incertidumbre y se calcula con la siguiente fórmula:

$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (xi - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

SD = Desviación estándar.

\bar{x} = Valor promedio de un conjunto de datos

xi = Valor individual.

n = Número de datos.

Mediante los parámetros estadísticos se corroborarán las desviaciones exigidas por las normas en cada uno de los ensayos.

2.3. Materiales

- El cemento analizado en este proyecto es el cemento portland Tipo GU (CGU), puesto que es el cemento de mayor consumo y disponible comercialmente, es usado en la construcción en general por sus excelentes propiedades y desempeño mencionados en el capítulo anterior. El CGU es

adquirido en ADELCA S.A. ubicado en el sector Huachi Chico del cantón Ambato, los detalles de las especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 8 y datos de envasado en la Tabla 14:

Tabla 14. Datos de envasado de la muestra CGU

• Fecha de envasado	• 2019-12-28
• Lugar de envasado	• Latacunga
• Hora de envasado	• 15:19:28

- Las zeolitas estudiadas son:
- **Zeolita Azul (ZA)**, nombre que se le asigna por presentar una coloración verde azulada (Figura 28), se obtiene en estado bruto durante una visita in situ a los yacimientos ubicados en la región Litoral del Ecuador, provincia de Guayas específicamente en un Sector de la Cordillera de Colonche del cantón Isidro Ayora, dado a que se registra en la tesis doctoral del Dr. Morante que las mayores concentraciones de zeolitas se encuentran en esta zona hasta el techo de la Formación Cayo en Guayaquil



Figura 28. Zeolita Natural en roca (ZA)

- **Zeolita comercial (ZZ)**, donada en una procesadora de zeolitas ubicada en el cantón Isidro Ayora Km 1.8 Vía a las Mercedes, en la Tabla 15, se presentan en resumen las especificaciones del producto (Figura 29):

Tabla 15. Especificaciones Técnicas Zeolita comercial ZZ [67].

Identificación del producto	
Nombre químico	Aluminosilicatos altamente cristalizados
Tipo mineral	No metálico
Nombre Científico	Clinoptilolita
Nombre Genérico	Zeolita natural
Presentación	Granulado (malla 4-malla 16) 4.8-1.6 mm Polvo (malla 20-30) 1.4-0.4mm
Envase	Sacos polipropileno laminado con marca
Peso	50 Kg
Fórmula Química	$\text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{MgO} \cdot \text{H}_2\text{O}$
Uso de la Sustancia	Agrícola
Composición Química	
Dióxido de silicio, Óxido de aluminio, Óxido de Magnesio, Óxido de Calcio, Óxido de potasio, Óxido de hierro, Óxido de Sodio	
Propiedades Físicas y Químicas	
Estado físico	Polvo fino y granulado
Color	Verde azulado
Olor	Inodoro
PH solución acuosa al 5%	7.6
Absorción elementos (N P K)	Rápida
Selectividad	En su orden N,P,K otros
Liberación de elementos	Lenta
Solubilidad en agua (20°C)	< 100 mg/litro
Densidad aparente	300-400 Kg/m ³ compactada 520 Kg/m ³
Punto de fusión/reblandecimiento	Estable hasta 1200 grados Celsius/No Aplicable
Higroscopicidad	El producto es Higroscópico



Figura 29. Zeolita Natural Zeonatec Mineplus (ZZ).

- **Zeolita comercial (ZI)** adquirida en la oficina central de una compañía dedicada a procesar y expender minerales, ubicación de oficina Km 19.5 Vía Guayaquil-Salinas (Figura 30), planta de producción Km 22 Vía Guayaquil-Salinas, las especificaciones técnicas de ZI se muestran en la Tabla 16

Tabla 16. Especificaciones técnicas de la Zeolita ZI [68].

Datos del producto			
Apariencia	Polvo color blanco inodoro e insípido		
Fórmula	CO ₃ Ca		
Composición	Producto mineral en base de zeolita		
Contenidos	CO ₃ Ca: 94-98% - Ca 34-38%		
Densidad	1.24		
Humedad	Máx 1%		
Características			
ANÁLISIS FÍSICOS: GRANULOMETRIA según NORMAS ASTM			
Retenido malla 200	0,40 Máx	%	INEN 244
Retenido malla 200	9 Máx.	%	-
Retenido en malla 325	2 Máx	%	-
ANÁLISIS QUÍMICOS: MATERIA PRIMA (%)		PRODUCTO TERMINADO (%)	
CaO	53,1	CO ₃ Ca	94-98
SiO ₂	2,5		
Al ₂ O ₃	0,6		
MgO	0,59	Ca	34-38
SO ₃	0,3		
Fe ₂ O ₃	0,2		

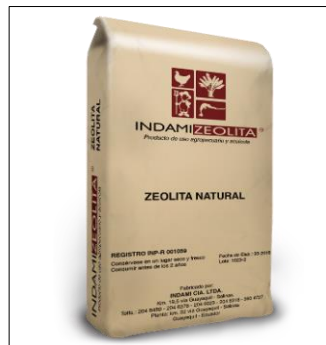


Figura 30. Zeolita Natural Indami 200 (ZI)

- El reactivo para los ensayos de densidad es la nafta (gasolina) de densidad mayor a 0.73 g/cm³ a 23 °C ± 2 °C
- Picnómetro de vidrio de 500±0.25 ml, ln 20 °C (Figura 11).

2.4.Equipos

- Máquina de los Ángeles (MAG)

La Máquina de los Ángeles, marca Controls (Figura 31 Máquina de los Ángeles., ubicada en el laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica (FICM-UTA), consta de un juego de 12 esferas y un contador digital que activa y desactiva el motor permitiendo que el tambor gire a una velocidad de 500 rpm.



Figura 31 Máquina de los Ángeles.

- Molino de bolas de tambor (MBT)

El molino de bolas de tambor que se muestra en Figura 32, diseñado y elaborado dentro de un proyecto de tesis para aplicaciones de pulvimetalurgia está ubicado en los laboratorios de Ingeniería Mecánica de la FICM-UTA.

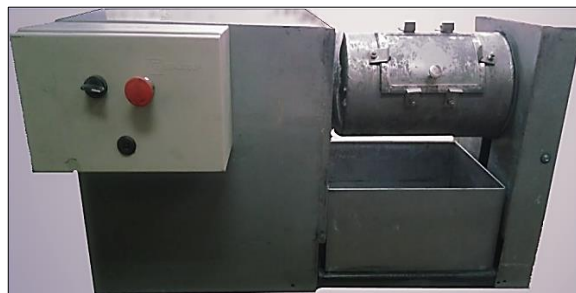


Figura 32. Molino de bolas de tambor.

Las especificaciones técnicas del molino MBT se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17. Especificaciones técnicas del Molino de Bolas de Tambor [64].

Potencia (HP)	0.5
Reductor de velocidad	1:20
Velocidad de giro (rpm)	74
Capacidad de carga máxima (kg)	18
Peso del tambor (kg)	8.5
Tiempo de molienda (horas)	1-10
Longitud del molino (cm)	95
Alto (cm)	51
Diámetro del tambor (cm)	21
Longitud del tambor (cm)	34
Nivel de ruido (Db)	85

- Tamizadoras y tamices

En la Figura 33, se muestran las tamizadoras automáticas D407 marca Controls, y los tamices de prueba estándar para análisis de tamaño de partículas y gradación, marca Controls se detallan en la Tabla 18, los mismos que se encuentran en el Laboratorio de Ensayo de Materiales.

Tabla 18. Serie de tamices del Laboratorio de Ensayo de Materiales.

Tamiz	Diámetro (mm)	Diámetro (um)
3/8"	9,5	9500
N° 4	4,75	4750
N° 8	2,5	2500
N° 10	2	2000
N° 16	1,25	1250
N° 30	0,6	600
N° 50	0,355	355
N° 100	0,15	150
N°200	0,075	75



Figura 33. Tamizadoras automáticas Controls

- Microscopio electrónico de barrido

Microscopio Electrónico de Barrido (SEM, de sus siglas en inglés) marca JEOL modelo JSM-IT 100 (Figura 34). Las especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19. Especificaciones técnicas del microscopio electrónico de barrido [69].

Voltaje de aceleración	500V a 20keV (opción de 30kV)
Resolución	Modo de alto vacío (SE): 4nm a 20kV, 8nm a 3keV, 15nm a 1kV (3nm a 30keV) Modo de vacío bajo (BSE): 5 nm a 20 keV (4 nm a 30 keV) - Modelos de vacío bajo
Magnificación	X5 a X300,000 (impreso como tamaño de salida de 128 mm x 96 mm)
Detectores estándar	Detector de electrones secundario tipo E / T Detector de electrones de retrodispersión de estado sólido (con modelos de bajo vacío)
Rango de vacío para modelos LV	10 Pa a 100 Pa
Software	PC con Windows ® 7, funciones de software Multi touch integradas en Microsoft ®
Control Remoto de SEM	La serie JSM-IT100 es capaz tanto de visualización remota en vivo como de control remoto completo control a través de la web



Figura 34. Microscopio Electrónico de Barrido [69].

- Minisputtering de bajo vacío

No reporta especificaciones



Figura 35. Minisputtering de bajo vacío [70].

- Balanza digital marca Sartorius M-power modelo AZ 1502 capacidad de 1500 g y legibilidad de 0.01 g. Tamaño de bandeja 6.9 "x 5.6" (174 x 143 mm), temperatura de funcionamiento 50 ° F a 86 ° F (10 ° C a 30 ° C) (Figura 36), este instrumento provee los pesos de las diferentes cantidades de muestra para realizar los ensayos.



Figura 36. Balanza analítica Sartorius M-power AZ 1502.

- Termómetro analógico, incertidumbre de 0.5 °C
- Baño María, marca Humboldt modelo H1390 capacidad 12 muestras dimensiones 495x292x203 mm volumen 29.4 litros, posee un microprocesador de control de temperatura (Figura 37).



Figura 37. Baño María Humboldt.

- Software ArcGIS, mediante este software se obtienen los mapas que muestran la información recopilada mediante investigación digital e In-situ, lo que permite se realice un catastro de la ubicación de las minas y procesadoras de zeolitas naturales que existen en Ecuador de forma organizada y delimitada (Figura 38).

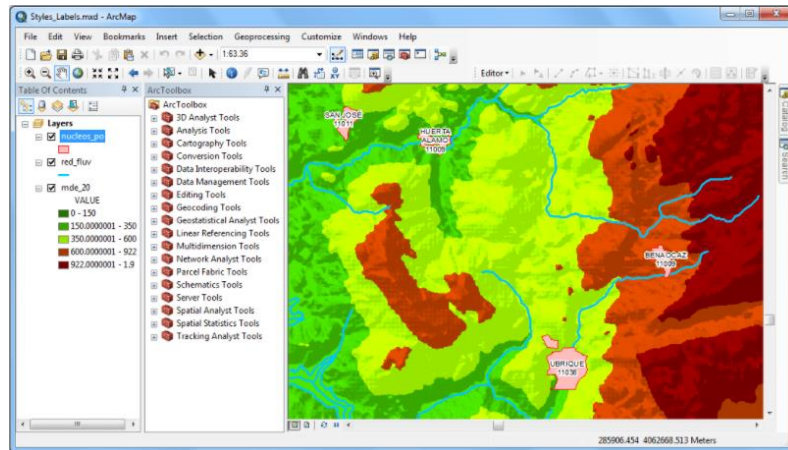


Figura 38. Interface ArcGIS

2.5.Método

2.5.1. Proceso de selección de zeolitas naturales

Para la selección de las muestras se realizan las siguientes actividades:

- 1) Realizar un catastro de las minas y procesadoras de zeolitas naturales en el Ecuador mediante la investigación en el portal de información de la Agencia de Regulación y Control Minero (ARCOM) [71], la Superintendencia de Companias (SUPERCIAS) [72] y páginas web, obtener información de los proyectos mineros de zeolitas naturales en el Ecuador, así como los contactos de procesadoras privadas que las comercializan.
- 2) Contactar a los titulares o administradores de cada mina y procesadora, para obtener mayor información y verificación de la obtenida.
- 3) Realizar un mapa del catastro de zeolitas naturales en el Ecuador mediante ArcGIS.
- 4) Filtrar la información en una tabla seleccionando las minas y procesadoras adecuadas para la adquisición de las muestras, basado en el área de explotación de mayor potencial.
- 5) Visita de campo a las minas y procesadoras para la respectiva georreferenciación y adquisición de las muestras.
- 6) Selección de las muestras que se adecuan para el cumplimiento de los objetivos

propuestos en el presente proyecto de grado.

- 7) Conservación de las muestras en materiales aislantes de humedad.
- 8) Realizar mapas mediante ARGIS y Google Earth para la georreferenciación de las minas y procesadoras, respectivamente.

2.5.2. Caracterización Geométrica

Al obtener una muestra de zeolita natural en roca (ZA, estrato 3), fue necesario su caracterización geométrica para lo cual se usan los equipos MAG y MBT, con el propósito de acercarse a la finura del cemento CGU. Los pasos a seguir se los distribuye en dos etapas como sigue a continuación:

ETAPA 1: Molienda en la máquina MAG

- 1) Limpieza del tambor de la máquina MAG.
- 2) Reducción de las rocas ZA mediante la máquina MAG a 500 rev/min.
- 3) Tamización de la muestra por los tamices 4.75 mm, 2 mm y 75 μ m (N° 4, N° 10 y N° 200, respectivamente).
- 4) Preservación de la muestra que pasa por el tamiz 75 μ m (N° 200), en frascos herméticos y fundas con cierre para evitar que penetre la humedad y separación de los tamaños mayores para la siguiente molienda.
- 5) Repetir los pasos del 1 al 4 aumentando la cantidad de material y el tiempo de molido.

ETAPA 2: Molienda en el molino MBT

En vista de que en la etapa 1 no se logra obtener una cantidad significativa de partículas menores a 0,075 mm es necesario moler la zeolita natural en un molino mucho más efectivo para lo cual se acude a los Laboratorios de Ingeniería Mecánica donde se analizan las posibles opciones seleccionando el molino de bolas de tambor MBT el cual presenta las mejores características para la molienda de la zeolita lográndose obtener mayor cantidad de estas partículas y a su vez permite realizar ensayos de granulometría.

- 1) Molienda de las fracciones de ZA en el molino MBT obtenidas en el paso anterior a

diferentes masas y tiempos como se muestra en la

- 2) Tabla 20, para la obtención de las gráficas granulométricas.

Tabla 20. Muestras de ZA para granulometría

Nomenclatura de la Muestra	Tamaño de muestras	Masas de muestras	Tiempo molida	Tiempo tamizado
	(mm)	(g)	(min)	(min)
ZA1-G40	4,75-9,5	300	40	30
ZA2-G60	4,75-9,5	300	40+20	30
ZA3-G60	4,75-9,5	300	60	30
ZA4-M40	<4.75 y > 2	300	40	30
ZA5-M60	<4.75 y > 2	300	40+20	30
ZA6-P60	< 2 y > 0.075	300	60	30
ZA7-P60	< 2 y > 0.075	1000	60	30
ZA8-P120	< 2 y > 0.0 75	1000	120	30

- 3) Tamizado de las muestras por la serie Tyler especificada en la norma para áridos finos (ASTM-C33-08 / NTE INEN 872-11).
- 4) Registrar los pesos del material retenido en cada tamiz
- 5) Determinación del porcentaje que pasa en cada tamiz mediante tablas en Excel y obtención de las gráficas granulométricas.
- 6) Repetir los pasos 1, 2, 3 y 4 para cada muestra especificada en la
- 7) Tabla 20.
- 8) Molienda del material restante introduciendo una masa alrededor de 2000 g de la muestra por una a dos horas.
- 9) Tamizado de la muestra resultante del paso anterior, por el tamiz N° 200 (75 um) en cantidades no mayores a 1000 g, hasta que pase todo el material fino (intervalos de tamizado 30 min)
- 10) Registro de masas y preservación de la muestra en material aislante.

2.5.3. Caracterización Morfológica

Para determinar la morfología de las muestras ZA, ZI, ZZ y CGU, se emplea la técnica de la Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) ó Scanning Electron Microscopy (SEM). Mediante el microscopio se obtienen imágenes que permiten analizar detalles

morfológicos de la estructura interna de cada una de las muestras. Para el análisis de las muestras se aplica el siguiente proceso:

Procedimiento

Preparación de las muestras:

- 1) Obtener muestras de aproximadamente 1cm³ de cada zeolita natural y del cemento preservándolas en recipientes herméticos.
- 2) Secar las muestras en el horno a una temperatura de 40° por un lapso de 24 horas.
- 3) Colocar pequeñas muestras sobre una cinta adhesiva colocadas en el pin stub de aluminio para ser recubiertas con un material conductor (sputtering de oro, platino o cromo) mejorando la cantidad de electrones secundarios para una mejor calidad de imagen.
- 4) Se coloca en un equipo de recubrimiento de oro, que consiste en electrodos del material de recubrimiento sobre los que se aplica una gran diferencia de potencial produciendo un arco eléctrico que evapora parte del material del electrodo por electrostática el polvo muy finísimo de oro se adhiere de forma uniforme sobre la muestra quedando recubierta totalmente.
- 5) Se registra en una libreta detalles de las muestras para un mejor manejo de ellas dentro del microscopio.

Análisis SEM:

- 6) Las muestras preparadas se colocan sobre el porta muestras del microscopio donde pueden ir uno o más stubs.
- 7) Colocar el portamuestras en el SEM, el cual debe estar previamente preparado para el análisis.
- 8) Observar las muestras configurando el equipo de acuerdo al material.
- 9) Obtener varios enfoques a diferentes aumentos para un mejor análisis de las características morfológicas del material.
- 10) Analizar las imágenes.

2.5.4. Caracterización química.

Mediante el microanálisis EDS incorporado al microscopio electrónico de barrido se determina el espectro de composición química de las muestras, así como cada elemento. En el caso del cemento se determinan los óxidos que describen las normas NTE INEN 152, NTE INEN 160 y ASTM C 150.

Procedimiento

- 1) Obtener los espectros químicos y composición porcentual de los elementos químicos de cada muestra mediante el microscopio electrónico de barrido acto seguido a la obtención de las micrográficas de la caracterización morfológica mediante el cursor señalando sobre la imagen del monitor sobre puntos o zonas de interés que se desea analizar obteniendo de forma instantánea y precisa la composición química elemental del material de manera cualitativa y cuantitativa en el punto seleccionado.
- 2) Determinación de la relación silicio aluminio.
- 3) Determinación manual de los porcentajes de óxidos de cada elemento, mediante factores de conversión.
- 4) Determinación de los compuestos principales del cemento, mediante la aplicación de las ecuaciones de Bogue (muestra CGU).
- 5) Discusión de resultados.
- 6) El procedimiento se repite para cada muestra de zeolita natural a excepción del numeral 4.
- 7) Comparación de resultados del cemento y zeolitas naturales.

2.5.5. Caracterización Física

Para alcanzar los objetivos de este proyecto investigativo se analizan propiedades físicas de densidad y finura aplicando ensayos estandarizados característicos del cemento en todas las muestras (cemento y zeolitas naturales), con la finalidad de establecer cuál de

las muestras de zeolitas naturales presenta propiedades físicas similares a la del cemento portland Tipo GU.

2.5.5.1. Densidad

Para determinar la densidad de cada una de las muestras de zeolitas naturales ZA, ZI, ZZ y cemento CGU, en la presente investigación se usa el método del Picnómetro, debido a que no se cuenta con el frasco de Le Chatelier, siguiendo los requerimientos de la norma ASTM C 188 – 03 correspondiente a la norma ecuatoriana NTE INEN 156, para su uso, principalmente el numeral 3.3 norma ASTM y 4.2.5 norma INEN en el que estipula que se puede usar otro equipo siempre y cuando un mismo operador pueda obtener resultados dentro de $\pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ de los resultados obtenidos, por otro lado se establece en el numeral 6.1 norma ASTM y 4.2.7 norma INEN que el resultado de dos ensayos adecuadamente realizados por el mismo operador con el mismo material no debe diferir en más de $\pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ [38].

Procedimiento

- 1) Para garantizar la fiabilidad en los resultados se calibra el picnómetro obteniendo la curva de calibración del picnómetro (AASHTO T 100), para lo cual el picnómetro lleno de gasolina es calibrado para varias temperaturas. La curva es propia de cada picnómetro por lo cual se usa el mismo picnómetro para todos los ensayos.
- 2) Para la determinación de las densidades se toma las siguientes masas en la balanza analítica:
 - Masa del picnómetro (gr): M1
 - Masa del picnómetro + 64 g de muestra (gr): M2
 - Masa del picnómetro + 64 g de muestra + gasolina (gr): M3
 - Masa del Picnómetro + gasolina(gr) (dato obtenido de la curva de calibración): M5
- 3) Realizar los cálculos respectivos mediante una tabla excel para determinar la densidad, se usa la siguiente nomenclatura:
 - $M4=M3-M2$ (Masa de la gasolina añadida)

- $M6=M5-M1$ (Masa 500cm³ Gasolina)
 - $DG=M6/500\text{cm}^3$ (Densidad de la Gasolina)
 - $M7=M6-M4$ (Masa de la Gasolina desalojada por la muestra)
 - $MC=M2-M1$ (Masa de la muestra)
 - $VG=M7-M1$ (Volumen de Gasolina Desalojada)
 - $DR=MC/VG$ (Densidad real de la muestra)
- 4) Reportar las densidades con tres decimales verificando que la densidad de la gasolina sea mayor a 0,73 g/cm³ (numeral 3.2 y 4.3 de la norma ASTM e INEN, respectivamente).
 - 5) Realizar al menos dos ensayos y reportar resultados acatando el numeral 6 de la norma ASTM y 4.7 de la norma INEN.

2.5.5.2. Finura

Método de Tamizado Seco

La finura de las muestras se determina mediante la aplicación del método de tamizado seco con el tamiz de 150 μm (N° 100) cuyo procedimiento se encuentra detallado en la norma ASTM C- 184-94 correspondiente a la norma ecuatoriana NTE INEN 489-13.

Procedimiento

En base a la norma se realiza el siguiente procedimiento:

- 1) Registro de pesos iniciales (fuente y tamiz de 150 μm).
- 2) Colocación de la muestra en el tamiz de 150 μm y registro de pesos (fuente y tamiz).
- 3) Sosteniendo con ambas manos a la fuente y tamiz destapado se realiza movimientos de muñeca suaves, girando continuamente al tamiz durante este proceso (movimiento-giratorio), para este proceso normalmente se requiere de 3 o 4 minutos.
- 4) Culminado el tiempo de tamización, se coloca la tapa sobre el tamiz y se retira la fuente, dando pequeños golpes alrededor del tamiz con el mango de la brocha

usada para su limpieza y con la cual se procede a retirar el material que se encuentra en la parte inferior, registrando todo el peso del material que paso junto con el de la fuente y el peso del tamiz de 150 μm con el residuo. Cualquier material que haya quedado en la tapa debe ser regresado al tamiz.

- 5) Registro de pesos (fuente y tamiz 150 μm)
- 6) Se realiza el mismo procedimiento desde paso 3 al paso 5, durante 5 o 10 minutos.
- 7) Se realizan ensayos de un minuto (golpe-giro), para lo cual se sostiene firmemente en ambas manos todo el conjunto (fuente, tamiz 150 μm y tapa) en una posición ligeramente inclinada, se mueve el conjunto hacia adelante y hacia atrás en el plano de inclinación, mientras que con la palma de la otra mano se golpea suavemente el lado del tamiz simultáneamente, alrededor de 150 veces en un minuto. Este tamizado se lo debe realizar sobre un papel blanco para que el material que caiga en él durante el tamizado pueda ser regresado al tamiz. Después de cada 25 golpes se gira el tamiz alrededor de un sexto de revolución siempre en la misma dirección.
- 8) Registrar los pesos (fuente y tamiz de 150 μm)
- 9) El paso 7 y 8 se deben repetir hasta que el material que pase en un minuto sea menor o igual a 0.05 g.
- 10) La finura se determina mediante la fórmula para tamiz 100 (sin corrección), especificada en la mencionada norma, con el peso del residuo final del tamiz de 150 μm .

CAPITULO III

3. RESULTADOS Y DISCUSION

3.1. Gráficos y tablas de datos

3.1.1. Selección de zeolitas naturales

Inicialmente se realiza el catastro de zeolitas naturales en el Ecuador (Tabla 21) con toda la información recabada del portal del ARCOM, y directamente de páginas web de procesadoras que expenden éstos aluminosilicatos. La mayor parte de la información se obtiene del portal de la ARCOM como: nombre, área de extracción, ubicación geográfica, coordenadas, sin embargo, no todos los contactos obtenidos mediante este portal se encontraban habilitados, por lo que se investiga a través del portal de la Superintendencia de Compañías (SUPERCIAS) [72] y páginas web de las procesadoras. Se recopila información general directamente de los titulares y administradores de las minas y proveedores mediante llamadas y visitas *In-situ*, ver Tabla 22. La Figura 39 muestra la ubicación de las minas de acuerdo al ARCOM formando parte de la Cordillera Chongòn-Colonche en la Provincia de Guayas, notándose una mayor concentración de éstas en el cantón Isidro Ayora y alrededores del cantón Guayaquil.

Tabla 21. Catastro de Minas de zeolitas naturales en Ecuador [72].

Sistema de Referencia WGS84 UTM 17 SUR														
NZ No	Nombre/Mina	Prov.	Cantón	Parroquia	Área (ha)			Coordenadas Geográficas		Coordenadas UTM				
					Extracción	%	Cantonal	Latitud	Longitud	X	Y			
1	<i>Zeonatec*</i>	Guayas	Isidro Ayora	Isidro Ayora	-	-	-	-1.8957	-80.1464	594939,00	9790357,00			
2	<i>Fausto</i>		Isidro Ayora	Isidro Ayora	2	0,14	481	-1,8949	-80,1476	595000,00	9790800,00			
3	<i>Zeolita</i>		Lomas de Sargentillo	Lomas de Sargentillo	40	2,79	40	-2,0234	-80,1858	590551,66	9776334,58			
4	<i>Elena</i>		Isidro Ayora	Isidro Ayora	225	5,68	481	-2,0229	-80,1774	591486,02	9776385,89			
5	<i>Diana</i>				4	0,28		-2,0279	-80,1687	592600,00	9776100,00			
6	<i>Bexi</i>				190	3,24		-2,0348	-80,1794	591256,22	9775073,41			
7	<i>Calpacsa SA.</i>				8	0,56		-2,0337	-80,1575	593698,65	9775185,19			
8	<i>Río Paco</i>				12	0,84		-2,0396	-80,1777	591449,80	9774535,87			
9	<i>Pincopaz I</i>				300	0,91		-2,0778	-80,1663	592000,00	9770000,00			
10	<i>Chongón</i>				Guayaquil	Guayaquil		88	6,13	653,60	-2,1041	-80,1062	599352,96	9767364,65
11	<i>Clinop</i>							Chongón	4		0,28	-2,1124	-80,0657	604000,00
12	<i>El Refugio</i>		288	20,08			-2,1179	-80,0401	606200,00		9765400,00			
13	<i>Pinto</i>		150	10,46			-2,1174	-80,0660	603500,00		9765800,00			
14	<i>Pinto II</i>		120	8,36			-2,1249	-80,0646	603500,00		9765000,00			
15	<i>Voluntad de</i>		3,6	0,25			-2,1300	-80,0167	609347,80		9764537,45			
16	<i>Crilarsa C.A*</i>		-	-	-	-2.1926	-80.0518	605437,20	9757613,80					
17	<i>Indami Cia</i>		-	-	-	-2,1935	-80,0543	605155,00	9757511,00					
18	<i>Calmosacorp</i>		Guayaquil	Chongón	-	-	-	-2,1917	-80,0557	604994,00	9757706,00			
19	<i>Biomarsa</i>				-	-	-	-2.1961	-80.0719	603202,00	9757134,00			
20	<i>Cerro del Tres I</i>				Durán	Durán	24	1,67	24	-2,1773	-79,8347	629900,00	9759200,00	
21	<i>ESPOL*</i>		Guayaquil	Guayaquil	-	-	-	-	-	615139,76	9762722,52			

*In-situ

Tabla 22. Información General de las Minas y Proveedoras.

