



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

TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO CIVIL

TEMA:

“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ALUMINOSILICATOS EN RELACIÓN CON EL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO IP”

AUTOR: Ramiro Fabian Ramos Peñafiel

TUTOR: Ing. Mg. Wilson Santiago Medina Robalino

Ambato – Ecuador

Febrero - 2021

CERTIFICACIÓN

En calidad de tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, con el tema: **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ALUMINOSILICATOS EN RELACIÓN CON EL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO IP”** elaborado por el Sr. **Ramiro Fabian Ramos Peñafiel**, portador de la cédula de ciudadanía: C.I. 180510764-4, 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.
- ✓ Está concluido en su totalidad.

Ambato, Enero 2021

Ing. Mg. Wilson Santiago Medina Robalino
TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, **Ramiro Fabian Ramos Peñafiel** con C.I. 180510764-4 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente Trabajo Experimental con el tema **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ALUMINOSILICATOS EN RELACIÓN CON EL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO IP”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del trabajo de investigación, a excepción de las referencia bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Febrero 2021



Ramiro Fabian Ramos Peñafiel
C.I. 180510764-4
AUTOR

© DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este Proyecto Técnico 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, Febrero 2021



Ramiro Fabian Ramos Peñafiel
C.I. 180510764-4
AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por el estudiante Ramiro Fabian Ramos Peñafiel de la carrera de Ingeniería Civil bajo el tema **“ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ALUMINOSILICATOS EN RELACIÓN CON EL CEMENTO PUZOLÁNICO TIPO IP”**.

Ambato, Febrero 2021

Para constancia firman:

Ph.D. Diana Carolina Coello Fiallos
Miembro del Tribunal

Ing. Mg. Favio Paúl Portilla Yandún
Miembro del Tribunal

DEDICATORIA

Dedico mi trabajo de investigación a Dios por brindarme salud y valentía para continuar día tras día para alcanzar un objetivo más de mi proyecto de vida.

A mi madre, por apoyarme durante toda mi vida estudiantil y estar pendiente de mi todo el tiempo.

A mis tías Sara, Rocío, por acogerme en su hogar cuando llegue a esta ciudad y brindarme su apoyo incondicional siempre con el corazón abierto para cualquier necesidad.

A mis primos, Pablo, Francisco, Alejandro con quienes compartí gran parte de mi vida y guiarme por un buen camino.

A mi padre por apoyarme durante el tiempo que compartimos juntos.

A mi hermana Erika, por estar al pendiente de mí y ser la persona que me acompañó desde que iniciamos esta travesía de estudiar para ser mejores personas.

A mis abuelit@s por siempre aconsejarme para ser un buen ser humano y profesional, enseñándome valores como humildad, respeto y solidaridad hacia los demás.

“Elaborar un plan y asegurar el éxito es una de las mayores satisfacciones que un hombre inteligente y capaz puede experimentar” (Henry Fyol)

Fabian Ramos

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento infinito todos los docentes de la carrera de Ingeniería Civil por compartir su conocimiento profesional con paciencia y dedicación durante mi permanencia como estudiante.

Un agradecimiento muy especial al Ing. Santiago Medina, por sus sabios conocimientos, su don de gente, por su mística profesional y sobre todo por su inevitable apoyo y confianza depositada en mi persona.

Mi gratitud infinita a la Dirección de Investigación y Desarrollo por medio del equipo de investigación SciTeM de la carrera de Ingeniería Civil, con quienes desarrollamos esta investigación.

Mi gratitud al personal administrativo por facilitarnos materiales y el mejor servicio para adquirir conocimientos y poder desenvolvernos de la mejor manera en nuestra profesión.

Fabian Ramos

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
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN EJECUTIVO	xv
ABSTRACT.....	xvi
CAPÍTULO I.....	1
1.1 Antecedentes Investigativos	1
1.1.1 Antecedentes.....	1
1.1.2 Justificación.....	5
1.1.3 Fundamentación Teórica	7
1.1.3.1.Cemento	7
1.1.3.2.Cemento Portland.....	7
1.1.3.3.Cemento Portland Tipo IP.....	7
1.1.3.4.Tipos de Cemento Portland	8
1.1.3.5.Propiedades del Cemento.....	9

1.1.3.6. Puzolanas.....	15
1.1.3.7. Clasificación de las puzolanas	16
1.1.3.7.1 Puzolana Naturales.....	16
1.1.3.7.2 Puzolanas Artificiales.....	18
1.1.3.8. Aplicación de la puzolana en la fabricación del cemento	20
1.1.3.9. Efectos de las puzolanas naturales en las propiedades del hormigón fresco	20
1.1.3.10.Efectos de las puzolanas naturales en las propiedades del hormigón endurecido	21
1.1.3.11.Zeolitas	22
1.1.3.12.Tipo de Zeolitas	23
1.1.3.12.1. Zeolita Sintética	23
1.1.3.12.2. Zeolita Natural.....	23
1.1.3.12.2.1 Zeolita Natural Clinoptilolita	28
1.1.3.13.Aplicación de la zeolita.....	29
1.1.3.14.Zeolita Natural en el Ecuador	30
1.1.3.15.Proceso de Producción	32
1.1.3.16.Nivel de Producción.....	33
1.1.4 Hipótesis	34
1.2 Objetivos.....	34

1.2.1 Objetivo General.....	34
1.2.2 Objetivos Específicos	34
CAPITULO II	35
2.1 Materiales y Equipos	35
2.1.1 Materiales	35
2.1.2 Equipos	35
2.1.2.1 Sistema de Información Geográfica (SIG).....	37
2.2 Métodos.....	37
2.2.1 Nivel de Investigación.....	37
2.2.2 Nivel Exploratorio	38
2.2.3 Nivel Descriptivo	38
2.2.4 Población y Muestra	38
2.3 Plan de Recolección de Datos.....	40
2.3.1 Trabajo de campo y muestreo	42
2.3.2 Trituración	43
2.3.3 Ensayos de laboratorio	45
2.3.3.1 Ensayo de la densidad real del cemento y zeolita natural.....	45
2.3.3.2 Ensayo de finura del cemento y zeolita natural método tamizado seco.....	46
2.3.3.3 Caracterización morfológica del cemento y zeolita natural (SEM).....	48
2.3.3.4 Caracterización mineralógica del cemento y zeolita natural (EDS).....	49
2.4 Plan de Procesamiento y Análisis de Información.....	49
2.4.1 Plan de procesamiento.....	49
2.4.2 Plan de análisis.....	50

CAPITULO III.....	51
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
3.1 Análisis y discusión de resultados	51
3.1.1 Determinación de la densidad real del cemento (método del picnómetro)....	51
3.1.2 Determinación de la densidad de la zeolita natural (método del picnómetro)	
52	
3.1.3 Determinación de la finura del cemento y zeolita natural (tamizado seco)...	56
3.1.4 Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM)	59
3.1.5 Análisis de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS)	63
3.2 Verificación de hipótesis.....	67
CAPITULO IV	68
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	68
4.1 Conclusiones	68
4.2 Recomendaciones	70
BIBLIOGRAFÍA	71
Anexo A.- Proceso de trituración de roca zeolíticas hasta obtener tamaño deseado	
.....	75
Anexo B.- Proceso para determinar la densidad de las zeolitas naturales y del	
cemento puzolánico tipo IP	76
Anexo C.- Determinación de la finura del cemento y zeolitas naturales	77
Anexo D.- Muestras de zeolitas para análisis SEM y EDS	77
Anexo E.- Tabla de los elementos y compuestos del cemento tipo IP y Zeolitas ZV,	
ZX, ZCr.	78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Compuestos principales del cemento portland	10
Tabla 2: Requerimientos Químicos	17
Tabla 3: Requerimientos Físicos	17
Tabla 4: Clasificación estructural de la zeolita	25
Tabla 5: Composición química de zeolita natural	27
Tabla 6: Cálculo de la densidad real del cemento IP	51
Tabla 7: Cálculo de la densidad real de la Zeolita Natural (ZV)	52
Tabla 8: Cálculo de la densidad real de la Zeolita Natural (ZX)	53
Tabla 9: Cálculo de la densidad real de la Zeolita Natural (ZCr)	54
Tabla 10: Resumen Densidad Real	55
Tabla 11: Cálculo de la finura del cemento IP	56
Tabla 12: Cálculo de la finura de la Zeolita Natural (ZV)	56
Tabla 13: Cálculo de la finura de la Zeolita Natural (ZX)	57
Tabla 14: Cálculo de la finura de la Zeolita Natural (ZCr)	57
Tabla 15: Resumen de Finura	58

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1:Reactividad relativa de los compuestos del cemento.....	10
Figura 2: Evolución del calor de hidratación para pastas de cemento	12
Figura 3: Tiempo de fraguado para cemento Portland.....	15
Figura 4:Micrografía SEM de partículas de ceniza volante con aumento de 1000x18	
Figura 5:Ceniza volante.....	19
Figura 6:Polvo de humo de sílice	19
Figura 7:Resistencia la compresión de puzolana natural hasta un año.....	22
Figura 8: Zeolita a diferentes escalas	23
Figura 9:Formación de la Zeolita Natural.....	24
Figura 10: Estructura básica de una zeolita	26
Figura 11: Formación Cayo	31
Figura 12: Ubicación de Zeolita Natural y Procesadoras.....	40
Figura 13: Muestras de Zeolita Natural (Zeonatec), Las Mercedes, Isidro Ayora, Prov. Guayas.....	42
Figura 14: Trituración manual de Zeolitas	43
Figura 15: Molino de bolas.....	44
Figura 16:Tamizadora eléctrica.....	44
Figura 17:Frasco de Le Chatelier para el ensayo de densidad	46
Figura 18: Movimientos suaves de muñeca	47

Figura 19: Estructura del microscopio electrónico de barrido.....	48
Figura 20: Microfotografía SEM Cemento IP.....	59
Figura 21: Microfotografía SEM Zeolita Natural (ZV)	60
Figura 22: Microfotografía SEM Zeolita Natural (ZX)	61
Figura 23: Microfotografía SEM Zeolita Natural (ZCr).....	62
Figura 24: Espectro EDS Cemento IP.....	63
Figura 25: Espectro EDS Zeolita Natural (ZV)	64
Figura 26: Espectro EDS Zeolita Natural (ZX)	65
Figura 27: Espectro EDS Zeolita Natural (ZCr).....	66

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación se inició con la adquisición de la zeolita natural en roca y pulverizada en diferentes yacimientos, para esta investigación la clasificación de la zeolita se determinó de acuerdo con la norma ASTM C 618, el material empleado es una puzolana natural. Posteriormente se continuó con la trituración manual y mecánica de este mineral hasta obtener la finura deseada; luego se procedió a realizar los ensayos necesarios para la caracterización de las propiedades físicas del cemento tipo IP y zeolita natural, se empezó con la determinación de la densidad real del cemento y la zeolita según lo indican las normas ASTM C 188 - NTE INEN 156. A continuación, se realizó el ensayo para determinar la finura de estos materiales mediante el método por tamizado seco utilizando el tamiz 150 micras (N° 100) siguiendo el procedimiento de la norma NTE INEN 489.

Para realizar el análisis químico de Microscopía Electrónica de Barrido y Espectroscopía por Dispersión de Rayos X (SEM, EDS) del cemento tipo IP y zeolita natural se tomó muestras en polvo de cada material, el cual me permite determinar su morfología y componentes a una energía de 15 kilo electron boy (keV) con un nivel a detalle de 2000 aumentos y en modo de alto vacío (high vacuum - HV).

Los resultados obtenidos de las propiedades físicas y químicas muestran la factibilidad de este mineral (aluminosilicatos) como un material con características cementante interesantes para sustituir parcialmente al cemento.

ABSTRACT

The present investigation was initiated with the acquisition of natural zeolite in rock and sprayed in different deposits, for this investigation the classification of zeolite was determined according to ASTM C 618, the material used is a natural puzolana. Subsequently, manual and mechanical crushing of this mineral was continued until the desired fineness was obtained; The tests necessary for the characterization of the physical properties of IP-type cement and natural zeolite were then carried out, and the determination of the actual density of cement and zeolite was started as indicated in ASTM C 188 - NTE INEN 156. The test was then carried out to determine the fineness of these materials by dry sieving using the 150 microns sieve (No. 100) following the procedure of NTE INEN 489.

To perform the chemical analysis Electronic Scanning Microscopy and X-ray scattering spectroscopy (SEM, EDS) of IP-type cement and natural zeolite, powder samples were taken from each material, This allows me to determine its morphology and components at an energy of 15 kilo electron boy (keV) with a level in detail of 2000 increases and in high vacuum mode (HV).

The results obtained from the physical and chemical properties show the feasibility of this mineral (aluminosilicates) as a material with interesting cementing characteristics to partially replace cement.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes Investigativos

1.1.1 Antecedentes

La demanda de hormigón durante los últimos años ha incrementado de manera significativa, debido al crecimiento poblacional y el desarrollo de los países a nivel mundial, provocando mayor explotación de materia prima y más consumo de energía fósil. Actualmente la industria del cemento enfrenta costos elevados de producción por el aumento del costo energético, escasez y deterioro de materia prima, y debido a la obligación de cuidar el medio ambiente reduciendo las emisiones de CO₂ [1].

Esta problemática ha conducido a los investigadores a la búsqueda de materiales cementantes alternativos, con las mismas características que las del cemento portland, pero más amigables con el medio ambiente. En este sentido se han realizado varias investigaciones sobre el uso de zeolita para sustitución parcial del cemento como parte de pastas y morteros cementicios.

De manera individual, las zeolitas pueden convertirse en un recurso valioso para la industria de la construcción por su versatilidad, incluyendo la facilidad de extracción, la disponibilidad de depósitos, la poca complejidad en su fabricación y la reducción notable de la contaminación ambiental.

El uso de puzolanas naturales como sustituto parcial del cemento portland es conocido por su efectividad en la gran mayoría de la producción de cemento en Europa. La zeolita natural, ha sido ampliamente utilizada en grandes obras en la antigüedad como coliseos, acueductos, y la Cúpula del Panteón de 42 m de luz [2]; sin embargo su aplicación más popular de puzolanas naturales en la fabricación

de cementos puzolánicos se produjo en la primera década del siglo xx mostrando un crecimiento durante las últimas décadas. El uso más importante de zeolita natural en el cemento y producción de hormigón ha sido reportado en China el uso de 30 millones de toneladas cada año[3].

De acuerdo con varios resultados, las zeolitas juegan un papel fundamental en la fabricación del cemento con propiedades favorables, traducidas como aumento de resistencia mecánica, menor calor de hidratación y mayor inhibición de la reacción álcalis-sílice. Con estas adiciones de minerales, se pueden lograr cementos resistentes a sulfatos y al agua de mar, logrando una mayor durabilidad de los mismos [4].

Específicamente, se han realizado varias investigaciones sobre la aplicación de la zeolita natural sustituyendo parcialmente en diferentes porcentajes al cemento portland, entre las que podemos mencionar:

Robalino, P. *“El uso de zeolita como una adición mineral para producir cemento puzolánico”*, indica a lo largo de los años se han reconocido el gran desempeño y utilidad de las zeolitas naturales han tenido en diferentes áreas como la medicina, la economía; gracias a la moderna tecnología del hormigón se ha podido estudiar más las aplicaciones de esta puzolana natural, como una adición mineral para incorporar al cemento con la finalidad de mejorar sus propiedades para obtener un producto igualmente resistente y más económico. El desarrollo de esta investigación se realizó aplicado las normas ASTM vigentes para la realización de los ensayos, la zeolita natural se la obtuvo del peñón de la ESPOL localizado en el campus Prosperina. Al finalizar esta investigación se pudo concluir:

- ✓ El índice de actividad puzolánica al sustituir el 20% de la zeolita natural por cemento portland cumplió con los requisitos que establece la norma ASTM C618-03 a los 7 y 28 días de edad, los valores obtenidos fueron 91,86% a los 7 días y 106,5%

a los 28 días superando el índice de 75% que dicha especificación estable para utilizar puzolanas naturales en el hormigón.

- ✓ Considerando las especificaciones de la norma ASTM C618-03 para el uso de puzolanas naturales como adición mineral, se comprobó mediante un análisis químico de la zeolita que cumple esta norma. La norma especifica el contenido mínimo de la suma de Oxido de Silicio (SiO_2), Oxido de Aluminio (Al_2O_3) y Oxido Férrico (Fe_2O_3) deber ser el 70%, y la zeolita utilizada en los ensayos obtuvo el 83,1% [5].

Saltos O. *“Efectos de la adición de la zeolita en las propiedades mecánicas del hormigón convencional de cemento Portland tipo I”*, en este estudio se realizaron probetas dosificadas equivalentes a 400 kg/m^3 , el mismo tuvo una adición de zeolita en 5%, 10%, 20%, 30% con respecto a la masa del cemento Portland tipo I más los agregados finos y gruesos. Se comparó con una muestra patrón la cual no contenía zeolita. Entre las pruebas realizadas también se encuentran las propiedades que presenta el hormigón fresco y hormigón endurecido, en todas las pruebas se comprobó la eficacia de la zeolita como puzolana lo que representa una alternativa en la fabricación de cemento puzolánico a menor costo y excelentes propiedades, donde se concluyó que:

- ✓ Un aumento de la resistencia en el hormigón con adición de zeolita, específicamente la del 10% aumento su valor en la resistencia a la compresión simple, como a la tracción por compresión diametral, mejorando después de los 28 días.
- ✓ El contenido de aire presentó una reducción en su porcentaje a medida que incrementó el porcentaje de zeolita, de igual manera la densidad absorción y porosidad presentaron los mejores valores con el 10% de zeolita[2].

Najimi [3] *“An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan”*, en este estudio se empleó la zeolita

natural de tipo clinoptilolita en donde se analizaron probetas de control y experimentales sustituyendo el 15%, 30% de cemento Portland tipo II por la adición de zeolita, concluyendo lo siguiente:

- ✓ En general, las propiedades del hormigón mejoraron mediante la sustitución parcial del cemento por zeolita natural, más eficiencia de la aplicación de la zeolita natural se observó en la penetración de iones de cloruro, la velocidad de corrosión, la contracción por secado y la penetración del agua

- ✓ El menor nivel de reemplazo condujo a una mejor durabilidad, el hormigón que contenía un 15% de zeolita natural alcanzó una adecuada resistencia a la compresión, penetración de iones de cloruro, la velocidad de corrosión, la contracción por secado y la penetración del agua y también no exige demasiado superplastificante.

