



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

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

TEMA:

**“ESTUDIO DE LA ZEOLITA NATURAL COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL
CEMENTO TIPO GU EN LA CONSTRUCCIÓN”**

Autor: Diego Andrés Maldonado Maldonado

Tutor: Ing. Mg. Wilson Santiago Medina Robalino

AMBATO – ECUADOR

Enero - 2021

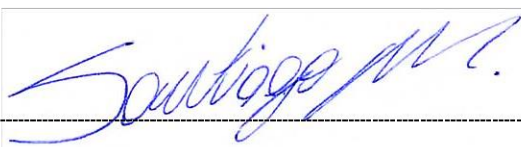
CERTIFICACIÓN

En mi calidad de tutor del Trabajo Experimental, previo a la obtención del título de Ingeniero Civil, con el tema: **“ESTUDIO DE LA ZEOLITA NATURAL COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO TIPO GU EN LA CONSTRUCCIÓN”**, elaborado por el Sr. Diego Andrés Maldonado Maldonado, portador de la cedula de ciudadanía: C.I. 0705110633, estudiante de la Carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Certifico:

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

Ambato, Enero 2021



Ing. Mg. Wilson Santiago Medina Robalino

TUTOR

AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Yo, **Diego Andrés Maldonado Maldonado**, con C.I. 0705110633 declaro que todas las actividades y contenidos expuestos en el presente trabajo experimental con el tema **“ESTUDIO DE LA ZEOLITA NATURAL COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO TIPO GU EN LA CONSTRUCCIÓN”**, así como también los análisis estadísticos, gráficos, conclusiones y recomendaciones son de mi exclusiva responsabilidad como autor del proyecto, a excepción de las referencias bibliográficas citadas en el mismo.

Ambato, Enero 2021

A handwritten signature in blue ink that reads "Diego Maldonado". The signature is stylized with a large initial 'D' and a long horizontal stroke.

Diego Andrés Maldonado Maldonado

C.I. 070511063-3

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

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

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

Ambato, Enero 2021



Diego Andrés Maldonado Maldonado

C.I. 070511063-3

AUTOR

APROBACIÓN DE TRIBUNAL DE GRADO

Los miembros del Tribunal de Grado aprueban el informe del Trabajo Experimental, realizado por el estudiante Diego Andrés Maldonado Maldonado de la Carrera de Ingeniería Civil bajo el tema: **“ESTUDIO DE LA ZEOLITA NATURAL COMO SUSTITUTO PARCIAL DEL CEMENTO TIPO GU EN LA CONSTRUCCIÓN”**.

Ambato, Enero 2021

Para constancia firman:



Dra. Diana Carolina Coello Fiallos
Miembro del Tribunal



Ing. Mg. Favio Paúl Portilla Yandún
Miembro del Tribunal

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a:

A mis pilares fundamentales durante este largo trayecto de la carrera mi abuelita Amada y mi madre Suly quienes con su inmenso amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir una meta más; gracias por levantarme del suelo una y otra vez y enseñarme que los fracasos y errores se toman con fuerza y coraje para vencer. Gracias por confiar en mí.

A mis tíos Oliverio y Byron y mi tía Vanesa por estar ahí siempre para apoyarme y brindarme sus consejos para ser una mejor persona. Gracias por motivarme.

Mis hermanos Iván y Martín que siempre con su cariño y sonrisas me motivaban a seguir adelante.

A mis amigos que a lo largo de la carrera vivimos muchas experiencias que las guardaré en mi corazón y por la ayuda que siempre nos brindamos para poder culminar nuestra carrera. Espero muchos éxitos y logros para todos.

A todos que de una u otra manera aportaron para la culminación de una de mis metas muchas gracias.

DIEGO

AGRADECIMIENTO

Esta tesis va en agradecimiento a:

A mi Dios todopoderoso por toda la sabiduría e inteligencia brindada para poder cumplir esta meta tan deseada, por la fuerza para nunca darme por vencido y por la convicción de siempre tener plena confianza y fe en su palabra.

A la facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato por abrirme las puertas y brindarme todos sus conocimientos para desarrollar mi camino profesional.