Nombre/Mina	Contenido	Medida (mesh)	Aplicaciones	Exportación	Dirección	Teléfono /Correo/Pág. Web	Observaciones
<i>Zeonatec</i>	Clinoptilolita	40, 100, 200, 325	Acuícola camaroneas , Agricultura, Gandería, Filtros, Salud y Construcción	4 Países de Exportación	Km 1.8 Vía las Mercedes	042692752 ; 0960851639 <i>www.zeonatec.com</i> <i>zeonatecventas@gmail.com</i> <i>zeonatec@gmail.com</i>	Dispone de mina y procesadora Titular: Sr. Edison Arciniegas
<i>Fausto</i>	-	-	-	-	Coop. Renacer MZ. 142, Solar 24 (Guayaquil)	-	Titular: Ascencio Avellán Fausto Daniel
<i>Zeolita</i>	-	100	Acuícola camaroneas	No exportan	Bolivia 1211 Y Capitán Saeda	Sr. Wilson Villalta: 0994413356 Oficina: 042445585	Actualmente no estan explotando, trabajan en conseción solo proveen. El proceso de la zeolita es artesanal. Saco de 45 kg costo \$ 5,00. Dispuesto a colaborar y llevarnos a la mina proveer muestra en roca. Titular: Escalante Chalen Olga Gardenia
<i>Elena</i>	-	malla talco	No comercializa	No exportan	Coop. Luis Vargas Torres MZ A2 Solar 1	titular Rafael Chavez: 0999120873	Esta registrado en el catastro minero pero actualmente se encuentra paralizada ya que el gobierno paralizó las concesiones. Manifiesta que se realizaron estudios de CHINA Y ALEMANIA no calificó por la sobrecarga de 4 a 5 metros

							sobre la zeolita la extracción salía muy costosa. Holcim también ha realizado investigaciones e hizo cemento. Titular: Chávez Salazar Rafael Guillermo
<i>Diana</i>	-	-	-	-	Sauces 4	-	Titular: Lara Fiallos Diana Magali
<i>Bexi</i>	Clinoptilolita	200	Agrícolas, Avícolas	Colombia	Las Mercedes	titular: 0994654093	Se realizó análisis en Colombia, se determina que es netamente natural. Está en concesión minera tienen 20 Ha. para 150 años. Investigaciones con el Magap. Anteriormente proveían a Holcing. Titular: Vera Pazmiño Bexi Elizabeth María
<i>Calpacsa SA.</i>	Clinoptilolita	100 325	Actualmente no explota	Actualmente no explota	RB Torres del Salado Km 11/5 Vía a la Costa	titular: 0985234516 asesor: 0988881237 <i>alexavalencia23@hotmail.com</i> <i>celebritycorp@yahoo.com</i> <i>zoiloangulo@aol.com</i>	Actualmente no explota, se encuentra en proceso de trámites de título y ambientales, puede proveer muestras en roca. El Ing. Angulo (asesor) tiene experiencia, descubridor de la zeolita en Isidro Ayora, conoce muchas minas de zeolita es amigo del Ing. Morante de la ESPOL y otros de mucha ayuda, manifiesta que el Sr. Gelo muele pero actualmente no. Titulares: Torres Freire Rosa Delia/Gelo Torres Félix Miguel
<i>Río Paco</i>	-	-	-	-	Vacas Galindo y La 32	-	Titular: Noboa Apolinario Matilde Mariela
<i>Pincopaz I</i>	-	-	-	-	Urdenor 1 Manzana 137 Villa 18	-	Titular: Pincopaz S.A.

<i>Chongón</i>	Ninguna	-	-	-	Vía a la Costa Km 10 1/2 Camino Real	-	No explotan, están por cerrar solo explotan minas de piedras. Titular: Constructora Caminos y Minas Concamin CIA Ltda.
<i>Clinop</i>	-	-	-	-	Calle Lorenzo de Garaycoa y Ayacucho/Parroqui Bolívar/Cantón Guayaquil/Lorenzo de Garaycoa	-	Titular: Alcivar Escobar Cayetano Damián
<i>El Refugio</i>	Alto contenido en: clinoptilolita mordenita heulandita	algunas medidas 325	Agrícola: Abonos potásicos, alimentación animal Ambientales : purificación de agua	Guatemala Colombia	Cdla. Santa Cecilia	Gerente Patricia Lucas: 0996324959 https://1697-ec.all.biz/	PLANTA: tras Monte Sinaí, tras Holcim Perimetral Av. Casuarina tras de Voluntad de Dios. Venden zeolitas sintéticas. Marcas de productos Zeoagro, zeofloc, zeoanimal, zeocama. Extracción de feldespatos. Disponen de zeolitas con y sin actividad puzolánica.
<i>Pinto</i>	Alto contenido en: clinoptilolita mordenita heulandita	algunas medidas 325	Agrícola: Abonos potásicos, alimentación animal Ambientales : purificación de agua	Guatemala Colombia	Cdla. Santa Cecilia	Gerente Patricia Lucas: 0996324960 https://1697-ec.all.biz/	Dispuestos a colaborar pero con carta de la universidad. Se realizó estudio tesis Guevara-2002 ESPOL Mina Refugio https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3440/1/5963.pdf . Titular: Sra. Patricia Lucas gerente de Zeolitas S.A.

<i>Pinto II</i>	Alto contenido en: clinoptilolita mordenita heulandita	algunas medidas 325	Agrícola: Abonos potásicos, alimentación animal Ambientales : purificación de agua	Guatemala Colombia	Cdla. Santa Cecilia	Gerente Patricia Lucas: 0996324960 https://1697-ec.all.biz/	
<i>Voluntad de Dios I</i>	-	-	-	-	MZ 113 Lote 19 Voluntad de Dios Sector 3 Bocas	-	Titular: Chávez Salazar Julio Cesar
<i>Crilarsa C.A</i>	zeolita verde	-	Crianza de camarones, peces, pollos de engorde, gallinas ponedoras, cerdos bovinos de carne y leche. Aditivo en alimentos balanceados, control de olores, estabilizar el nivel de Ph en piscinas, absorber bacterias sólidos en	-	Km 22 Vía a la Costa	0985211202 0991917165 042738254 www.crilarsa.com https://www.facebook.com/pg/crilarsa/community/?ref=page_internal https://guayaquil.yalwacom.ec/ID_133552737/Zeolita-Activo-fertilizante-inteligente-CRILARSA-C-A.html https://guayaquil.evisos.ec/venta-de-zeolita-activo-verde-crilarsa-ca-id-241809	Especificación: Al ₂ (SiO ₂) ₃ (silicato de aluminio) > 80%. Zeolita que usó en su tesis Valenzuela 2017 UTA Titulares: Pazmiño Kravets Vadin Cristofher Pazmiño Molina Cristobal Eduardo

			suspensión, residuos				
<i>Indami Cia Ltda</i>	-	200	Agrícola, acuícola, avícola, industrial y agroindustrial, en las que se utilizan como materia prima o producto terminado, el carbonato de calcio, sulfato de calcio y zeolitas.	-	Km 19,5 Vía Guayaquil-Salinas	Juan Pablo Armas: 0991713157 04 204 6480 04 204 6376 04 204 6023 info@indami.com.ec http://indami.com.ec/	Distribución y procesamiento de productos agrícolas
<i>Calmosacorp S.A.</i>	-	40, máx 40%	Acuicola, Agrícola, Avicola, Industrial, Pecuaria	-	Km. 20 Via a la Costa Guayaquil – Ecuador	Christel Quiñonez 0939861881;04-3901373 ventas@calmosacorp.com https://calmosacorp.com	Titular: Hernán Armas C.
<i>Biomarsa Kravets</i>	Clinoptilolita	<500 µm	Alimentación Animal, Fertilización Agrícola, Potabilización de Aguas, Abonos y Residuos Orgánicos, Pi	-	Las Cumbres y Planta en Km 22 Vía a la Costa	097-860-8444; 098-521-1202 pedidos@biomarsa.com http://www.biomarsa.com/inicio.html	Dispuestos a colaborar

			agricultura y Camaronicultura Industrial				
<i>Cerro del Tres 1</i>	-	-	-	-	Las Palmas 316 y La Sexta	0999791564	Poco contenido de zeolita no está comercializando. Empresa: Concreto y Prefabricados C Ltda
<i>Zeonat S.A.</i>	-	-	-	-	Casa Matriz Principal 3 Colinas Alborada Intersección 765 a 300 metros de Mafeco	04-6005153 0998365238 zeolitaecuador@gmail.com intnetmar@gmail.com	ZEONAT S.A. es una empresa que se dedica a la Explotación y Procesamiento de ZEOLITAS NATURALES para luego comercializarla con el nombre de ZEONAT, siendo dueños de los terrenos donde se encuentran los yacimientos de este mineral, así como también de las Concesiones Mineras, está sujeto a control por parte del Ministerio de Agricultura, Acuicultura, Ganadería y Pesca MAGAP; Accionistas: Zambrano Vargas Jasmin Mercedes, Pilco Campusano Carlos Aberto, Barberan Vera Mario Abel, Guagua Vives Juan Gabriel.
<i>Georgy</i>	-	-	-	-	Manuel Vega 1090 y M Lamar	-	Titular: Sánchez Neira Jorge Teodoro

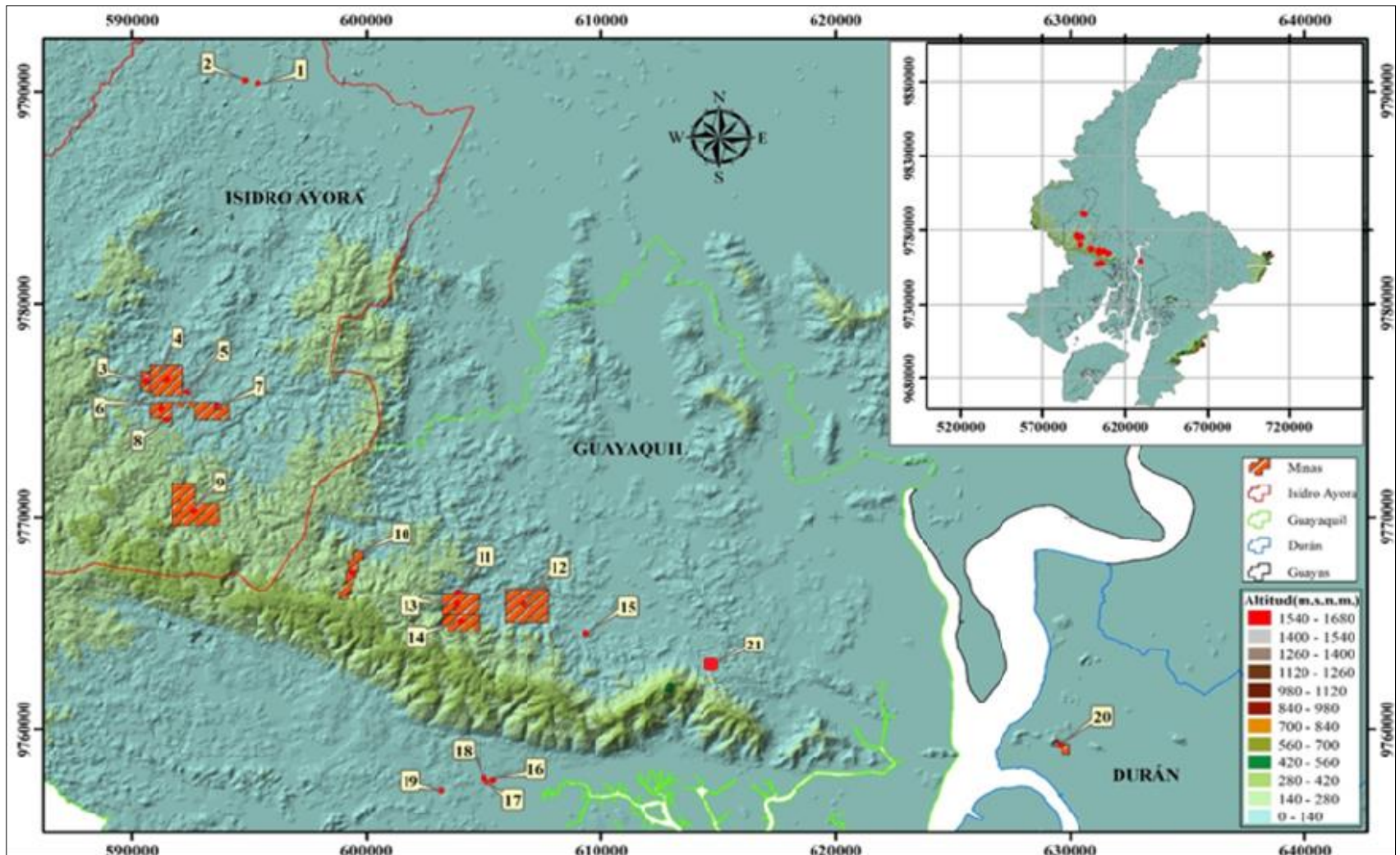


Figura 39. Catastro minas de Zeolitas Naturales en Ecuador.

En la Tabla 23 y Tabla 24, se filtra la información de la Tabla 21 y

Tabla 22. La selección de las minas y procesadoras se basa en la disponibilidad de colaboración de los administradores de las minas y procesadoras, y la cercanía entre ellas para facilitar la adquisición de la mayor cantidad de muestras en menor tiempo, debido a que el tiempo que se planifica para las visitas es corto.

Tabla 23. Minas y procesadoras por ubicación.

PROVINCIA	CANTÓN	PARROQUIA	ZN	Mina
GUAYAS	GUAYAQUIL	GUAYAQUIL	12	El Refugio
	ISIDRO AYORA	ISIDRO AYORA	13	Pinto
			14	Pinto II
			6	Bexi
			16	Calcáreos del Pacífico Calpacsa S.A.
			1	Zeonatec
	LOMAS DE SARGENTILLO	LOMAS DE SARGENTILLO	17	Zeolita
	GUAYAQUIL	CHONGÓN	17	Indami Cia Ltda
			18	Calmosacorp S.A.
			19	Biomarsa Kravets
		GUAYAQUIL	15	Voluntad de Dios I
	ISIDRO AYORA	ISIDRO AYORA	9	PINCOPAZ
			4	ELENA

Tabla 24. Minas y proveedoras contactadas para visitas.

ZN	Mina	Dirección	Contacto
12	El Refugio	Guayaquil Cdla. Santa Cecilia	Gerente Sra. Patricia Lucas: 0996324959
13	Pinto		
14	Pinto II		
6	Bexi	Isidro Ayora Las Mercedes	titular Sra. Bexi Vera: 0994654093
16	Calcáreos del Pacífico Calpacsa S.A.	Isidro Ayora RB Torres del Salado Km 11/5 Vía a la Costa	Asesor Ing. Zoilo Angulo: 0988881237 Titular Sr Felix Gelo: 0985234516
17	Indami Cia Ltda	Chongón Km 19,5 Vía Guayaquil-Salinas	Juan Pablo Armas:0991713157;(04) 204 6480 - 204 6376 - 204 6023
18	Calmosacorp S.A.	Chongón Km. 20 Via a la Costa	Christel Quiñonez 0939861881;04-3901373
19	Biomarsa Kravets	Chongón Las Cumbres y Planta en Km 22 Via a la Costa	097-860-8444; 098-521-1202
1	Zeonatec	Isidro Ayora Km 1.8 Vía las Mercedes	042692752 ; 0960851639
15	Voluntad de Dios I	Guayaquil MZ 113 Lote 19 Voluntad de Dios Sector 3 Bocas	A través de Calcáreos del Pacífico Calpacsa S.A. Ing Zoilo Angulo: 0988881237
9	PINCOPAZ	Isidro Ayora Urdenor 1 Manzana 137 Villa 18	A través de Calcáreos del Pacífico Calpacsa S.A. Ing Zoilo Angulo: 0988881237
4	ELENA	Isidro Ayora Coop. Luis Vargas Torres MZ A2 Solar 1	Titular Rafael Chavez: 0999120873

De acuerdo a los datos del ARCOM los sectores con mayor explotación de aluminosilicatos se encuentran en el cantón Isidro Ayora y cantón Guayaquil (Figura 40 y (Figura 41).

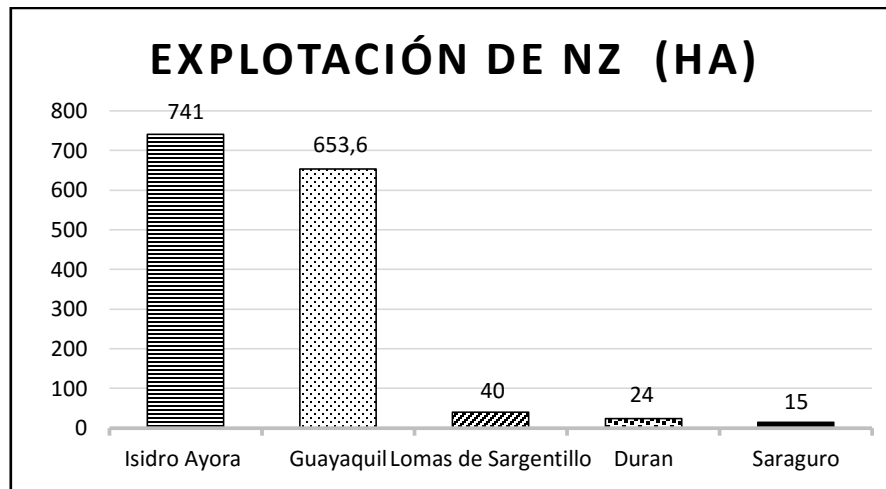


Figura 40. Áreas de Explotación de Zeolita Natural en Hectáreas.

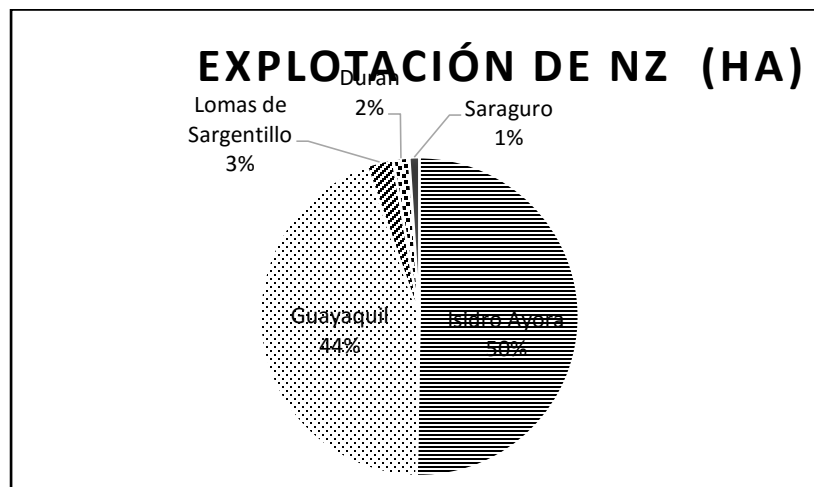


Figura 41. Porcentajes de Áreas de explotación de Zeolitas Naturales.

Con la información antes recabada se planifica la visita a la provincia del Guayas, el recorrido inicia en el Cantón Isidro Ayora, tomando en consideración que la mayor parte de las minas se encuentran en este cantón y finalmente Vía a la Costa del cantón Guayaquil. Por limitaciones del tiempo no se alcanza a realizar todas las visitas planificadas, sin embargo, se obtienen nueve muestras de zeolitas en total, detalladas e identificadas en la Tabla 25.

Tabla 25. Tabla general de muestras adquiridas por el grupo de investigación.

Fuente	Fecha de adquisición	Nombre	Muestra	Diámetro (um)	Cantidad (g)
Mina (estrato1)	14-Nov.2019	Zeonatec-Verde	ZV	Roca	7596,3
Mina (estrato2)	14-Nov.2019	Zeonatec-Café	ZC	Roca	12793
Mina (estrato3)	14-Nov.2019	Zeonatec-Azul	ZA	Roca	155762,1
Mina (estrato4)	14-Nov.2019	Zeonatec-Roja	ZR	Roca	7207,8
Procesadora 1	14-Nov.2019	Zeonatec-200	ZZ	75	25000
Procesador 2	12-Dic.2019	X-200	ZX	45	25000
Procesadora 3	14-Nov.2019	Indami	ZI	75	25000
Procesadora 4	14-Nov.2019	Calmosacorp	ZCa	45	25000
Procesadora 5	14-Nov.2019	Crilarsa	ZCr	75	25000

Cuatro de las muestras de zeolita naturales (ZV, ZC, ZA y ZR), se recolectan en su estado natural en forma de roca directamente de una mina del cantón Isidro Ayora, provincia del Guayas, donde se puede observar los diferentes estratos con variaciones en su tonalidad como se muestra en la Figura 42, siendo estos señalados en orden descendente y en la Figura 43 se muestra el estrato 4 de la misma mina que por las condiciones de excavación no fue posible ubicarlo en una misma fotografía. Las demás muestras fueron adquiridas de las procesadoras donde las comercializan que en su mayoría se encuentran cercanas a las zonas de explotación en la provincia de Guayas, cantón Guayaquil, vía a la Costa.



Figura 42. Obtención de las muestras según la estratigrafía de una mina del Cantón Isidro Ayora.



Figura 43. Estrato 4 de la mina del Cantón Isidro Ayora.

Las muestras de zeolita natural que se utilizarán para la presente investigación son las denominadas ZA, ZZ, y ZI donde la primera muestra ZA pertenece al tercer estrato de la mina (Figura 42), visualmente tiene un color verde azulado y presenta rocas amorfas con aristas irregulares con textura vidriosa, se observa oxidación en la superficie más expuesta y en su parte interna dos secciones una azul muy compacta y una café menos compacta, La segunda muestra ZZ se obtuvo de la procesadora 1, finamente molida (75 μ m). Con la finalidad de ampliar los datos de la presente investigación se selecciona una tercera muestra ZI, adquirida de la procesadora 3 finamente molida (75 μ m). En la Tabla 26 se presentan las coordenadas de ubicación de cada muestra analizada en el presente proyecto y mediante la georreferenciación se muestran los mapas ArcGis (Figura 44 y Figura 45), donde puede observarse que las mismas están dentro de la provincia de Guayas Cantón Isidro Ayora (muestra ZA y ZZ) y Cantón Guayaquil (muestra ZI). Todas las muestras se ubican dentro de la Cordillera Chongón-Colonche cabe señalar que la ubicación de la muestra ZA corresponde a una mina y las muestras ZZ y ZI a procesadoras que las expenden.

Tabla 26. Coordenadas de la ubicación de las muestras.

Nº	Muestra	Nombre	Este	Norte	Longitud	Latitud
1	ZA	Mina Zeonatec	592533,00	9775847,00	-80,17	-2,03
2	ZZ	Procesadora Zeonatec	594968,14	9790375,09	-80,15	-1,90
3	ZI	Procesadora Indami	600531,19	9762088,15	-80,10	-2,15

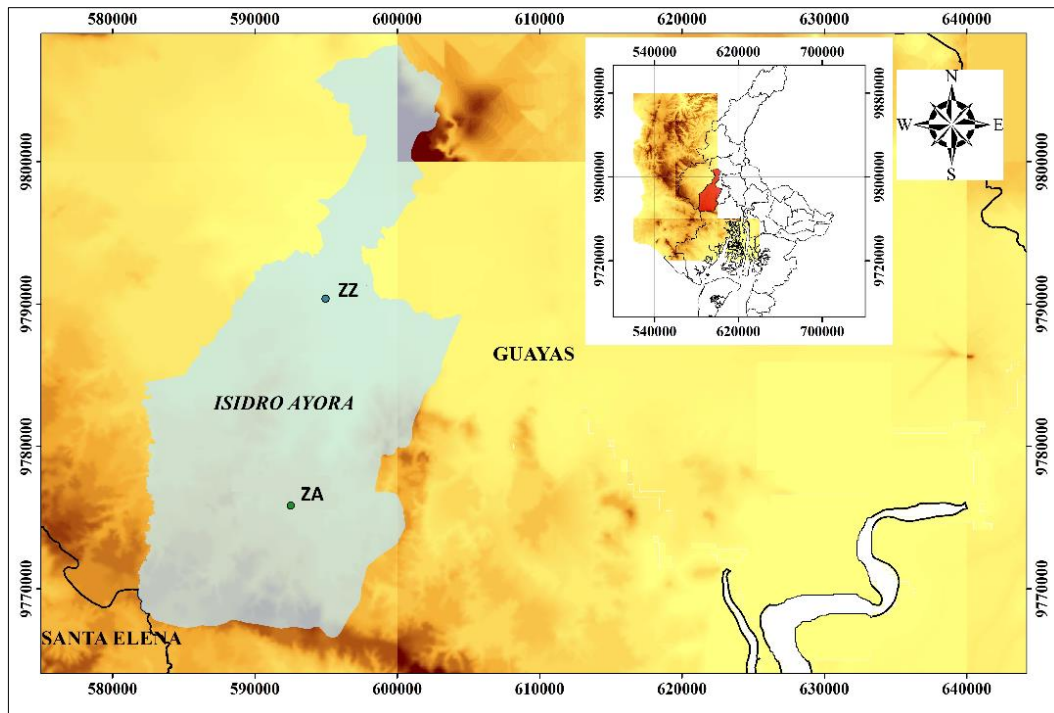


Figura 44. Ubicación de las muestras en el cantón Isidro Ayora.