1.1.2 Justificación

El hormigón es uno de los materiales más usados en la construcción a nivel mundial por su bajo precio, características mecánicas, adecuada durabilidad y por la facilidad de ser conformado en varias formas y tamaños. A pesar de estas ventajas, los problemas ambientales son derivados de la fabricación de cemento Portland dependiendo de la tecnología de producción, Jacob [6] manifiesta rangos de emisión de 0,73 a 0,99 Ton de CO₂ por 1 Ton de cemento. Más de la mitad de esta cantidad se produce en la calcinación del cemento, por lo que hay investigaciones para emplear materiales cementantes suplementarios (SCMs) que pueden sustituir al menos una parte de cemento en el hormigón por materiales más amigables con el medio ambiente.

Múltiples investigaciones se han realizado sobre la incorporación de puzolanas naturales en el concreto, dichos estudios permitieron demostrar la efectividad de la zeolita como indica Samardzioska [7], donde nos indica el uso de este material cementante suplementario ayuda a reducir la contaminación ambiental, sino que también a disminuir el calor de hidratación y la porosidad, también ayuda al mejoramiento de las propiedades mecánicas del hormigón, así como la durabilidad de las estructuras.

El uso de zeolita en el mortero y hormigón puede mitigar e incluso evitar fenómenos que son significativamente destructores como la reacción álcalis-sílice y reacciones alcalinos-carbonato, responsables de la formación de grietas y expansión en las estructuras hormigonadas [8].

Es evidente que el conjunto de propiedades conocidas actualmente aportan una serie de ventajas competitivas que potencian su explotación, como su fácil extracción, bajos precios de producción, baja contaminación ambiental, su versatilidad y utilidades casi universales [9].

En Latinoamérica, la zeolita como aditivo en la producción de cementos constituye una de las medidas de sustentabilidad económica y ambiental de la industria cementera cubana, debido a la inexistencia de fuentes de cenizas volantes y micro sílices.

Las zeolitas naturales más abundantes en Cuba son las clinoptilolitas, modernitas y heulanditas. Varios yacimientos han sido estudiados para la utilización como material de construcción, como áridos ligeros por su bajo peso volumétrico, como adición en la producción de cemento mezclas dada su actividad puzolánica [10].

En nuestro país las investigaciones se realizaron a mediados de los años noventa por investigadores cubanos quienes se percataron de rocas zeolitizadas en la zona de Pascuales-Guayaquil, posteriormente investigadores de la ESPOL en el 2000 encontraron rocas zeolitizadas en el Parque Tecnológico Gustavo Galindo [11].

Según [12] Morante, a pesar de tener grandes recursos de zeolita sobre todo en la cordillera Chongón – Colonche no se ha dado un verdadero desarrollo en cuanto a las aplicaciones en la construcción excepto en la agricultura, acuicultura, ganadería, etc.

Investigaciones realizadas muestran las ventajas que posee la zeolita natural para sustitución parcial del cemento como lo muestra Carlos Saltos [2] en su tesis, analizó probetas de hormigón elaboradas con distintos porcentajes de zeolita natural en 5%, 10%, 20% y 30% con respecto a la masa del cemento, llegando a la conclusión que este mineral adicionándole al hormigón ayuda en el mejoramiento de la resistencia a la compresión específicamente en la probeta del 10% de adición de zeolita.

1.1.3 Fundamentación Teórica

1.1.3.1. Cemento

✓ Definición

El cemento es un material aglutinante que presenta propiedades de adherencia y cohesión, que permite la unión de fragmentos minerales entre sí, formando todo compacto [13]. Se produce elevando a grandes temperaturas, 1450°C, piedra caliza y arcilla, con lo cual se produce una fusión parcial formando nódulos de Clinker. El Clinker se lo mezcla con sulfato de calcio para finalmente molerlo y formar el cemento [14].

1.1.3.2. Cemento Portland

El cemento Portland es una mezcla de materiales minerales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen alúmina, sílice u óxido de hierro, procesados a altas temperaturas y mezclados con yeso. Este material tiene la propiedad de fraguar y endurecer en presencia del agua, presentándose una reacción química que se conoce como hidratación [13].

Conocido en la actualidad como un material conglomerante, utilizado de manera más común para la elaboración de distintas variedades de hormigones empleados en la construcción obras civiles de gran envergadura, diseñadas para resistir los climas más agresivos garantizando sus resistencia y durabilidad respecto al paso del tiempo [15].

1.1.3.3. Cemento Portland Tipo IP

El Cemento Portland Puzolánico Tipo IP, diseñado para construcciones en general. Para la fabricación de este tipo de cemento, se utiliza clinkler de alta calidad,

puzolana natural de origen volcánico de alta reactividad y yeso de alta pureza. La mezcla así preparada y dosificada adecuadamente, es molida en un sistema de molienda de última generación, que incorpora un separador de alta eficiencia para lograr un alto grado de finura.

Aplicaciones del Cemento Portland IP

- ✓ Construcción de casa y edificios
- ✓ Obras viales: puentes, viaductos, obras de arte
- ✓ Obras sanitarias e hidráulicas
- ✓ Obras civiles en la industria petrolera

1.1.3.4. Tipos de Cemento Portland

Hoy en día se fabrican diversos tipos de cementos para satisfacer diferentes necesidades y para cumplir con propósitos específicos [13]. Las normas NTE INEN 152, 490 y 2380; la NTE INEN 152 abarca diez tipos de cementos portland que se producen en nuestro país, siendo los principales desde el tipo I al V. Los cementos portland tipo (IA, IIA, IIIA) son adicionados con un material incorporador de aire durante el proceso de fabricación; estos cementos producen concretos con resistencias mejoradas contra la acción del congelamiento – deshielo. Finalmente, cementos portland tipo II (MH), II(MH)A; se emplea cuando se desea un moderado calor de hidratación y resistencia moderada a los sulfatos o un cemento donde se desea incorporar aire para los mismos usos que el tipo II(MH) respectivamente [16].

La INEN 490 cementos hidráulicos compuestos, se emplean en aplicaciones de uso general y especial, utilizando cemento portland o clinkler de cemento portland, con escoria de cemento o puzolana; abarcando dos tipos: binario, que consiste en cemento portland con cemento de escoria o con una puzolana y ternario, que consiste en cemento portland con una combinación de dos puzolanas diferentes o con

cemento de escoria y una puzolana [17]. Esta norma establece ciertos tipos de cementos hidráulicos compuestos destinados para usos específicos, teniendo así:

- ✓ **Tipo IS** – Cemento portland de escoria de alto horno,
- ✓ **Tipo IP** – Cemento portland puzolánico y,
- ✓ **Tipo IT** – Cemento compuesto terciario.

Así mismo, la NTE INEN 2380 establece los requisitos de desempeño que deben cumplir los cementos hidráulicos y clasifica a los cementos de acuerdo a sus propiedades específicas sin considerar restricciones sobre su composición o la de sus constituyentes relacionados con el desarrollo de resistencia, resistencia a los sulfatos, calor de hidratación y resistencia a la reactividad álcali-sílice [18]. Esta norma establece los siguientes seis tipos de cementos:

- ✓ **Tipo GU** – 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

1.1.3.5. Propiedades del Cemento

✓ **Composición Química**

Los materiales utilizados para fabricar cemento portland son la cal, sílice, el óxido de aluminio y el óxido de hierro. Estos materiales interactúan en el horno principal formando compuestos químicos complejos. La calcinación en el horno reestructura la composición molecular, produciendo los siguientes compuestos principales, que se muestran en la tabla 1:

Tabla 1: Compuestos principales del cemento portland

Compuesto	Fórmula química	Fórmula común	Rango usual en peso (%)
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S	45 - 60
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S	15 - 30
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	6 - 12
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	6 - 8

Fuente: Asocreto [13]

✓ **Silicato Tricálcico (C_3S)**

Se hidrata y se endurece rápidamente y es responsable, en gran parte, por el inicio del fraguado y la resistencia temprana. La resistencia temprana del concreto de cemento portland es mayor, cuando el porcentaje de C_3S aumenta.

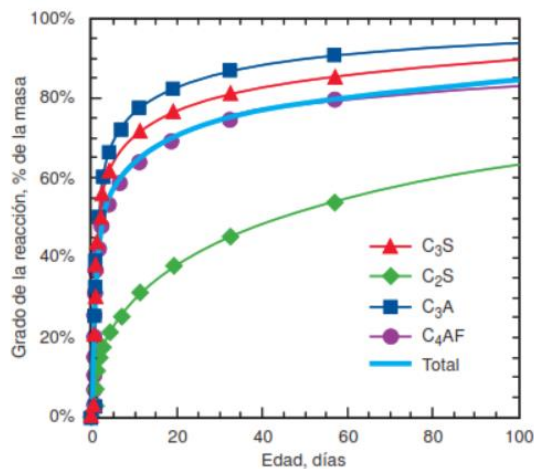


Figura 1: Reactividad relativa de los compuestos del cemento.

La curva llamada total tiene una composición del 55% de C_3S , 18% de C_2S , 10% de C_3A Y 8% de C_4AF , una composición mediana del cemento tipo I

Fuente: PCA [19]

Silicato Dicálcico (C₂S)

Se hidrata y se endurece lentamente y contribuye grandemente para el aumento de resistencia en edades más allá de una semana.

Aluminato Tricálcico (C₃A)

Libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye un poco para el desarrollo de las resistencias tempranas. Los cementos con bajos porcentajes de C₃A resisten mejor a suelos y aguas con sulfatos.

Ferroaluminato Tetracálcico (C₄AF)

Producto resultante del uso de materias primas de hierro y aluminio para la reducción de la temperatura de clinkerización durante la fabricación del cemento. Este compuesto contribuye muy poco para la resistencia. La mayoría de los efectos de color para la producción del cemento gris se deben al C₄AF y sus hidratos.

Sulfato de Calcio

Comúnmente llamado yeso, se adiciona al cemento durante la molienda final, ofreciendo sulfato para la reacción con el C₃A y la formación de etringita (trisulfoaluminato de calcio). Esto controla la hidratación del C₃A. Sin sulfato, el fraguado del cemento sería rápido. Además del control del fraguado y del desarrollo de resistencia, el sulfato también ayuda a controlar la contracción por secado (retracción).

Existen compuestos menores, como el óxido de magnesio, el óxido de titanio, el óxido de manganeso, el óxido de sodio y el óxido de potasio[19].

✓ Calor de hidratación

Es el calor que se genera por la reacción (agua + cemento) exotérmica de la hidratación del cemento, es decir, reacciones que liberan calor, haciendo que los concretos aumenten su temperatura al fraguar.

El calor que se produce en el cemento ordinario es de aproximadamente de 80 – 100 cal/g. La cantidad de calor generado depende de la composición química del cemento en especial del silicato tricálcico (C_3S) y del aluminato tricálcico (C_3A) [14]. La relación agua cemento, la finura del cemento y la temperatura de curado también son factores que intervienen en la generación de calor. La tasa de generación de calor es mayor en las edades tempranas. Se genera gran cantidad de calor en los tres primeros días, con la mayor tasa de liberación de calor ocurriendo a lo largo de las primeras 24 horas [19].

Los cementos no generan calor a una tasa constante. La producción de calor durante la hidratación de un cemento portland tipo I se representa en la figura 2. El primer pico se debe a la liberación de calor por las reacciones iniciales de los compuestos del cemento, tales como aluminato tricálcico. Este primer pico (7 minutos después de la mezcla de la pasta) de calor se sigue por un periodo de baja reactividad conocido periodo de incubación. Después de varias horas, el segundo pico (ocurre entre 6 – 12 horas) atribuido al silicato tricálcico, señalizando el comienzo el comienzo de endurecimiento de la pasta. Finalmente, un tercer pico (ocurre entre 12 – 90 horas) debido a la reacción renovada del aluminato tricálcico.

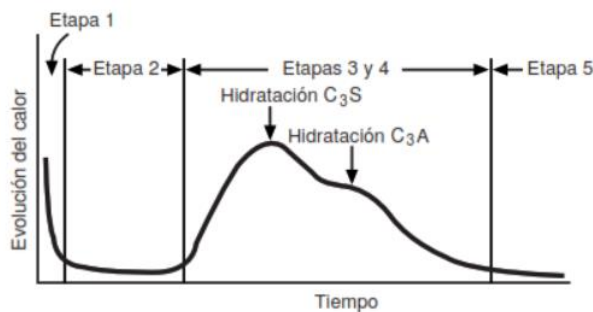


Figura 2: Evolución del calor de hidratación para pastas de cemento
Fuente: PCA [19]

La **etapa 1** es el calor de humedecimiento (hidratación del C_3A y C_3S).

La **etapa 2** es el periodo de incubación relacionado al tiempo de fraguado inicial.

La **etapa 3** es una reacción acelerada de los productos de hidratación que determina la tasa de endurecimiento y el tiempo de fraguado final.

La **etapa 4** hay una desaceleración de la formación de los productos de hidratación y determina la tasa de aumento de resistencia inicial.

La **etapa 5** es lenta, caracterizada por la formación estable de productos de hidratación, estabilizando la tasa de aumento de resistencia a edades avanzadas [19].

✓ **Densidad del cemento**

La densidad del cemento está definida como la masa de un volumen unitario de los sólidos [20]. Su valor varía muy poco, suele estar cercano a $3,15 \text{ gr/cm}^3$. En los cementos adicionados, es menor porque el contenido de Clinker por tonelada de cemento es inferior y su valor es $2,90 \text{ gr/cm}^3$, dependiendo del porcentaje de adiciones.

La determinación de la densidad del cemento según la NTE INEN 156 - ASTM C 188 consiste en establecer la relación entre una masa de cemento y el volumen del líquido no reactivo que esta masa desplaza en el frasco de Le Chatelier; también permite el uso de equipo alternativo como lo indica en 4.2.5. Existen varios métodos determinar la densidad, entre los más importantes tenemos Le Chatelier, Schuman, Mann, Candler y el picnómetro. Para nuestro caso emplearemos el método del picnómetro [13].

✓ **Finura del cemento**

La finura es una de las propiedades más importantes del cemento, ya que está ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia[13]. Sin embargo, un alto grado de finura incrementa los costos de producción debido a que aumenta el tiempo de molienda; y cuanto más fino sea un

cemento tiende a deteriorarse más rápido porque absorbe más fácilmente la humedad del aire. Pero un cemento fino, exuda menos que uno más grueso, debido a que retiene mejor el agua al tener mayor superficie de hidratación.

Normalmente, la finura se mide de forma indirecta, midiendo el área superficial con el aparato de medición de la permeabilidad al aire de Blaine ASTM C 204, NTE INEN 196; la prueba de Blaine determina la superficie específica en cm^2/g o m^2/kg de las partículas de cemento, lo que significa la cantidad de superficie que un gramo de partículas de cemento puede cubrir.

Según la Asociación Colombiana de Productores de Concreto (Asocreto) [13], la superficie específica de los cementos está comprendida entre 3400 y 4500 cm^2/g (Blaine). La norma ASTM C150 establece como mínimo debe ser 2800 cm^2/g (Blaine).

✓ **Fraguado**

El fraguado es el endurecimiento de la pasta de cemento o el cambio de estado plástico a estado sólido. El fraguado dota al cemento de una cierta resistencia, es preciso distinguirlo del endurecimiento, que hace referencia a la ganancia de resistencia en una pasta de cemento fraguada. El fraguado normalmente se describe en dos niveles: fraguado inicial y fraguado final.

Fraguado inicial Vicat. -Es el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua y el instante en el cual la penetración medida es de 25 mm (mínimo 45 minutos).

Fraguado final Vicat. – Es el tiempo transcurrido entre el contacto inicial del cemento con el agua y el instante en el cual la aguja no deja una impresión circular completa en la superficie de la pasta (máximo 420 minutos) [21].

Conocer los tiempos de fraguado inicial y final, es importante porque así permite estimar el tiempo disponible para mezclar, transportar, colocar, vibrar y afirmar el concreto en obra, así como para curarlo y colocarlo en servicio [13]. La figura 3 ilustra los promedios de los tiempos de fraguado inicial y final para cementos portland.

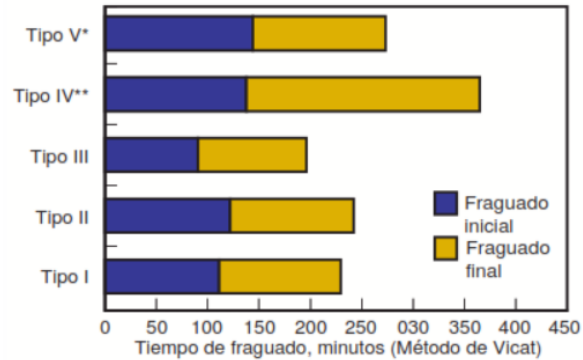


Figura 3: Tiempo de fraguado para cemento Portland
Fuente: Gebhardt y PCA [22]

✓ Falso fraguado

La NTE INEN 875 define como el endurecimiento prematuro de las pastas de cemento, mortero u hormigón sin la generación de mucho calor, cuyo endurecimiento puede ser eliminado y recobrar la plasticidad con un mezclado adicional sin la adición de agua; también conocido como “fraguado apresurado”, “rigidización prematura”, “fraguado vacilante” y “fraguado elástico” [23].

1.1.3.6. Puzolanas

La puzolana es un material silíceo aluminoso que, cuando está en polvo fino y en presencia de humedad, reacciona químicamente con el hidróxido de calcio liberado por la hidratación del cemento portland para formar silicato de calcio hidratado y otros compuestos cementantes [19].

Las puzolanas naturales o artificiales están compuestos principalmente por sílice amorfa, poseen poco o ningún valor cementante, pero finalmente molidos y en presencia de agua, a temperatura ambiente reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio disuelto Ca(OH)_2 para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia [5],[24].

El color de las puzolanas varía de acuerdo con el lugar y a su composición química; de esta manera pueden tener colores como: gris oscuro, blanco lechoso, blanco amarillento, rojizo, verdoso, amarillo rojizo, etc.

1.1.3.7. Clasificación de las puzolanas

Las puzolanas se pueden clasificar según su naturaleza; puzolanas naturales y puzolanas artificiales.