A los docentes tutores a cargo del proyecto de investigación, Ing. Santiago Medina, Ing. Favio Portilla, Ing. Maritza Ureña y Dra. Diana Coello por sus enseñanzas y conocimientos impartidos y por permitirme demostrarles que estoy preparado para llevar el título de Ingeniero Civil. Mi respeto y admiración hacia ustedes.

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

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

A.- PÁGINAS PRELIMINARES

CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE LA INVESTIGACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DE TRIBUNAL DE GRADO.....	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
INDICE DE IMAGENES	x
INDICE DE TABLAS	xii
INDICE DE GRÁFICOS	xiv
RESUMEN EJECUTIVO	xv
ABSTRACT.....	xvi

B.- CONTENIDO

CAPITULO I.- MARCO TEÓRICO	1
1.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	1
1.1.1 Antecedentes	1
1.1.2 Justificación	4
1.1.3 Fundamentación Teórica	5
1.1.4 Hipótesis	18
1.2 OBJETIVOS	18
1.2.1 General:	18
1.2.2 Específicos:.....	18
CAPITULO II.- METODOLOGÍA.....	19
2.1 MATERIALES	19
2.1.1 Zeolita Natural	19
2.1.2 Cemento Holcim Fuerte tipo GU	21
2.1.3 Gasolina Extra	22
2.1.4 Agua Potable	23

2.2	MÉTODO	24
2.2.1	Obtención de zeolitas	33
2.2.2	Caracterización Geométrica de Zeolita Natural ZV	43
2.2.3	Finura de cemento y zeolitas por método de Tamizado Seco	48
2.2.4	Densidad real por método del picnómetro de cemento y zeolitas	50
2.2.5	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	52
2.2.6	Dispersión de rayos X	54
CAPITULO III.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN		55
3.1	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	55
3.1.1	Caracterización Geométrica de la Zeolita Natural ZV	57
3.1.2	Finura del cemento y zeolitas por método de Tamizado Seco	72
3.1.3	Densidad real por método del picnómetro de cemento y zeolitas	80
3.1.4	Microscopía electrónica de barrido y Dispersión de rayos X de cemento y zeolitas	88
3.1.5	Actividad Puzolánica de cemento y zeolitas	105
3.2	VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS	107
CAPITULO IV.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		108
4.1	CONCLUSIONES	108
4.2	RECOMENDACIONES	111
BIBLIOGRAFÍA		112
ANEXOS		115

INDICE DE IMAGENES

Imagen 1: Muestra de una mina de zeolita natural	5
Imagen 2: Caracterización mineralógica de las zeolitas	10
Imagen 3: Mineralogía de la Cordillera Chongón-Colonche	11
Imagen 4: Detalle del Frasco de Le Chatelier para ensayo de densidad	14
Imagen 5: Esquema de un equipo SEM	15
Imagen 6: Imagen de una zeolita a través del SEM	16
Imagen 7: Imágenes SEM y espectros EDS obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido	17
Imagen 8: Muestra de zeolita verde	20
Imagen 9: Saco de 50kg de zeolite activo de CRILARSA C.A.....	20
Imagen 10: Holcim Fuerte tipo GU	21
Imagen 11: Muestra de gasolina extra	23
Imagen 12: Mapa de ubicación de zeolitas en la provincia del Guayas	26
Imagen 13: Mapa de ubicación de la cordillera Chongón-Colonche	29
Imagen 14: Mapa de ubicación zeolitas en la provincia del Guayas sobre la cordillera Chongón-Colonche	30
Imagen 15: Mapa de ubicación zeolitas en el cantón Isidro Ayora, provincia de Guayas.....	31
Imagen 16: Mapa de ubicación zeolitas en los cantones Guayaquil y Durán, provincia de Guayas.....	32
Imagen 17: Mina de Zeonatec S.A	33
Imagen 18: Planta de procesamiento de Zeonatec S.A	33
Imagen 19: Ubicación de mina y planta de Zeonatec S.A	34
Imagen 20: Perfil Longitudinal de mina Zeonatec S.A	35
Imagen 21: Estratos extraídos de la mina Zeonatec S.A	35
Imagen 22: Muestras en roca de zeolita verde	36
Imagen 23: Oficina y planta de Crilarsa C.A	38
Imagen 24: Muestra original de ZCr	39
Imagen 25: Muestra de ZCr retenido en el tamiz #200 (75um).....	39
Imagen 26: Muestra de ZCr que pasa el tamiz #200 (75um).....	40
Imagen 27: Material de ZCr con tamaños diversos mayores a 75um.....	40
Imagen 28: Muestra original de ZX	42
Imagen 29: Muestra de ZX retenido en el tamiz #200 (75um).....	42
Imagen 30: Muestra de ZX que pasa el tamiz #200 (75um).....	42
Imagen 31: Muestra original de zeolita verde	43
Imagen 32: Máquina de los Ángeles.....	44
Imagen 33: Material listo para la trituración.....	44
Imagen 34: Material después de la trituración	45
Imagen 35: Esquema del molino horizontal	46
Imagen 36: Equipos para realizar ensayo de finura	49
Imagen 37: Finura de la zeolita verde.....	50
Imagen 38: Equipos para realizar ensayo de densidad	51
Imagen 39: Densidad real del cemento	52