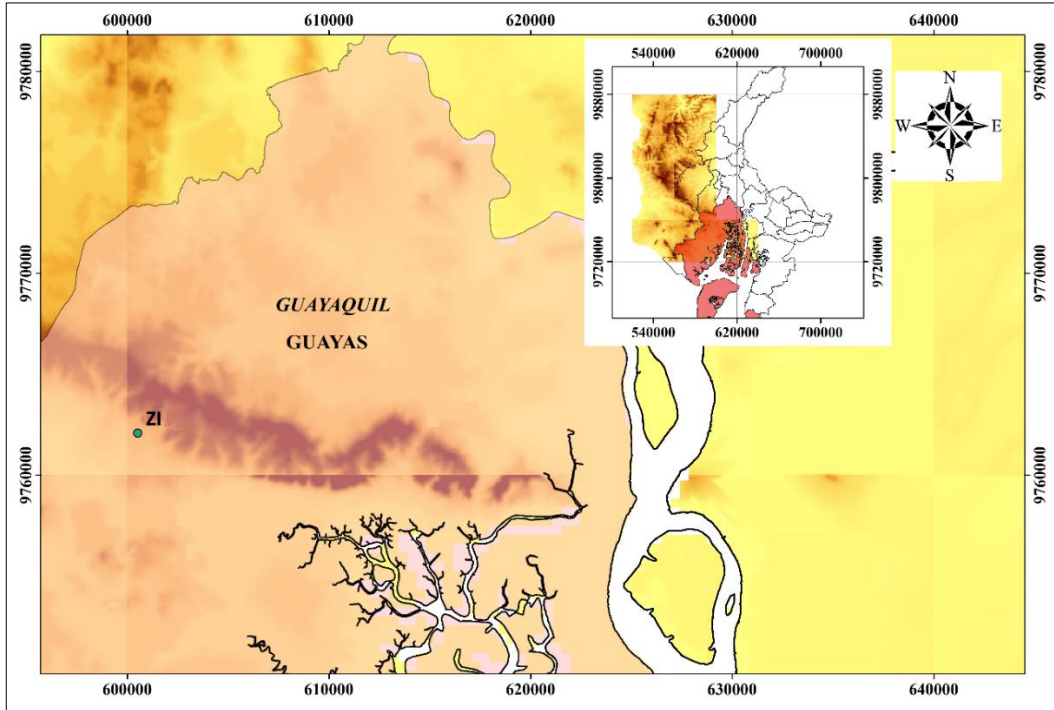


Figura 45. Ubicación de las muestras en el cantón Guayaquil

De la misma manera se ubica las muestras en un mapa de Google Earth (Figura 46).

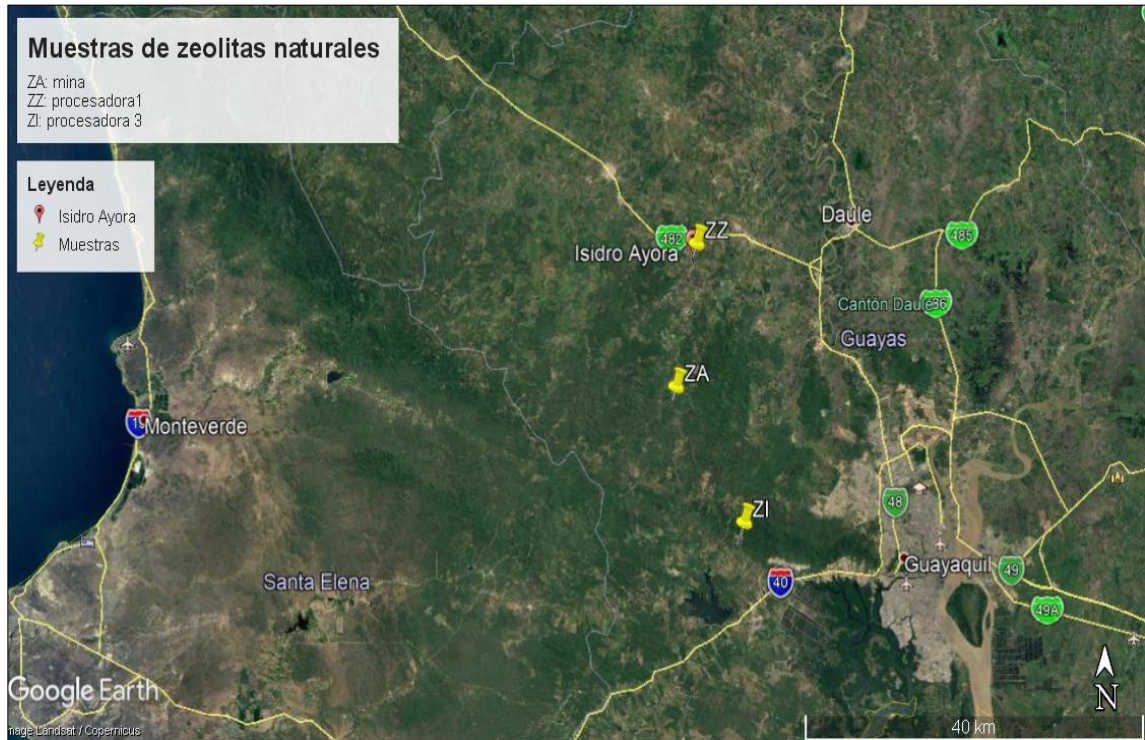


Figura 46. Fotografía satelital de la ubicación de las muestras seleccionadas.

La Tabla 27, muestra en detalle como se realizaron las visitas para la obtención de las muestras.

Tabla 27. Evidencia de la visita In-Situ y muestreo en la provincia del Guayas

El recorrido inicia en el cantón Isidro Ayora de la provincia del Guayas, con la visita de la mina Zeonatec (Figura 47), recorrido que se realiza con la guía del propietario, donde se procede a tomar las muestras en roca de las zeolitas naturales ZA, ZV, ZC y ZR (Figura 48), así como el punto de ubicación de la mina.



Figura 47. Visita de la Mina Zeonatec



Figura 48. Recolección de muestras en roca..

Se realiza el recorrido en la procesadora Zeonatec, donde se conoce el proceso de producción de las zeolitas naturales el cual es sumamente sencillo. El material es extraído de la mina y apilado bajo techo (Figura 49), se somete a una trituración primaria que sube por unas bandas que la transportan hacia los molinos (Figura 50) que se configuran de acuerdo al grado de finura requerido para los diferentes productos que finalmente son embasados y etiquetados (Figura 101). El uso posterior del producto depende de la molienda es decir del grado de finura del aluminosilicato generalmente usado en la agricultura, acuicultura crianza de animales y desinfección como arena para gatos. Se obtiene dos muestras de 25 kg cada una: la muestra ZZ de 75 μm de diámetro y la muestra ZX de 45 μm de diámetro.



Figura 49. Almacenamiento de la materia prima.



Figura 50. Molienda de las zeolitas naturales.



Figura 51. Almacenamiento del producto terminado Zeonatec

Se continua el recorrido Vía a la Costa visitando la oficina (Figura 52) y procesadora Indami donde se obtiene 25 kg de la muestra ZI con diámetro de 75 μm (Figura 53).



Figura 52. Oficina Indami



Figura 53. Visita procesadora Indami.

Seguidamente se visita la procesadora de Calmosacorp como se puede ver en la Figura 54, donde se obtienen 25 kg de muestra ZCa de 45 μm de diámetro.



Figura 54. Visita procesadora Calmosacorp.

Por último se obtiene 25 kg de la muestra ZCr de 75 μm de diámetro, de la procesadora Crilarsa (Figura 55).



Figura 55. Visita procesadora Crilarsa

Se realiza la visita al Dr. Fernando Morante en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), quién destaca por su amplia experiencia en estudio de las zeolitas naturales en el Ecuador principalmente estudios geológicos, químicos, así como aplicaciones entre otros (Figura 56). Amablemente nos permite conocer las instalaciones del Laboratorio de Materiales de la noble institución y el funcionamiento de los diferentes equipos que se usan para el estudio de materiales incluyendo los aplicados en esta investigación. Cabe señalar que la información aportada personal y bibliográficamente por el Dr. Morante es una base importante para la presente investigación (Figura 57).



Figura 56. Visita a la ESPOL.



Figura 57. Laboratorios de materiales ESPOL

3.1.2. Caracterización geométrica

3.1.2.1. Resultados de la molienda Etapa 1

La Tabla 28, muestra la evidencia de la molienda en la máquina de los ángeles MAG, donde se describe a detalle el procedimiento realizado.

Tabla 28. Evidencia de la molienda de ZA Etapa 1.

MOLIENDA ETAPA 1	
<p>Inicialmente se tuvo que hacer una limpieza profunda de la máquina MAG, cerciorándose de que estuviera completamente seca para evitar la absorción de humedad en la muestra y a manera de prueba se inicia la molienda en la misma con una de las rocas de la zeolita natural ZA obtenidas de la mina, de peso aproximado 2.5 kg por el lapso de 15 minutos, luego de este</p>	

Figura 58. Material que entra a la MAG.

tiempo se verifica poco material molido por lo que se somete otros 15 minutos de molienda (Figura 58).

Transcurrido los 30 min de molienda se espera 5 min hasta que se asiente el polvo dentro de la máquina. Con el equipo de protección necesario la muestra ZA se retira de la máquina observándose que el material grueso era mucho mayor que el fino. Se procede a retirar las esferas y separar el material grueso del fino mediante el tamiz N° 4 (manualmente), para luego tamizar el material fino por los tamices N° 10 y N° 200 (en la tamizadora 500 g por 15 min) y así obtener el material requerido de 0,075 mm (Figura 59).



Figura 59. Material que sale de la máquina MAG.

Se repite la molienda tres veces más con cantidades de 5 kg de muestra ZA por lapsos de una hora. Antes de cada molienda en la máquina MAG se tritura manualmente con un combo de 2 Kg a las rocas sin moler y las fracciones más gruesas resultantes de las moliendas, las mismas que mostraron una semejanza a cantos rodados por la abrasión que sufre en la máquina MAG. La fuerza aplicada para la trituración es considerable, observándose el desprendimiento de fracciones angulares con vértices filosos (Figura 60).

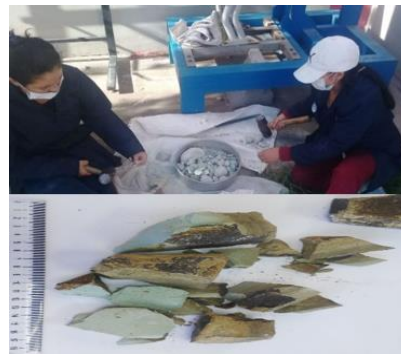


Figura 60. Trituración manual de la muestra ZA

El material resultante del proceso de molienda de la máquina MAG se muestra en la Figura 61, con un total de material de 15415,22 g, donde se puede ver un material mayormente grueso encontrándose partículas con tamaños hasta 9.5 mm (Figura 61).



Figura 61. Material resultante de la etapa 1.

El material resultante es clasificado y preservado en materiales aislantes y frascos herméticos. Mediante una tabla Excel se registra las masas del material por tamaños (Figura 62). Se observa que el material fino ≤ 0.075 mm obtenido es muy poco por lo que se opta por otros métodos como el uso de molinos de los Laboratorios de Ingeniería Mecánica.



Figura 62. Clasificación del material por tamaños.

El material resultante de la molienda en la etapa 1 con la máquina MAG, es clasificado por tamaños registrando sus masas como se observa en la Tabla 29.

Tabla 29. Resultados de pesos y tamaños de ZA obtenidos en la molienda Etapa 1.

TAMIZ	3/8"	N° 4	N° 10	N° 200	FUENTE	Total (g)
Diámetros	(mm)			(mm)		15415,22
	>9.5	4,75-9,5	2-4,75	> 0,075	$\leq 0,075$	
Peso (g)	0	1131,70	477,42	10126,0	3680,10	




En los resultados de la Tabla 29, se puede ver que del 100% del total del material, el que pasa el tamiz de N° 200 (0,075 mm) tan solo representa el 23.87 %, mientras que la mayoría del material es retenido en el tamiz, por lo que se ve necesario el uso de otro equipo de molienda.

3.1.2.2. Resultados de la Etapa 2 de la molienda

Debido a que el material menor al tamiz N° 200 (0,075 mm) obtenido durante el proceso de molienda en la ETAPA 1 representa menos del 25% del total de la muestra ZA, se procede a moler en la máquina MBT. La

Tabla 30, muestra la evidencia de la molienda en el molino de bolas de tambor MBT, donde se describe el proceso realizado.

Tabla 30. Evidencia de la molienda de ZA Etapa2.

MOLIENDA ETAPA 2	
<p>La máquina MBT proporcionada por el Laboratorio de Ingeniería Mecánica es la que mejores características presenta, a esta máquina se le realiza una limpieza a fondo a cada una de sus piezas especialmente la parte interna del tambor donde se va alojar la muestra. Luego de introducir la muestra en el tambor este es cerrado por seguridad, para prevenir que el material se escape del interior se ve necesario cubrir alrededor del tambor con fundas de basura industriales (Figura 63).</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 63. Limpieza y recubrimiento del molino MBT.</i></p>
<p>La Figura 64, muestra el material entrante (parte superior) y material saliente (parte inferior) de las primeras cuatro moliendas especificadas en la Tabla 20, notándose un mejor resultado.</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 64. Material que entra y sale en las cuatro primeras moliendas.</i></p>
<p>Las cuatro últimas muestras de la Tabla 20, fueron molidas al tiempo requerido en la misma. La Figura 65 muestra de la misma manera el material entrante y saliente en cada una (Figura 65).</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Figura 65. Material que entra y sale en las cuatro últimas moliendas.</i></p>

Todas las muestras se tamizan en la serie de tamices Tyler y sus pesos se registran para luego elaborar las gráficas granulométricas y a su vez preservar la muestra que pasa el tamiz de 75 μm (#200). El material sobrante se muele con cantidades alrededor de 2 kg por un tiempo de 2 horas y luego es tamizado por el tamiz de 75 μm para de igual manera preservarlo para los ensayos posteriores.



Figura 66. Tamizado y registro de masas para ensayo granulométrico.

Inicialmente se realizan moliendas en diferentes proporciones, tamaños y tiempos, se realiza el análisis granulométrico de la muestra ZA que permite tener una idea de la graduación del material. El material resultante de la Etapa 1 se divide en rangos de tamaños y cantidades como se muestra en la

Tabla 31. Los resultados de granulometría de cada tamaño se especifican a detalle en el anexo A1 desde la Tabla 69 a Tabla 76. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA8-P120., para las muestras ZA1-G40, ZA2-G60, ZA3-G60, ZA4-M40, ZA5-M60, ZA6-P60, ZA7-P60 y ZA8-P120, respectivamente, un total de ocho muestras, las cuales se denominaron así de acuerdo a los rangos de tamaño, cantidad de material y tiempo de molienda.

Tabla 31. Resumen de Ensayos Granulométricos

Ensayado por:		Verónica Salcedo & Paúl Fernández			Norma:		ASTM C-33/ASTM C-136		
Tamaño muestra (mm)		<9,5 y >4,75- (G)			<4.75 y > 2 (M)		< 2 y > 0,075 (P)		
Cantidad de muestra (g)		300						1000	
Tiempo de molienda (min)		40	60	60	40	60	60	60	120
Abertura		ZA1-G40	ZA2-G60	ZA3-G60	ZA4-M40	ZA5-M60	ZA6-P60	ZA7-P60	ZA8-P120
Tamiz	mm	% que pasa							
3/8"	9,50	100	100	100	100	100	100	100	100
N°4	4,75	37,33	40,25	47,08	100	100	100	100	100
N°8	2,36	36,93	40,01	46,54	100	100	100	100	100
N°16	1,18	36,76	40,01	46,30	99,73	99,62	99,90	99,83	99,99
N°30	0,59	36,46	39,24	45,19	98,09	98,16	97,68	99,09	99,22
N°50	0,30	33,55	32,70	37,93	88,14	85,63	81,07	93,47	93,67
N°100	0,15	23,73	18,90	16,87	66,34	51,41	50,49	78,95	72,23
N°200	0,075	7,67	3,57	2,26	28,38	21,00	11,45	15,34	10,14
Modulo de Finura MF		3,95	3,89	3,60	0,48	0,65	0,71	0,29	0,35

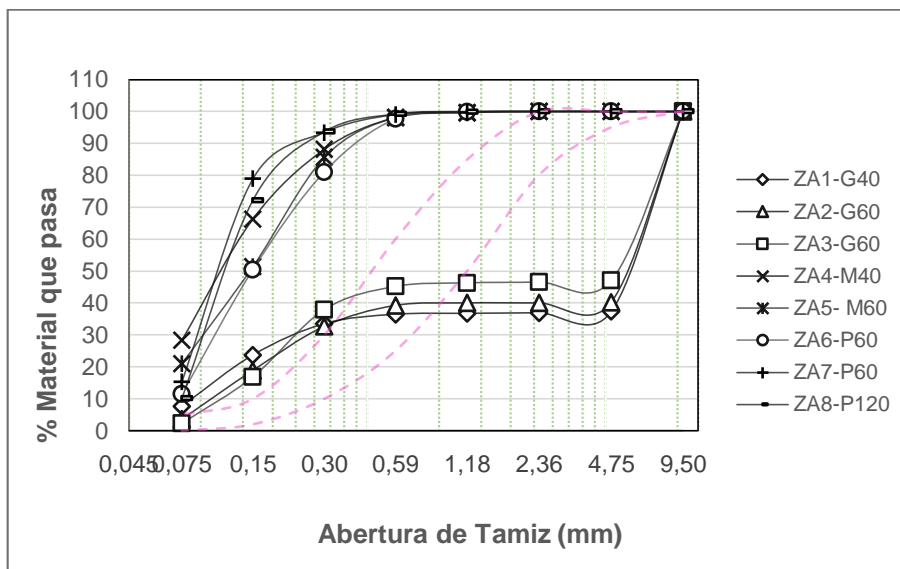


Figura 67. Curvas Granulométricas.

La Figura 67, muestra las curvas granulométricas de cada ensayo donde se aprecia junto con la

Tabla 31, que los rangos de tamaños $<9,5 \text{ mm}$ y $> 4,75 \text{ mm}$ tienden a un material grueso más del 50% de las partículas, mientras que para los otros rangos de tamaño menores a $4,75 \text{ mm}$ el material tiende a un material muy fino de características arcillosas sin embargo, el material de mayor porcentaje que pasa el tamiz N° 200 ($0,075 \text{ mm}$) es de 28,38 % para la muestra ZA4-M40 con una cantidad molida de 300g, un rango de tamaño $<4,75 \text{ mm}$ y $> 2 \text{ mm}$ y un tiempo de molienda de 40 minutos. Por otra parte, el material con el rango de menor tamaño ($<2 \text{ mm}$ y $> 0,075 \text{ mm}$) a pesar de aumentar cantidad y tiempo de molienda disminuye el porcentaje de material que pasa el tamiz N° 200 ($0,075 \text{ mm}$), lo cual probablemente se debería a la atracción electrostática entre partículas demasiado finas. También se puede observar que las muestras presentan porcentajes iguales en las aberturas de tamices de $0,59 \text{ mm}$ (N°16), $1,18 \text{ mm}$ (N° 30), $2,36 \text{ mm}$ (N° 50) y $4,75 \text{ mm}$ (N° 100) de material que pasa, para las muestras ZA1-G40, ZA2-G60 y ZA3-G60 de aproximadamente el 100% y en las muestras ZA4-M40, ZA5-M60, ZA6-P60, ZA7-P120 y ZA8-P120 es de aproximadamente el 50%

Adicionalmente se calcula los módulos de finura en cada una de las muestras ZA con la siguiente fórmula:

$$MF = \frac{\sum \% \text{ retenidos acumulados en los tamices normados}}{100}$$

El módulo de finura tiene un valor mayor a 3 para las muestras ZA1-G40, ZA2-G60 y ZA3-G60, y un módulo de finura menor a 1 para el resto de las muestras. El módulo de finura no debe confundirse del índice de finura, ya que el módulo independientemente de la cantidad de tamices usados siempre va a ser el mismo, sin embargo, puede dar una idea de la finura del material generalmente usado en los agregados, así para un agregado fino el valor óptimo está entre 2.50 y 3, mientras que para el agregado grueso el módulo de finura es mayor a 3 dependiendo de su tamaño máximo. Con respecto a lo anteriormente mencionado se podría decir que la zeolita natural ZA se considera un material grueso en las muestras ZA1-G40, ZA2-G60 y ZA3-G60 con valores de 3,95, 3,89 y 3,60 y muy fino en las demás (tipo arcilla).

Tabla 32. Molienda de material restante 1.

Ensayado por:	Paúl Fernandez & Verónica Salcedo		Fecha molienda:	31/1/2020	
Tamaño de muestra: (mm)	< 2 y > 0,075		Fecha tamizado:	6/2/2020	
Peso antes molida: (g)	2542,00	Tiempo molida: (min)	120		
Peso después molida: (g)	2541,56	Tiempo tamizado: (min)	1000g/90 min		
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
N°200	0,075	1350,17	1350,17	53,20%	46,80%
fuelle	-	1187,68	2537,85	100,00%	-

Material en Fuente: 46.80 %

Pérdida: 0.15 %

Tabla 33. Molienda de material restante 2.

Ensayado por:	Paúl Fernandez & Verónica Salcedo		Fecha molienda:	31/1/2020	
Tamaño de muestra: (mm)	< 2 y > 0,075		Fecha tamizado:	6/2/2020	
Peso antes molida: (g)	2190,00	Tiempo molida: (min)	120		
Peso después molida: (g)	2186,00	Tiempo tamizado: (min)	1000g/90 min		
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
N°200	0,075	1220,73	1220,73	56,17%	43,83%
fuelle	-	952,58	2173,31	100,00%	-

Material en Fuente: 43.83 %

Pérdida: 0.58 %

El módulo de finura tiene un valor mayor a 3 para las muestras ZA1-G40, ZA2-G60 y ZA3-G60, y un módulo de finura menor a 1 para el resto de las muestras. El módulo de finura no debe confundirse del índice de finura, ya que el módulo independientemente de la cantidad de tamices usados siempre va a ser el mismo, sin embargo, puede dar una idea de la finura del material generalmente usado en los agregados, así para un agregado fino el valor óptimo está entre 2.50 y 3, mientras que para el agregado grueso el módulo de finura es mayor a 3 dependiendo de su tamaño máximo. Con respecto a lo anteriormente mencionado se podría decir que la zeolita natural ZA se considera un material grueso en las muestras ZA1-G40, ZA2-G60 y ZA3-G60 con valores de 3,95, 3,89 y 3,60 y muy fino en las demás (tipo arcilla).

Tabla 32 y Tabla 33 muestran las últimas moliendas realizadas con el material retenido en los tamices mayores al N° 200 (0,075 mm), en cantidades aproximadas a 2000 g, con un tiempo de molienda de 120 minutos y un tiempo de tamizado de 90 minutos por cada 1000g de material donde se alcanza porcentajes cercanos al 50% de material que pasa el tamiz N° 200 (0,075 mm). En total el material obtenido con la finura requerida sobrepasa los 6000 g.

3.1.3. Resultados de la Caracterización Morfológica

Las muestras de cemento y aluminosilicatos se caracterizaron mediante el microscopio electrónico de barrido, inicialmente se prepararon las muestras como se describen en el capítulo II debido a que no son un material conductor. El microanálisis para la obtención de la imagen SEM de cada muestra se realiza el 28 de febrero de 2020 en las mismas condiciones a 15 keV con una magnificación de 2000X.

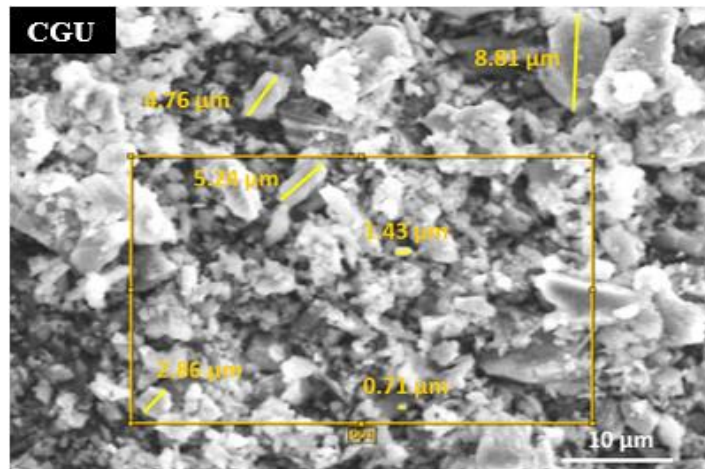


Figura 68. Micrografía SEM Cemento CGU.

La Figura 68, muestra la morfología del cemento CGU donde se observan partículas en forma de láminas planas, sueltas e irregulares con aristas en parte agudas y otras sutilmente redondeadas, el tamaño promedio de estas partículas es de $3.97 \mu\text{m}$, los tamaños de estas partículas varían entre $0.71 \mu\text{m}$ y $8.81 \mu\text{m}$, aunque se podría encontrar partículas mucho más pequeñas que $0.5 \mu\text{m}$.

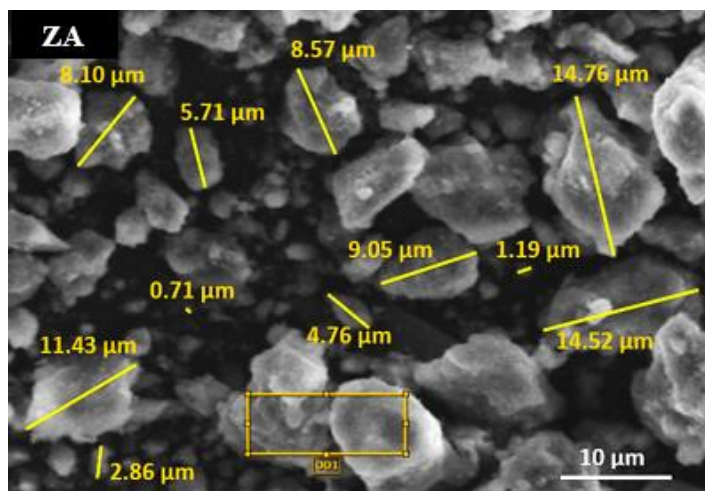


Figura 69. Micrografía SEM de la zeolita ZA.

La morfología del aluminosilicato ZA (Figura 69) muestra estructuras poliédricas sueltas, despejadas y dispersas, se observan partículas con superficies irregulares de apariencia vidriosa con aristas sutilmente redondeadas, el tamaño promedio de las partículas es de $7.42 \mu\text{m}$, los tamaños de las partículas varían entre $0.71 \mu\text{m}$ y $14.76 \mu\text{m}$, donde partículas

desde 5 μm en adelante se ven más latentes. ZA presenta estructuras poliédricas y cubicas de bordes y superficies irregulares de varios tamaños (entre 5 y 20 un)

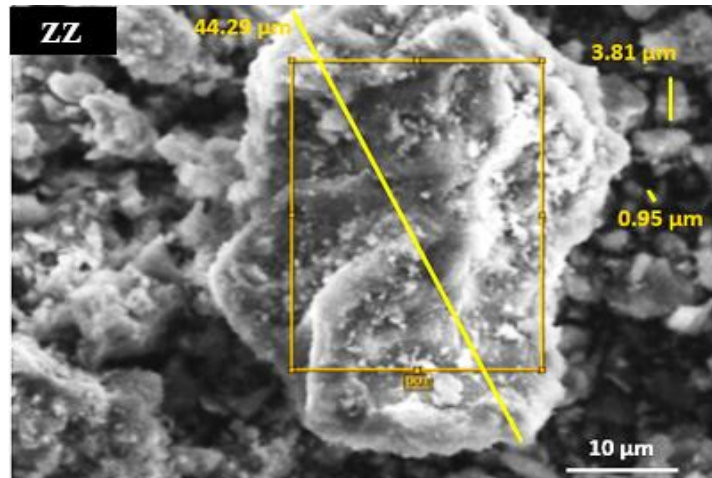


Figura 70. Micrografía de la zeolita ZZ.