1.1.3.7.1 Puzolana Naturales

Las puzolanas naturales normalmente son de origen volcánico o rocas sedimentarias con una composición química y mineralógica adecuada [25], las cuales son formadas por silicatos amorfos hidratados; algunos tipos de estas puzolanas son las cenizas volcánicas, piedra pómez, tobas volcánicas o zeolitas y obsidiana [2,5]. De acuerdo con la ASTM C-618, las puzolanas naturales para uso en la elaboración del concreto han sido denominadas de tipo N (natural).

Las puzolanas naturales deberían cumplir con los siguientes requisitos químicos y físicos, tabla 2 y tabla 3 como lo indica la norma ASTM C-618.

- ✓ **Cenizas Volcánicas (Natural Fly Ash).** – Esta se forman por erupciones de carácter explosivo, en pequeñas partículas templadas a temperatura ambiente, originando la formación de estado vítreo.

- ✓ **Tobas Volcánicas o Zeolita.** -Tipo de roca pulverizada proveniente de ceniza o arena volcánica, sedimentada en las faldas de un volcán y compacta por su propio peso conjuntamente con la acción del agua.

Tabla 2: Requerimientos Químicos

	Clases		
	N	F	C
Óxido de Silicio (SiO ₂)+ Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)+Óxido de Hierro (Fe ₂ O ₃)	70	70	50
Trióxido de Sulfuro (SO ₃), máximo %	4	5	5
Contenido de humedad, máximo %	3	3	3
Pérdida por ignición, máximo %	10	6	6

Fuente: ASTM C-618 [26]

Tabla 3: Requerimientos Físicos

	Clases		
	N	F	C
Finura: Cantidad retenida cuando se tamiza en húmedo en un tamiz de 45 µm (No. 325), máximo %	34	34	34
Índice de esfuerzos: Con cemento Portland, a los 7 días, mínimo % de control.	75 ^B	75 ^B	75 ^B
Con cemento Portland, a los 28 días, mínimo % de control	75 ^B	75 ^B	75 ^B
Requisito de agua, máximo, porcentaje de control	115	105	105
Expansión o contracción en autoclave, máximo, % Requisitos de uniformidad: La densidad y la finura de las muestras individuales no debe variar del promedio establecido por las diez pruebas anteriores, o por todas las pruebas anteriores si el número es menor de diez, en más de:	0,8	0,8	0,8
Densidad, variación máxima del promedio,%	5	5	5
Porcentaje retenido en 45 µm (No. 325), variación máxima, puntos porcentuales del promedio	5	5	5

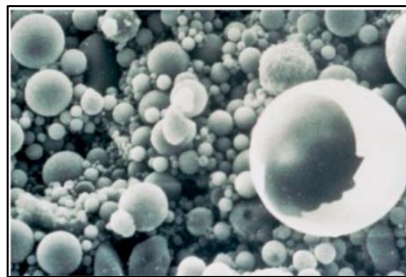
Fuente: ASTM C-618 [26]

1.1.3.7.2 Puzolanas Artificiales

Las puzolanas artificiales son materiales que deben su condición puzolánica a un tratamiento térmico adecuado. En la actualidad son las de mayor uso a nivel mundial en función de las ventajas técnicas y económicas que ofrecen, existen varios tipos: las cenizas volantes (fly ash), arcillas activadas térmicamente, microsílíce y las cenizas de cascara de arroz.

- ✓ **Cenizas Volantes.** -Es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en plantas generadoras de electricidad. Es un polvo que posee una finura muy alta constituido de partículas esférica. Constan esencialmente de dióxido de silicio reactivo (SiO_2) y oxido de aluminio (Al_2O_3). El resto contiene óxido de hierro (Fe_2O_3) y otros compuestos.

La mayoría de las partículas de ceniza volante son esferas y algunas son cenosferas huecas. También se pueden presentar en la forma de plerosferas, que son esferas que contienen esferas menores. Los materiales molidos, como el cemento portland, tienen partículas sólidas angulares. Los tamaños de las partículas de la ceniza volante varían de menos de $1\ \mu\text{m}$ hasta más de $100\ \mu\text{m}$, siendo el tamaño de una partícula típica $20\ \mu\text{m}$.



*Figura 4: Micrografía SEM de partículas de ceniza volante con aumento de 1000x
Fuente: PCA [19]*



Figura 5: Ceniza volante
Fuente: PCA [19]

- ✓ **Arcillas Activadas Térmicamente.** – Arcillas donde su estructura cristalina es destruida mediante un tratamiento térmico en un rango de temperatura de entre 600 – 900 °C.
- ✓ **Humo de sílice.** -También llamado microsílíce, humo de sílice condensado o sílice activa, es un subproducto que se origina en la reducción de cuarzo de alta pureza con carbón en hornos de arco eléctrico para la producción de silicio y ferrosilicio, y consiste en partículas esféricas muy finas con menos de 1mm de diámetro y con diámetro promedio cerca de 0.1 μm , aproximadamente cien veces menor que el promedio de las partículas de cemento, además contiene al menos el 85% de dióxido de silicio amorfo.



Figura 6: Polvo de humo de sílice
Fuente: PCA [19]

- ✓ **Cenizas de Residuos Agrícolas.** - Producida por la calcinación controlada de la cáscara de arroz, bagazo de la caña de azúcar. Esta posee básicamente sílice amorfa mayor al 90% y posee gran actividad puzolana [24,25] cuya estructura depende de la temperatura de combustión .

1.1.3.8. Aplicación de la puzolana en la fabricación del cemento

La aplicación de las puzolanas se emplea con dos fines principales, el primero es utilizarlo en la fabricación de cementos puzolánicos. El material natural o artificial es molido junto con el clinkler en un molido de bolas hasta obtener la finura adecuada. El segundo en introducirlo directamente en la concretera como un ingrediente más, en la elaboración de concreto o mortero con la finalidad de fijar la cal liberada de los silicatos del cemento y mejorar la durabilidad de este.

1.1.3.9. Efectos de las puzolanas naturales en las propiedades del hormigón fresco

Las puzolanas naturales pueden afectar las propiedades de los hormigones frescos. La cohesión, la consistencia o trabajabilidad, la segregación, el sangrado y el tiempo de fraguado de los hormigones de cemento puzolánico difieren de los hormigones de cemento Portland. Estas propiedades cambian en los cementos puzolánicos según la variación en la forma de las partículas de pureza y la finura de las puzolanas naturales.

La mayoría de las puzolanas naturales mejoran la cohesión de la mezcla al producir una pasta más plástica que ayuda a su consolidación y fluidez. Esto contribuye a mejorar la segregación de los hormigones de cemento puzolánico. La consistencia o trabajabilidad mejoran cuando se usan partículas redondas y lisas de puzolana en la mezcla.

La tasa de sangrado disminuye al aumentar la proporción del área superficial de los sólidos al volumen de agua en la mezcla de concreto; la adición de puzolanas naturales generalmente aumenta la proporción del área superficial de los sólidos al

volumen de agua y por lo tanto mejora el sangrado del hormigón. El uso de puzolana natural puede extender el tiempo de fraguado de la pasta de cemento, especialmente a un mayor nivel de reemplazo del cemento [28].

1.1.3.10.Efectos de las puzolanas naturales en las propiedades del hormigón endurecido

La reacción del hidróxido de calcio del cemento portland con la puzolana produce hidratos de silicato de calcio y endurece el mortero y el concreto. El reemplazo parcial de puzolana por cemento inicialmente reduce la tasa de endurecimiento del cemento, pero a edades posteriores la resistencia de los hormigones con puzolana es similar, a veces mayor que los cementos portland de control.

La figura 7 indica los resultados de una investigación para el desarrollo de la resistencia a la compresión de las puzolanas naturales y piedra pómez, hasta un año en condiciones húmedas. En casi los tres niveles de reemplazo 10, 22.5 y 30% la resistencia a los 7 días del concreto que contiene puzolanas naturales fue menor que la del concreto de control (SC) . Sin embargo, a edades mayores y más allá de los 180 días, se puede observar un incremento de resistencia a la compresión en la mayoría de los hormigones que contienen varios porcentajes de puzolana natural.

La resistencia de los hormigones que contienen puzolana natural depende de muchos factores, como el tipo de puzolana, su tamaño de partícula, área de superficie específica, finura, actividad puzolánica y la cantidad de puzolana reemplazada por cemento.

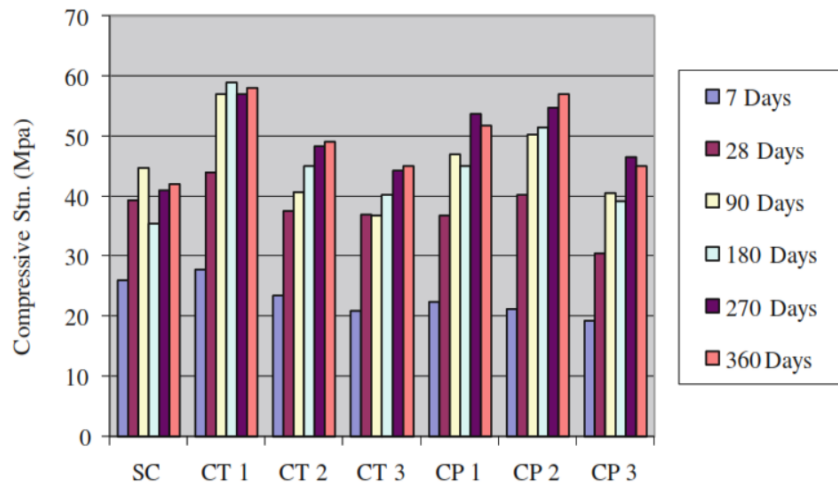


Figura 7: Resistencia la compresión de puzolana natural hasta un año
Fuente: [28]

1.1.3.11. Zeolitas

Las zeolitas son aluminosilicatos cristalinos hidratados, que pueden ser de origen natural o sintético.

El término zeolita fue empleado inicialmente para designar a una familia de minerales naturales, que presentaban, como propiedades particulares, el intercambio de iones y la deshidratación reversible del agua. Esta última propiedad dio origen al nombre genérico de zeolita, el cual deriva de dos vocablos griegos, zeo: que ebulle, y lithos: piedra [27].

En la figura 8 se muestran una zeolita a diferentes escalas, la imagen a) muestra una zeolita en polvo, la imagen b) es una micrografía de microscopía electrónica de barrido en la que se ven los cristales de una zeolita tipo faujasita, en la imagen c) se aprecia la microscopía de transmisión en la que se aprecia la microporosidad de la zeolita y finalmente la imagen d) representa la estructura a nivel de enlaces de dicha zeolita a escala 0,1nm.

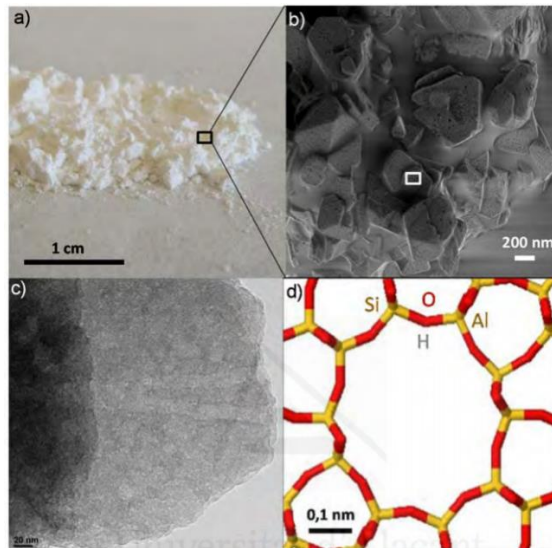


Figura 8: Zeolita a diferentes escalas
Fuente: Grau Aida [29]

1.1.3.12. Tipo de Zeolitas

1.1.3.12.1. Zeolita Sintética

Las zeolitas sintéticas son sólidos obtenidos a partir de soluciones acuosas saturadas de composición apropiada, en un dominio de temperaturas comprendido entre 25°C y 300°C. La naturaleza de la zeolita viene determinada básicamente por factores cinéticos. Haciendo variar la composición de la soluciones y las condiciones operativas, es posible sintetizar zeolitas de diferente estructura o la misma zeolita con diferente composición química [30].

1.1.3.12.2. Zeolita Natural

La zeolita natural es un aluminosilicato hidratado de cationes alcalinos y alcalinotérreos (potasio, calcio, sodio) con una estructura de marco 3D constituidas de (Al, Si)O₄ tetraedros y se clasifican según la relación SiO₂:Al₂O₃ [3,22,28], donde predomina una estructura porosa con gran capacidad para incorporar y ceder agua,

sin cambios importantes en la estructura cristalina. Las zeolitas obtenidas de diferentes áreas de una misma mina pueden variar en su composición química.

a) Formación de la Zeolita Natural

La zeolita natural se formó como resultado de las erupciones volcánicas mediante reacciones hidrotérmicas de rocas volcánicas de silicio y ricas en álcalis. Los antecedentes geológicos sugieren que las zeolitas se generan a partir de un magma basáltico rico en SiO_2 , cuando sufre una violenta caída de temperatura es allí donde luego de este proceso natural se da la formación de la zeolita natural.

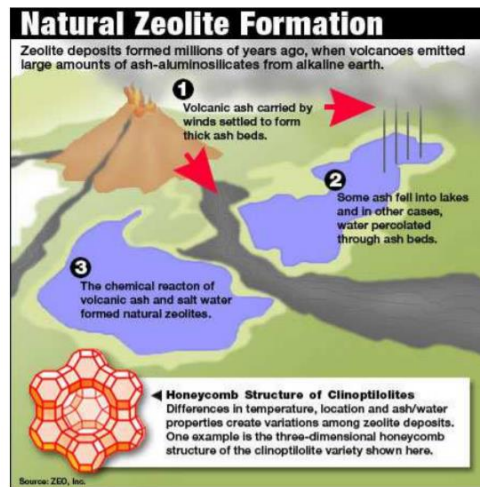


Figura 9: Formación de la Zeolita Natural
Fuente: [33]

La Asociación Internacional de Zeolita (IZA) ha reconocido más de 50 tipos de zeolita natural y 150 sintéticos son conocidos y utilizados en diferentes industrias. Las más comunes son: analcima, chabacita, clinoptilolita, erionita, ferrierita, heulandita, laumontita, mordenita y phillipsita. Entre ellas las de mayor valor comercial son la clinoptilolita, heulandita y la modernita [34]. En la industria del cemento para que un material se lo considere como puzolana, requiere que la suma de Fe_2O_3 , SiO_2 y Al_2O_3 debe ser al menos el 70% lo que muchas zeolitas naturales proporcionan esta condición [31].

b) Clasificación Estructural de Zeolita Natural

Meier, W. M., propuso una clasificación estructural de las zeolitas apoyándose en estudios estratigráficos, la cual estaba basado en la existencia de 8 unidades secundarias de construcción, que se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 4: Clasificación estructural de la zeolita

Grupo C ₄ (Grupo de la filipsita)			Grupo C ₈ -T ₁ (Grupo de la mordenita)			Grupo C ₆ -C ₆ (Grupo de la faujasita)			
Zeolita	TO ₄	Si/Al	Zeolita	TO ₄	Si/Al	Zeolita	TO ₄	Si/Al	
Li-ABW	8	1-3	Bikitaita	9	4-7	Linde	24	1-3	
Filipsita	16		Dischiardita	24		Rho	46		
Harmotoma	16		Epistilbita	24		ZK5	96		
Gismondita	16		Ferrierita	36		Faujasita	192		
Na-P	16		Mordenita	48	Paulingita	672			
Amacita	16		ZSM-5	96	Linde N	768			
Garronita	16		ZSM-11	96					
Yugawaralita	16								
Merlionita	32								
Grupo C ₄ -C ₄ (Grupo de la analcima)			Grupo C ₆ (Grupo de la chabazita)			Grupo C ₄ -C ₄ (Grupo de la heulandita)			
Analcima	48	1-3	Soladita	12	2.5-4.0	Brewsterita	16	2.2-5.5	
Leucita	48		Cancrinita	12		Heulandita	36		
Wairakita	48		Ofrerita	18		Estilbita	72		
A	48		Losod	24		Stellerita	72		
		Gmelinita	24	Barretita		72			
Grupo C ₄ -T ₁ (Grupo de la natrolita)							Grupo C ₈ (Grupo de la laumontita)		
Edigtonita	10	1-2	Liotita	36			Laumontita	24	1-2
Gonnardita	20		Chabazita	36					
Thomsonita	40		Mazzita	36					
Natrolita	40		Erionita	36					
Scolecita	40		Aghanita	48					
Mesolita	120		Levynita	54					

TO₄: Número de tetraedros por celda unitaria Si/Al relación silicio-aluminio en el grupo estructural [35]

c) Estructura

En el gráfico N°4, se explica la estructura básica de una zeolita, donde se puede observar los átomos de silicio rodeados por 4 átomos de oxígeno; el Al^{3+} está reemplazando al Si^{4+} , creando una deficiencia de cargas positivas o un aumento de cargas negativas que están siendo compensadas por cationes de intercambio Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , para mantener el equilibrio de la red de la zeolita. También se observa en el interior de la red el agua zeolítica. Los cationes intercambiables pueden desprenderse fácilmente e intercambiarse con cationes selectivos de su entorno [12,24].

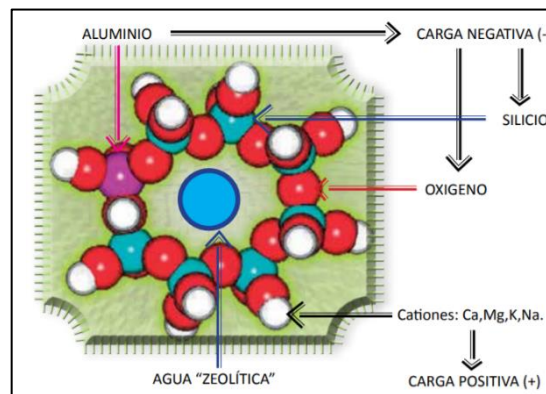
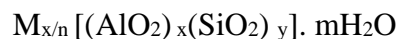


Figura 10: Estructura básica de una zeolita
Fuente: Morante [12]

Las zeolitas presentan la siguiente fórmula química por celda unitaria:



Donde:

M: catión de valencia "n" (Na^+ , K^+ , Li^+), y/o (Ca^{++} , Mg^{++} , Ba^{++} , Sr^{++})

m: número de moléculas de agua

x: número de átomos de aluminio

y: número de átomos de silicio

d) Composición química

A continuación, en la tabla 5 se puede observar la composición química que poseen varias zeolitas naturales de diferentes lugares existiendo una variación en el contenido de óxido de silicio (SiO_2) y óxido de aluminio (Al_2O_3).