La micrografía de la Figura 70, muestra la estructura del aluminosilicato ZZ donde se observan granulos sueltos amorfos de textura vidriosa cuya superficie esta cubierta de partículas muy pequeñas. El tamaño promedio de las partículas es de 16.35 μm , los tamaños de estos granulos van entre 0.95 μm hasta 40.95 μm la partícula de mayor tamaño.

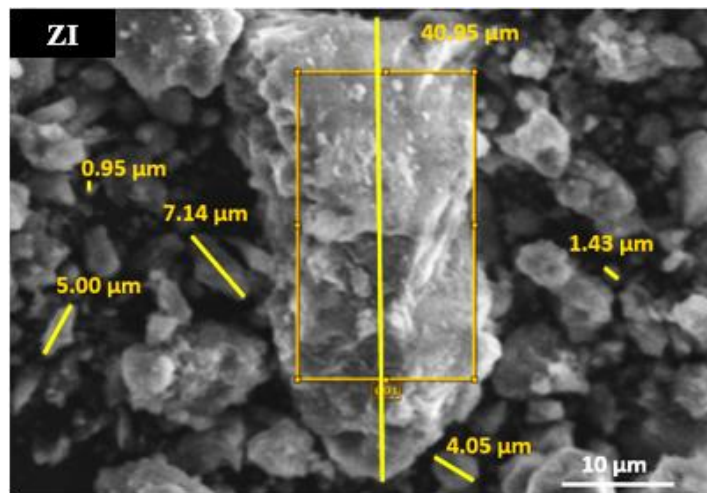


Figura 71. Micrografía SEM de la zeolita ZI.

La Figura 71, permite observar la morfología del aluminosilicato ZI la cual se asemeja al aluminosilicato ZZ donde se muestran granos cristalinos amorfos sueltos con

superficie rugosa y aglomeraciones de partículas más finas en su superficie, estos gránulos muestran bordes en su mayoría redondeados. El tamaño promedio de las partículas es de 9.92 μm , los tamaños de las partículas varían entre 0.95 μm y 40.95 μm .

En general las micrografías de las zeolitas naturales por MEB muestran que el tamaño de las partículas se encuentra por debajo de 45 μm observándose que la partícula de mayor tamaño es de la muestra ZZ de 44,29 μm (93 mm), mientras que las partículas más pequeñas se visualizan en el cemento CGU con partículas menores e iguales a 10 μm .

3.1.4. Resultados de la Caracterización Química

Los espectros de la composición química de las muestras se obtienen al igual que las micrografías mediante el microscopio electrónico de barrido IT100LA a 15 keV, a través del detector de rayos X. Este ensayo proporciona información de la composición elemental másica y atómica en porcentaje tanto del cemento como de los aluminosilicatos con los que se puede determinar la relación Si/Al de cada una de las muestras.

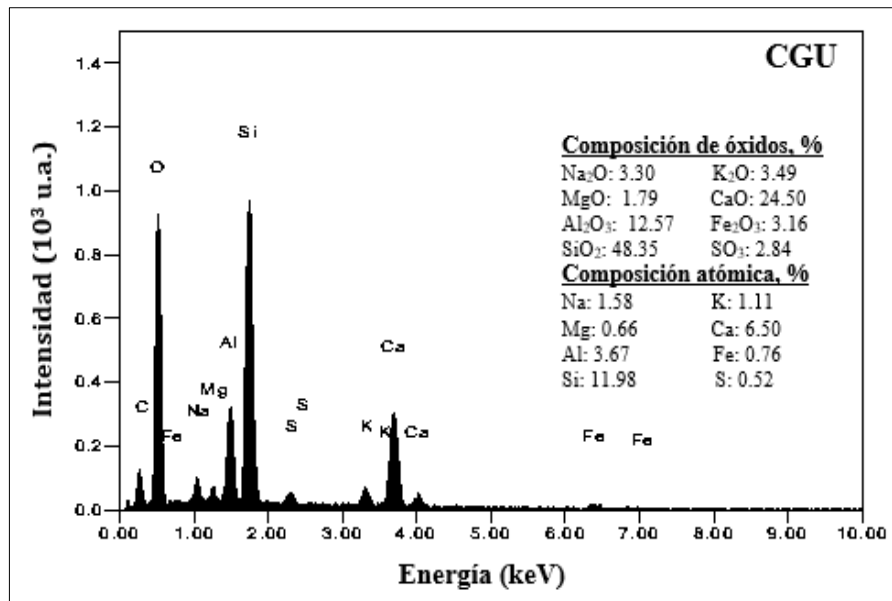


Figura 72. EDS del cemento CGU.

En la Figura 72, se muestra el espectro EDS de la composición química elemental del cemento CGU, con una tasa de conteo de 1429.00 CPS se muestra el pico más alto es para

el silicio con una intensidad muy cercana a 1×10^3 mientras que el aluminio representa la tercera parte del pico del silicio aproximadamente 0.35×10^3 , bajando en orden de intensidad seguido se encuentra al calcio de valor aproximado al del aluminio. De igual manera se muestra la intensidad en forma descendente en picos mucho más bajos de la presencia de sodio, potasio, magnesio, azufre y hierro.

Tabla 34. Porcentaje de elementos químicos en la muestra CGU.

Elemento	Masa %	Átomos %	Si/Al
C	4,92	17,35	3,40
O	21,12	55,87	
Na	0,86	1,58	
Mg	0,38	0,66	
Al	2,34	3,67	
Si	7,95	11,98	
S	0,4	0,52	
K	1,02	1,11	
Ca	6,16	6,5	
Fe	1	0,76	
Total	46,15	100	

La Tabla 34, muestra la composición elemental del cemento CGU tanto en porcentaje de masa como en porcentaje de átomos, de los cuales se ha podido calcular la relación silicio-aluminio de la muestra. Descartándose al oxígeno se puede observar una mayor concentración de silicio de 7.95 en porcentaje de masa y 11.98 en porcentaje atómico. El calcio es el segundo elemento con mayor porcentaje másico de 6.16 % y porcentaje atómico de 6.5% atómico, así mismo los otros dos compuestos principales del cemento que son el aluminio y el hierro presentan porcentajes másicos de 2.34 y 1 y atómicos de 3.67 y 0.76, respectivamente.

La composición en óxidos de cada elemento se determina de forma manual para lo cual se aplica los factores de conversión para EDS como se muestra en la Tabla 35. Para calcular el porcentaje de óxido másico se multiplica el factor de conversión por el porcentaje elemental másico correspondiente a cada elemento y para obtener el porcentaje de óxido atómico se multiplica el porcentaje de óxido másico por 100 dividido para el total de los porcentajes de óxidos másicos que componen la muestra.

Tabla 35. Determinación de la composición química de los óxidos del CGU.

Elemento	% másico	Oxido	Factor Ox.	% masico	% atómico
Na	0,86	Na ₂ O	1,348	1,16	3,30
Mg	0,38	MgO	1,6583	0,63	1,79
Al	2,34	Al ₂ O ₃	1,8895	4,42	12,57
Si	7,95	SiO ₂	2,1393	17,01	48,35
K	1,02	K ₂ O	1,2046	1,23	3,49
Ca	6,16	CaO	1,3992	8,62	24,50
Fe	1	Fe ₂ O ₃	1,1113	1,11	3,16
S	0,4	SO ₃	2,4972	1,00	2,84
TOTAL	20,11	-	-	35,18	100,00

Aplicación de las ecuaciones de Bogue:

- Determinación del Silicato tricálcico

$$C_3S = (4,07 * \%CaO) - (7,60 * \%SiO_2) - (6,72 * \%Al_2O_3) - (1,43 * \%Fe_2O_3) - (2,85 * \%SO_3)$$

$$C_3S = (4,07 * 24,50) - (7,60 * 48,35) - (6,72 * 12,57) - (1,43 * 3,16) - (2,85 * 2,84)$$

$$C_3S = -364,81\% \text{ (Inconsistente)}$$

- Determinación del Silicato dicálcico

$$C_2S = (2,867 * \%SiO_2) - (0,7544 * C_3S)$$

$$C_2S = (2,87 * 48,35) - (0,754 * 3 * 24,50 * 48,35)$$

$$C_2S = -2540,74\% \text{ (Inconsistente)}$$

- Determinación del Aluminato tricálcico

$$C_3A = (2,65 * \%Al_2O_3) - (1,69 * \%Fe_2O_3)$$

$$C_3A = (2,65 * 12,57) - (1,69 * 3,16)$$

$$C_3A = 27,97\%$$

- Determinación del Ferro Aluminato tetracálcico

$$C_4AF = (3,04 * 3,16)$$

$$C_4AF = 9,61\%$$

Tabla 36. Comparación de óxidos del cemento CGU con requerimientos y composición típica

Óxido	CGU (%)	Contenido requerido (%)	Composición típica (%)
CaO	24,50	60-67	63
SiO ₂	48,35	17-25	20
Al ₂ O ₃	12,57	3.0-8.0	6
Fe ₂ O ₃	3,16	0.5-6.0	3
MgO	1,79	0.5-4.0	1.5
Na ₂ O y K ₂ O (Álcalis)	3,30-3,49	0.3-1.2	1
SO ₃	2,84	2.0-3.5	2

La Tabla 36, permite ver que la composición en óxidos del cemento CGU a excepción del óxido de magnesio (MgO), el trióxido de dihierro (Fe₂O₃) y el trióxido de azufre SO₃, no cumplen los límites de composición química aproximados del cemento portland especificados en la Tabla 5 del capítulo I de la presente tesis, seguramente por las grandes diferencias encontradas en los valores de los compuestos principales del cemento CGU (altamente silíceo) y cementos portland comunes (altamente cálcico), ya que CGU es un cemento con adiciones puzolánicas, lo que se ve reflejado en el análisis EDS que muestra el mayor valor para el óxido de silicio de 48.35% seguido por el óxido de calcio con el 24.50%, óxido de aluminio de 12.57% y óxido de hierro 3.16%, por el contrario los cementos portland comunes que cumplen requisitos químicos normalizados presentan mayores porcentajes de óxido de calcio. Por lo tanto, no es posible usar las ecuaciones de Bogue ya que una sutil variación en los óxidos que componen el cemento está demostrado que influye en los valores de los compuestos principales del cemento [29], sin embargo, los valores determinados de C3A y C4AF fueron 27.97% y 9.60%, mientras que C₃S Y C₂S tuvieron valores inconsistentes, pero se presume que las sumas de estos estén cercanos a 62.43% por la diferencia respecto al 100%.

Por otro lado, Garófalo en su estudio [35], realiza un análisis comparativo de propiedades químicas de ocho cementos comercializados en Ecuador con diferentes contenidos de adiciones (Figura 73), entre ellos el tipo y marca del cemento usado en la presente tesis.

Cemento	Contenido de clinker (%)	Contenido de adiciones (%)
A	53.8	46.2
B	56.5	43.5
C	73.2	26.8
D	65.46	34.54
E	74.8	25.2
F	67.8	32.2
G	61.61	38.39
H	85.6	14.4

Figura 73. Porcentaje estimado de clinker en cada cemento analizado por Garófalo [35].

El análisis de la composición química de los diferentes tipos de cementos ecuatorianos (Figura 74) varían entre sí debido a la materia prima y procesos de fabricación [35]. Los altos contenidos de silicio denotan un cemento con altas adiciones puzolánicas (muestra A y B) que no necesariamente cumplen con los requisitos típicos del cemento portland, pero demuestran altas capacidades de resistencia que superan los requisitos de las normas NTE INEN 490 y NTE INEN 2380 (Figura 75). Además de esto Garófalo concluye que mientras mayor sea el contenido de adiciones menor será su calor de hidratación.

Cemento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MaO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	P ₂ O ₅	P.F	Na ₂ O EQ	TOT.
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
A	37.9	8.95	2.7	37.7	0.9	2.48	1.67	1.59	0.45	0.24	3.0	2.69	97.6
B	32.7	9.45	4.22	41.9	1.44	2.52	0.67	1.21	0.62	0.24	4.0	1.65	98.9
C	27.6	5.93	3.37	52.4	1.07	2.48	0.92	0.84	0.44	0.24	3.4	1.44	98.8
D	27.6	5.93	3.09	51.2	2.41	2.38	1.28	0.87	0.29	0.24	4.9	1.71	100.1
E	27.9	7.1	3.82	51.9	1.98	2.34	0.46	1.4	0.39	0.24	1.6	1.7	99.1
F	30.8	7.98	4.14	48.4	2.06	1.98	0.48	1.54	0.46	0.24	1.2	1.85	99.1
G	30.6	7.98	4.21	48.4	2.12	1.93	0.48	1.47	0.46	0.24	2.2	1.79	100.1
H	19.1	4.23	3.31	62.2	1.75	3.45	0.56	0.48	0.22	0.24	4.4	0.85	100

Figura 74. Composición química de los cementos analizados por Garófalo [35].

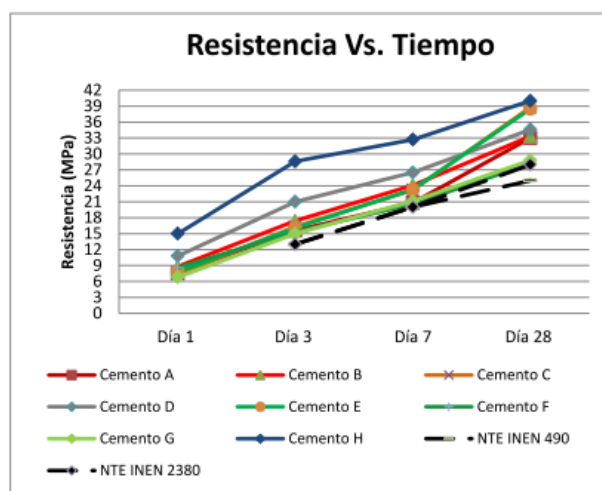


Figura 75. Resistencia a la compresión en cubos de mortero a 1, 3, 7 y 28 días según Garófalo.

Tabla 37. Comparación de porcentajes de óxidos del cemento CGU con otros estudios.

Muestra/Elemento	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	SO ₃
CGU	3,30	1,79	12,57	48,35	3,49	24,50	3,16	2,84
Markiv 2016	0,17	2,41	4,41	20,17	1,02	63,45	2,39	3,21
Najimi et al 2012	0,25	2,6	4,85	21,68	0,71	61,32	4,4	1,9
Vejmelková et al 2012	0,11	1,04	5,6	21,89	0,92	62,33	3,75	2,88

En la Tabla 37 se puede ver una comparación de la composición en óxidos del cemento CGU con otros cementos que se usaron en estudios de sustitución parcial de zeolitas naturales en cemento portland, cuya principal diferencia está en el contenido de calcio y por ende en el contenido de silicio y aluminio, siendo el cemento CGU el único diferente con contenidos silicio-aluminio altos que se debe al contenido de adiciones que éste tiene, en cuanto a los compuestos minoritarios de CGU, respecto a los demás resultados se nota porcentajes levemente más altos Cabe señalar que no se registran estudios con cemento tipo GU en investigaciones con zeolitas naturales y la casi nula información química de este tipo de cemento por parte de fabricantes debido a que no se considera un requisito.

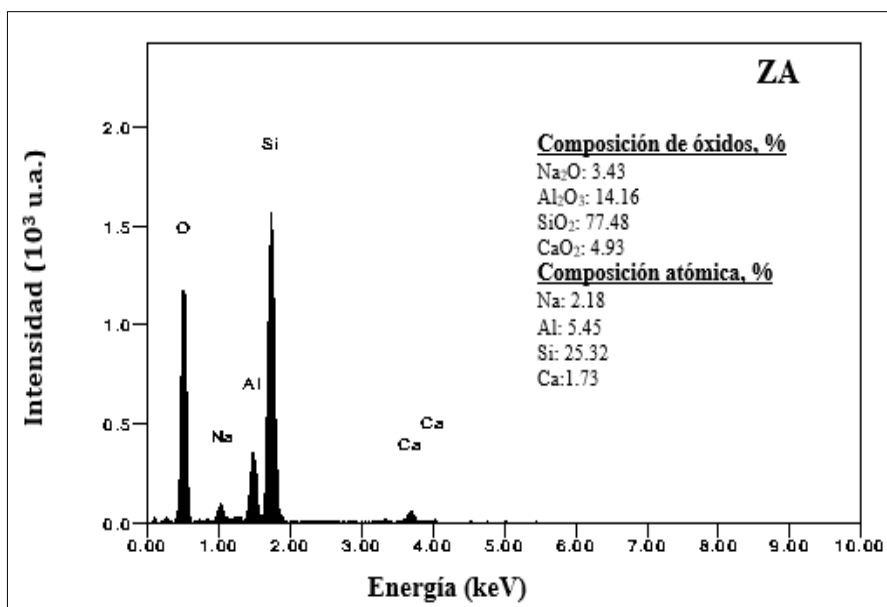


Figura 76. EDS de la zeolita ZA

El espectro EDS de la composición química elemental del aluminosilicato ZA con una tasa de conteo de 1576 CPS se muestra en la Figura 76, donde se observa un pico muy elevado para el silicio con relación a los demás elementos con intensidad aproximada de 1.65×10^3 , también se observa el pico del aluminio que representa aproximadamente la cuarta parte del silicio de intensidad de 0.4×10^3 , además de picos de sodio y calcio más bajos, respectivamente.

Tabla 38. Porcentaje de elementos químicos en la muestra ZA.

Elemento	Masa %	Átomos %	Si/Al
O	17.98	65.33	4.83
Na	0.86	2.18	
Al	2.53	5.45	
Si	12.23	25.32	
Ca	1.19	1.73	
Total	34.79	100.00	

Los porcentajes de la composición elemental másica y atómica del aluminosilicato ZA al igual que su relación Si/Al se muestra en la Tabla 38, donde se observa el porcentaje mayoritario para el silicio tanto másico de 12.23 % y atómico de 25.32%, seguido por el aluminio con valores de 2,53% y 5,45%, másico y atómico, respectivamente; Se registra presencia de calcio y sodio

Tabla 39. Determinación de la composición química de los óxidos de ZA.

Elemento	% másico	Oxido	Factor Ox.	% másico	% atómico
Na	0,86	Na₂O	1,348	1,16	3,43
Al	2,53	Al₂O₃	1,8895	4,78	14,16
Si	12,23	SiO₂	2,1393	26,16	77,48
Ca	1,19	CaO	1,3992	1,67	4,93
TOTAL	16,81	-	-	33,77	100,00

Los óxidos del aluminosilicato ZA se presentan en la Tabla 39, donde se puede ver contenido muy alto de óxido de silicio SiO₂ de 77,48%, de óxido de aluminio (Al₂O₃) de 14,16% y en porcentajes mucho menores contenidos de óxidos de calcio (CaO) y óxido de sodio Na₂O

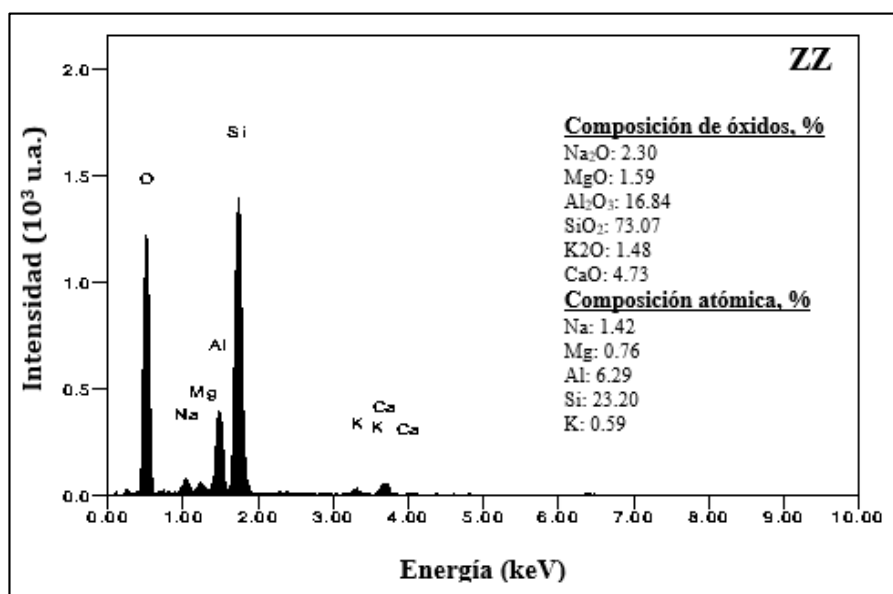


Figura 77. EDS de la zeolita ZZ.

El espectro del aluminosilicato ZZ con tasa de conteo de 1556.00 CPS se muestra en la Figura 77, se puede observar un pico alto de silicio de intensidad cercana a 1.4×10^3 , mientras que el aluminio es el segundo pico en mayor intensidad de 0.4×10^3 , seguido se observa presencia de calcio y sodio con picos de similar intensidad y en menor intensidad magnesio y potasio, respectivamente. La composición porcentual de los elementos químicos del aluminosilicato ZZ tanto másicos como atómicos se presentan en la Tabla

40, además de su relación Si/Al. Descartando al oxígeno el elemento de mayor presencia es el silicio con porcentaje másico de 11.42% y atómico de 23.20%

Elemento	Masa %	Átomos %	Si/Al
O	18.54	66.12	3.83
Na	0.57	1.42	
Mg	0.32	0.76	
Al	2.98	6.29	
Si	11.42	23.20	
K	0.41	0.59	
Ca	1.13	1.61	
Total	35.37	100	

Tabla 40. Porcentaje de elementos químicos en la muestra ZZ.

A diferencia de que la zeolita ZA, la zeolita ZZ presenta elementos como el calcio, sodio, potasio y magnesio (Tabla 40).

Tabla 41. Determinación de la composición química de los óxidos de ZZ.

Elemento	% másico	Oxido	Factor Ox.	% másico	% atómico
Na	0,57	Na₂O	1,348	0,77	2,30
Mg	0,32	MgO	1,6583	0,53	1,59
Al	2,98	Al₂O₃	1,8895	5,63	16,84
Si	11,42	SiO₂	2,1393	24,43	73,07
K	0,41	K₂O	1,2046	0,49	1,48
Ca	1,13	CaO	1,3992	1,58	4,73
TOTAL	16,83			33,44	100,00

De acuerdo a la Tabla 41, la zeolita ZZ presenta porcentajes de óxido de silicio de 73,07%, óxido de aluminio de 16,84% y en porcentajes mucho menores contenidos de óxidos de calcio, óxido de sodio, óxido de potasio y óxido de magnesio.

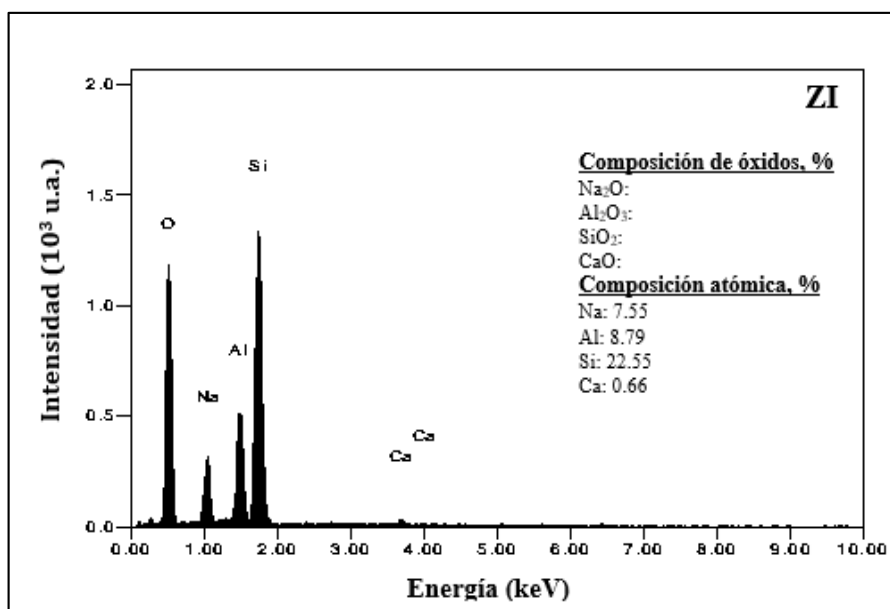


Figura 78. EDS de la zeolita ZI.

En la Figura 78, se observa el espectro del aluminosilicato ZI con una tasa de conteo de 1513.00 CPS, se observan picos de mayor intensidad para el silicio de aproximadamente 1.35×10^3 , bajando en su intensidad se encuentra al aluminio con intensidad cercana a 0.55×10^3 , seguido está el sodio con una intensidad considerable de 0.3×10^3 y finalmente la presencia de calcio en menor intensidad.

Tabla 42. Porcentaje de elementos químicos en la muestra ZI.

Elemento	Masa %	Átomos %	Si/Al
O	16.42	60.44	2.67
Na	2.95	7.55	
Al	4.03	8.79	
Si	10.76	22.55	
Ca	0.45	0.66	
Total	34.61	100.00	

La Tabla 42, muestra porcentualmente la cantidad de masa y átomos de los elementos constitutivos del aluminosilicato ZI, donde se puede ver un 10.76 % en cantidad de masa del silicio y 22.5 % de su composición atómica, de igual manera se presenta una cantidad considerable de sodio de 2.95% y 7.55%, respectivamente, muy cercana a la concentración del aluminio.

La determinación de los óxidos del aluminosilicato ZI se presenta en la Tabla 43.

Tabla 43. Determinación de la composición química de los óxidos de ZI.

Elemento	% másico	Óxido	Factor Ox.	% másico	% atómico
Na	2,95	Na₂O	1,348	3,98	11,28
Al	4,03	Al₂O₃	1,8895	7,61	21,61
Si	10,76	SiO₂	2,1393	23,02	65,32
Ca	0,45	CaO	1,3992	0,63	1,79
TOTAL	18,19			35,24	100,00

La muestra de zeolita ZI está constituida por óxido de silicio 65,32%, óxido de aluminio 21,61%, óxido de calcio de 1,79%, óxido de sodio 11,28%, como se puede apreciar en la Tabla 43.

Análisis comparativo

Relación Silicio-Aluminio

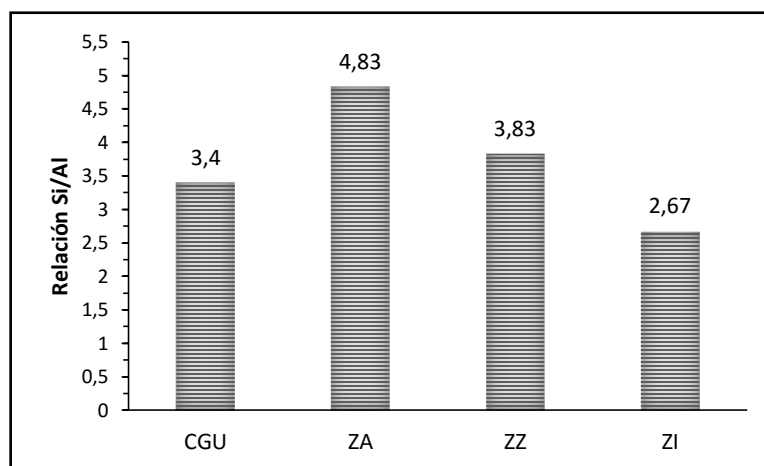


Figura 79. Esquema comparativo de la relación Si/Al del cemento y de los aluminosilicatos.

Las zeolitas naturales ZA y ZZ presentan un mayor valor en la relación Si/Al muy cercanos entre sí con valores de 4,83 y 3,83 pero mayores al cemento CGU que tiene un valor de 3,4 como se muestra en la Figura 79, mientras que el de menor valor es el de la muestra ZI, con 2,67. Por otro lado se observa que todas las zeolitas naturales muestran una relación Si/Al dentro del rango que clasifica a las clinoptilolitas (2-5).

Tabla 44. Composición porcentual elemental del cemento y aluminosilicatos.

Muestra/Elemento	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Fe	S
CGU	1,58	0,66	3,67	11,98	1,11	6,50	0,76	0,52
ZA	2,18	-	5,45	25,32	-	1,73	-	-
ZZ	1,42	0,76	6,29	23,20	0,59	1,61	-	-
ZI	7,55	-	8,79	22,55	-	0,66	-	-

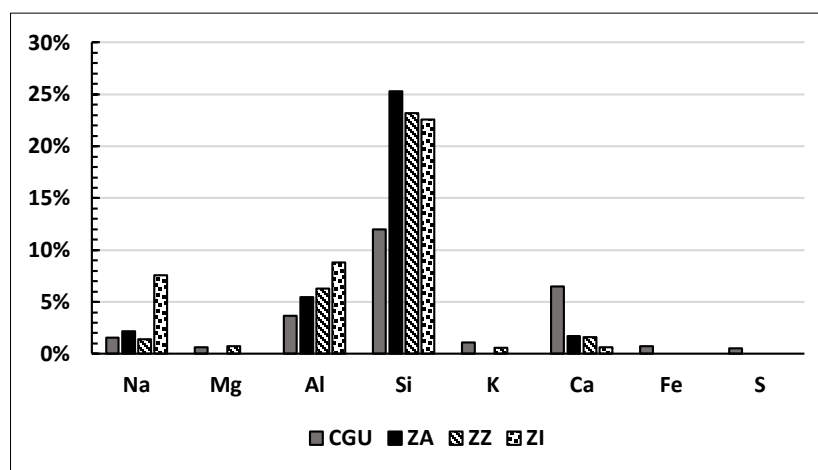


Figura 80. Esquema comparativo de la composición elemental del cemento y aluminosilicatos.

Como se puede ver en la Tabla 44 y Figura 80, los mayores porcentajes de silicio corresponde a las muestras de zeolita natural entre 12% y 23% encabezado por la muestra ZA, siendo el menor valor para el cemento CGU, por otro lado, en contenido de aluminio la muestra ZI está en primer lugar con 8,79 % mientras que las demás tienen valores similares quedando al último también el cemento con 3,67%. El contenido de Sodio también es mayor en la muestra ZI con 7,55%, para las demás muestras se observan cantidades menores al 2,5 %. A diferencia de las zeolitas naturales donde la presencia de calcio esta alrededor del 2%, su presencia en el cemento es más alto con 6,16%, además se detecta en el cemento pequeñas cantidades de magnesio, azufre, potasio y hierro, le sigue la muestra ZZ con elementos detectados en pequeñas cantidades de sodio, magnesio y potasio.

Comparación con óxidos principales en la constitución del cemento

Tabla 45. Composición porcentual de óxidos principales del cemento y aluminosilicatos.

Muestra/Elemento	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃
CGU	48,35	12,57	24,50	3,16
ZA	77,48	14,16	4,93	-
ZZ	73,07	16,84	4,73	-
ZI	65,32	21,61	1,79	-

Figura 81. Comparación de óxidos de las muestras zeolíticas y cemento.

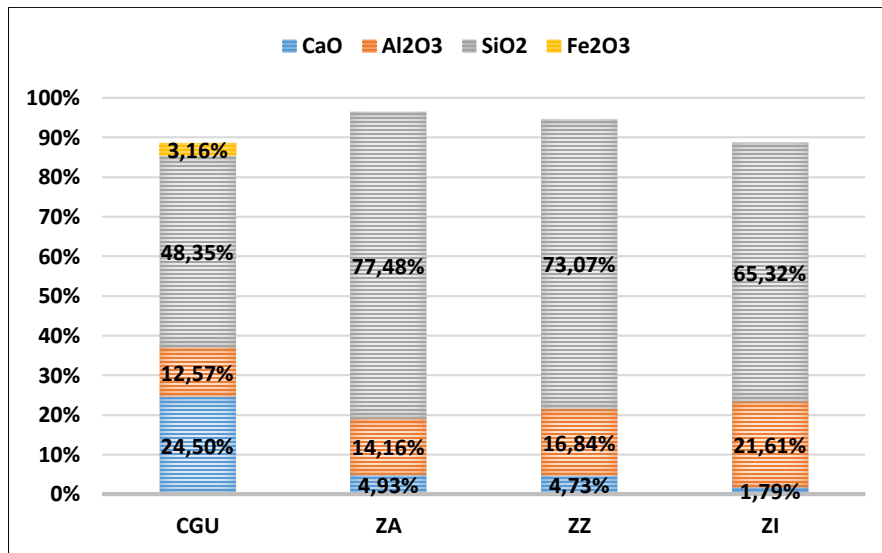


Figura 82. Comparación de los óxidos principales.

En la Figura 82, se observa que las muestras de zeolitas poseen todos los óxidos principales que tiene el cemento a excepción del óxido de hierro, sin embargo, la zeolita ZA excede en contenido de óxido de silicio al cemento aproximadamente en un 30%, la ZZ en un 25% y la ZI en un 17%, tomando en cuenta el alto contenido de este óxido en el cemento CGU respecto a otros cementos portland que son base de estudio con zeolitas. Así mismo las zeolitas naturales superan al cemento en contenidos de óxido de aluminio entre el 2% y el 10% aproximadamente. Por el contrario, se nota una gran diferencia en los contenidos de óxido de calcio con un contenido menor para las zeolitas entre el 2% y 5%, aproximadamente, mientras que el cemento posee un 24,50%.

Comparación con óxidos minoritarios presentes en el cemento CGU

Muestra/Elemento	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	SO ₃
CGU	3,30	1,79	3,49	2,84
ZA	3,43	-	-	-
ZZ	2,30	1,59	1,48	-
ZI	11,28	-	-	-

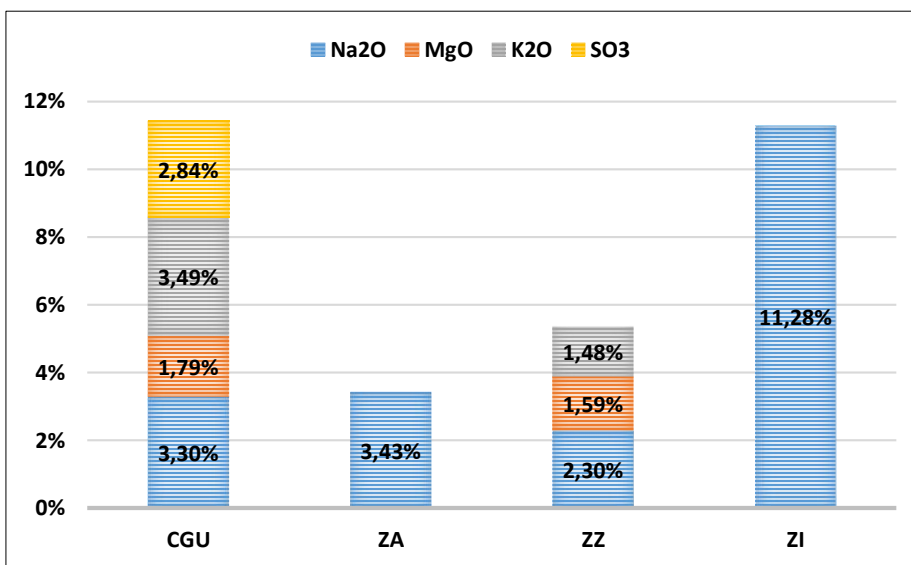


Figura 83. Comparación de los óxidos secundarios.

Se observa en la Figura 83, que los óxidos minoritarios representan máximo el 11,5% y mínimo el 3,43% del total de la muestra, valores para el cemento CGU y zeolita ZA, respectivamente. Se puede ver que las zeolitas ZA y ZI tan solo poseen el óxido de sodio con valores de 3,43% para ZA un valor similar se halla en el cemento CGU de 3,30%, mientras que la zeolita ZI presenta un valor muy alto de 11,28%, respectivamente. Por otro lado, la zeolita ZZ es la que tiene más componentes minoritarios (óxido de sodio, óxido de magnesio y óxido de potasio), que se debería analizar en la influencia que estos aportarían al cemento tomando en cuenta que en el caso del óxido de sodio en el cemento sobrepasa lo requerido para cementos comunes, por otro lado, cabe señalar que el óxido de magnesio en el cemento CGU cumple con los requisitos y de forma segura se puede decir que el contenido encontrado en la zeolita ZA que es similar son compatibles en cuanto a su porcentaje de contenido.

Actividad puzolánica en las zeolitas naturales

Tabla 46. Requerimientos químicos ASTM C-618.

ASTM C-618	ZA	ZZ	ZI
SiO ₃ +AL ₂ O ₃ +FE ₂ O ₃ Mìn 70 (%)	91,64	89,91	86,93
SO ₃ Màx. 4 (%)	0,00	0,00	0,00

El análisis químico EDS permite determinar la capacidad puzolánica de las muestras de zeolitas naturales ya que la norma ASTM C 618 establece que la suma en porcentajes de SiO₂, AL₂O₃ y Fe₂O₃ debe dar como mínimo 70%, los resultados de las tres zeolitas analizadas en el presente proyecto cumplen con la norma como se observa en la Tabla 46. De la misma manera cumplen con el requisito de que el valor en porcentaje del trióxido de sulfuro (SO₃) no debe pasar del 4% ya que en los resultados las zeolitas ZA, ZZ y ZI, tienen un valor nulo en la presencia de este óxido.

3.1.5. Resultados de la Caracterización Física

3.1.5.1. Densidad Real

Calibración del picnómetro

Se nota que mientras varía la temperatura de la gasolina en el picnómetro aforado, el nivel de la gasolina también varía, así mientras la temperatura aumenta el nivel asciende y mientras la temperatura disminuye el nivel de la gasolina desciende con respecto a la marca de aforo, por ende, hay variación en su masa por lo que se ve necesario la calibración del picnómetro para obtener datos confiables. El picnómetro se calibra basándose en el procedimiento especificado en la norma AASHTO T 100 y ASTM D-854, mediante una relación de la masa del picnómetro aforado con la gasolina y la temperatura a la que se encuentra la gasolina. La Tabla 47, registra las masas del conjunto picnómetro más gasolina a diferentes temperaturas, de donde se obtiene la curva de calibración del picnómetro (Figura 84), curva polinómica con la que se obtiene la masa del conjunto picnómetro más gasolina (M5) a cualquier temperatura, dato que sirve para los cálculos de la densidad. La temperatura se reemplaza en la ecuación como valor de x y se obtiene el valor de y que es la masa del conjunto picnómetro más gasolina.

Tabla 47. Resultados de los datos para la calibración del picnómetro.

T (°C)	W (gr)
40	513,25
36	515,09
33	516,37
30	517,28
27	519,11
25	519,68
23,5	520,04
20	521,80
17	522,99

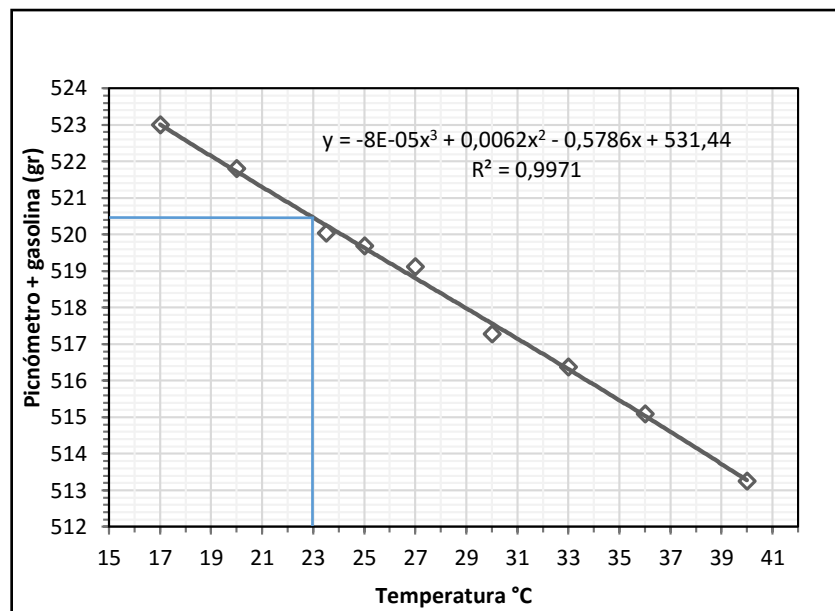


Figura 84. Calibración picnómetro 500 ml

Tabla 48. Densidad real de CGU.



		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL								
TESIS: "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND"										
ENSAYO DE DENSIDAD										
ENSAYADO POR:	Verónica Elizabeth Salcedo Rivera	NORMA	NTE INEN 156 / ASTM C 188-03/AASHTO T- 100; ASTM D 854							
LUGAR:	Laboratorio de Química FICM	MUESTRA	CGU							
FECHA:	14/2/2020	HORA	12:05	12:35	12:45	14:55	13:15	14:40	15:25	13:55
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
T	Temperatura	°C	29	26,5	26	25	24	23	22,5	18,5
M1	Masa del picnómetro	gr	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80
M2	Masa del picnómetro + muestra	gr	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80
M3	Masa del picnómetro + muestra + Gasolina	gr	566,74	567,52	567,85	568,19	568,74	569,14	569,34	570,88
M4=M3-M2	Masa Gasolina Añadida	gr	350,94	351,72	352,05	352,39	352,94	353,34	353,54	355,08
M5	Masa del picnómetro + 500cm ³ Gasolina	gr	517,92	518,97	519,18	519,60	520,02	520,44	520,65	522,35
M6=M5-M1	Masa 500cm ³ Gasolina	gr	366,12	367,17	367,38	367,80	368,22	368,64	368,85	370,55
DG=M6/500cm³	Densidad de la Gasolina	gr/cm ³	0,732	0,734	0,735	0,736	0,736	0,737	0,738	0,741
M7=M6-M4	Masa de la Gasolina desalojada por la muestra	gr	15,18	15,45	15,33	15,41	15,28	15,30	15,31	15,47
MC=M2-M1	Masa de la muestra	gr	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00
VG=M7/DG	Volumen de Gasolina Desalojada	cm ³	20,74	21,04	20,87	20,95	20,75	20,75	20,75	20,88
DRC=MC/VG	Densidad Real de la muestra	gr/cm ³	3,086	3,041	3,067	3,055	3,085	3,084	3,084	3,066
DRP	Densidad Real Promedio	gr/cm ³	3,071							

Tabla 49. Densidad real de ZA.



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



TESIS: "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND"

ENSAYO DE DENSIDAD

ENSAYADO POR:	Verónica Elizabeth Salcedo Rivera	NORMA:	NTE INEN 156 / ASTM C 188-03/AASHTO T- 100; ASTM D 854								
LUGAR:	Laboratorio de Química FICM	MUESTRA	ZA								
FECHA:	6/2/2020	HORA	12:50	13:05	13:18	13:25	13:35	14:10	14:30	15:05	15:35
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9
T	Temperatura	°C	32	30	27	25	24	23,5	23	22	21
M1	Masa del picnómetro	gr	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80
M2	Masa del picnómetro + muestra	gr	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80
M3	Masa del picnómetro + muestra + Gasolina	gr	561,58	562,42	563,74	564,35	564,73	564,94	565,16	565,52	565,92
M4=M3-M2	Masa Gasolina Añadida	gr	345,78	346,62	347,94	348,55	348,93	349,14	349,36	349,72	350,12
M5	Masa del picnómetro + 500cm ³ Gasolina	gr	516,65	517,50	518,76	519,60	520,02	520,23	520,44	520,86	521,28
M6=M5-M1	Masa 500cm ³ Gasolina	gr	364,85	365,70	366,96	367,80	368,22	368,43	368,64	369,06	369,48
DG=M6/500cm³	Densidad de la Gasolina	gr/cm ³	0,730	0,731	0,734	0,736	0,736	0,737	0,737	0,738	0,739
M7=M6-M4	Masa de la Gasolina desalojada por la muestra	gr	19,07	19,08	19,02	19,25	19,29	19,29	19,28	19,34	19,36
MC=M2-M1	Masa de la muestra	gr	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00
VG=M7/DG	Volumen de Gasolina Desalojada	cm ³	26,14	26,09	25,92	26,17	26,19	26,18	26,15	26,20	26,20
DRC=MC/VG	Densidad Real de la muestra	gr/cm ³	2,449	2,453	2,469	2,446	2,443	2,445	2,448	2,443	2,443
DRP	Densidad Real Promedio	gr/cm ³	2,449								

Tabla 50. Densidad real de ZZ.





		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL						
TESIS: "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND"								
ENSAYO DE DENSIDAD								
ENSAYADO POR:	Verónica Elizabeth Salcedo Rivera	NORMA :	NTE INEN 156 / ASTM C 188-03/AASHTO T-100; ASTM D 854					
LUGAR:	Laboratorio de Química FICM	MUESTRA	ZZ					
FECHA:	6/2/2020	HORA	12:15	12:40	12:58	14:05	14:22	14:50
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	E1	E2	E3	E4	E5	E6
T	Temperatura	°C	27	24	23	22	21	17,5
M1	Masa del picnómetro	gr	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80
M2	Masa del picnómetro + muestra	gr	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80
M3	Masa del picnómetro + muestra + Gasolina	gr	564,03	565,25	565,63	566,02	566,60	567,81
M4=M3-M2	Masa Gasolina Añadida	gr	348,23	349,45	349,83	350,22	350,80	352,01
M5	Masa del picnómetro + 500cm ³ Gasolina	gr	518,76	520,02	520,44	520,86	521,28	522,78
M6=M5-M1	Masa 500cm ³ Gasolina	gr	366,96	368,22	368,64	369,06	369,48	370,98
DG=M6/500cm³	Densidad de la Gasolina	gr/cm ³	0,734	0,736	0,737	0,738	0,739	0,742
M7=M6-M4	Masa de la Gasolina desalojada por la muestra	gr	18,73	18,77	18,81	18,84	18,68	18,97
MC=M2-M1	Masa de la muestra	gr	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00
VG=M7/DG	Volumen de Gasolina Desalojada	cm ³	25,52	25,49	25,51	25,52	25,28	25,57
DRC=MC/VG	Densidad Real de la muestra	gr/cm ³	2,507	2,511	2,509	2,507	2,531	2,503
DRP	Densidad Real Promedio	gr/cm ³	2,511					

Tabla 51. Densidad real de ZI.

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL										
TESIS: "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND"										
ENSAYO DE DENSIDAD										
ENSAYADO POR:	Verónica Elizabeth Salcedo Rivera	NORMA:	NTE INEN 156 / ASTM C 188-03/AASHTO T- 100; ASTM D 854							
LUGAR:	Laboratorio de Química FICM	MUESTRA:	ZI							
FECHA:	13/2/2020	HORA:	16:47	16:25	16:10	17:36	17:42	17:47	16:10	15:30
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
T	Temperatura	°C	31	29	27	24	23	22	20	18
M1	Masa del picnómetro	gr	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80	151,80
M2	Masa del picnómetro + muestra	gr	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80	215,80
M3	Masa del picnómetro + muestra + Gasolina	gr	562,26	563,06	564,16	565,03	565,45	565,82	566,85	567,55
M4=M3-M2	Masa Gasolina Añadida	gr	346,46	347,26	348,36	349,23	349,65	350,02	351,05	351,75
M5	Masa del picnómetro + 500cm ³ Gasolina	gr	517,08	517,92	518,76	520,02	520,44	520,86	521,71	522,57
M6=M5-M1	Masa 500cm ³ Gasolina	gr	365,28	366,12	366,96	368,22	368,64	369,06	369,91	370,77
DG=M6/500 cm ³	Densidad de la Gasolina	gr/cm ³	0,731	0,732	0,734	0,736	0,737	0,738	0,740	0,742
M7=M6-M4	Masa de la Gasolina desalojada por la muestra	gr	18,82	18,86	18,60	18,99	18,99	19,04	18,86	19,02
MC=M2-M1	Masa de la muestra	gr	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00	64,00
VG=M7/DG	Volumen de Gasolina Desalojada	cm ³	25,76	25,76	25,35	25,78	25,76	25,79	25,49	25,65
DRC=MC/VG	Densidad Real de la muestra	gr/cm ³	2,485	2,484	2,525	2,482	2,485	2,481	2,511	2,496
DRP	Densidad Real Promedio	gr/cm ³	2,494							

Desviación estándar

Mediante desviación estándar se analizan los resultados de los ensayos de densidad realizados con la gasolina a temperaturas dentro y fuera del rango que especifica la norma como se muestra en la Tabla 52 a la Tabla 55, donde se toman resultados a temperaturas

mayores y menores al rango 23 ± 2 °C , debido a que las diferencias son mínimas en las desviaciones en comparación a los ensayos realizados dentro de este rango y también observándose que cumplen con lo especificado en el numeral 6.1 de la norma ASTM C-188, que la desviación no debe diferir más de 0.03.

Tabla 52. Desviación estándar densidad CGU.

CGU						
T °C	n	xi	xi- \bar{x}	(xi- \bar{x}) ²	SD= $\sqrt{\Sigma(xi-\bar{x})^2/n-1}$	$\bar{x} \pm SD$
29	1	3,086	0,015	0,000	0,017	3,054
26,5	2	3,041	-0,030	0,001		
26	3	3,067	-0,004	0,000		
25	4	3,055	-0,016	0,000		
24	5	3,085	0,014	0,000		3,088
23	6	3,084	0,013	0,000		
22,5	7	3,084	0,013	0,000		
18,5	8	3,066	-0,005	0,000		
-	\bar{x}	3,071	Σ	0,002		

Para el rango 23 ± 2 °C la SD es 0.015

Tabla 53. Desviación estándar densidad ZA.

ZA						
T °C	n	xi	xi- \bar{x}	(xi- \bar{x}) ²	SD= $\sqrt{\Sigma(xi-\bar{x})^2/n-1}$	$\bar{x} \pm SD$
32	1	2,449	0,000	0,000	0,008	2,440
30	2	2,453	0,004	0,000		
27	3	2,469	0,020	0,000		
25	4	2,446	-0,003	0,000		
24	5	2,443	-0,006	0,000		2,457
23	6	2,448	-0,001	0,000		
23,5	7	2,445	-0,004	0,000		
22	8	2,443	-0,006	0,000		
21	9	2,443	-0,006	0,000		
-	\bar{x}	2,449	Σ	0,001		

Para el rango 23 ± 2 °C la SD es de 0.002

Tabla 54. Desviación estándar densidad ZZ.

ZZ						
T °C	n	xi	xi- \bar{x}	(xi- \bar{x}) ²	SD= $\sqrt{\Sigma(xi-\bar{x})^2/n-1}$	$\bar{x} \pm SD$
27	1	2,507	-0,004	0,000	0,010	2,501
24	2	2,511	0,000	0,000		
23	3	2,509	-0,002	0,000		

22	4	2,507	-0,004	0,000		2,521
21	5	2,531	0,020	0,000		
17,5	6	2,503	-0,008	0,000		
-	\bar{x}	2,511	Σ	0,000		

Para el rango 23 ± 2 °C la SD es 0.011

Tabla 55. Desviación estándar densidad ZI

ZI						
T °C	n	xi	xi- \bar{x}	(xi- \bar{x}) ²	SD= $\sqrt{\Sigma(xi-\bar{x})^2/n-1}$	$\bar{x} \pm SD$
31	1	2,485	-0,009	0,000	0,016	2,465
29	2	2,484	-0,010	0,000		
27	3	2,525	0,031	0,001		
24	4	2,482	-0,012	0,000		
23	5	2,485	-0,009	0,000		
22	6	2,481	-0,013	0,000		2,497
20	7	2,511	0,017	0,000		
18	8	2,496	0,002	0,000		
	\bar{x}	2,494	Σ	0,002		

Para el rango 23 ± 2 °C la SD es 0.018

Análisis Comparativo

Cementos tipo GU:

Tabla 56. Comparación de densidades de cementos Tipo GU

Muestra	CGU	Anasi [41]	Martínez [43]	Caiza [44]	Vivas [45]
Frasco normalizado	picnómetro	picnómetro	picnómetro	picnómetro	picnómetro
Densidad (g/cm ³)	3.071	2.85	2.95	2.912	3.00

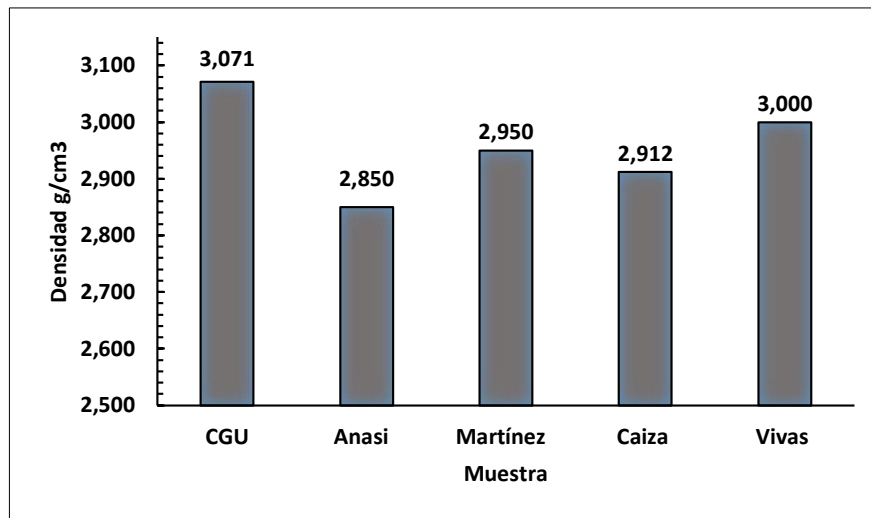


Figura 85. Esquema comparativo de densidades en cementos tipo GU.

La Tabla 56 y Figura 86 muestran densidades bajas para la mayoría de estudios con cemento tipo GU siendo el valor máximo el de la muestra analizada CGU que alcanza un valor de 3,071 g/cm³ siguiéndole el valor de 3,000g/cm³ para la muestra de Vivas, mostrando que los cementos con adiciones tienden a disminuir el valor de su densidad, esta variación seguramente se debe a la cantidad de puzolana que contiene cada uno.

Zeolitas naturales:

Tabla 57. Comparación de varios estudios de densidades de zeolitas naturales.

Muestra	ZA	ZZ	ZI	Sedlmajer	Jacob	Huanca t al
Densidad (g/cm ³)	2,449	2,511	2,494	2,279	2,98	2,269

Se corrobora que las zeolitas naturales presentan densidades bajas, las densidades encontradas en las zeolitas naturales ZA, ZZ y ZI, se encuentran en valores intermedios respecto a otros estudios con otros tipos de zeolitas naturales (Tabla 57), se presume que esta diferencia se debe a las variaciones en su composición química y estructura.