Tabla 5: Composición química de zeolita natural

Componente químico	Contenido (%)	Contenido (%)	Contenido (%)
Óxido de silicio (SiO_2)	64.70	67.79	72.00
Óxido de aluminio (Al_2O_3)	11.21	13.66	10.89
Óxido de hierro (Fe_2O_3)	1.38	1.44	1.48
Óxido de magnesio (MgO)	0.79	1.2	0.53
Óxido de calcio (CaO)	2.08	1.68	2.04
Óxido de sodio (Na_2O)	-	2.04	1.91
Óxido de potasio (K_2O)	64.7	1.42	3.24
Óxido de azufre (SO_3)	0.03	0.52	-
Fuente:	Memduh [31]	Najimi [3]	Biomarsa [37]

e) Propiedades de la zeolita

Las propiedades principales que presentan las zeolitas son:

- ✓ Alta capacidad de intercambio iónico (CIC)
- ✓ Alto grado de hidratación
- ✓ Baja densidad y un gran volumen cuando se deshidrata
- ✓ Sirve como tamiz molecular
- ✓ Capacidad de retener, absorber gases, humedad; petroquímicos, iones radioactivos, iones de amonio y iones de metales pesados [38]

f) Propiedades químicas

Las propiedades químicas, que generalmente incluyen el intercambio iónico, adsorción o deshidratación y rehidratación. Estas propiedades están en función de su estructura cristalina de cada especie y de su composición catiónica.

g) Propiedades físicas

Las propiedades físicas de una zeolita deben considerarse de dos maneras:

- ✓ Desde el punto de vista de sus propiedades naturales, incluyendo su morfología, tipos de cristal, gravedad específica, densidad, color, tamaño de cristal, el grado de cristalización, resistencia a la corrosión y abrasión.

- ✓ Desde el punto de vista físico como un producto para cualquier aplicación específica, tomando en cuenta las características brillantes, color, área superficial, tamaño de partícula, dureza, resistencia al desgaste y otros.

A continuación, se presentan las características generales que presentan las zeolitas; las mismas dependen básicamente de la estructura y composición química de cada sólido [35].

- ✓ Diámetro de poro: 2 a 12 angstroms
- ✓ Diámetro de cavidades: 6 a 12 angstroms
- ✓ Superficie interna: varios cientos de m^2/g
- ✓ Capacidad de intercambio catiónico: 0 a 560meq/100g
- ✓ Capacidad de absorción: $<0,35 \text{ cm}^3/g$
- ✓ Estabilidad térmica: desde 200°C hasta más de 1000°C

1.1.3.12.2.1 Zeolita Natural Clinoptilolita

La clinoptilolita es una zeolita natural formada por la desvitrificación de ceniza volcánica en lagos o lagunas hace millones de años. Este tipo es más estudiada y considerada la de mayor utilidad. La clinoptilolita, se presenta en forma de rocas de origen volcánico, y son minerales del grupo aluminosilicatos hidratados compuesto por: aluminio, sílice, hidrógeno y oxígeno altamente estables, con una forma similar a una jaula.

Las cargas negativas de las unidades de aluminio se equilibran con la presencia de cationes intercambiables, notablemente calcio, magnesio, sodio, potasio y hierro. Estos iones pueden ser desplazados por otras sustancias, por ejemplo, metales pesados y iones de amoníaco. Este fenómeno se lo conoce como intercambio catiónico, y es esta la capacidad de la clinoptilolita lo que le da las propiedades útiles [39].

1.1.3.13. Aplicación de la zeolita

Las zeolitas son de gran interés industrial ya que poseen diversas propiedades lo que permite su aplicación en diferentes campos. Los usos de la zeolita se basan en: eliminación de residuos radio activos, tratamientos de efluentes residuales urbanos y agrícolas, depuración de gases, limpieza de los derrames de aceites, agricultura, acuicultura, horticultura, avícola, industrial, pecuaria y usos en la construcción.

✓ Eliminación de metales pesados

Uno de los usos de la clinoptilolita natural con mejores resultados es el tratamiento de los residuos industriales de talleres galvánicos para la eliminación de Na^{2+} , Cr^{3+} y Co^{2+} , de tenerías para eliminar Cr^{6+} de procesos mineros para eliminar Ni, Co, Cu, Mn y NH_4^+ , basándose fundamentalmente en las propiedades de intercambio iónico de la clinoptilolita. Se considera que la clinoptilolita es la zeolita que posee las mejores características para procesos de eliminación de metales contenidos en residuos industriales, debido a su resistencia química, mecánica y térmica, lo que posibilita procesos de regeneración y recuperación de los valores metálicos.

✓ Remoción de amonio

La eliminación de amonio de residuos industriales y aguas negras es una práctica que se basa en la elevada capacidad de intercambio amonio por la clinoptilolita. Este es uno de los mejores y seguros usos de la zeolita en el tema de control ambiental. Las

técnicas de utilización de la zeolita varían de acuerdo con los propósitos: columnas de intercambio iónico, adición en polvo de zeolita al residual, etc.

✓ **Agricultura**

La estructura porosa de la zeolita ayuda como fertilizante natural a mantener el suelo aireado gracias a su capacidad de intercambio iónico, ofreciendo beneficios como la liberación lenta y prolongada de urea en el suelo durante mucho más tiempo debido a la estabilidad y resistencia de esta sustancia.

✓ **Acuicultura**

La zeolita permite aumentar la concentración de peces y camarones, ya que facilita la oxigenación del medio y evita la contaminación del mismo gracias a su capacidad de intercambio catiónico es capaz de eliminar el amoníaco tóxico, fósforo y otros compuestos no deseados del agua de circulación.

✓ **Construcción**

El uso más común de este mineral es en la fabricación de cementos puzolánicos. Las rocas zeolíticas poseen actividad puzolánica que se traduce en la reacción del CaO con el aluminosilicato, así se obtienen los mismos productos que en la reacción directa del cemento natural [40] .

1.1.3.14. Zeolita Natural en el Ecuador

En Ecuador las primeras investigaciones sobre zeolita natural comenzaron a finales de los años 90, cuando un grupo de expertos cubanos recorrieron la costa ecuatoriana y encontraron materiales zeolíticos en el Cayo, cerca de Guayaquil.

Los expertos cubanos propusieron un proyecto de investigación sobre las aplicaciones de las zeolitas naturales. Se enfocaron principalmente en aplicaciones

agrícolas y pecuarias con resultados satisfactorios, dando paso a nuevas investigaciones.

Como conclusión se determinó que en casi todas las rocas se dan los principales minerales de zeolita: Clinoptilolita y Heulandita.

La formación Cayo, una extensa área de más de 100 km² y altos contenidos de zeolita, es un depósito importante de zeolitas.

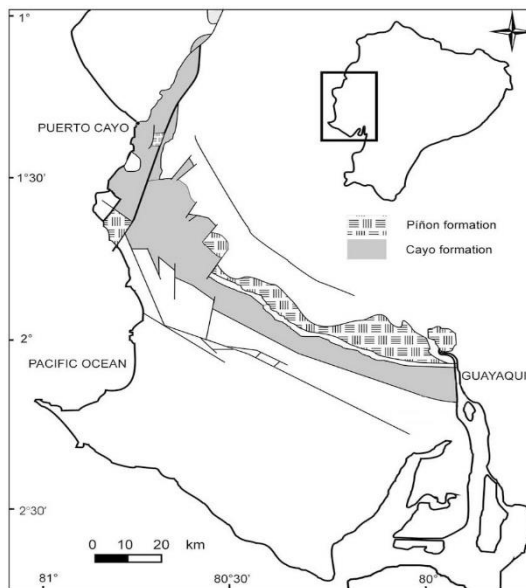


Figura 11: Formación Cayo
Fuente: Fernando Morante

En el área oriental, cerca de Guayaquil puede distinguirse dos zonas: un alta “sur”, de clinoptilolita – heulandita (mordenita) y una baja “norte”, de albita – laumontita – cuarzo. En la zona baja el contenido de zeolita es mínimo, mientras que en la zona alta el contenido de zeolita varía de acuerdo con cambios litológicos.

Cerca del límite costero se encuentra una zona rica en zeolita clinoptilolita – heulandita – mordenita. No se encuentran minerales de alto grado, como laumontita y albita, y el contenido de cuarzo es bajo.

En la actualidad, en el Ecuador se está comercializando y aplicando zeolitas naturales en la industria agrícola, acuícola, avícola, pecuaria, construcción, industrial y agroindustrial; siendo las zeolitas una alternativa efectiva y accesible para aplicar en la descontaminación de ríos, piscinas camaroneras para adsorber elementos como amoníaco, ácido sulfhídrico, metales pesados, entre otros [12] .

1.1.3.15. Proceso de Producción

La materia prima es seleccionada para que cumpla con las características técnicas necesarias según su aplicación.

El proceso de producción inicia con:

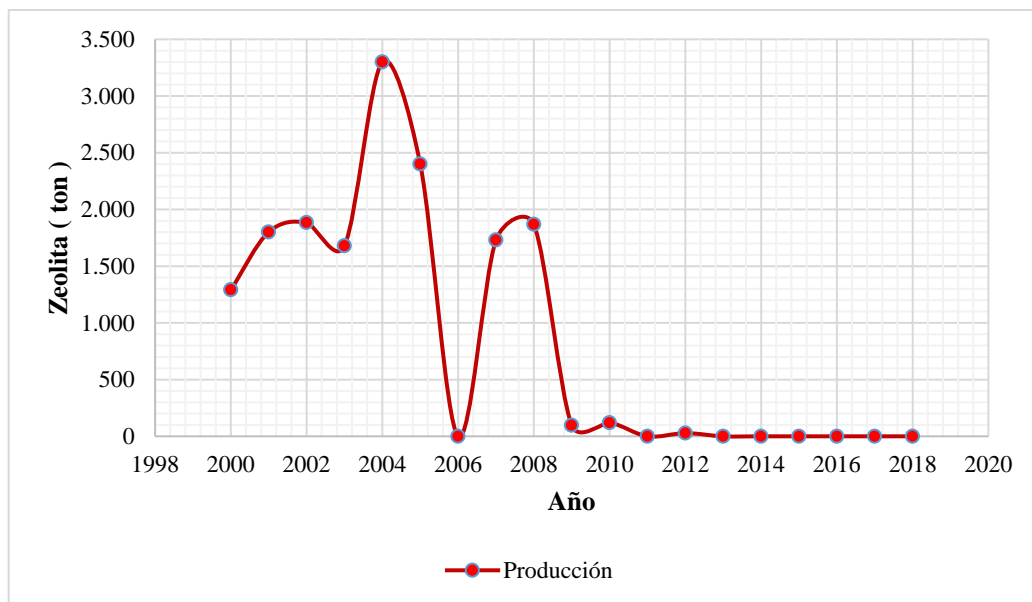
- ✓ **Extracción:** Se extrae el mineral de la mina con la ayuda de la retroexcavadora, explotación que se lo realiza a cielo abierto por ser un mineral no metálico que aflora en la superficie terrestre. Posteriormente este mineral es transportado en volquetas hasta la planta de trituración.

- ✓ **Molienda:** En la planta de trituración primero se procede a realizar la limpieza al material, mediante el uso de una zaranda vibratoria para eliminar material extraño, luego se alimenta a la trituradora de mandíbula y mediante bandas transportadoras llevar la materia prima a los molinos de impacto hasta lograr la granulometría desea.

- ✓ **Envasado:** Se lo realiza manualmente en sacos de polipropileno laminado o plastificado de acuerdo con el peso puede ser de 25 kg – 50 kg con la finalidad de aislar el material del ambiente externo y también para evitar que las partículas pequeñas salgan del saco al exterior [41].

1.1.3.16. Nivel de Producción

En 2019, Ecuador realizó un total de 1219 exportaciones de minerales como oro, plata, cobre, plomo, zeolita y zinc. Los minerales como la zeolita y puzolana van a Colombia y Guatemala [42], a continuación podemos observar los niveles de producción en el Ecuador durante estos años.



Fuente: Agencia de Regulación y Control Minero [43]

Como se puede observar en el gráfico adjunto, se comenzó a producir zeolitas a gran escala a partir del año 2000 según la ARCOM, mientras que en un estudio realizado en el año 2004 [12] manifiesta que la producción inició en el año 1998; a partir del año 2000 la producción comenzó a tomar un crecimiento hasta el año 2002 mientras que a partir de este año sufre un leve decrecimiento teniendo altibajos. Durante los últimos años la producción ha sido insignificante según los registros de producción en la ARCOM.

1.1.4 Hipótesis

Las propiedades físicas y químicas de los aluminosilicatos con relación al cemento puzolánico tipo IP serán semejantes para ser aplicadas en sustitución parcial al cemento.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

- ✓ Analizar las propiedades físicas de aluminosilicatos comparadas con las del cemento puzolánico tipo IP.

1.2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Comparar la morfología y composición química de tres muestras de zeolita natural existente en el Ecuador, en relación con el cemento portland puzolánico tipo IP.
- ✓ Determinar las propiedades físicas de las zeolitas naturales que sean necesarias para sustituir parcialmente al cemento.
- ✓ Determinar los posibles usos de las zeolitas analizadas como sustituto parcial del cemento en la construcción.

CAPITULO II

METODOLOGÍA

2.1 Materiales y Equipos

Durante la realización de los diferentes ensayos de laboratorio en este trabajo experimental se utilizaron los siguientes materiales y equipos necesarios los mismo se indican a continuación:

2.1.1 Materiales

- ✓ Zeolita natural (75 μ m)
- ✓ Zeolita natural en roca
- ✓ Cemento puzolánico portland tipo IP
- ✓ Agua potable
- ✓ Reactivo (gasolina extra)
- ✓ Grasa

2.1.2 Equipos

- ✓ **Densidad real del cemento**
 - Matraz aforado de 500cc
 - Pipeta graduada
 - Balanza, con una precisión de 0,05 g
 - Termómetro
 - Recipiente de acero inoxidable
 - Brocha 1”
 - Cuchara de acero inoxidable
 - Embudo plano

✓ **Reducción del tamaño de las rocas**

- Combo de acero 4kg
- Bandejas galvanizadas
- **Molido de bolas**, con las siguientes características:
 - Potencia: 0.5 HP
 - Velocidad de giro: 74 rpm
 - Tiempo de molienda: 1-10 horas
 - Peso de diseño a moler: 2 kg
 - Cantidad de esferas de acero: 117
 - Nivel de ruido: 85 dB

✓ **Tamizado**

- Tamizadora eléctrica
- Juego de tamices ASTM E11; N° 3/8",4,8,10,16,30,50,100,200, más tapa y fondo

✓ **Análisis morfológico y composición química (SEM-EDS)**

- Microscopio electrónico de barrido modelo SM-IT100
Especificaciones:
 - Resolución: Modo HV: 3 nm (30 kV) ,4nm (20 kV), 8nm (3 kV) 15 nm (1 kV); Modo LV: 4nm (30 kV), 5nm (20kV)
 - Aumento: x5 a x300.000
 - Voltaje de aceleración: 0.5 kV a 30 kV

✓ **Equipos adicionales**

- GPS Garmin eTrex 10
- Probetas graduadas
- Equipo de protección individual
- Cuchara de mano
- Fundas con cierre hermético
- Computador portátil
- Cámara fotográfica

2.1.2.1 Sistema de Información Geográfica (SIG)

Un sistema de información geográfica (SIG) es una estructura para recopilar, gestionar y analizar datos. Arraigado a la ciencia de la geografía, GIS integra muchos tipos de datos. Analiza la ubicación espacial y organiza capas de información en visualizaciones mediante mapas y escenas en 3D. Con capacidad única, GIS revela información más profunda sobre los datos, como los patrones, las relaciones y las situaciones, lo que ayuda a los usuarios a tomar decisiones más eficientes e inteligentes [44].

✓ ArcGIS

ArcGIS es un completo sistema que permite recopilar, organizar, administrar, compartir y distribuir información geográfica. Es una plataforma líder a nivel mundial para crear y utilizar Sistemas de Información Geográfica (SIG), ArcGIS es utilizada por personas de todo el mundo para poner el conocimiento geográfico al servicio de los sectores de gobiernos, la empresa, la ciencia, la educación y los medios.

ArcGIS permite:

- Crear, compartir y utilizar mapas inteligentes
- Compilar información geográfica
- Crear y administrar bases de datos geográficas
- Resolver problemas mediante análisis espacial
- Conocer y compartir información mediante la geografía y la visualización

2.2 Métodos

2.2.1 Nivel de Investigación

Los niveles de investigación considerados en este proyecto de investigación son los indicados a continuación:

- ✓ Exploratorio
- ✓ Descriptivo

2.2.2 Nivel Exploratorio

Los estudios exploratorios se realizan cuando el objetivo es examinar problema de investigación poco estudiados. Es decir, cuando la revisión de la literatura revela que solo hay guías no investigadas e ideas vagantes relacionadas con el tema de investigación. Los estudios exploratorios sirven para familiarizarnos con fenómenos desconocidos para obtener información sobre la posibilidad de llevar a cabo una investigación más completa. Asimismo, implican un mayor riesgo requieren gran paciencia, serenidad y receptividad por parte del investigador [45].

La presente investigación es de carácter exploratoria, ya que no se cuenta con información específica sobre un análisis comparativo de las propiedades físicas de aluminosilicatos en relación con el cemento puzolánico tipo IP.

2.2.3 Nivel Descriptivo

Los estudios descriptivos busca especificar propiedades, características y rasgos importantes de cualquier fenómeno que se analice, es decir únicamente pretenden medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre las variables de estudio [45].

La presente investigación es de carácter descriptivo, porque busca determinar ciertas propiedades físicas de los aluminosilicatos con la finalidad de describir y detallar en que se relacionan con las del cemento puzolánico IP.

2.2.4 Población y Muestra

La siguiente investigación considera a todos los tipos de zeolitas naturales como el universo, estableciendo a nueve muestras de zeolitas (ZV, ZC, ZA, ZR, ZZ, ZI, ZX, ZCa, ZCr,) y dos tipos de cementos puzolánicos (CIP, CGU) como la población; las

zeolitas naturales: Zeonatec Verde (ZV), (ZX), Crilarsa (ZCr) y al cemento puzolánico (CIP) que representan como una parte de este conjunto como la muestra definida.