Muestras de estudio

Tabla 58. Resultados del ensayo de densidad de las muestras.

Muestra:	CGU	ZA	ZZ	ZI
Densidad:	3,071	2,449	2,511	2,494

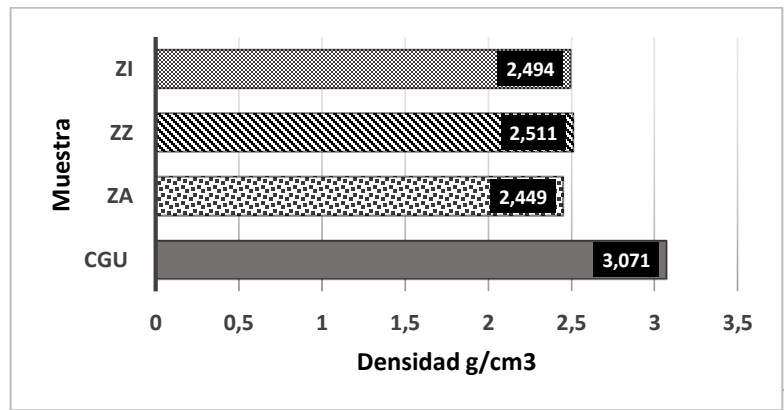


Figura 86. Esquema comparativo de densidades.

La Tabla 58 y la Figura 86, muestran densidades mucho más bajas para los aluminosilicatos ZA, ZI y ZZ con valores de 2,449 g/cm³, 2,494 g/cm³ y 2,511 g/cm³, respectivamente, en comparación con el cemento que presenta una densidad de 3.071 g/cm³, se observa que la menor densidad en los aluminosilicatos la presenta la zeolita natural ZA con 2,449 g/cm³ y que ZZ y ZI presentan densidades cercanas entre sí de 2,494 g/cm³ y 2,511 g/cm³.

Tabla 59. Evidencia del proceso del ensayo de densidad.

Paso 1.- Se calibra el picnómetro para obtener datos confiables de la masa del conjunto picnómetro más gasolina, para esto primero se registra la masa del picnómetro vacío, procurando que el mismo se encuentre limpio y seco por dentro y por fuera. (el peso del frasco perfectamente limpio siempre va a ser el mismo), luego se llena de gasolina hasta antes de la marca de aforo, en posición inclinada y con movimientos suaves se saca todo el aire que contiene, se coloca a baño maría hasta que se equilibre la temperatura con la del baño maría luego se retira del baño maría ajustando con la pipeta el nivel de la gasolina con la marca de



Figura 87. Calibración del picnómetro.

aforo, se seca el picnómetro por fuera y por dentro en el cuello del frasco se pesa el conjunto a una precisión de 0,01 g, registrando la temperatura con el termómetro hasta la mitad de la profundidad del frasco. Se repite el proceso iniciando a temperatura ambiente y luego se va variando con temperaturas más bajas y más altas que la de ambiente, con la finalidad de obtener la curva de calibración mediante la relación de la temperatura y peso del conjunto (Figura 87).

Paso 2.- Se registran las masas de los siguientes conjuntos:

-Picnómetro vacío (M1). - para esto se verifica que el picnómetro este completamente limpio y seco por dentro y por fuera.

-Picnómetro + 64 g de muestra (M2). - al picnómetro previamente limpio y pesado, se introduce los 64 g de la muestra ayudándose de un rollo de papel y un embudo para evitar que las partículas se adhieran al cuello del frasco, luego se pesa verificando que el peso sea el correcto y de ser necesario se rectifica.

-Picnómetro + muestra + gasolina (M3). - se llena de gasolina al conjunto M2 hasta antes de la marca de aforo, luego sosteniendo el picnómetro en posición inclinada se realiza movimientos giratorios suaves por un lapso de 2 minutos para extraer el aire, después con la pipeta se llena el picnómetro hasta la marca de aforo. Se registra la masa del conjunto M3 a diferentes temperaturas de la gasolina



Figura 88. Ensayo de densidad (picnómetro).

<p>haciendo uso del baño maría, tomando en cuenta la especificación de la norma de $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y que el picnómetro este correctamente aforado.</p> <p>-Picnómetro + gasolina (M5).- la masa del conjunto M5 se obtiene de la curva de calibración para la temperatura de cada ensayo con la finalidad de minimizar errores en la determinación de la densidad.</p>	
<p>Paso 3, 4, 5 y 6 Los resultados de densidad son reportados refiriéndose a la precisión especificada en las normas.</p>	

3.1.5.2. *Finura*

Se obtiene los porcentajes de finura de todas las muestras utilizando el método de tamizado seco con el tamiz N° 100 (sin corrección). Los ensayos se basan en las normas ASTM C-184 correspondiente a la normativa NTE INEN 489. Se presentan las desviaciones estándar para los resultados obtenidos en cuatro ensayos, de acuerdo a la norma no se reportan datos de la desviación estándar debido al poco uso de este método, sin embargo, se lo deja a criterio del usuario. Para el presente caso se promedian los resultados de todos los ensayos.

Tabla 60. Resultados de Finura_Método Tamizado Seco CGU.

MÉTODO TAMIZADO SECO		MUESTRA	CGU			
ENSAYADO POR:	Verónica Salcedo Rivera	FECHA	15/1/20 20	11/2/20 20	11/2/20 20	11/2/20 20
NORMA:	NTE INEN 489 / ASTM C-184	HORA	16:35	13:45	14:25	14:55
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	E1	E2	E3	E4
m	Peso de la Material	g	50	50	50	50
#	Repeticiones 1min	NA	3	3	3	3
w (< 0,05)	Peso en fuente por norma	g	0,03	0,03	0,02	0,04
Rs	Peso residuo del material	g	0,02	0,03	0,03	0,02
F	Finura	%	99,96	99,94	99,94	99,96
Pr	Promedio	%	99,95			

Tabla 61. Desviación estándar Finura CGU.

CGU					
n	xi	xi- \bar{x}	(xi- \bar{x}) ²	SD= $\sqrt{\Sigma(xi-\bar{x})^2/n-1}$	$\bar{x}\pm SD$
1	99,96	0,010	0,000	0,009	99,941
2	99,94	-0,010	0,000		
3	99,94	-0,010	0,000		
4	99,96	0,010	0,000		
\bar{x}	99,950	Σ	0,000		99,959

Desviación estándar de 009.

Tabla 62. Resultados de Finura_Método Tamizado Seco ZA.

MÉTODO TAMIZADO SECO		MUESTRA	ZA			
ENSAYADO POR:	Verónica Salcedo R. & Ramiro Fernández A.	FECHA	14/1/20 20	14/1/20 20	14/1/20 20	15/1/20 20
NORMA:	NTE INEN 489 / ASTM-C 184	HORA	9:15	12:35	14:45	8:30
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	E1	E2	E3	E4
m	Peso de la Material	g	50	50	50	50
#	Repeticiones 1min	NA	43	27	19	19
w (< 0,05)	Peso en fuente por norma	g	0,02	0,03	0,01	0,01
Rs	Peso residuo del material	g	0,21	0,59	0,75	0,38
F	Finura	%	99,58	98,82	98,50	99,24
Pr	Promedio	%	99,04			

Tabla 63. Desviación estándar Finura ZA.

ZA					
n	xi	xi-x̄	(xi-x̄) ²	SD= $\sqrt{\Sigma(xi-x̄)^2/n-1}$	x̄±SD
1	99,58	0,545	0,297	0,366	98,669
2	98,82	-0,215	0,046		
3	98,50	-0,535	0,286		
4	99,24	0,205	0,042		
\bar{x}	99,035	Σ	0,671		99,401

Desviación estándar de 0,366

Tabla 64. Resultados de Finura_Método Tamizado Seco ZZ.

MÉTODO TAMIZADO SECO		MUESTRA	ZZ			
ENSAYADO POR:	Verónica Salcedo R. & Ramiro Fernández A.	FECHA	14/1/20 20	14/1/20 20	14/1/20 20	17/1/20 20
NORMA:	NTE INEN 489 / ASTM C	HORA	10:40	13:00	14:10	9:47
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	E1	E2	E3	E4
m	Peso de la Material	g	50	50	50	50
#	Repeticiones 1min	NA	11	11	15	17
w (< 0,05)	Peso en fuente por norma	g	0,03	0,01	0,02	0,01
Rs	Peso residuo del material	g	0,24	0,11	0,16	0,48
F	Finura	%	99,52	99,78	99,68	99,04
Pr	Promedio	%	99,51			

Tabla 65. Desviación estándar Finura. ZZ.

ZZ					
n	xi	xi-x̄	(xi-x̄) ²	SD= $\sqrt{\Sigma(xi-x̄)^2/n-1}$	x̄±SD
1	99,52	0,015	0,000	0,254	99,251
2	99,78	0,275	0,076		
3	99,68	0,175	0,031		
4	99,04	-0,465	0,216		
\bar{x}	99,505	Σ	0,323		99,759

Desviación estándar de 0,254

Tabla 66. Resultados de Finura Método Tamizado Seco ZI.

MÉTODO TAMIZADO SECO		MUESTRA	ZI			
ENSAYADO POR:	Verónica Salcedo R. & Ramiro Fernández A.	FECHA	15/1/20 20	15/1/20 20	15/1/20 20	15/1/20 20
NORMA:	NTE INEN 489 / ASTM C	HORA	8:30	10:35	12:25	12:20
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	E1	E2	E3	E4
m	Peso de la Material	g	50	50	50	50
#	Repeticiones 1min	NA	6	8	6	5
w (< 0,05)	Peso en fuente por norma	g	0,03	0,02	0,04	0,03
Rs	Peso residuo del material	g	0,83	0,20	0,17	0,10
F	Finura	%	98,34	99,60	99,66	99,80
Pr	Promedio	%	99,35			

Tabla 67. Resultados de Finura Método Tamizado Seco ZI

ZI					
n	xi	xi- \bar{x}	(xi- \bar{x}) ²	SD= $\sqrt{\Sigma(xi-\bar{x})^2/n-1}$	$\bar{x} \pm SD$
1	98,34	-1,010	1,020	0,526	98,824
2	99,6	0,250	0,062		
3	99,66	0,310	0,096		
4	99,8	0,450	0,202		
\bar{x}	99,350	Σ	1,381		99,876

Análisis comparativo

Tabla 68. Resultados del ensayo de finura de las muestras

Muestra:	CGU	ZA	ZZ	ZI
Finura:	99,95	99,04	99,51	99,35

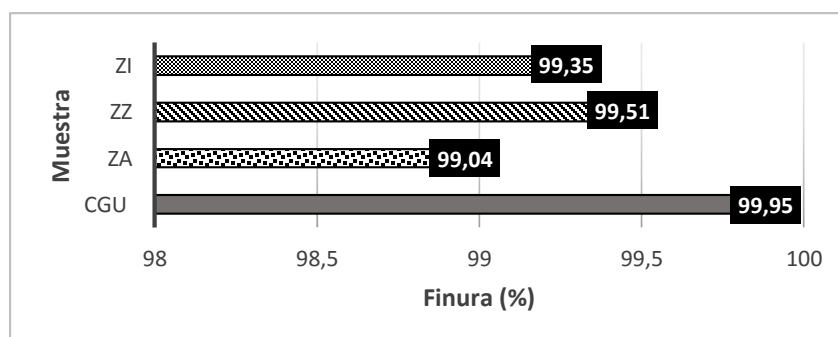


Figura 89. Esquema comparativo de finura.

Todas las muestras de zeolitas naturales poseen porcentajes de finura cercanos al cemento CGU el cual posee una finura de 99,95% con un grado de impurezas de 0.05% mientras que las zeolitas poseen un grado de impurezas máximo del 1% mucho menor al requerido del 5%.

Es necesario indicar que estos valores solo nos proveen información del grado de finura de las partículas por lo que es necesario realizar el ensayo de Blaine que arroja resultados en términos de superficie específica con el cual se puede conocer la influencia de la finura en la velocidad de las reacciones químicas relacionado a las propiedades mecánicas adquiridas, velocidad de hidratación y cambios de volumen.

3.2. Verificación de la hipótesis

Los resultados de la presente investigación indican que la hipótesis “Las zeolitas naturales del Ecuador tienen características morfológicas, físicas y químicas que lo hacen un material idóneo como remplazo en el cemento tipo GU” se cumple ya que las zeolitas naturales ecuatorianas estudiadas poseen una morfología muy parecida a la del cemento que se acercaría mucho más si las muestras son molidas a tamaños menores de 45 μm , las densidades bajas que muestran los aluminosilicatos se asemejan a la de otros estudios con resultados favorables en las propiedades mecánicas del hormigón y morteros, donde se demuestra su factibilidad como sustituto parcial de cemento. Por otro lado, la composición química de los aluminosilicatos respecto al cemento portland tipo GU tienen similitudes que dependen básicamente de su relación Si/Al alto por lo que es compatible, sin embargo, en los elementos minoritarios existe variaciones que podrían influir en el comportamiento de las mezclas, mucho más en las adicionadas en grandes porcentajes, por lo que se debe considerar que el porcentaje de sustitución debe ser bajo.

CAPITULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- Mediante el microanálisis MEB se observan similitudes entre las zeolitas naturales y el cemento en cuanto al tamaño de partículas. La zeolita ZA es la que más se acerca al cemento con partículas por debajo de las 15 μm con una diferencia de aproximadamente 5 μm respecto al cemento CGU, sin embargo, las zeolitas ZZ y ZI podrían mostrar semejanzas en la cantidad de partículas menores a 2 μm .
- Se observa semejanzas en los tamaños, estructuras y texturas de los aluminosilicatos ZZ y ZI ya que las finuras de las dos fueron obtenidas por procesos de molienda industriales.
- El análisis EDS mediante el microscopio electrónico de barrido permite detectar todos los elementos químicos típicos del cemento sin requerir de otros ensayos para su determinación.
- Las zeolitas naturales ZA, ZZ y ZI poseen el porcentaje de sílice que requieren los materiales arcillosos como pizarras esquistos y arcillas en general para ser materias primas para la elaboración del cemento el cual debe estar entre 60% y 70%.
- Las zeolitas naturales analizadas reúnen los óxidos necesarios (CaO ; SiO_2 ; Al_2O_3) a excepción del trióxido de hierro para ser sustituidas en el cemento portland CGU.
- El alto contenido en silicio de las zeolitas naturales ZA y ZZ de 77,48% y 73,07%, respectivamente podría aumentar aún más el contenido de óxido de silicio del cemento CGU mientras que la muestra ZI por tener un menor contenido de este óxido con un valor de 22.55% probablemente puede ser el que obtenga mejores resultados en los análisis mecánicos.

- El bajo contenido de Ca en el cemento CGU impiden la formación de la Alita y Belita en cantidad suficiente para superar las resistencias adquiridas por cementos que, si los tienen en mayor cantidad, por lo cual la zeolita natural ZA y ZZ con presencia de este óxido contribuirá a mejorar esta propiedad ya que contienen 4,93% y 4,73% de este óxido, respectivamente.
- Los cementos por desempeño no se pueden comparar a requisitos químicos de cementos sin adiciones por la composición química diferente que tienen como se lo demuestra en los resultados de esta investigación.
- Todas las zeolitas naturales analizadas en la presente investigación dan indicios de un material apto para ser remplazado parcialmente en el cemento por su alta capacidad puzolánica ya que la suma en porcentajes de SiO₂, Al₂O₃ y Fe₂O superan el mínimo especificado por la norma ASTM C-618 de 70%, se encontró porcentajes de 91.64%, 89.91% y 86.93% para ZA, ZZ y ZI, respectivamente.
- Del mismo modo los aluminosilicatos cumplen con el máximo porcentaje establecido por mencionada norma para el contenido de trióxido de azufre ya que los valores encontrados en las tres muestras ZA, ZZ y ZI fueron nulos.
- Los resultados de las densidades obtenidas en el presente estudio para las zeolitas naturales son de 2,449 g/cm³; 2,511 g/cm³ y 2,494 g/cm³, para ZA, ZZ Y ZI, respectivamente, en relación a las reportadas por otros estudios estas se encuentran en el rango con valores intermedios (Tabla 57).
- Las densidades de las zeolitas naturales relativamente más bajas que el cemento CGU, seguramente son compatibles, ya que se evita sobrepasar los niveles de densidad del cemento establecidas por norma, propiedad fundamental en el diseño de mezclas.
- Los porcentajes de finura de las zeolitas son similares a la del cemento CGU, todas mayores al 99%, cumpliendo con el grado de impurezas admido del 5%.
- En relación a los resultados obtenidos en los diferentes análisis realizados en las zeolitas naturales se concluye que es factible su uso como sustituto parcial del cemento portland tipo GU en porcentajes bajos tomando en cuenta que el

cemento tipo GU ya posee adiciones de material puzolánico.

4.2.Recomendaciones

- Es recomendable realizar otros estudios químicos y físicos de las muestras usadas en esta investigación como por ejemplo la consistencia normal, tiempos de fraguado, Finura aplicando otros métodos, en apoyo a este proyecto para futuras investigaciones realizadas a hormigones y morteros con adiciones de zeolitas naturales
- Se recomienda realizar los ensayos con un control estricto de la temperatura y humedad, para cumplir con requisitos de ensayos y calibración, minimizando el nivel de error.
- Se recomienda preservar las muestras de zeolitas naturales en envases herméticos para evitar que éstas retengan humedad por su alta capacidad de absorción, además de aislarlas de lugares donde se emanen gases ya que podrían verse afectadas sus propiedades químicas.
- Se recomienda al ARCOM se actualice la información sobre la explotación de zeolitas naturales que no concuerda con la proporcionada directamente por los propietarios de las minas.
- Se recomienda tamizar las muestras adquiridas de las procesadoras a la malla especificada por el proveedor ya que estas presentaron impurezas probablemente adquiridas durante el envasado.
- Se recomienda que las sustituciones de los aluminosilicatos en el cemento tipo GU para análisis mecánicos, se prueben con porcentajes pequeños debido a que aumentarían el ya alto contenido de óxido de silicio del cemento.

4.3.Limitaciones del estudio

- Los sucesos de fuerza mayor (Pandemia) suscitados este período han limitado

el uso normal de los laboratorios, impidiendo la culminación de todos los ensayos que se preveían para el cumplimiento total de los objetivos como lo son Vicat para determinar tiempos de fraguado y Blaine para determinar la finura.

- El acceso a equipos para análisis de materiales, ya que el Laboratorio de Ensayo de materiales no se cuenta con todo lo que se requiere para este tipo de análisis.
- Dificultad en el acceso a información, ya que los estudios realizados sobre este tema en el Ecuador son muy escasos.
- Falta de experiencia en los ensayos químicos, ya que estos ensayos se realizan por primera vez en la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.
- El muestreo se ve limitado ya que a excepción de ZA las demás muestras no se pudieron obtener directamente a las minas como verificación de que sea un material libre de impurezas.
- La falta de un acondicionamiento ambiental de los laboratorios, debido a que las temperaturas ambientes variaban drásticamente, lo cual alargó los periodos de ensayos hasta cinco veces más de lo normal debido a que se tenía que esperar a estar en condiciones ambientales que requería la norma para cada ensayo.

4.4.Recomendaciones para futuros estudios

El proyecto investigativo aporta la caracterización y análisis químico y físico de las zeolitas naturales procedentes de Ecuador un material poco difundido en el país en el área de la construcción, por lo que futuras investigaciones en este material ayudaría a aprovechar las bondades que ofrecen estos aluminosilicatos. Seguidamente recomiendan algunas opciones de estudios que pueden desarrollarse para conocer más de este preciado material.

- Influencia de las adiciones de zeolitas naturales ecuatorianas como adición al

cemento en propiedades de durabilidad de productos elaborados con cemento.

- Análisis mecánico en hormigones y morteros con diferentes porcentajes de adiciones de zeolitas naturales en el cemento para conocer el porcentaje óptimo que presente las mejores características mecánicas.
- Influencia de los componentes minoritarios de las zeolitas naturales ZA, ZZ y ZI respecto al cemento en sus propiedades mecánicas

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Mata Cabrera, “La Selección Sostenible De Los Materiales De Construcción,” *Tecnol. Y Desarro.*, vol. 8, pp. 3–7, 2010.
- [2] Federación Interamericana del Cemento, “Informe Estadístico 2013 - FICEM,” 2013.
- [3] T. Markiv, K. Sobol, M. Franus, and W. Franus, “Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite,” *Arch. Civ. Mech. Eng.*, vol. 16, no. 4, pp. 554–562, 2016, doi: 10.1016/j.acme.2016.03.013.
- [4] J. L. Costafreda, J. J. Díaz, and B. Calvo, “Propiedades Físicas, Mecánicas Y Químicas De Algunas Zeolitas Naturales Procedentes De México, Cuba Y España,” *Ponencias y Comun. Present. en el IV Congr. Cuba. Minería (MINERÍA'2011)-IV Conv. Cuba. Ciencias la Tierra-Geociencias 2011*, pp. 3–11, 2011, doi: 10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2012.06.031.
- [5] A. Costafreda Mustelier, Jorge Luis; Martín Sánchez, Domingo Alfonso; Costafreda Velázquez, Jorge Luis; Prado Govea, Raúl; Iván Tobón, Jorge; Álvarez Gutiérrez, Yennifer; Bello Vásquez, Luis Andrés; Vattuone, Maria Elena; Gargiulo, María Florencia; Crosta, S, *las Zeolitas naturales de Iberoamérica*. Madrid: Fundación Gómez Pardo, 2018.
- [6] F. E. Morante Carballo, “Las zeolitas de la costa de Ecuador(Guayaquil):Geología, caracterización y aplicaciones,” Universidad Politécnica de Madrid, 2004.
- [7] B. B. Raggiotti, M. J. Positieri, F. Locati, J. Murra, and S. Marfil, “Zeolite, study of aptitude as a natural pozzolan applied to structural concrete,” *Rev. la Constr.*, vol. 14, no. 2, pp. 14–20, 2015.
- [8] F. Morante, D. Garcés, L. Machiels, A. Mina, and R. Noriega, “Metodología de Investigación para la Prospección de Yacimientos de Zeolitas Naturales de Origen Vulcano Sedimentarios,” *Técnicas aplicadas a la caracterización y aprovechamiento de recursos geológico-mineros*, vol. IV, no. Februar. pp. 1–12, 2013, [Online]. Available: <http://www.igme.es/CYTED/publicaciones/2013.htm>.
- [9] C. Laurino and B. Palmieri, “Zeolite: ‘the Magic Stone’; Main Nutritional, Environmental, Experimental and Clinical Fields of Application.,” *Nutr. Hosp.*, vol. 32, no. 2, pp. 573–581, 2015, doi: 10.3305/nh.2015.32.2.8914.
- [10] F. Morante Carballo, *Zeolitas Naturales del Ecuador: Geología, Caracterización y*

Aplicaciones. 2014.

- [11] M. Nuñez Soca, “USO DE LA ZEOLITA EN CULTIVOS DE IMPORTANCIA ECONOMICA.,” *INFOMIN*, vol. 10, no. 1, pp. 46–56, 2018, doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- [12] J. L. Costafreda Mustelier, *TECTOSILICATOS CON CARACTERÍSTICAS ESPECIALES: LAS ZEOLITAS NATURALES*. 2014.
- [13] D. E. Pérez Silva, “Trabajo Experimental Previo a La Obtención Del,” UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO, 2017.
- [14] U. F. Carreño Sayago, “TRATAMIENTOS DE AGUAS INDUSTRIALES CON METALES PESADOS A TRAVÉS DE ZEOLITAS Y SISTEMAS DE BIORREMEDIACIÓN. REVISIÓN DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN,” *Rev. Ing. Investig. y Desarro.*, vol. 15, no. 1, pp. 70–78, 2015.
- [15] P. K. Huanca, B. Paredes, M. Rodríguez, D. P. Gonzales, T. R. Tejada, and J. E. Chávez, “CARACTERIZACIÓN Y APLICACIÓN DE UNA ZEOLITA NATURAL DE OCUVIRI (PERÚ) PARA LA REMOCIÓN DE Pb (II) EN SOLUCIÓN A NIVEL LABORATORIO CHARACTERIZATION AND APPLICATION OF A NATURAL ZEOLITE OF OCUVIRI (PERU) FOR THE REMOVAL OF Pb (II) IN SOLUTION AT THE LABORAT,” no. October, pp. 0–12, 2018, [Online]. Available: http://www.exeedu.com/publishing.cl/av_cienc_ing/.
- [16] R. Ramírez, A. Véliz, G. Juan, L. Moreno, G. Herrera, and M. Salvatierra, “Reducción de trazas de materia orgánica en agua potable mediante la adsorción con Zeolita Reduction of organic matter traces in drinking water through adsorption with zeolite,” vol. 12, no. 29, pp. 51–62, 2019.
- [17] C. M. Cortes Olano and M. A. Fernandez Carvallo, “INFLUENCIA DE LAS ZEOLITAS Y BIOPOLIMEROS EN EL MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA DE SUELOS DEL SUR, ESTE Y NORTE DE LIMA PARA VÍAS A NIVEL DE AFIRMADO,” Universidad Ricardo Palma, 2015.
- [18] P. Loren, L. Mardones, G. Valdes, A. Calabi-Floody, and E. Sanchez-Alonso, “Evaluación de la durabilidad a fatiga de mezclas semicalientes con adición de zeolita natural y RAP . Evaluation of fatigue durability of warm mix asphalt with addition of natural zeolite and RAP .,” *Rev. Ing. Obras Civiles*, vol. 8, no. 2, pp. 1–16, 2018.
- [19] A. M. Jacob and L. G. Das, “Ecofriendly Concrete by Partial Replacement of

- Cement by Zeolite,” *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.*, vol. 6, no. 5, pp. 8194–8200, 2017, doi: 10.15680/IJRSET.2017.0605157.
- [20] M. Najimi, J. Sobhani, B. Ahmadi, and M. Shekarchi, “An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 35, pp. 1023–1033, 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.038.
- [21] M. Sedlmajer, J. Zach, J. Hroudová, and P. Rovnaníková, “Possibilities of Utilization Zeolite in Concrete,” *Int. Sch. Sci. Res. Innov.*, vol. 9, no. 5, pp. 525–528, 2015.
- [22] E. Vejmelková, T. Kulovaná, M. Keppert, M. Ondráček, and R. Černý, “Natural zeolite as environmentally friendly supplementary cementitious material in concrete,” *WIT Trans. Ecol. Environ.*, vol. 165, pp. 275–285, 2012, doi: 10.2495/ARC120251.
- [23] L. Rodríguez Ortiz, E. G. Adiany, and G. L. Á. V., “COMPORTAMIENTO DEL ENSAYO DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO P 35 PARA DIFERENTES ADICIONES DE ZEOLITA BEHAVIOR OF THE RESISTANCE TEST TO COMPRESSION OF CEMENT P 35 FOR DIFFERENT ADDITIONS OF ZEOLITA,” *Universidad&Ciencia*, vol. 5, no. 1, pp. 73–88, 2016.
- [24] E. Vejmelková, T. Kulovaná, M. Ondráček, and R. Černý, “Application of natural zeolite as supplementary cementitious material in concrete production,” *CESB 2013 PRAGUE .Low-tech high-tech Mater. Technol. Sustain. Build.*, pp. 477–480, 2013.
- [25] S. C. Y. Miguel Ángel Sanjuán Barbudo, *Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland*. 2014.
- [26] Romulo Ochoa L. y Elena Flores B., “Química Del Cemento Parte I,” *Rev. Química*, vol. 8, no. 2, pp. 207–214, 1994.
- [27] I. E. de Normalización, *NTE INEN 151: Cemento. Definición de términos relacionados con el cemento hidráulico*. Quito, 2005.
- [28] Holcim Fuerte, “Ficha técnica-Cemento hidráulico Tipo GU para la construcción en general,” 2018. [Online]. Available: https://www.portaldirecta.com/portaldirecta/ec/CEMENTO_GU_G.pdf.
- [29] A. M. Neville, *Tecnología del Concreto*, Primera ed., vol. 1. México: imcyc, 2013.

- [30] A. Torre C., “Curso Basico de Tecnología Del Concreto para Ingenieros Civiles,” 2004, pp. 1–131.
- [31] B. S. Andrés Peña, Fernanda Pinta, Natalia Angulo, “Infoeconomía INEC,” 9, 2012.
- [32] H. E. S.A., “Nuestros procesos de producción,” Latacunga, 2011. [Online]. Available: <http://holcimecuador.com/sites/default/files/NuestrosProcesosDeProduccion.pdf>.
- [33] FLACEMA, “Proceso de Fabricación,” *El cemento*, 2013. <http://www.flacema.org/el-cemento/proceso-de-fabricacion> (accessed Nov. 21, 2019).
- [34] A. Ponce Aguirre, “Proceso Productivo del Cemento,” *DCPLAYER*, 2018. <https://docplayer.es/71106075-Proceso-productivo-del-cemento.html> (accessed Nov. 26, 2019).
- [35] A. C. Garófalo Mero, “EVALUACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS CEMENTOS A PARTIR DE LA CORRELACIÓN DE SUS PROPIEDADES ASOCIADAS CON LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN,” Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2015.
- [36] I. E. de Normalización, *NTE INEN 2380: Cementos hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*. Quito, 2011.
- [37] L. E. Andrango Chasipanta, “Cemento Fuerte Tipo GU Saco 50 Kg - Holcim - disensa.” https://www.disensa.com.ec/cemento_holcim_fuerte_tipo_gu_saco_50_kg/p (accessed Oct. 17, 2019).
- [38] I. E. de Normalización, *NTE INEN 156: Cemento Hidráulico. Determinación de la densidad*. Quito, 2009.
- [39] C. Martinez, “Picnómetro: Características, Funciones, Tipos - Lifeder,” *Lifeder*. <https://www.lifeder.com/picnometro/> (accessed Jan. 05, 2020).
- [40] “Kyntel Fiola volumetrica con tapa de PP de 500 ml | Equipamiento Cientifico.” <http://www.equipamientocientifico.com/shop/product/kyntel-fiola-volumetrica-con-tapa-de-pp-de-500-ml-6983> (accessed Jan. 23, 2020).
- [41] N. E. Anasi Chango, “Módulo Estático de Elasticidad del Hormigón, en Base a su

Resistencia a la Compresión: $f'c = 28$ MPa, Fabricado con Materiales de la Mina Villacres, Ubicada en el Sector de la Península Cantón Ambato en la Provincia de Tungurahua y Cemento Holcim,” Universidad Central del Ecuador, 2013.

- [42] O. R. Hidalgo Silverio, “Diseño de Hormigones de Alta Resistencia Utilizando Agregados de la Cantera Vega Rivera y Cemento Holcim Fuerte Tipo GU,” Universidad Técnica de Machala, 2018.
- [43] L. J. Martínez Valle, “Análisis Comparativo De La Edad Vs La Resistencia a La Compresión Del Hormigón Elaborado Con Diferentes Marcas De Cementos Portland,” Universidad Técnica de Abato, 2016.
- [44] K. J. Caiza Yungán, “Estudio Comparativo de la Resistencia a Compresión entre el Hormigón ($f'c=240$ kg/cm²), Hormigón con Adición de Microsílice y Hormigón con Adición de Ceniza de Cáscara de Trigo Utilizando Agregados Pertenecientes a la Planta de Trituración ‘Jaime Vaca’ de,” Universidad Técnica de Ambato, 2017.
- [45] K. N. Vivas Villarreal, “Diseño de un Hormigón Liviano Elaborado con Ceniza de Madera como Sustituto Parcial del Agregado Fino,” Universidad Técnica de Ambato, 2016.
- [46] NTE INEN 196:2009, “Cemento hidráulico. Determinación de la finura mediante el aparato de permeabilidad al aire.,” 2009.
- [47] NTE INEN 158, *Cemento Hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado, Método VICAT*. Quito-Ecuador, 2009, pp. 1–12.
- [48] “APARATO DE VICAT MANUAL - PINZUAR,” *PINZUAR*. <https://www.pinzuar.com.co/pinzuar/es/productos/concretos/aparato-vicat-manual/> (accessed Jan. 26, 2020).
- [49] Q. -Ecuador, *NTE INEN 157. Cemento Hidráulico. Determinación de la consistencia normal. Método Vicat*. Quito, 2009, pp. 1–8.
- [50] R. Gayoso and M. Rosell, “Zeolita utilizada como aditivo mineral activo para hormigones,” 2003.
- [51] O. Portilla Zuñiga, “Zeolitas,” 2013. <https://www.slideshare.net/leugim89/zeolitas-28464310> (accessed Oct. 17, 2019).
- [52] 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.
- [53] Mi. J. Jimenez Cedillo, “Caracterización De Minerales Zeolíticos Mexicanos,” Universidad Autónoma del Estado de México, 2004.
- [54] M. Rosell, R. Gallaso, and B. Calvo, “Zeolita como aditivo mineral activo en hormigones de altas prestaciones,” *Bol. Geol. y Min.*, vol. 117, no. 4, pp. 783–792, 2006.
- [55] 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.
- [56] 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, doi: 10.1093/nq/s10-IV.96.358-a.
- [57] Tescan, “VEGA 3SEM: Instructions for Use,” 2013.
- [58] A. Akbar Ramezani pour, *Cement Replacement Materials*. Tehran, 2014.
- [59] A. L. Varela and S. R. Ron, “Geografía y clima del Ecuador,” *Bioweb. Pontificia Universidad Católica del Ecuador*, 2018. <https://bioweb.bio/geografiaClima.html> (accessed May 28, 2020).
- [60] L. Machiels *et al.*, “Zeolite mineralogy of the Cayo formation in Guayaquil Ecuador,” *Appl. Clay Sci.*, no. 42, pp. 180–188, 2008.
- [61] G. Valenzuela, “Análisis comparativo de la resistencia a compresión del hormigón tradicional, con hormigón al emplear zeolita natural en reemplazo parcial del cemento.,” Universidad Técnica de Ambato, 2017.
- [62] ARCOM, “Ecuador ha exportado USD 723 millones en minerales desde 2017 – Agencia de Regulación y Control Minero.” <http://www.controlminero.gob.ec/ecuador-ha-exportado-usd-723-millones-en-minerales-desde-2017/> (accessed May 30, 2020).
- [63] “REDUCCIÓN DE TAMAÑO. MOLINOS.” <https://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo9.pdf> (accessed Jan. 27, 2020).
- [64] E. A. Cabezas Casco, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MOLINO DE BOLAS PARA APLICACIONES DE PULVIMETALURGIA EN LOS

LABORATORIOS DE INGENIERÍA MECÁNICA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO,” Universidad Técnica de Ambato, 2017.

- [65] R. Puerta Tuesta, J. Rengifo Trigozo, and N. Bravo Morales, “ARCGIS BÁSICO,” Tingo María-Perú, 2011.
- [66] J. Martínez Urreaga, A. Narros Sierra, M. de la F. García Soto, F. Pozas Requejo, and V. M. Días Lorente, *Experimentación en Química General*. Madrid: Paraninfo, 2009.
- [67] Z. S.A., “FICHA TÉCNICA CATFERTIL. Catalizador de fertilizantes,” Guayaquil.
- [68] I. I. A. y Minera, “INDAMI- INDAMI ZEOLITA 200,” 2017. <http://indami.com.ec/productos/zeolita-200/> (accessed Jan. 27, 2020).
- [69] S. E. Microscope, “JSM-IT100 Series,” Singapore, 2016.
- [70] Aname, “instrumentación científica,” *Metalizador SC7620*, 2020. <https://microscopiaelectronica.com/index.php/equipos-microscopia-electronica/recubridores/recubridorsputteringbajocoste> (accessed Aug. 05, 2020).
- [71] “Agencia de Regulación y Control Minero.” <http://www.controlminero.gob.ec/#> (accessed Jan. 18, 2020).
- [72] “Sistema Portal de Información Superintendencia de Compañías.” <https://appscvsmovil.supercias.gob.ec/PortalInfor/consultaPrincipal.zul?id=1> (accessed Jan. 18, 2020).

ANEXOS

A. Ensayos.

A1. Caracterización geométrica.

A2. Caracterización Física

B. Archivo fotográfico

A. Ensayos

A1. Caracterización geométrica.

Tabla 69. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA1-G40.



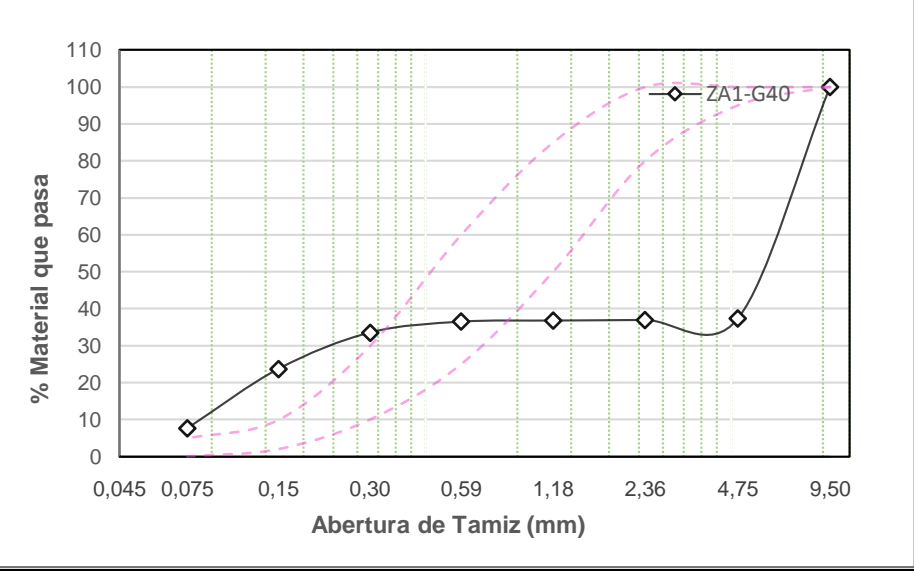
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 					
TESIS: "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND"					
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA					
Ensayado por:	Paúl Fernandez & Verónica Salcedo			Fecha:	29/1/2020
Muestra:	ZA1-G40		Tiempo molida: (min)	40	
Tamaño de muestra: (mm)	4,75-9,5		Tiempo tamizado: (min)	30	
Peso antes molida: (g)	300		Norma:	ASTM C-33 (INEN 872)	
Peso después molida: (g)	298,40			ASTM C-136 (/INEN 696)	
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
3/8"	9,5	0	0	0	100
N°4	4,75	187,00	187,00	62,67	37,33
N°8	2,36	1,20	188,20	63,07	36,93
N°16	1,18	0,50	188,70	63,24	36,76
N°30	0,59	0,90	189,60	63,54	36,46
N°50	0,297	8,70	198,30	66,45	33,55
N°100	0,149	29,30	227,60	76,27	23,73
N°200	0,075	47,90	275,50	92,33	7,67
fuelle	-	22,90	298,40	100,00	-
CURVA GRANULOMÉTRICA					
					
Material en fuente %	7.67	Pérdida %	0.00	MF	3.95

Tabla 70. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA2-G60.



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

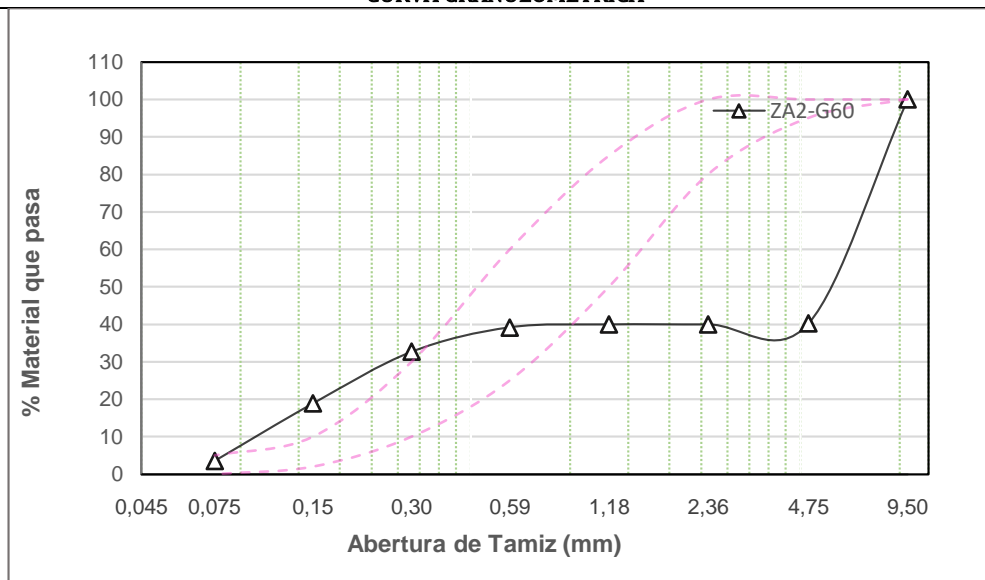


TESIS: "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND"

ENSAYO DE GRANULOMETRÍA

Ensayado por:	Paúl Fernandez & Verónica Salcedo		Fecha:	29/1/2020	
Muestra:	ZA2-G60		Tiempo molida: (min)	40+20	
Tamaño de muestra: (mm)	4,75-9,5		Tiempo tamizado: (min)	30	
Peso antes molida: (g)	300		Norma:	ASTM C-33 (INEN 872)	
Peso después molida: (g)	297,00			ASTM C-136 (/INEN 696)	
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
3/8"	9,5	0	0	0	100
N°4	4,75	177,40	177,40	59,75	40,25
N°8	2,36	0,70	178,10	59,99	40,01
N°16	1,18	0,00	178,10	59,99	40,01
N°30	0,59	2,30	180,40	60,76	39,24
N°50	0,297	19,40	199,80	67,30	32,70
N°100	0,149	41,00	240,80	81,10	18,90
N°200	0,075	45,50	286,30	96,43	3,57
fuelle	-	10,60	296,90	100,00	-

CURVA GRANULOMÉTRICA



Material en fuente %	3.57	Pérdida %	0.03	MF	3.89
-----------------------------	------	------------------	------	-----------	------

Tabla 71. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA3-G60



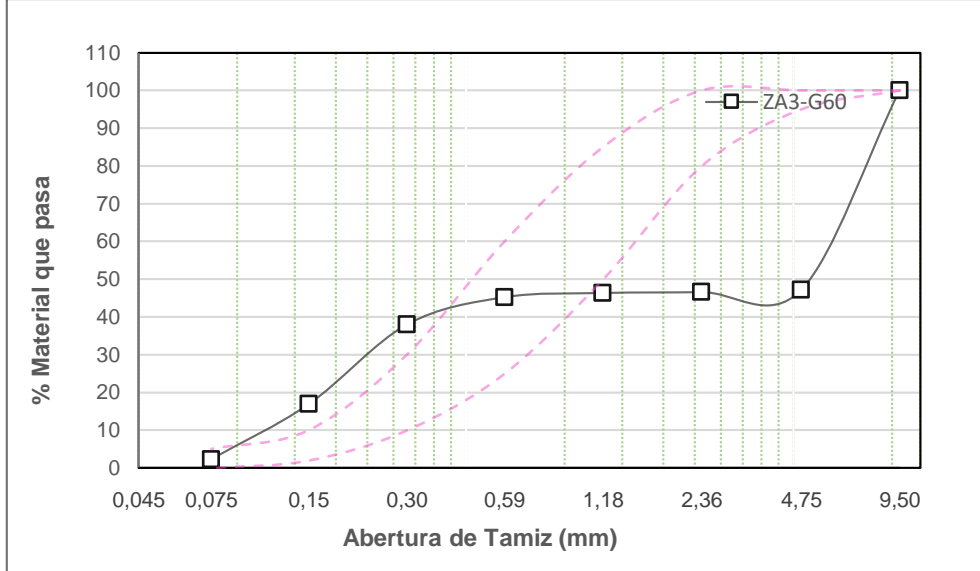
		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS: "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND"					
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA					
Ensayado por:	Paúl Fernandez & Verónica Salcedo			Fecha:	29/1/2020
Muestra:	ZA3-G60		Tiempo molida: (min)	60	
Tamaño de muestra: (mm)	4,75-9,5		Tiempo tamizado: (min)	30	
Peso antes molida: (g)	300		Norma:	ASTM C-33 (INEN 872)	
Peso después molida: (g)	298,30			ASTM C-136 (/INEN 696)	
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
3/8"	9,5	0	0	0	100
N°4	4,75	156,80	156,80	52,92	47,08
N°8	2,36	1,60	158,40	53,46	46,54
N°16	1,18	0,70	159,10	53,70	46,30
N°30	0,59	3,30	162,40	54,81	45,19
N°50	0,297	21,50	183,90	62,07	37,93
N°100	0,149	62,40	246,30	83,13	16,87
N°200	0,075	43,30	289,60	97,74	2,26
fuelle	-	6,70	296,30	100,00	-
CURVA GRANULOMÉTRICA					
					
Material en fuente %	2.26	Pérdida %	0.67	MF	3.60

Tabla 72. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA4-M40.



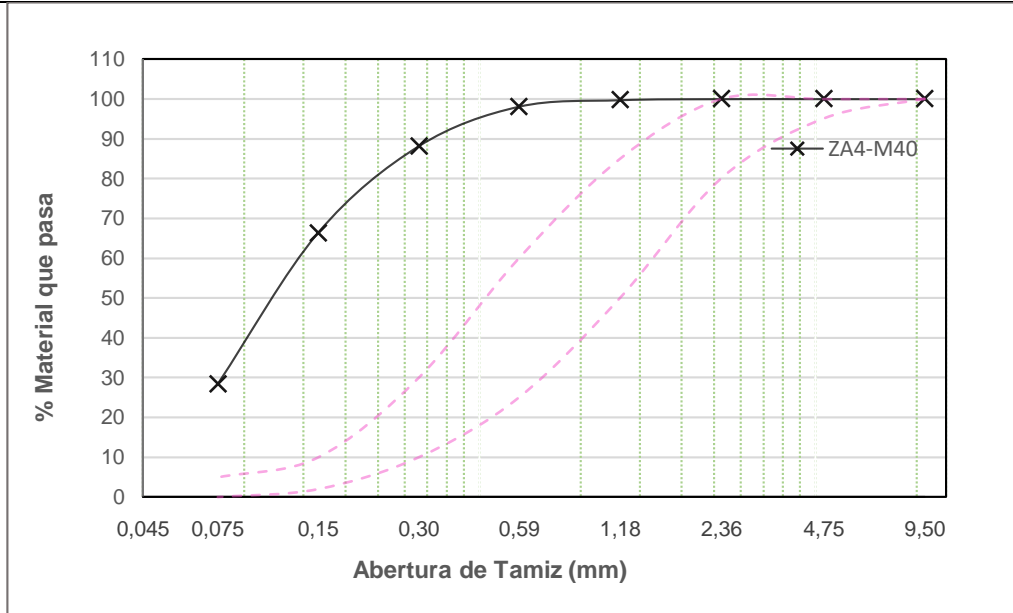
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
TESIS: "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND"					
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA					
Ensayado por:	Paúl Fernandez & Verónica Salcedo		Fecha:	29/1/2020	
Muestra:	ZA4-M40		Tiempo molida: (min)	40	
Tamaño de muestra: (mm)	<4.75 y > 2		Tiempo tamizado: (min)	30	
Peso antes molida: (g)	300		Norma:	ASTM C-33 (INEN 872)	
Peso después molida: (g)	294,70			ASTM C-136 (/INEN 696)	
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
3/8"	9,5	0	0	0	100
N°4	4,75	0	0	0	100
N°8	2,36	0	0	0	100
N°16	1,18	0,80	0,80	0	99,73
N°30	0,59	4,80	5,60	1,91	98,09
N°50	0,297	29,20	34,80	11,86	88,14
N°100	0,149	64,00	98,80	33,66	66,34
N°200	0,075	111,40	210,20	71,62	28,38
fuelle	-	83,30	293,50	100	-
CURVA GRANULOMÉTRICA					
					
Material en fuente %	28.38	Pérdida %	0.41	MF	0.48

Tabla 73. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA5-M60.



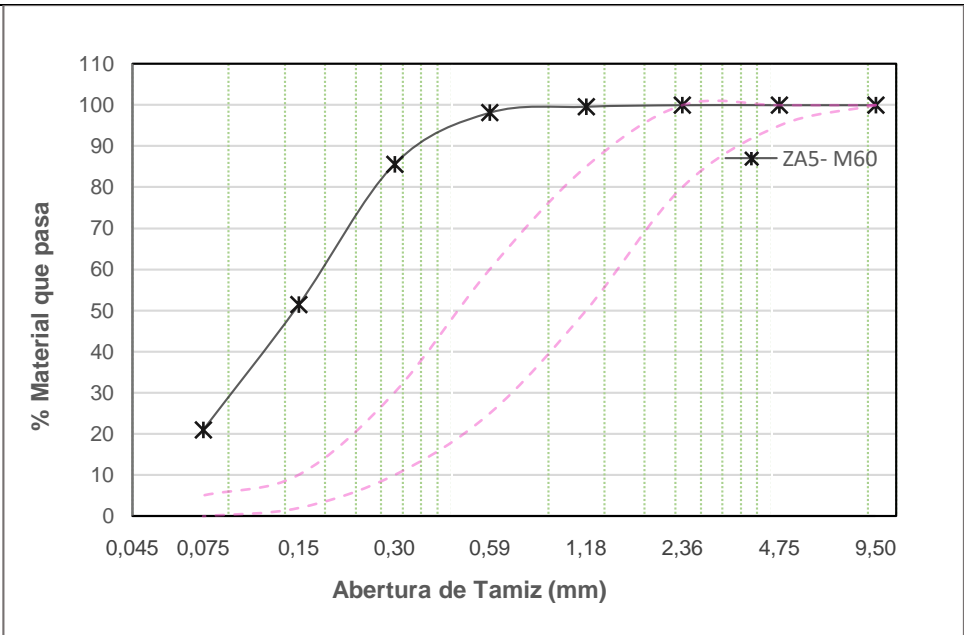
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO ACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL 					
TESIS: "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND"					
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA					
Ensayado por:	Paúl Fernandez & Verónica Salcedo			Fecha:	30/1/2020
Muestra:	ZA5-M60		Tiempo molida: (min)	40+20	
Tamaño de muestra: (mm)	<4.75 y > 2		Tiempo tamizado: (min)	30	
Peso antes molida: (g)	300		Norma:	ASTM C-33 (INEN 872)	
Peso después molida: (g)	294,40			ASTM C-136 (/INEN 696)	
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
3/8"	9,5	0	0	0	100
N°4	4,75	0	0	0	100
N°8	2,36	0	0	0	100
N°16	1,18	1,10	1,10	0,38	99,62
N°30	0,59	4,20	5,30	1,84	98,16
N°50	0,297	36,10	41,40	14,37	85,63
N°100	0,149	98,60	140,00	48,59	51,41
N°200	0,075	87,60	227,60	79,00	21,00
fuelle	-	60,50	288,10	100,00	-
CURVA GRANULOMÉTRICA					
					
Material en fuente %	21.00	Pérdida %	2.14	MF	0.65

Tabla 74. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA6-P60.



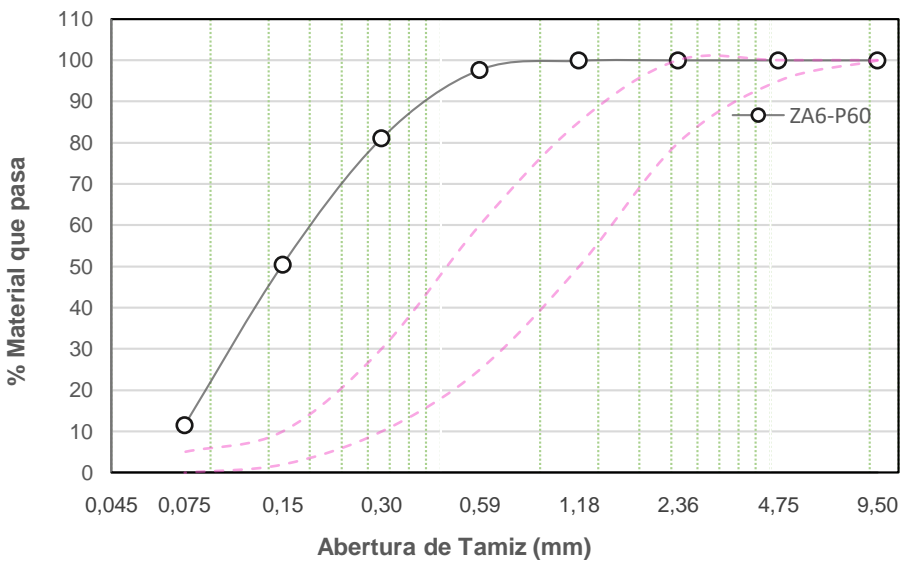
 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO ACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL					
TESIS: "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND"					
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA					
Ensayado por:	Paúl Fernandez & Verónica Salcedo	Fecha:	30/1/2020		
Muestra:	ZA6-P60	Tiempo molida: (min)	60		
Tamaño de muestra: (mm)	< 2 y > 0,075	Tiempo tamizado: (min)	30		
Peso antes molida: (g)	300	Norma:	ASTM C-33 (INEN 872)		
Peso después molida: (g)	299,10		ASTM C-136 (/INEN 696)		
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
3/8"	9,5	0	0	0	100
N°4	4,75	0	0	0	100
N°8	2,36	0	0	0	100
N°16	1,18	0,30	0,30	0	99,90
N°30	0,59	6,60	6,90	2,32	97,68
N°50	0,297	49,50	56,40	18,93	81,07
N°100	0,149	91,10	147,50	49,51	50,49
N°200	0,075	116,30	263,80	88,55	11,45
fuelle	-	34,10	297,90	100	-
CURVA GRANULOMÉTRICA					
					
Material en fuente %	11.45	Pérdida %	0.40	MF	0.71

Tabla 75. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA7-P60.