En la presente investigación se realizará una comparación de las propiedades físicas y químicas como densidad, finura, microscopía electrónica de barrido (SEM) y dispersión de energía de rayos X (EDS) de cada una las tres zeolitas naturales, figura 8 (ZV, ZX, ZCr) con el cemento puzolánico (CIP). El propósito de estos experimentos es encontrar todas aquellas características importantes de las zeolitas naturales para conocer más sobre este importante material y establecer las posibles aplicaciones en la industria de la construcción como un material para la sustitución parcial del cemento.

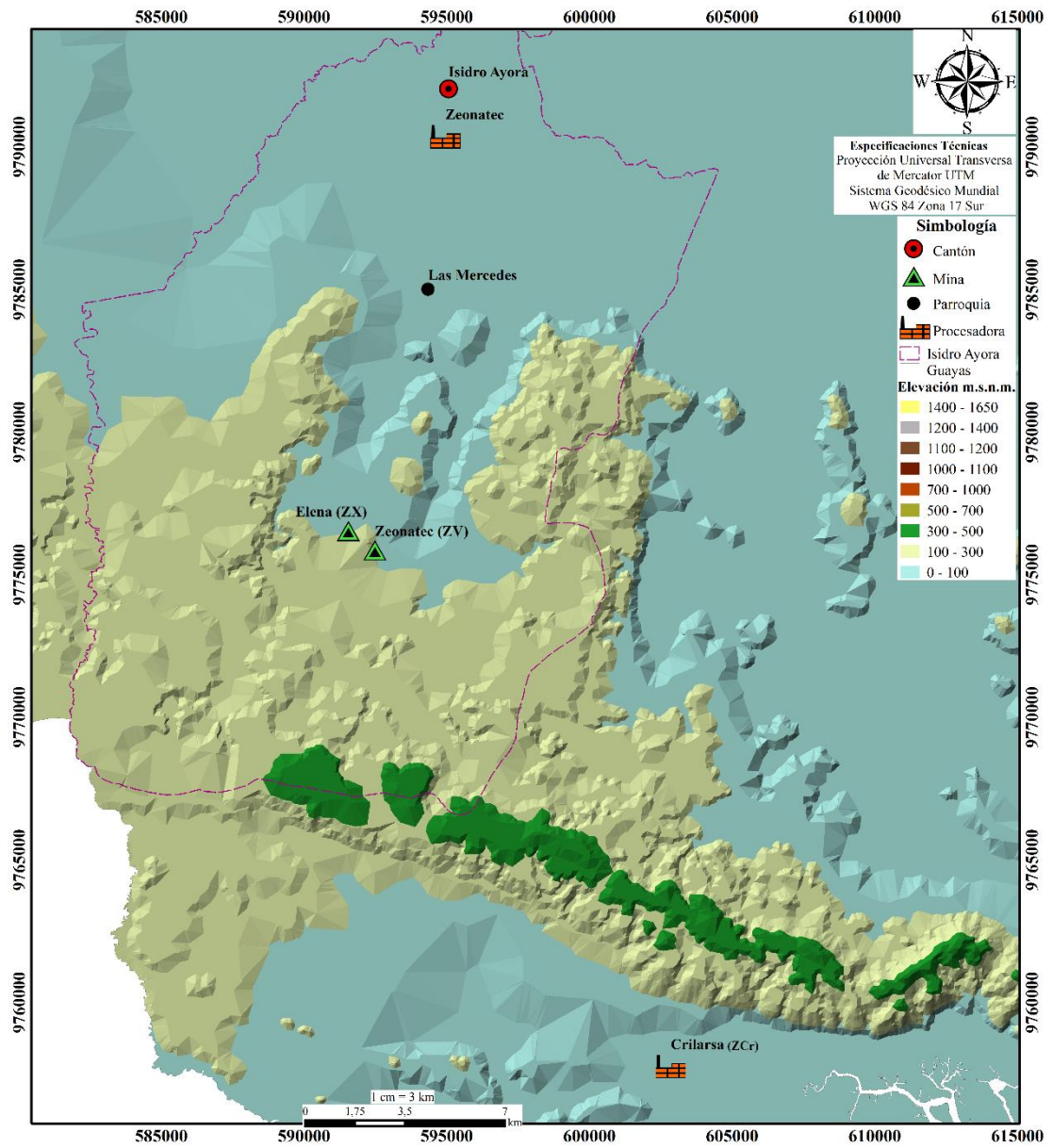


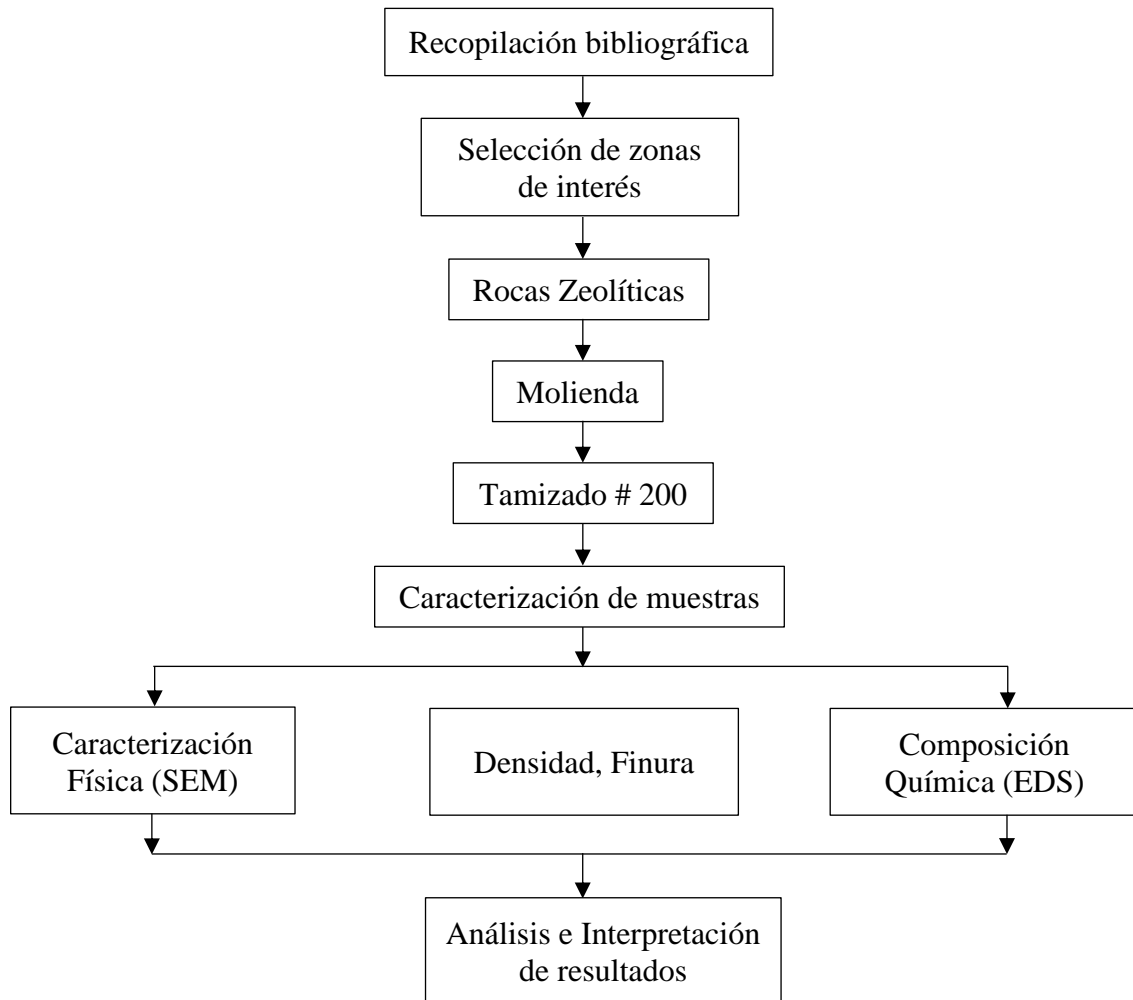
Figura 12: Ubicación de Zeolita Natural y Procesadoras
Fuente: Fabian Ramos

2.3 Plan de Recolección de Datos

Durante esta etapa de la investigación se realizarán varias actividades con la ayuda de los equipos disponibles en el laboratorio de Ensayo de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica (FICM). A continuación, se describe los diferentes

ensayos de laboratorio, los mismos que deben realizarse el número de veces necesarios para cumplir los parámetros estipulados en las normas NTE INEN y ASTM.

En el siguiente diagrama se presenta las principales etapas que se siguieron para el desarrollo de la recolección de datos en esta investigación.



2.3.1 Trabajo de campo y muestreo

Las muestras de zeolita natural empleadas fueron recolectadas en la mina localizada en la cordillera Chongón – Colonche perteneciente a la Provincia del Guayas, cantón Isidro Ayora, parroquia Las Mercedes zona que presenta mayor potencialidad de zeolita natural. Se recogieron un total de cuatro muestras de zeolita natural en roca de diversos tamaños aproximadamente de 6 a 8 kg (Figura 13); las muestras de zeolita recogidas en roca fueron de cuatro estratos que presentaba este yacimiento.

Las muestras obtenidas en rocas se las identificó como ZV, ZC, ZA, ZR, son rocas compactas de color verde y marrón con tonos verdes claros.

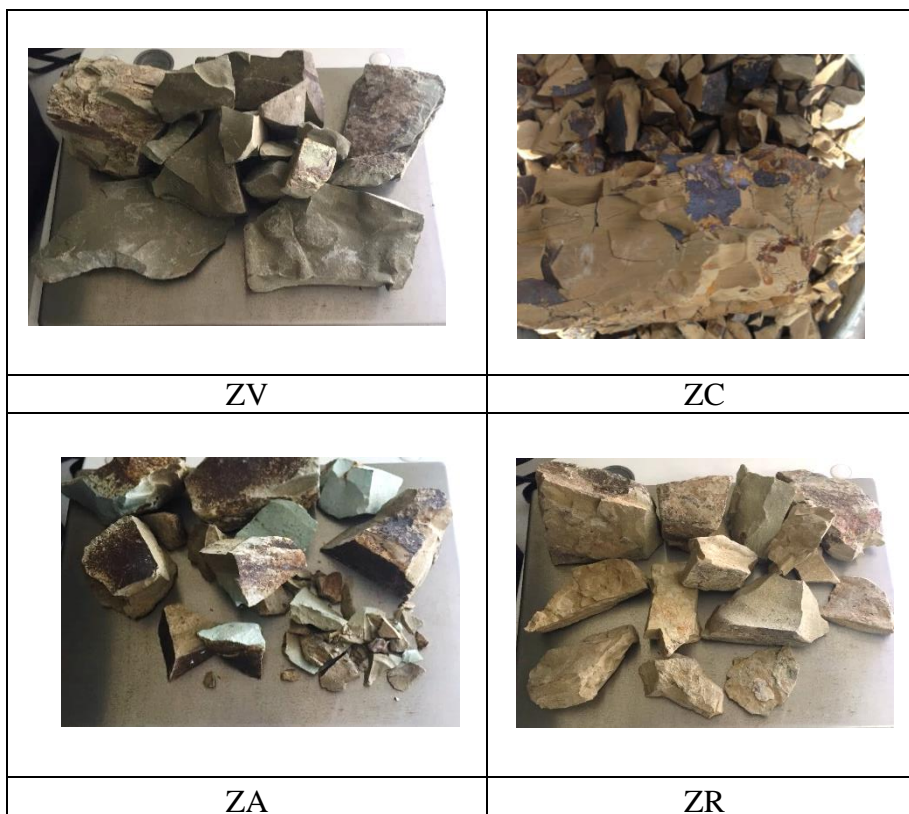


Figura 13: Muestras de Zeolita Natural (Zeonatec), Las Mercedes, Isidro Ayora, Prov. Guayas
Fuente: Fabian Ramos

Además, en esta investigación también se utilizó zeolita natural comercializado y procesado por varias empresas dedicadas a la producción de este material puzolánico en diferentes granulometrías (75 μm , 150 μm , 425 μm). La mayor parte de estas empresas se encuentran localizadas en la Provincia del Guayas, dichas muestras en su mayoría se tuvieron que tamizar por la malla #200 (75 μm) para su posterior utilización.

2.3.2 Trituración

Para la reducción del tamaño de partículas se emplearon dos métodos mecánicos:

- ✓ **Trituración con un combo.-** La primera etapa de la trituración de la zeolita natural en roca se realizó en el laboratorio de Ensayos de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Esta consistió en tomar la roca y mediante golpes con el combo llevarlas a un tamaño de 20 mm aproximado y posteriormente puedan ser molidas en el molino de bolas.



Figura 14: Trituración manual de Zeolitas
Fuente: Fabian Ramos

- ✓ **Molienda.-** La zeolita triturada se alimentó al molino de bolas para iniciar la pulverización del material hasta obtener la granulometría necesaria, colocamos 1kg de zeolita triturada con un total de 117 esferas de acero con un diámetro entre 11 – 31 mm a una velocidad de 74 rpm durante 1 hora para disminuir su tamaño menor a 75 μm que pasen la malla #200.



Figura 15: Molino de bolas
Fuente: Fabian Ramos

- ✓ **Tamizado.-** Una vez finalizada la molienda se procede a extraer el material molido cuidadosamente y se procede a pesar antes de tamizar en los tamices 3/8", N°4, 8, 16, 30, 50, 100, 200 durante 30 minutos utilizando la tamizadora eléctrica.



Figura 16: Tamizadora eléctrica
Fuente: Fabian Ramos

Una vez finalizado esta actividad se separó el material con un tamaño mayor a 75 μm , y se repitió nuevamente la molienda hasta obtener la cantidad de material necesario que pase el tamiz de 75 μm para la realización de los diferentes ensayos; la zeolita natural menor a 75 μm es almacenada en fundas herméticas en un lugar libre de humedad y contaminación por algún tipo de gas.

Es importante mencionar, la zeolita natural posee distintas características entre las más importantes son absorber la humedad y gases del medio en el que encuentren.

2.3.3 Ensayos de laboratorio

2.3.3.1 Ensayo de la densidad real del cemento y zeolita natural

El ensayo está estandarizado según la norma NTE INEN 156 y ASTM C-188. La determinación de la densidad de cemento hidráulico consiste en establecer la relación entre la masa de cemento y el volumen desplazado por el cemento expresado en g/cm^3 .

Para la realización de este ensayo se utilizó el método del picnómetro, el cual consiste en introducir progresivamente 64 g de cemento, posteriormente se coloca el reactivo (gasolina) hasta la marca de aforo del picnómetro, se realizan agitaciones permanentes manteniendo una posición horizontal para sacar los vacíos entre el reactivo y cemento o zeolita; la temperatura juega un papel muy importante durante la realización del ensayo ya que se debe mantener una variación de $0.2\text{ }^{\circ}C$ entre la lectura inicial y final del volumen del líquido desplazado por el cemento, luego se aplica la siguiente formula:

$$\rho(g/cm^3) = \frac{\text{masa del cemento, g}}{\text{volumen desplazado, cm}^3}$$

La norma NTE INEN 156, describe el procedimiento para realizar este ensayo mediante el frasco Le Chatelier, sin embargo, la norma indica en el numeral **4.2.5** la utilización de un equipo alternativo por lo que usamos el picnómetro aforado debido a la no disponibilidad del equipo que se muestra en la figura 17.

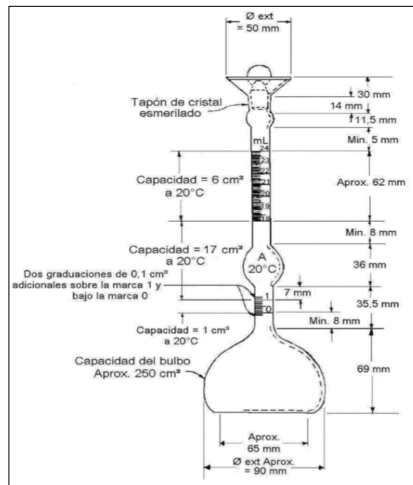


Figura 17: Frasco de Le Chatelier para el ensayo de densidad
Fuente: NTE INEN 156 [20], ASTM C-188 [46]

2.3.3.2 Ensayo de finura del cemento y zeolita natural método tamizado seco

El presente ensayo iniciamos pesando 50 gramos del material a ensayar, asegurándonos que las muestras estén libres de humedad y grumos. Posteriormente colocamos la muestra sobre un tamiz limpio y seco de 75 μm (N° 200) con la bandeja colocada. Tamizar con movimiento de muñeca hasta que la mayoría del material haya pasado y el tamiz luzca casi limpio, esta actividad requiere de 3 a 4 minutos, luego colocamos la tapa del tamiz y manteniendo firme golpeamos suavemente la parte inferior del tamiz con el mango de la brocha hasta que aparezca limpio. Vaciamos el material retenido en la bandeja y limpiamos con un paño.

Nuevamente continuamos tamizando por 5 a 10 minutos girando el tamiz durante todo el proceso, teniendo cuidado de no prolongarnos del tiempo establecido. De nuevo volvemos a colocar la tapa y realizamos golpes suaves. Si el cemento esta condición adecuada no debe quedar polvo apreciable en el residuo, ni adherido al tamiz o bandeja.

Finalmente realizamos ensayos de 1 minuto sosteniendo el tamiz con la bandeja y la tapa puesta con una mano en una posición inclinada y realizamos movimientos hacia adelante y hacia atrás en un plano inclinado, al mismo tiempo golpear el lado del tamiz suavemente con l palma de la mano alrededor de 150 veces/minuto. Después de cada 25 golpes girar el tamiz 60° en la misma dirección. Continuar esta actividad hasta que no más de 0,05 g de material pase en 1 minuto de tamizado y finalmente pesar el retenido del tamiz teniendo cuidado con el cepillado de la malla en ambos lados garantizando la remoción de todo el residuo.



*Figura 18: Movimientos suaves de muñeca
Fuente: Fabian Ramos*

La finura de los materiales se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$F = 100 - [(R_s * 100) / m] \text{ donde}$$

F= finura del cemento que pasa el tamiz 75 μm (N° 200) expresada en porcentaje

R_s= Residuo reteniendo en el tamiz 75 μm (N° 200)

m= masa de ensayo en gramos

2.3.3.3 Caracterización morfológica del cemento y zeolita natural (SEM)

La microscopía electrónica de barrido (SEM-Scanning Electron Microscopy) se basa en el principio de la microscopía óptica en la que se sustituye el haz de luz por un haz de electrones. Se coloca la muestra en una cámara de vacío, para poder focalizar el haz de electrones que se bombardea a la muestra, los electrones del haz chocan sobre la superficie de la interacción de estos electrones con la superficie del material se recauda información con los detectores de los electrones secundarios que generan imágenes de alta resolución, proporcionando de esta manera datos sobre formas, texturas y composición química de un material.

El haz de electrones interactúa con la muestra y es desplazado sobre toda la superficie a modo de un pincel que barre la muestra con continuas idas y venidas. Esta movilidad del haz se consigue gracias a un sistema de bobinas de barrido situadas en la columna del instrumento como se muestra en la figura 19.

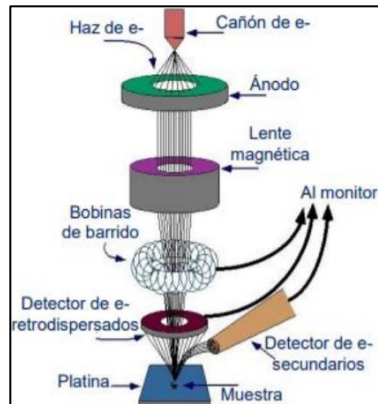


Figura 19: Estructura del microscopio electrónico de barrido
Fuente: Ramírez A. [48]

El estudio morfológico se llevó a cabo utilizando un Microscopio Electrónico de Barrido JSM-IT100. Este equipo nos permite tener información sobre la morfología de nuestra muestra de zeolita, así mismo, es posible obtener una estimación

semicuantitativa sobre la presencia de elementos en la composición química. La muestra se prepara al depositar una pequeña cantidad de zeolita en polvo en forma dispersa, sobre una cinta de carbono de doble cara para asegurar un fino recubrimiento. Puesto que los materiales utilizados no son conductores, se metaliza la superficie de las muestras para asegurar suficiente conductividad y evitar la creación de cargas eléctricas en la superficie que podrían deteriorar la calidad de la imagen. La metalización se realiza utilizando la técnica de recubrimiento a vacío de las muestras con una fina capa de oro.

2.3.3.4 Caracterización mineralógica del cemento y zeolita natural (EDS)

El analizador por dispersión de energía de rayos X (Energy Disperse X-Ray Spectroscopy- EDS) es una técnica de análisis no destructiva donde la radiación utilizada son los rayos X característicos que emite la muestra bajo el bombardeo de electrones. El análisis EDS proporciona información analítica sobre la composición del material del total o de zonas de la muestra de hasta unas cuantas micras de diámetro[49].

Los parámetros utilizados para las mediciones fueron:

- ✓ Equipo: Microscopio electrónico de barrido modelo JSM-IT100
- ✓ Voltaje: 15 kV
- ✓ Resolución: HV (high vacuum)
- ✓ Magnification: x 2,000

2.4 Plan de Procesamiento y Análisis de Información

2.4.1 Plan de procesamiento

El procesamiento de la información recabada a lo largo del desarrollo de la investigación se realizará siguiendo los procesos que se mencionan a continuación:

- ✓ Revisión crítica de la información obtenida; es decir eliminación de información defectuosa: contradictoria, incompleta, no pertinente, etc.
- ✓ Tabulación de la información de los ensayos de laboratorio realizados.
- ✓ Elaboración de graficas de acuerdo con los resultados obtenidos.

2.4.2 Plan de análisis

- ✓ Analizar e interpretar los resultados obtenidos en base a los objetivos e hipótesis.
- ✓ Establecer conclusiones y recomendaciones.

CAPITULO III
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de resultados

3.1.1 Determinación de la densidad real del cemento (método del picnómetro)

Tabla 6: Cálculo de la densidad real del cemento IP

Denominación		ENSAYOS		
		I*	II	III
Tipo: Cemento Pozolánico IP		Temperatura: 23°C		
Norma: NTE INEN 156 – ASTM C 188				
Fecha: 17/12/2019				
1. Masa del picnómetro (g)	m_1	151,81	151,81	151,81
2. Masa del picnómetro + cemento (g)	m_2	215,81	215,81	215,81
3. Masa del picnómetro + cemento + gasolina (g)	m_3	567,38	566,42	566,25
4. Masa de la gasolina añadida (g)	$m_4 = m_3 - m_2$	351,57	350,61	350,44
5. Masa del picnómetro + 500cc de gasolina (g)	m_5	519,93	519,01	518,88
6. Masa del 500cc de gasolina (g)	$m_6 = m_5 - m_1$	368,12	367,2	367,07
7. Densidad de la gasolina (g/cm ³)	$\delta_{ga} = m_6/500cc$	0,736	0,734	0,734
8. Masa de gasolina desalojada por cemento (g)	$m_7 = m_6 - m_4$	16,55	16,59	16,63
9. Masa del cemento (g)	$m_c = m_2 - m_1$	64	64	64
10. Volumen de gasolina desalojada (cm ³)	$V_{dga} = m_7/\delta_{ga}$	22,48	22,59	22,65
11. Densidad real del cemento (g/cm ³)	$\delta_c = m_c/V_{dga}$	2,847	2,833	2,825
12. Densidad real promedio del cemento (g/cm ³)		2,84		

* La temperatura del ensayo 1 es de 23,5 °C.

Precisión y Desviación (INEN 156 -literal 4.7.1)		
Parámetros de Control	Valores	Precisión 1 Op
Intervalo	0,022	<0,03
Desviación estándar	0,011	<0,012
Coefficiente de variación	0,39%	<1%
Valor promedio	2,84 g/cm³	

Elaborado por: Fabian Ramos

3.1.2 Determinación de la densidad de la zeolita natural (método del picnómetro)

Tabla 7: Cálculo de la densidad real de la Zeolita Natural (ZV)

Tipo: Zeolita Natural (ZV)				
Norma: NTE INEN 156 – ASTM C 188			Temperatura: 23°C	
Fecha: 20/12/2019				
Denominación		ENSAYOS		
		I	II	III
1. Masa del picnómetro (g)	m_1	151,8	151,8	151,8
2. Masa del picnómetro + cemento (g)	m_2	215,8	215,8	215,8
3. Masa del picnómetro + cemento + gasolina (g)	m_3	568,5	568,5	568,7
4. Masa de la gasolina añadida (g)	$m_4 = m_3 - m_2$	352,7	352,7	352,9
5. Masa del picnómetro + 500cc de gasolina (g)	m_5	523,0	523,0	523,3
6. Masa del 500cc de gasolina (g)	$m_6 = m_5 - m_1$	371,1	371,2	371,5
7. Densidad de la gasolina (g/cm ³)	$\delta_{ga} = m_6/500cc$	0,742	0,743	0,743
8. Masa de gasolina desalojada por cemento (g)	$m_7 = m_6 -$	18,47	18,50	18,58
9. Masa del cemento (g)	$m_c = m_2 - m_1$	64	64	64
10. Volumen de gasolina desalojada (cm ³)	$V_{dga} =$	24,88	24,92	25,01
11. Densidad real del cemento (g/cm ³)	$\delta_c = m_c/V_{dga}$	2,572	2,569	2,559
12. Densidad real promedio del cemento (g/cm ³)		2,57		

Precisión y Desviación (INEN 156 - literal 4.7.1)		
Parámetros de Control	Valores	Precisión 1 Op
Intervalo	0,013	<0,03
Desviación estándar	0,007	<0,012
Coefficiente de variación	0,26%	<1%
Valor promedio	2,57 g/cm³	

Elaborado por: Fabian Ramos

Tabla 8: Cálculo de la densidad real de la Zeolita Natural (ZX)

Tipo: Zeolita Natural (ZX)				
Norma: NTE INEN 156 – ASTM C 188			Temperatura: 23°C	
Fecha: 19/12/2019				
Denominación		ENSAYOS		
		I	II	III
1. Masa del picnómetro (g)	m_1	151,81	151,80	151,80
2. Masa del picnómetro + cemento (g)	m_2	215,81	215,80	215,8
3. Masa del picnómetro + cemento + gasolina (g)	m_3	565,77	565,08	565,26
4. Masa de la gasolina añadida (g)	$m_4 = m_3 - m_2$	349,96	349,28	349,46
5. Masa del picnómetro + 500cc de gasolina (g)	m_5	522,82	522,24	522,50
6. Masa del 500cc de gasolina (g)	$m_6 = m_5 - m_1$	371,01	370,44	370,7
7. Densidad de la gasolina (g/cm ³)	$\delta_{ga} = m_6/500cc$	0,742	0,741	0,741
8. Masa de gasolina desalojada por cemento (g)	$m_7 = m_6 - m_4$	21,05	21,16	21,24
9. Masa del cemento (g)	$m_c = m_2 - m_1$	64	64	64
10. Volumen de gasolina desalojada (cm ³)	$V_{dga} = m_7/\delta_{ga}$	28,37	28,56	28,65
11. Densidad real del cemento (g/cm ³)	$\delta_c = m_c/V_{dga}$	2,256	2,241	2,234
12. Densidad real promedio del cemento (g/cm ³)		2,24		

Precisión y Desviación (INEN 156 - literal 4.7.1)		
Parámetros de Control	Valores	Precisión 1 Op
Intervalo	0,022	<0,03
Desviación estándar	0,011	<0,012
Coefficiente de variación	0,50%	<1%
Valor promedio	2,24 g/cm³	

Elaborado por: Fabian Ramos

Tabla 9: Cálculo de la densidad real de la Zeolita Natural (ZCr)

Tipo: Zeolita Natural (ZCr)				
Norma: NTE INEN 156 – ASTM C 188		Temperatura: 23°C		
Fecha: 16/12/2019				
Denominación		ENSAYOS		
		I	II	III
1. Masa del picnómetro (g)	m_1	161,98	161,98	161,98
2. Masa del picnómetro + cemento (g)	m_2	225,98	225,98	225,98
3. Masa del picnómetro + cemento + gasolina (g)	m_3	576,79	577,11	578,78
4. Masa de la gasolina añadida (g)	$m_4 = m_3 - m_2$	350,81	351,13	352,8
5. Masa del picnómetro + 500cc de gasolina (g)	m_5	534,32	534,55	536,28
6. Masa del 500cc de gasolina (g)	$m_6 = m_5 - m_1$	372,34	372,57	374,3
7. Densidad de la gasolina (g/cm ³)	$\delta_{ga} = m_6/500cc$	0,745	0,745	0,749
8. Masa de gasolina desalojada por cemento (g)	$m_7 = m_6 - m_4$	21,53	21,44	21,50
9. Masa del cemento (g)	$m_c = m_2 - m_1$	64	64	64
10. Volumen de gasolina desalojada (cm ³)	$V_{dga} = m_7/\delta_{ga}$	28,91	28,77	28,72
11. Densidad real del cemento (g/cm ³)	$\delta_c = m_c/V_{dga}$	2,214	2,224	2,228
12. Densidad real promedio del cemento (g/cm ³)		2,23		

Precisión y Desviación (INEN 156 - literal 4.7.1)		
Parámetros de Control	Valores	Precisión 1 Op
Intervalo	0,004	<0,03
Desviación estándar	0,002	<0,012
Coefficiente de variación	0,09%	<1%
Valor promedio	2,23 g/cm ³	

Elaborado por: Fabian Ramos

➤ **Análisis y discusión de las densidades reales**

De los ensayos realizados para la determinación de la densidad real del cemento IP y las zeolitas naturales, los valores obtenidos se encuentran dentro de los parámetros establecidos y determinados mediante varias investigaciones de laboratorio durante varios años.

El valor de la densidad real del cemento IP obtenido corresponde a $2,84 \text{ g/cm}^3$ como se indica en la (Tabla 8), dicho valor se encuentra cercano al intervalo de $2,9 - 3,15 \text{ g/cm}^3$. La diferencia de $0,06$ se debe a muchos factores entre los que podemos mencionar la temperatura del laboratorio, temperatura del reactivo, calidad de la muestra de cemento y el equipo empleado; estos inciden considerablemente en los resultados finales que se obtendrán.

Por el contrario, las densidades de las zeolitas naturales poseen valores cercanos a la densidad del cemento IP, la densidad real de las zeolitas se encuentra en un rango $1,9 - 2,9 \text{ g/cm}^3$ esto depende de la composición química de cada zeolita natural. Como se puede observar en la tabla (Tabla 8) la zeolita natural ZV posee una mayor densidad con respecto a las zeolitas ZX y ZCr. Estos datos fueron obtenidos de acuerdo con la norma NTE INEN 156, ASTM C188 debido a la falta de una norma para zeolitas naturales.

La desviación estándar ($<0,012\%$) se encuentra dentro de lo establecido por la NTE INEN 156, cumpliendo así este parámetro de control.

Tabla 10: Resumen Densidad Real

Tipo	Densidad	NTE INEN 156	Desviación Estándar
Cemento IP	$2,84 \text{ g/cm}^3$	$<0,012\%$	0,011%
Zeolita (ZV)	$2,57 \text{ g/cm}^3$		0,007%
Zeolita (ZX)	$2,24 \text{ g/cm}^3$		0,011%
Zeolita (ZCr)	$2,23 \text{ g/cm}^3$		0,002%

3.1.3 Determinación de la finura del cemento y zeolita natural (tamizado seco)

Tabla 11: Cálculo de la finura del cemento IP

Tipo: Cemento Puzolánico IP			
Norma: NTE INEN 489 – ASTM C184			
Fecha: 14/01/2020			
Denominación	Unidad	Ensayos	
		E1	
Masa del material de ensayo	g	50	
Repeticiones 1min	#	4	
Peso en la fuente ($\leq 0,05$)	g	0,003	
Residuo de muestra retenido #200 Rs	g	0,14	
Finura F	%	99,72	
Promedio Pm	%	99,72	

Elaborado por: Fabian Ramos

Tabla 12: Cálculo de la finura de la Zeolita Natural (ZV)

Tipo: Zeolita natural (ZV)				
Norma: NTE INEN 489 – ASTM C184				
Fecha: 08/01/2020				
Denominación	Unidad	Ensayos		
		E1	E2	E3
Masa del material de ensayo	g	50	50	50
Repeticiones 1min	#	10	14	11
Peso en la fuente ($\leq 0,05$)	g	0,003	0,04	0,05
Residuo de muestra retenido #200 Rs	g	0,11	0,09	0,07
Finura F	%	99,78	99,82	99,89
Promedio Pm	%	99,82		

Elaborado por: Fabian Ramos

Tabla 13: Cálculo de la finura de la Zeolita Natural (ZX)

Tipo: Zeolita natural (ZX)				
Norma: NTE INEN 489 – ASTM C184				
Fecha: 10/01/2020				
Denominación	Unidad	Ensayos		
		E1	E2	E3
Masa del material de ensayo	g	50	50	50
Repeticiones 1min	#	10	6	6
Peso en la fuente (≤0,05)	g	0,03	0,01	0,02
Residuo de muestra retenido #200 Rs	g	0,01	0,02	0,03
Finura F	%	99,98	99,96	99,94
Promedio Pm	%	99,96		

Elaborado por: Fabian Ramos

Tabla 14: Cálculo de la finura de la Zeolita Natural (ZCr)

Tipo: Zeolita natural (ZCr)				
Norma: NTE INEN 489 – ASTM C184				
Fecha: 14/01/2020				
Denominación	Unidad	Ensayos		
		E1	E2	E3
Masa del material de ensayo	g	50	50	50
Repeticiones 1min	#	3	4	4
Peso en la fuente (≤0,05)	g	0,005	0,004	0,005
Residuo de muestra retenido #200 Rs	g	0,15	0,08	0,13
Finura F	%	99,70	99,84	99,74
Promedio Pm	%	99,76		

Elaborado por: Fabian Ramos

➤ **Análisis y discusión de finura (método de tamizado seco)**

Los valores obtenidos en este ensayo de los materiales investigados como se muestra en la (Tabla 15), el cemento IP presenta un 99,72% de finura lo que nos indica que este material conglomerante garantiza una buena calidad y cumple una de las propiedades relevantes.

De una manera semejante se llegaron a obtener porcentajes superiores al 99% en las zeolitas naturales analizadas, correspondiendo el 99,96% a la zeolita ZX esta característica física puede corresponder a un mejor proceso de trituración en su planta de procesamiento para obtener una finura ($<75 \mu\text{m}$); sin embargo, las zeolitas ZV y ZCr obtuvieron un 99,82%, 99,76% de finura respectivamente, realizando en estas zeolitas un proceso experimental en la trituración.

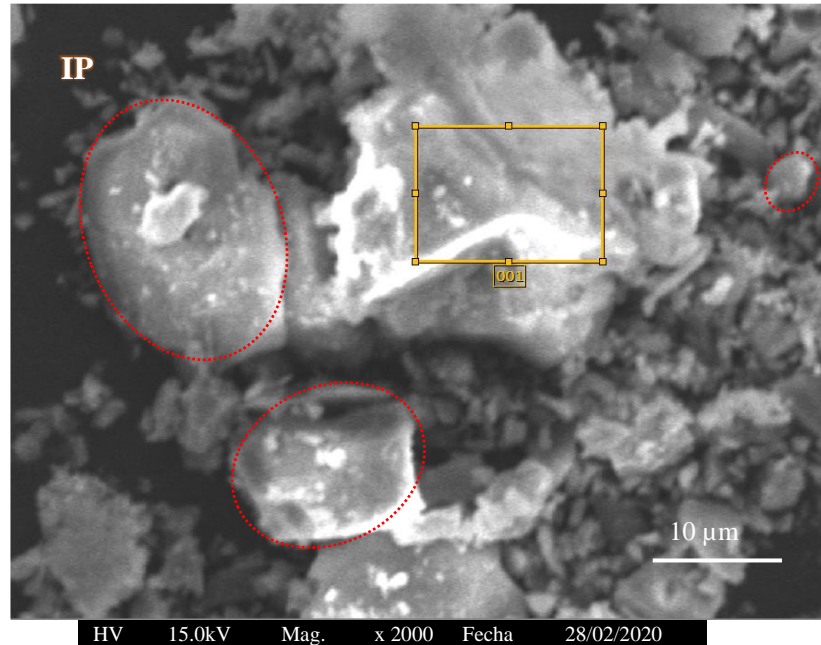
La norma NT INEN 489 indica que no hay material de referencia aceptado, que sea adecuado para determinar la desviación estándar del procedimiento de este método de ensayo [50].