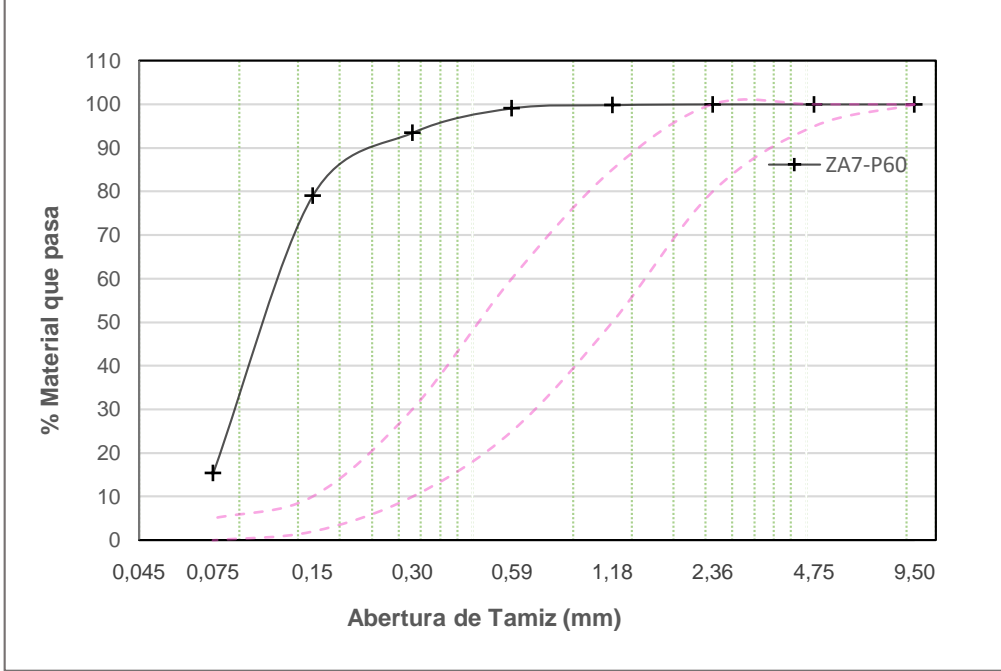


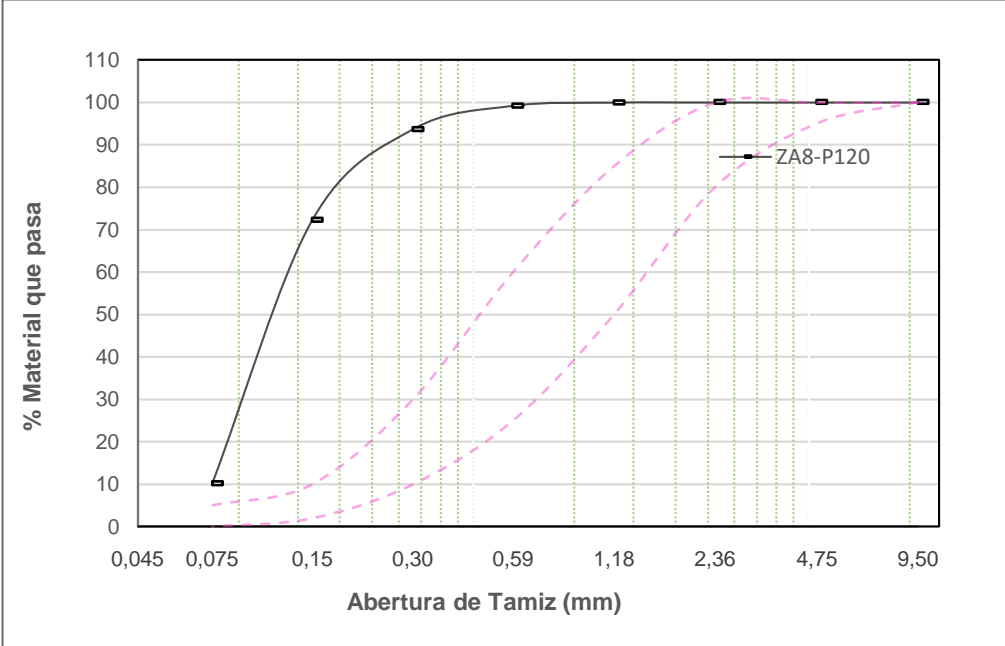
		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS: "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND"					
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA					
Ensayado por:	Paúl Fernandez & Verónica Salcedo			Fecha:	30/1/2020
Muestra:	ZA7-P60		Tiempo molida: (min)	60	
Tamaño de muestra: (mm)	< 2 y > 0,075		Tiempo tamizado: (min)	30	
Peso antes molida: (g)	1000		Norma:	ASTM C-33 (INEN 872)	
Peso después molida: (g)	998,10			ASTM C-136 (/INEN 696)	
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
3/8"	9,5	0	0	0	100
N°4	4,75	0	0	0	100
N°8	2,36	0	0	0	100
N°16	1,18	1,70	1,70	0	99,83
N°30	0,59	7,40	9,10	0,91	99,09
N°50	0,297	55,90	65,00	6,53	93,47
N°100	0,149	144,40	209,40	21,05	78,95
N°200	0,075	633,00	842,40	84,66	15,34
fuelle	-	152,60	995,00	100	-
CURVA GRANULOMÉTRICA					
					
Material en fuente %	15.34	Pérdida %	0.31	MF	0.29

Tabla 76. Resultados ensayo granulométrico de la muestra ZA8-P120.

		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL			
TESIS: "ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ZEOLITA NATURAL (ALUMINOSILICATO) DE TIPO CLINOPTILOLITA PARA REMPLAZO PARCIAL DEL CEMENTO PORTLAND"					
ENSAYO DE GRANULOMETRÍA					
Ensayado por:	Paúl Fernandez & Verónica Salcedo			Fecha:	30/1/2020
Muestra:	ZA8-P120		Tiempo molida: (min)	120	
Tamaño de muestra: (mm)	< 2 y >0,075		Tiempo tamizado: (min)	30	
Peso antes molida: (g)	1000		Norma:	ASTM C-33 (INEN 872)	
Peso después molida: (g)	995,60			ASTM C-136 (/INEN 696)	
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
3/8"	9,5	0	0	0	100
N°4	4,75	0	0	0	100
N°8	2,36	0	0	0	100
N°16	1,18	0,10	0,10	0,01	99,99
N°30	0,59	7,60	7,70	0,78	99,22
N°50	0,297	55,20	62,90	6,33	93,67
N°100	0,149	212,90	275,80	27,77	72,23
N°200	0,075	616,80	892,60	89,86	10,14
fuelle	-	100,70	993,30	100	-
CURVA GRANULOMÉTRICA					
					
Material en fuente %	10.14	Pérdida %	0.23	MF	0.35

A2. Caracterización Física.

EVIDENCIA ENSAYOS DE FINURA MÉTODO SECO

Tabla 77. Ensayo 1_FINURA_Tamizado Seco/ZA

FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 0489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz 100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaj e retenido	Porcentaj e pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250,65	280,88	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	250,65	330,88	50	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	254,67	326,8	45,92	4,02	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	NA	255,21	326,16	45,28	4,56	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	6	256,81	324,83	43,95	6,16	NA	NA	NA
	1	150	6	257,05	324,28	43,4	6,4	0,24	86,8	13,2
	1	150	6	257,48	323,77	42,89	6,83	0,43	85,78	14,22
	1	150	6	258,2	322,97	42,09	7,55	0,72	84,18	15,82
	1	150	6	259,31	321,81	40,93	8,66	1,11	81,86	18,14
	1	150	6	260,74	320,32	39,44	10,09	1,43	78,88	21,12
	1	150	6	262	318,97	38,09	11,35	1,26	76,18	23,82
	1	150	6	263,47	317,43	36,55	12,82	1,47	73,1	26,9
	1	150	6	265	315,89	35,01	14,35	1,53	70,02	29,98
	1	150	6	266,14	314,69	33,81	15,49	1,14	67,62	32,38
	1	150	6	266,96	313,85	32,97	16,31	0,82	65,94	34,06
	1	150	6	267,26	313,53	32,65	16,61	0,3	65,3	34,7
	1	150	6	268,29	312,5	31,62	17,64	1,03	63,24	36,76
	1	150	6	269,27	311,46	30,58	18,62	0,98	61,16	38,84
	1	150	6	269,81	310,9	30,02	19,16	0,54	60,04	39,96
	1	150	6	270,77	309,93	29,05	20,12	0,96	58,1	41,9
	1	150	6	271,53	309,17	28,29	20,88	0,76	56,58	43,42
	1	150	6	272,87	307,81	26,93	22,22	1,34	53,86	46,14
	1	150	6	274,32	306,35	25,47	23,67	1,45	50,94	49,06
	1	150	6	274,96	305,69	24,81	24,31	0,64	49,62	50,38
	1	150	6	275,39	305,26	24,38	24,74	0,43	48,76	51,24
	1	150	6	275,79	304,86	23,98	25,14	0,4	47,96	52,04
	1	150	6	276,09	304,56	23,68	25,44	0,3	47,36	52,64
	1	150	6	277,15	303,49	22,61	26,5	1,06	45,22	54,78
	1	150	6	278,38	302,22	21,34	27,73	1,23	42,68	57,32
	1	150	6	279,12	301,48	20,6	28,47	0,74	41,2	58,8
	1	150	6	279,97	300,64	19,76	29,32	0,85	39,52	60,48
	1	150	6	281,1	299,46	18,58	30,45	1,13	37,16	62,84
	1	150	6	282,59	297,97	17,09	31,94	1,49	34,18	65,82
	1	150	6	283,73	296,82	15,94	33,08	1,14	31,88	68,12
	1	150	6	284,78	295,72	14,84	34,13	1,05	29,68	70,32
	1	150	6	285,72	294,76	13,88	35,07	0,94	27,76	72,24
	1	150	6	287,61	292,92	12,04	36,96	1,89	24,08	75,92
	1	150	6	289,18	291,28	10,4	38,53	1,57	20,8	79,2
1	150	6	290,57	289,9	9,02	39,92	1,39	18,04	81,96	
1	150	6	293,14	287,38	6,5	42,49	2,57	13	87	
1	150	6	295,37	285,12	4,24	44,72	2,23	8,48	91,52	
1	150	6	297,6	282,84	1,96	46,95	2,23	3,92	96,08	
1	150	6	298,57	281,84	0,96	47,92	0,97	1,92	98,08	
1	150	6	299,05	281,37	0,49	48,4	0,48	0,98	99,02	
1	150	6	299,21	281,19	0,31	48,56	0,16	0,62	99,38	
1	150	6	299,27	281,12	0,24	48,62	0,06	0,48	99,52	
1	150	6	299,29	281,09	0,21	48,64	0,02	0,42	99,58	

Tabla 78 Ensayo 2_FINURA_Tamizado Seco/ZA

FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 0489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz 100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250,65	280,88	0		NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	250,65	330,88	50	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	254,95	326,4	45,52	4,3	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	NA	256,07	325,14	44,26	5,42	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	6	257,09	324,12	43,24	6,44	NA	NA	NA
	1	150	6	257,73	323,37	42,49	7,08	0,64	84,98	15,02
	1	150	6	258,13	322,89	42,01	7,48	0,4	84,02	15,98
	1	150	6	259,42	321,63	40,75	8,77	1,29	81,5	18,5
	1	150	6	260,14	320,85	39,97	9,49	0,72	79,94	20,06
	1	150	6	261,04	319,92	39,04	10,39	0,9	78,08	21,92
	1	150	6	264,21	316,75	35,87	13,56	3,17	71,74	28,26
	1	150	6	265,41	315,47	34,59	14,76	1,2	69,18	30,82
	1	150	6	267,6	313,25	32,37	16,95	2,19	64,74	35,26
	1	150	6	268,4	312,47	31,59	17,75	0,8	63,18	36,82
	1	150	6	269,85	310,97	30,09	19,2	1,45	60,18	39,82
	1	150	6	272,16	308,6	27,72	21,51	2,31	55,44	44,56
	1	150	6	273,82	306,95	26,07	23,17	1,66	52,14	47,86
	1	150	6	274,55	306,18	25,3	23,9	0,73	50,6	49,4
	1	150	6	276,95	303,72	22,84	26,3	2,4	45,68	54,32
	1	150	6	279,3	301,36	20,48	28,65	2,35	40,96	59,04
	1	150	6	281,42	299,2	18,32	30,77	2,12	36,64	63,36
	1	150	6	283,09	297,53	16,65	32,44	1,67	33,3	66,7
	1	150	6	284,42	296,16	15,28	33,77	1,33	30,56	69,44
	1	150	6	287,65	292,95	12,07	37	3,23	24,14	75,86
	1	150	6	289,68	290,87	9,99	39,03	2,03	19,98	80,02
	1	150	6	293,57	286,99	6,11	42,92	3,89	12,22	87,78
	1	150	6	295,62	284,78	3,9	44,97	2,05	7,8	92,2
	1	150	6	296,55	283,91	3,03	45,9	0,93	6,06	93,94
	1	150	6	298,15	282,28	1,4	47,5	1,6	2,8	97,2
	1	150	6	298,9	281,49	0,61	48,25	0,75	1,22	98,78
1	150	6	298,93	281,47	0,59	48,28	0,03	1,18	98,82	

Tabla 79 Ensayo 3_FINURA_Tamizado Seco/ ZA

FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 0489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz 100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250,65	280,88	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	250,65	330,88	50	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	260,86	320,65	39,77	10,21	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	NA	261,37	320,07	39,19	10,72	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	6	262,18	319,25	38,37	11,53	NA	NA	NA
	1	150	6	263,2	318,18	37,3	12,55	1,02	74,6	25,4
	1	150	6	264,33	316,97	36,09	13,68	1,13	72,18	27,82
	1	150	6	269,78	311,53	30,65	19,13	5,45	61,3	38,7
	1	150	6	270,74	310,52	29,64	20,09	0,96	59,28	40,72
	1	150	6	272,07	309,2	28,32	21,42	1,33	56,64	43,36
	1	150	6	274,38	306,88	26	23,73	2,31	52	48
	1	150	6	275,67	305,59	24,71	25,02	1,29	49,42	50,58
	1	150	6	281,33	299,9	19,02	30,68	5,66	38,04	61,96
	1	150	6	284,75	296,43	15,55	34,1	3,42	31,1	68,9
	1	150	6	287,51	293,68	12,8	36,86	2,76	25,6	74,4
	1	150	6	289,86	291,34	10,46	39,21	2,35	20,92	79,08
	1	150	6	293,34	287,83	6,95	42,69	3,48	13,9	86,1
	1	150	6	296,91	284,25	3,37	46,26	3,57	6,74	93,26
	1	150	6	298,13	282,99	2,11	47,48	1,22	4,22	95,78
	1	150	6	299,21	281,92	1,04	48,56	1,08	2,08	97,92
	1	150	6	299,37	281,73	0,85	48,72	0,16	1,7	98,3
	1	150	6	299,43	281,64	0,76	48,78	0,06	1,52	98,48
1	150	6	299,44	281,63	0,75	48,79	0,01	1,5	98,5	

Tabla 80. Ensayo 4_FINURA_Tamizado Seco/ ZA

FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 0489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz 100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250,81	281,02	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	250,81	281,02	50	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	255,08	326,76	45,74	4,27	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	NA	257,46	324,35	43,33	6,65	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	6	259,36	322,44	41,42	8,55	NA	NA	NA
	1	150	6	261,43	320,35	39,33	10,62	2,07	78,66	21,34
	1	150	6	263,57	318,18	37,16	12,76	2,14	74,32	25,68
	1	150	6	265,97	315,79	34,77	15,16	2,4	69,54	30,46
	1	150	6	267,76	313,99	32,97	16,95	1,79	65,94	34,06
	1	150	6	270,33	311,41	30,39	19,52	2,57	60,78	39,22
	1	150	6	271,9	309,84	28,82	21,09	1,57	57,64	42,36
	1	150	6	274,26	307,47	26,45	23,45	2,36	52,9	47,1
	1	150	6	276,53	305,17	24,15	25,72	2,27	48,3	51,7
	1	150	6	279,12	302,58	21,56	28,31	2,59	43,12	56,88
	1	150	6	281,14	300,52	19,5	30,33	2,02	39	61
	1	150	6	284,31	297,33	16,31	33,5	3,17	32,62	67,38
	1	150	6	288,13	293,49	12,47	37,32	3,82	24,94	75,06
	1	150	6	290,69	290,93	9,91	39,88	2,56	19,82	80,18
	1	150	6	297,92	283,68	2,66	47,11	7,23	5,32	94,68
	1	150	6	299,85	281,76	0,74	49,04	1,93	1,48	98,52
	1	150	6	300,1	281,49	0,47	49,29	0,25	0,94	99,06
	1	150	6	300,17	281,41	0,39	49,36	0,07	0,78	99,22
1	150	6	300,18	281,4	0,38	49,37	0,01	0,76	99,24	

Tabla 81. Ensayo 1_FINURA_Tamizado Seco/ ZI

FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 0489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz 100	Peso resuido tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje e pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250,81	281,03	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	250,81	331,03	50	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	257,25	324,41	43,38	6,44	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	NA	278,1	303,45	22,42	27,29	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	6	280,71	300,81	19,78	29,9	NA	NA	NA
	1	150	6	286,43	295,05	14,02	35,62	5,72	28,04	71,96
	1	150	6	293,72	287,72	6,69	42,91	7,29	13,38	86,62
	1	150	6	298,21	283,27	2,24	47,4	4,49	4,48	95,52
	1	150	6	299,53	281,88	0,85	48,72	1,32	1,7	98,3
	1	150	6	299,56	281,86	0,83	48,75	0,03	1,66	98,34

Tabla 82. Ensayo 2_FINURA_Tamizado Seco/ ZI

FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 0489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz 100	Peso resuido tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250,78	281,05	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	250,84	330,96	50,00	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	256,54	325,1	44,05	5,76	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	NA	283,51	297,99	16,94	32,73	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	6	288,27	293,21	12,16	37,49	NA	NA	NA
	1	150	6	296,16	285,3	4,25	45,38	7,89	8,5	91,5
	1	150	6	299,53	281,92	0,87	48,75	3,37	1,74	98,26
	1	150	6	299,72	281,68	0,63	48,94	0,19	1,26	98,74
	1	150	6	299,93	281,46	0,41	49,15	0,21	0,82	99,18
	1	150	6	300	281,37	0,32	49,22	0,07	0,64	99,36
	1	150	6	300,08	281,29	0,24	49,3	0,08	0,48	99,52
	1	150	6	300,1	281,25	0,2	49,32	0,02	0,4	99,6

Tabla 83. Ensayo 3_FINURA_Tamizado Seco/ ZI

FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 0489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz 100	Peso resuido tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250,76	281,05	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	250,82	330,96	50,00	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	278,27	303,31	22,26	27,51	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	NA	280,41	301	19,95	29,65	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	6	289,69	291,73	10,68	38,93	NA	NA	NA
	1	150	6	296,19	285,22	4,17	45,43	6,5	8,34	91,66
	1	150	6	299,4	281,95	0,9	48,64	3,21	1,8	98,2
	1	150	6	299,89	281,46	0,41	49,13	0,49	0,82	99,18
	1	150	6	300,07	281,28	0,23	49,31	0,18	0,46	99,54
	1	150	6	300,11	281,22	0,17	49,35	0,04	0,34	99,66

Tabla 84. Ensayo 4_FINURA_Tamizado Seco/ ZI

FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 0489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz 100	Peso resuido tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250,75	281,04	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	250,77	330,98	50,00	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	266,51	315	33,96	15,76	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	NA	279,99	301,38	20,34	29,24	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	6	295,54	285,78	4,74	44,79	NA	NA	NA
	1	150	6	299,71	281,61	0,57	48,96	4,17	1,14	98,86
	1	150	6	300,03	281,25	0,21	49,28	0,32	0,42	99,58
	1	150	6	300,1	281,16	0,12	49,35	0,07	0,24	99,76
	1	150	6	300,13	281,14	0,1	49,38	0,03	0,2	99,8

Tabla 85. Ensayo 1_FINURA_Tamizado Seco/ ZZ

FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 0489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	Peso Fuente	Peso tamiz 100	Peso resuido tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje e retenido	Porcentaje e pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	337,17	284,56	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	337,24	334,48	50	0,00	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	341,60	330,06	45,50	4,43	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	NA	345,25	326,30	41,74	8,08	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	6	355,99	315,53	30,97	18,82	NA	NA	NA
	1	150	6	362,57	308,90	24,34	25,40	6,58	48,68	51,32
	1	150	6	369,96	301,46	16,90	32,79	7,39	33,80	66,20
	1	150	6	373,96	297,31	12,75	36,79	4,00	25,50	74,50
	1	150	6	377,59	293,56	9,00	40,42	3,63	18,00	82,00
	1	150	6	380,97	290,09	5,53	43,80	3,38	11,06	88,94
	1	150	6	383,35	287,65	3,09	46,18	2,38	6,18	93,82
	1	150	6	384,78	286,14	1,58	47,61	1,43	3,16	96,84
	1	150	6	385,37	285,46	0,90	48,20	0,59	1,80	98,20
	1	150	6	385,82	284,93	0,37	48,65	0,45	0,74	99,26
	1	150	6	385,85	284,8	0,24	48,68	0,03	0,48	99,52

Tabla 86. Ensayo 2_FINURA_Tamizado Seco/ ZZ

FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 0489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	Peso Fuente	Peso tamiz 100	Peso resuido tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	337,17	284,56	0,00	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	337,26	334,44	50,00	0,00	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	342,5	329,09	44,53	5,33	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	NA	344,88	326,65	42,09	7,71	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	6	358,37	313,09	28,53	21,2	NA	NA	NA
	1	150	6	368,98	302,45	17,89	31,81	10,61	35,78	64,22
	1	150	6	377,01	293,44	8,88	39,84	8,03	17,76	82,24
	1	150	6	380,7	290,64	6,08	43,53	3,69	12,16	87,84
	1	150	6	383,95	287,31	2,75	46,78	3,25	5,5	94,5
	1	150	6	385,16	286,04	1,48	47,99	1,21	2,96	97,04
	1	150	6	385,55	285,51	0,95	48,38	0,39	1,9	98,1
	1	150	6	385,84	285,16	0,60	48,67	0,29	1,2	98,8
	1	150	6	386,08	284,88	0,32	48,91	0,24	0,64	99,36
	1	150	6	386,23	284,72	0,16	49,06	0,15	0,32	99,68
	1	150	6	386,24	284,67	0,11	49,07	0,01	0,22	99,78

Tabla 87. Ensayo 3_FINURA_Tamizado Seco/ ZZ

FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 0489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	Peso Fuente	Peso tamiz 100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	337,17	284,56	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	337,23	334,43	50,00	0,00	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	340,68	330,9	46,34	3,51	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	NA	342,59	328,93	44,37	5,42	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	6	349,25	322,23	37,67	12,08	NA	NA	NA
	1	150	6	362,3	309,13	24,57	25,13	13,05	49,14	50,86
	1	150	6	371,37	300,03	15,47	34,2	9,07	30,94	69,06
	1	150	6	379,46	291,93	7,37	42,29	8,09	14,74	85,26
	1	150	6	383,09	288,29	3,73	45,92	3,63	7,46	92,54
	1	150	6	383,96	287,36	2,80	46,79	0,87	5,6	94,4
	1	150	6	384,39	286,93	2,37	47,22	0,43	4,74	95,26
	1	150	6	384,94	286,31	1,75	47,77	0,55	3,5	96,5
	1	150	6	385,52	285,76	1,20	48,35	0,58	2,4	97,6
	1	150	6	385,96	285,22	0,66	48,79	0,44	1,32	98,68
	1	150	6	386,11	285,07	0,51	48,94	0,15	1,02	98,98
	1	150	6	386,22	284,96	0,40	49,05	0,11	0,8	99,2
	1	150	6	386,31	284,87	0,31	49,14	0,09	0,62	99,38
	1	150	6	386,39	284,78	0,22	49,22	0,08	0,44	99,56
1	150	6	386,41	284,72	0,16	49,24	0,02	0,32	99,68	

Tabla 88. Ensayo 4_FINURA_Tamizado Seco/ ZZ

FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 0489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	Peso Fuente	Peso tamiz 100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	337,15	284,55	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	337,22	334,47	50	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	345,21	326,43	41,88	8,06	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	NA	349,76	321,8	37,25	12,61	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	6	356,24	315,32	30,77	19,09	NA	NA	NA
	1	150	6	369,58	301,95	17,4	32,43	13,34	34,8	65,2
	1	150	6	374,98	296,5	11,95	37,83	5,4	23,9	76,1
	1	150	6	378,56	292,86	8,31	41,41	3,58	16,62	83,38
	1	150	6	379,89	291,44	6,89	42,74	1,33	13,78	86,22
	1	150	6	381,12	290,15	5,6	43,97	1,23	11,2	88,8
	1	150	6	382,57	288,54	3,99	45,42	1,45	7,98	92,02
	1	150	6	383,49	287,56	3,01	46,34	0,92	6,02	93,98
	1	150	6	383,85	287,12	2,57	46,7	0,36	5,14	94,86
	1	150	6	384,15	286,69	2,14	47	0,3	4,28	95,72
	1	150	6	384,48	286,3	1,75	47,33	0,33	3,5	96,5
	1	150	6	384,83	285,89	1,34	47,68	0,35	2,68	97,32
	1	150	6	384,96	285,75	1,2	47,81	0,13	2,4	97,6
	1	150	6	385,08	285,45	0,9	47,93	0,12	1,8	98,2
	1	150	6	385,16	285,34	0,79	48,01	0,08	1,58	98,42
	1	150	6	385,32	285,07	0,52	48,17	0,16	1,04	98,96
	1	150	6	385,33	285,03	0,48	48,18	0,01	0,96	99,04

B. Archivo fotográfico



Figura 90. Visita del grupo de investigación a la ESPOL con el Dr. Morante.



Figura 91. Grupo investigativo en la mina Zeonatec cantón Isidro Ayora.



Figura 92. Muestras de los estratos de la mina.



Figura 93. Muestras analizadas tamaño 75 μ m.

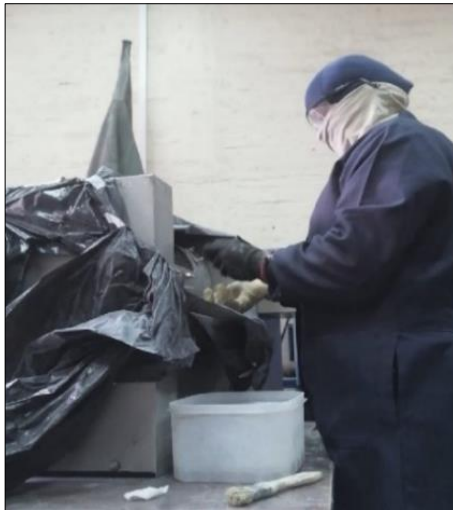


Figura 94. Sacando la muestra del Molino de bolas.



Figura 95. Información del Dr. Morante.



Figura 96. Recorrido por la mina Zeonatec.



Figura 97. Entrada al Laboratorio de Materiales



Figura 98. Muestra ZA en roca.



Figura 99. Producto Mine-Si 200 Zeonatec.



Figura 100. Grupo de Investigación.



Figura 101. Explicación del uso del producto



Figura 102. Registro de puntos en el GPS.



Figura 103. Aprendiendo el uso del aparato de Blaine.



Figura 104. Aprendiendo el uso del aparato de Vicat.