Tabla 15: Resumen de Finura

Tipo	Finura (%)
Cemento IP	99,72
Zeolita (ZV)	99,82
Zeolita (ZX)	99,96
Zeolita (ZCr)	99,76

Elaborado por: Fabian Ramos

3.1.4 Análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM)



*Figura 20: Microfotografía SEM Cemento IP
Fuente: Fabian Ramos*

➤ Análisis del resultado

La microfotografía del cemento puzolánico tipo IP, obtenida mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) en la presente investigación ha sido obtenida con energía de 15 Kv a un nivel de detalle de 2000 aumentos y en modo de alto vacío (high vacuum - HV). En la figura 20 que corresponde al cemento puzolánico tipo IP se puede observar tres masas con superficies irregulares de grandes dimensiones, además en sus alrededores se encuentran pequeños cristales aglomerados con forma no definida y también se puede apreciar granos semi redondos. Los cristales presentan un color opaco en algunos sitios.

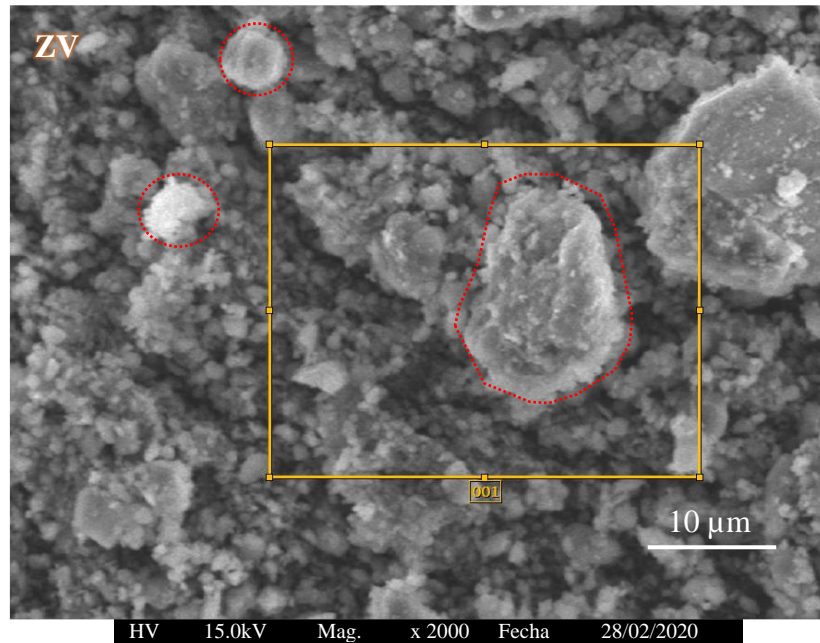


Figura 21: Microfotografía SEM Zeolita Natural (ZV)

Fuente: Fabian Ramos

➤ **Análisis del resultado**

La microfotografía de la zeolita natural ZV, obtenida mediante la microscopia electrónica de barrido (SEM) en la presente investigación ha sido obtenida con energía de 15 Kv a un nivel de detalle de 2000 aumentos y en modo de alto vacío (high vacuum - HV). En la figura 21 que corresponde a la zeolita natural ZV, se aprecia la formación de cristales zeolíticos de diferentes tamaños sobresaliendo entre estos dos cristales grandes con forma cuasi-esférica con un diámetro de entre 10 μm y 16 μm aproximadamente. Los cristales pequeños que representa un porcentaje mayor poseen un diámetro de 1 μm a 5 μm con superficies irregulares poco definidas; estos cristales zeolíticos poseen tonalidades claras en ciertos puntos y opacas en otros sitios.

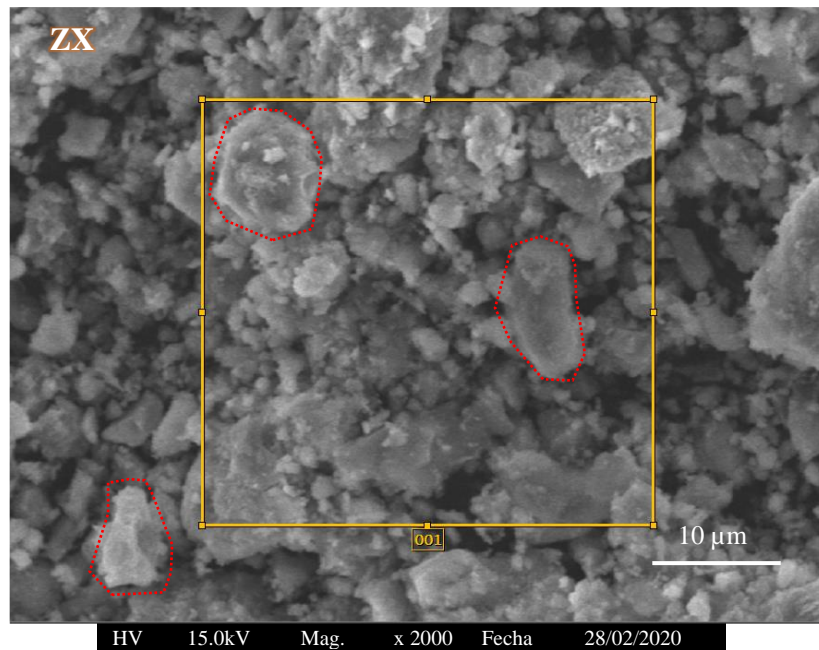


Figura 22: Microfotografía SEM Zeolita Natural (ZX)
Fuente: Fabian Ramos

➤ **Análisis del resultado**

La microfotografía de la zeolita natural ZX, obtenida mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) en la presente investigación ha sido obtenida con energía de 15 Kv a un nivel de detalle de 2000 aumentos y en modo de alto vacío (high vacuum - HV). La morfología de la zeolita natural ZX realizada mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) como se muestra en la figura 22, se aprecia la formación de cristales zeolíticos con tamaño menor a 1 μm hasta 10 μm aproximadamente, aglomerados en su gran mayoría con una geometría hexagonal y redonda. También se presenta cristales zeolítico alargado de $3.8 \times 1.7 \mu\text{m}$, poseen tonalidades constantes en la gran mayoría de los cristales distribuidos en toda la superficie.

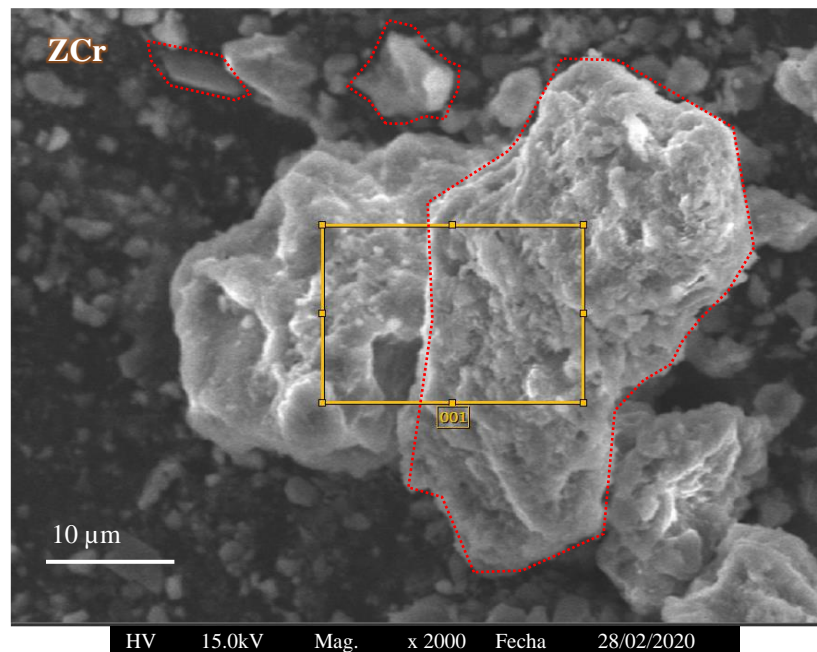


Figura 23: Microfotografía SEM Zeolita Natural (ZCr)
Fuente: Fabian Ramos

➤ **Análisis del resultado**

La microfotografía de la zeolita natural ZCr, obtenida mediante la microscopía electrónica de barrido (SEM) en la presente investigación ha sido obtenida con una energía de 15 Kv a un nivel de detalle de 2000 aumentos y en modo de alto vacío (high vacuum - HV). En la figura 23 que corresponde a la zeolita natural ZCr, se aprecia la formación de dos cristales zeolíticos porosos de gran tamaño de $19 \times 40 \mu\text{m}$ y $20 \times 24 \mu\text{m}$ también se presentan cristales con geometrías cúbicas y ciertos cristales con forma prismática. La gran parte de los cristales zeolíticos se concentran junto a los granos de mayor dimensión mientras que en sus alrededores existe la presencia de cristales con tamaños ente $1 \mu\text{m}$ y $4 \mu\text{m}$.

3.1.5 Análisis de Dispersión de Energía de Rayos X (EDS)

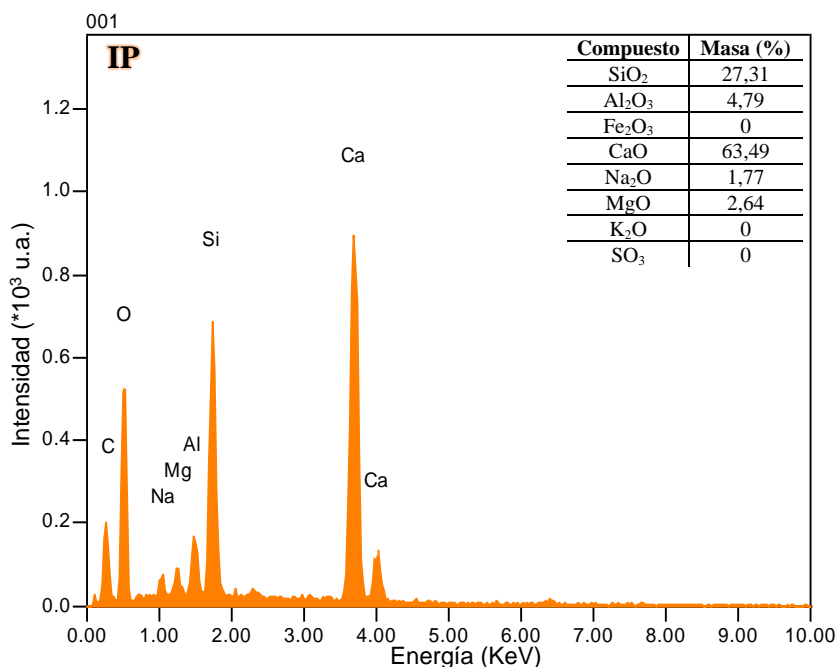


Figura 24: Espectro EDS Cemento IP

Fuente: Fabian Ramos

➤ Análisis del resultado

El análisis EDS se llevó a cabo a 15kv de energía en un modo de alto vacío con un recubrimiento metálico de oro. De acuerdo con los resultados que se presenta en la figura 24, se observa varios picos correspondientes a los elementos del cemento tipo IP encontrados siendo la presencia de calcio (Ca), oxígeno (O), carbono (C), silicio (Si), como componentes mayoritarios en el cemento puzolánico IP. En orden decreciente y en una menor cantidad se presentan también los elementos: al magnesio (Mg), sodio (Na) y potasio (K). ver anexo E

No se evidenció hierro (Fe), potasio (K), azufre (S) en la muestra analizada, este hecho no significa que no exista este elemento en el cemento puzolánico tipo IP, puesto que con la técnica solo se logra analizar un pequeño volumen de la muestra ensayada (fotografía 17).

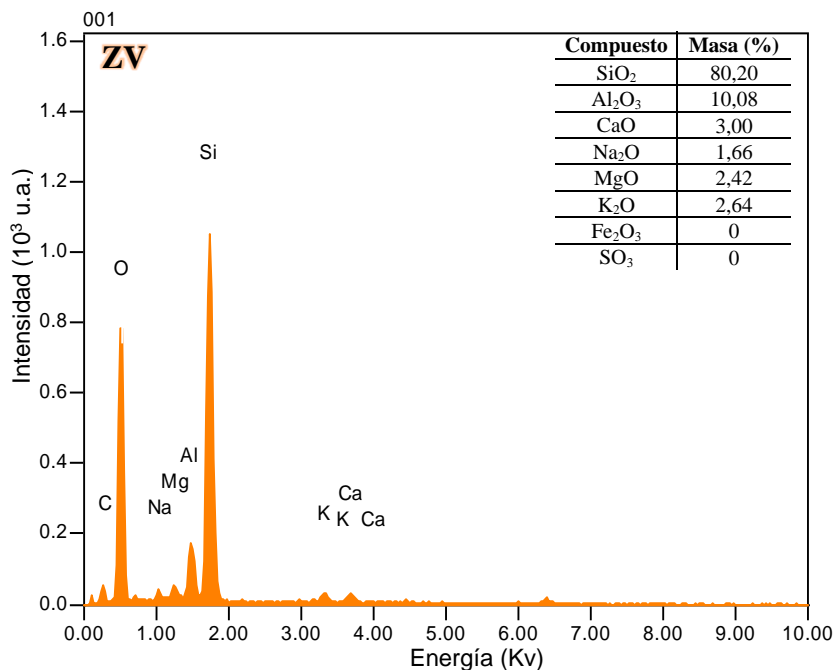


Figura 25: Espectro EDS Zeolita Natural (ZV)
Fuente: Fabian Ramos

➤ **Análisis del resultado**

El análisis EDS se llevó a cabo a 15kv de energía en un modo de alto vacío con un recubrimiento metálico de oro. En el espectro de la figura 25 correspondiente a la zeolita natural ZV (Fig. 18) en donde se detecta la presencia del oxígeno (O) y el silicio (Si) como elementos mayoritarios, propio de los aluminosilicatos. Se puede observar también en un orden decreciente la presencia de elementos como carbono (C), aluminio (Al), potasio (K), calcio (Ca) magnesio (Mg) y sodio (Na). ver anexo E

No se evidenció la presencia de hierro (Fe) en la muestra analizada este hecho no significa que no exista este elemento en la zeolita ZV, puesto que con la técnica solo se logra analizar un pequeño volumen de la muestra ensayada (fotografía 19).

Esta zeolita natural posee una relación Si/Al de $7.03 \approx 7$ lo que nos indica que pertenece al grupo de la mordenita.

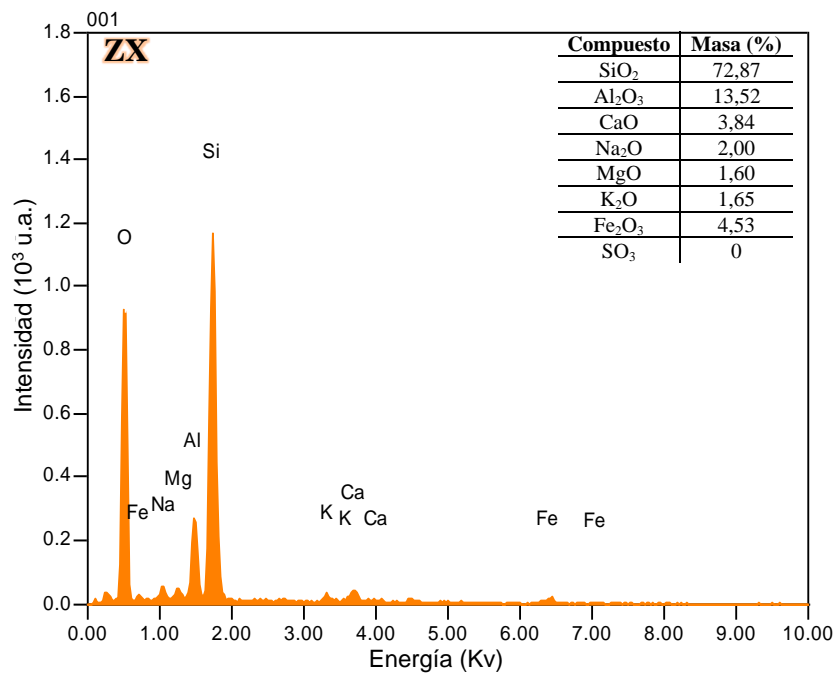


Figura 26: Espectro EDS Zeolita Natural (ZX)
Fuente: Fabian Ramos

➤ **Análisis del resultado**

El análisis EDS se llevó a cabo a 15kv de energía en un modo de alto vacío con un recubrimiento metálico de oro. En el espectro de la figura 26 correspondiente a la zeolita natural ZX (Fig. 23) en donde se detecta la presencia de oxígeno (O), el silicio (Si) y aluminio (Al) como elementos mayoritarios, propio de los aluminosilicatos. Se puede observar también en un orden decreciente la presencia de elementos como: hierro (Fe), calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg) con una mínima la presencia. Esto no quiere decir que no existan estos elementos en una mayor cantidad en la zeolita ZX, puesto que con la técnica solo se logra analizar un pequeño volumen de la muestra ensayada (fotografía 19)

Esta zeolita natural posee una relación Si/Al de $4.76 \approx 5$ lo que nos indica que pertenece al grupo de la mordenita. ver anexo E

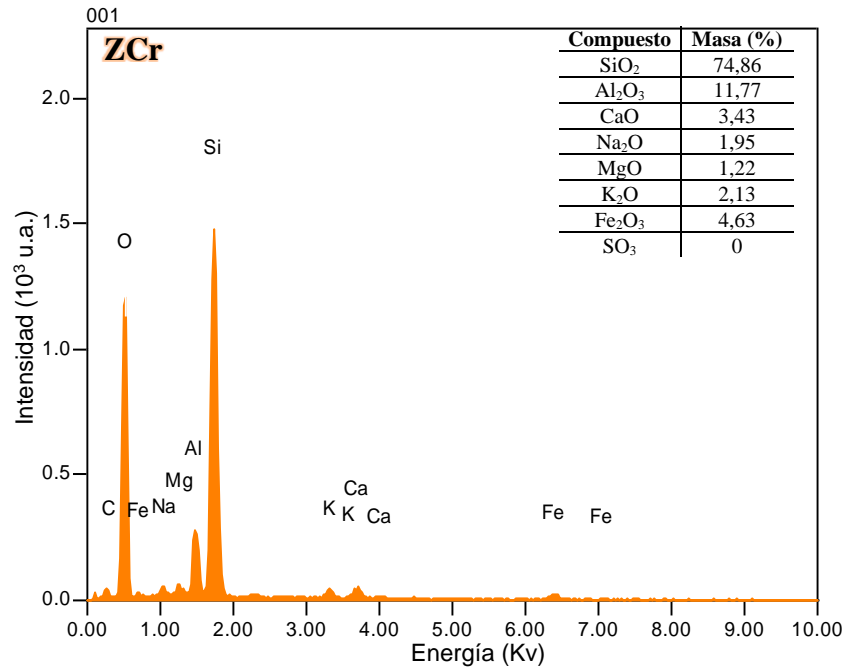


Figura 27: Espectro EDS Zeolita Natural (ZCr)
Fuente: Fabian Ramos

➤ **Análisis del resultado**

El análisis EDS se llevó a cabo a 15kv de energía en un modo de alto vacío con un recubrimiento metálico de oro. En el espectro de la figura 27 correspondiente a la zeolita natural **ZCr** (Fig. 20) en donde se detecta la presencia el oxígeno (O), silicio (Si) y carbono (C) como elementos mayoritarios, propio de los aluminosilicatos. Se puede observar también en un orden decreciente la presencia de elementos como hierro (Fe),calcio (Ca), potasio (K), sodio (Na), y con menor valor el magnesio (Mg) .

Esta zeolita natural presenta una relación Si/Al de $5.62 \approx 6$ lo que nos indica que pertenece al grupo de la mordenita. ver anexo E

3.2 Verificación de hipótesis

La morfología de las zeolitas naturales estudiadas y del cemento tipo IP presentan superficies irregulares porosas con cristales que varían su diámetro entre 1 μm y 15 μm aproximadamente, la forma de las partículas es prismática, angular y granos semi redondeados. Las zeolitas naturales son ricas en óxido de silicio y óxido de aluminio a diferencia del cemento IP que presenta valores inferiores de óxido de silicio y óxido de aluminio.

Así mismo las propiedades físicas (densidad, finura) de las zeolitas estudiadas presentaron características semejantes al cemento tipo IP, siendo estos parámetros importantes para su uso en la sustitución parcial del cemento.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- ✓ Se comprobó mediante el análisis químico EDS que cumple con los requerimientos de la norma ASTM C-618 (tabla 2) para su utilización como puzolanas naturales en el hormigón. Esta norma indica que el contenido mínimo entre la sumatoria de los siguientes compuestos Óxido de Silicio SiO_2 + Óxido de Aluminio Al_2O_3 , + Óxido de Hierro Fe_2O_3 , debe ser mínimo el 70%. En las zeolitas ensayas obtuvimos valores: 93.24% para ZV, 90.22% para ZX, 90.06% para ZCr que es propio de los aluminosilicatos.
- ✓ Con la caracterización realizada de las muestras zeolíticas por Dispersión de Energía de rayos X (EDS), se ha llegado a determinar que estas zeolitas pertenecen al grupo de la mordenita, presentando una relación **Si/Al** (ver anexo D) de 7, 5, 6, para las zeolitas ZV, ZX, ZCr, respectivamente.
- ✓ Mediante el análisis por Dispersión de Energía de rayos X (EDS), se comprobó que las zeolitas presentan porcentajes superiores (SiO_2 , Al_2O_3) en su composición química en relación con la composición del cemento tipo IP.
- ✓ La composición química de las zeolitas naturales varía dependiendo de su lugar de yacimiento y su proceso de formación en ambientes ígneos, sedimentarios y metamórficos.

- ✓ Mediante el análisis de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) identificamos que la estructura de las zeolitas ensayadas posee diferente morfología, predominado formas prismáticas, hexagonales alargados, la mayoría con superficie y forma irregular.
- ✓ Se determinó que la densidad de las zeolitas ensayadas $ZV=2.57 \text{ g/cm}^3$, $ZX=2.24 \text{ g/cm}^3$, $ZCr=2.23 \text{ g/cm}^3$ se encuentra dentro del rango estimado, existiendo una pequeña diferencia en relación con la del cemento puzolánico tipo IP= 2.85 g/cm^3 demostrando su calidad para emplear en la construcción al ser un producto natural.
- ✓ Se concluye que por medio de la trituration manual y con la ayuda del molino pulverizador podemos lograr la finura de la zeolita natural igual a la finura del cemento puzolánico tipo IP.
- ✓ Se determinó que los tiempos de pulverización hasta lograr la finura deseada en las zeolitas naturales varían dependiendo de la dureza de las zeolitas y su origen de yacimiento.
- ✓ Al hablar de costos para la producción a escala industrial es importante mencionar que la zeolita natural requiere de menos consumo de energía y menos procesos de producción hasta obtener el producto final; la industria del cemento es responsable de la emisión de grandes cantidades de CO_2 durante la producción de cemento.

4.2 Recomendaciones

- ✓ Realizar la adquisición de las rocas zeolíticas en los yacimientos en época seca debido a la capacidad de retención de líquidos y gases que posee este mineral.
- ✓ Realizar los ensayos de densidad real en un espacio que cumpla con los requisitos como se establece en las normas NTE INEN 156, ASTM C 188 en especial la temperatura y con los equipos correctos para obtener valores que puedan ser utilizados en investigaciones.
- ✓ Colocar la cantidad adecuada en el equipo de pulverización para evitar desperfectos de este y obtener la granulometría deseada.
- ✓ Se recomienda en los ensayos de la parte química (SEM,EDS), colocar las muestras de zeolita a ensayarse en eppendorf sellados herméticamente con parafilm (ver nexo E) para evitar el ingreso de humedad y gases.
- ✓ Según investigaciones de los últimos años la zeolita natural ha demostrado su idoneidad y su gran utilidad en diferentes campos como la agricultura, acuícola, avícola, filtros, construcción, etc. Es importante ver a este mineral como algo más que una simple sustitución del cemento, debemos ver como un recurso valioso para el desarrollo de materiales en el campo de la Ingeniería Civil.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Qu, A. Martin, J. Y. Pastor, A. Palomo, and A. Fern, “Characterisation of pre-industrial hybrid cement and effect of pre-curing temperature,” vol. 73, 2016.
- [2] O. Saltos, “Efectos de la Adición de Zeolita en las propiedades mecánicas de un hormigón conveccional del Cemento Portland Tipo I,” Escuela Superior Politecnica del Litoral, 2005.
- [3] 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.
- [4] J. L. Costafreda Mustelier, B. Calvo Pérez, and J. L. Parra, “Contribución De La Zeolita Natural a Las Resistencias Mecánicas De Cementos , Morteros Y Hormigones,” *Bibl. la Univ. Politécnica Madrid*, no. 1, pp. 1–10, 2014.
- [5] A. Robalino, “El uso de la Zeolita como una adición mineral para producir Cemento Puzolánico,” Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2004.
- [6] A. M. Jacob and L. G. Das, “Website : www.ijirset.com Ecofriendly Concrete by Partial Replacement of Cement by Zeolite,” vol. 6, no. 5, pp. 8194–8200, 2017.
- [7] T. Samardzioska and M. Jovanovski, “Zeolites - Sustainable Building Material,” no. June, 2017.
- [8] J. Carlos, D. Cruz, J. María, and D. Colorado, “A Much Better Concrete with Zeolite Additions- State of the Art Review,” 2014.
- [9] 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*, vol. 2010, no. 1, pp. 3–11, 2011.
- [10] 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.
- [11] O. Garcés, “Caracterización mineralógica del depósito de zeolitas naturales en el río Guaraguau (Isidro Ayora , provincia del Guayas) y su aplicación en la remoción de amonio en aguas residuale.,” Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2013.
- [12] F. Enrique and M. Carballo, “Las Zeolitas De La Costa De Ecuador (Guayaquil):

- Geología , Caracterización,” Universidad Politécnica de Madrid Escuela, 2004.
- [13] Asocreto, *Tecnología del Concreto Tomo I*, Tercera. Colombia, 2010.
- [14] V. Fréré, “Elaboración de un cemento híbrido basado en la activación alcalina de cemento portland puro y zeolita ecuatoriana,” Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2018.
- [15] A. Orrala and G. Gómez, “ESTUDIO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN CON ADICIÓN DE PUZOLANA OBTENIDA DE LA CALCINACIÓN DE RESIDUOS DEL CULTIVO DE MAÍZ PRODUCIDO EN LA PROVINCIA DE SANTA ELENA.,” UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA, 2015.
- [16] NTE INEN 152:2012, “Cemento Portland . Requisitos.” Quito, 2012.
- [17] NTE INEN 490:2011, “Cementos hidráulicos compuestos. Requisitos.” Quito, 2011.
- [18] NTE INEN 2380:2011, “Cementos Hidráulicos. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos.” Quito, 2011.
- [19] S. H. Kosmatka and W. Kerkhoff, *Diseño y control de mezclas de Concreto*, 1st ed. 2004.
- [20] NTE INEN 156:2009, “Cemento hidráulico. Determinación de la densidad.” Quito, 2009.
- [21] NTE INEN 158:2009, “Cemento hidráulico. Determinación del tiempo de fraguado. Método de Vicat.” Quito, 2009.
- [22] R. F. Gebhardt, “Cement, Concrete, and Aggregates,” in *Survey of North American Portland Cements: 1994*, 2nd ed., Pennsylvania, 1995, pp. 145–489.
- [23] NTE INEN 875:2009, “Cemento hidráulico. Determinación del endurecimiento prematuro. Método de la pasta.” Quito, 2009.
- [24] NTE INEN 491, “Puzolanas.” Quito, pp. 2–7, 1980.
- [25] Á. Sanjuán and S. Chinchón, *Introducción a la fabricación y normalización del Cemento Portland*, vol. 34, no. 11. Alicante, 2006.
- [26] ATM C-618, “Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” *Annu. B. ASTM Stand.*, no. C, pp. 3–6, 2010.


- [27] A. Correa, “Analizar el efecto del grado de amorfización de dos diferentes zeolitas naturales por medio de tratamientos termomecánicos sobre la resistencia a la compresión de morteros. Y su aplicación como puzolanas.” Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2009.
- [28] A. A. Ramezani pour, *Cement Replacement Materials Properties, Durability, Sustainability*. 2014.
- [29] A. Grau, “PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ZEOLITAS JERARQUIZADAS CON ESTRUCTURA MFI Y FAUJASITA: ANÁLISIS DE DIFERENTES MÉTODOS DE INCORPORACIÓN DE MESOPOROSIDAD EN LAS MINAS,” Universidad de Alicante, 2016.
- [30] M. Zarate and M. Gutiérrez, ““USO DE RESIDUOS DE LADRILLO PARA LA FORMACION DE ZEOLITA SINTETICA NaP Y EVALUACION DE SU CAPACIDAD DE ADSORCION DE Pb²⁺ CONTENIDO EN SOLUCION”,” UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN, 2018.
- [31] M. Nas and S. Nayir, “Investigation on Strength and Durability Properties of Concrete Containing Zeolite,” no. September, pp. 0–7, 2018.
- [32] B. Ahmadi and M. Shekarchi, “Cement & Concrete Composites Use of natural zeolite as a supplementary cementitious material,” *Cem. Concr. Compos.*, vol. 32, no. 2, pp. 134–141, 2010.
- [33] L. Benitez and E. López, “ANÁLISIS DEL CONOCIMIENTO DE LA PRODUCCIÓN DEL MINERAL ZEOLITA EN LA CIUDAD DE GUAYAQUIL Y SU ACEPTACIÓN EN EL MERCADO INTERNACIONAL.” Universidad de Guayaquil, 2017.
- [34] G. Rodríguez, “LA INGENIERÍA DE ZEOLITAS NATURALES: DESARROLLO DE NUEVOS MATERIALES Y SUS TECNOLOGÍAS DE UTILIZACIÓN,” UNIVERSIDAD DE LA HABANA, 2015.
- [35] L. Costafreda, “Geología, caracterización y aplicaciones de las rocas zeolíticas del complejo volcánico de Cabo de Gata (Almería),” Universidad Politécnica de Madrid, 2008.
- [36] 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.
- [37] “Biomarsa Kravets.” [Online]. Available: <http://www.biomarsa.com/zeolita.html>. [Accessed: 15-Dec-2019].
- [38] “¿Cómo se forma la zeolita? - Zeolitas CM.” [Online]. Available:

<http://www.cmzeolites.com.au/formed>. [Accessed: 15-Dec-2019].







- [39] D. Arajuno, “Evaluación de la zeolita natural (clinoptilolita),” ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO, 2012.
- [40] M. Rodríguez, “EVALUACION DE LA CAPACIDAD DE ADSORCIÓN DE NH₄⁺ Y METALES PESADOS Pb²⁺, Cd²⁺, Cu²⁺, Zn²⁺ y Mn²⁺ EMPLEANDO ZEOLITAS NATURA,” UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN, 2016.
- [41] E. Echeverría, “Estandarización del proceso de explotación y transformación de la zeolita natural de la empres Zeonatec S.A. en el cantón Isidro Ayora de la provincia del Guyas.,” 2013.
- [42] A. G. Atienza, “(No Title).”
- [43] Agencia de Regulación y Control Minero, “Revista Anual,” Quito, p. 14, Dec-2019.
- [44] ESRI, “¿Qué es el SIG? El | Tecnología de mapeo del sistema de información geográfica.” [Online]. Available: <https://www.esri.com/en-us/what-is-gis/overview>. [Accessed: 16-Jun-2020].
- [45] R. Hernández, C. Fernández, and P. Baptista, *Metodología de la investigación*, Quinta. México D.F., 2010.
- [46] ASTM C-188, “Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement,” *ASTM Int.*, vol. 95, no. Reapproved 2003, pp. 1–3, 2014.
- [47] NTE INEN 196:2009, “Cemento hidráulico. Determinación de la finura mediante el aparato de permeabilidad al aire.” Quito, 2009.
- [48] A. Ramírez, “Estudio de las transformaciones de las fases cristalinas de las arcillas en el proceso de quema de la cerámica.,” Universidad Central del Ecuador, 2019.
- [49] L. T. Cifuentes, “Tesis doctoral ESTUDIO DE METEORITOS SINGULARES POR TÉCNICAS ESPECTROSCÓPICAS Y DE LUMINISCENCIA NO DESTRUCTIVAS,” 2013.
- [50] NTE INEN 489:2013, “Cemento Hidráulico. Determinación de la Finura por Tamizado Seco.” Quito, 2013.

ANEXOS




Anexo A.- Proceso de trituración de roca zeolíticas hasta obtener tamaño deseado

	
<p>Obtención de zeolita en la mina</p>	<p>Rocas zeolíticas trituradas manualmente</p>
	
<p>Pulverización en el molino de bolas</p>	<p>Material zeolítico pulverizado</p>
	
<p>Proceso de tamizado</p>	<p>Producto final <math><75 \mu\text{m}</math></p>

Anexo B.- Proceso para determinar la densidad de las zeolitas naturales y del cemento puzolánico tipo IP

	
<p>Zeolita natural pulverizada</p>	<p>Cemento puzolánico tipo IP</p>
	
<p>Peso del material</p>	<p>Control de temperatura</p>
	
<p>Extracción del aire</p>	<p>Peso del reactivo + zeolita</p>

Anexo C.- Determinación de la finura del cemento y zeolitas naturales

	
<p>Movimientos leves horizontales</p>	<p>Golpes suaves</p>
	
<p>Peso retenido $\leq 0,05$ g</p>	

Anexo D.- Muestras de zeolitas para análisis SEM y EDS



Anexo E.- Tabla de los elementos y compuestos del cemento tipo IP y Zeolitas ZV, ZX, ZCr.

✓ **Cemento Tipo IP**

Elemento	Masa (%)	Si/Al	Compuesto	Masa (%)
Si	5,14	5,04	SiO ₂	27,31
Al	1,02		Al ₂ O ₃	4,79
Fe	0		Fe ₂ O ₃	0
Ca	18,27		CaO	63,49
Na	0,53		Na ₂ O	1,77
Mg	0,64		MgO	2,64
K	0		K ₂ O	0
S	0		SO ₃	0
O	18,06			
C	5,67			

✓ **Zeolita ZV**

Elemento	Masa (%)	Si/Al	Compuesto	Masa (%)
Si	8,22	7,03	SiO ₂	80,20
Al	1,17		Al ₂ O ₃	10,08
Ca	0,47		CaO	3,00
Na	0,27		Na ₂ O	1,66
Mg	0,32		MgO	2,42
K	0,48		K ₂ O	2,64
Fe	0,00		Fe ₂ O ₃	0
S	0,00		SO ₃	0
O	13,54			
C	2,85			

✓ Zeolita ZX

Elemento	Masa (%)	Si/Al	Compuesto	Masa (%)
Si	9,19	4,76	SiO ₂	72,87
Al	1,93		Al ₂ O ₃	13,52
Ca	0,74		CaO	3,84
Na	0,40		Na ₂ O	2,00
Mg	0,26		MgO	1,60
K	0,37		K ₂ O	1,65
Fe	1,10		Fe ₂ O ₃	4,53
S	0,00		SO ₃	0
O	13,57			

✓ Zeolita ZCr

Elemento	Masa (%)	Si/Al	Compuesto	Masa (%)
Si	11,85	5,62	SiO ₂	74,86
Al	2,11		Al ₂ O ₃	11,77
Ca	0,83		CaO	3,43
Na	0,49		Na ₂ O	1,95
Mg	0,25		MgO	1,22
K	0,00		K ₂ O	2,13
Fe	1,41		Fe ₂ O ₃	4,63
S	0,00		SO ₃	0
O	19,54			
C	2,61			

✓ Resumen del análisis químico de los materiales ensayados

Tipo	Compuesto (%)							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	MgO	K ₂ O	SO ₃
IP	27,31	4,79	0	63,49	1,77	2,64	0	0
ZV	80,20	10,08	3,00	1,66	2,42	2,64	0	0
ZX	72,87	13,52	3,84	2,00	1,60	1,65	4,53	0
ZCr	74,86	11,77	3,43	1,95	1,22	2,13	4,63	0