Imagen 40: Muestras preparadas para ensayos químicos.....	53
Imagen 41: Imagen SEM de CGU realizada a 15 KeV con un aumento de 2000x ..	89
Imagen 42: Imagen SEM de ZV realizada a 15 KeV con un aumento de 2000x	93
Imagen 43: Imagen SEM de ZX realizada a 15 KeV con un aumento de 2000x	97
Imagen 44: Imagen SEM de ZCr realizada a 15 KeV con un aumento de 2000x ..	101

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Composición química y mineralógica de la zeolita	6
Tabla 2: Composición Química típica del Cemento Portland	12
Tabla 3: Módulo de Finura para diferentes tipos de cemento.....	13
Tabla 4: Requisitos mínimos de Holcim Fuerte tipo GU.....	22
Tabla 5: Castrato de minas de zeolita en Ecuador	25
Tabla 6: Castrato de minas de zeolita actualizado en la provincia de Guayas	27
Tabla 7: Puntos de ubicación de la mina de Zeonatec S.A.....	34
Tabla 8: Cantidades de zeolita verde puestas en el molino horizontal	36
Tabla 9: Coordenadas de la planta de procesamiento y distribución de Crilarsa C.A.....	38
Tabla 10: Tamizado de cantidades de ZCr.....	39
Tabla 11: Coordenadas de mina Elena.....	41
Tabla 12: Tamizado de cantidades de ZX.....	41
Tabla 13: Características del molino horizontal	45
Tabla 14: Características de los cuerpos molidores del molino horizontal.....	46
Tabla 15: Cantidades y tamaños de ZV	47
Tabla 16: Cantidades para molienda de ZV	47
Tabla 17: Características de para la granulometría de material fino.....	48
Tabla 18: Características del cañón de electrones TE.....	52
Tabla 19: Condiciones de adquisición	54
Tabla 20: Nomenclatura empleada en ensayos realizados.....	56
Tabla 21: Datos y características de molido 1.....	57
Tabla 22: Datos y características de molido 2.....	58
Tabla 23: Datos y características de molido 3.....	60
Tabla 24: Datos y características de molido 4.....	62
Tabla 25: Datos y características de molido 5.....	65
Tabla 26: Datos y características de molido 6.....	66
Tabla 27: Datos y características de molido 7.....	67
Tabla 28: Tamizado de partículas finas de molido 1	68
Tabla 29: Tamizado de partículas finas de molido 2	68
Tabla 30: Tamizado de partículas finas de molido 5	69
Tabla 31: Tamizado de partículas finas de molido 6	69
Tabla 32: Resumen y caracterización de Molidos de ZV.....	70
Tabla 33: Datos y resultados de finura de FGU.....	72
Tabla 34: Datos y resultados de finura de FZV	74
Tabla 35: Datos y resultados de finura de FZX	75
Tabla 36: Datos y resultados de finura de FZCr	77
Tabla 37: Resumen de datos y resultados de finura de FGU, FZV, FZX y FZCr	79
Tabla 38: Datos y resultados de densidad de δ GU	80
Tabla 39: Datos y resultados de densidad de δ ZV	82
Tabla 40: Datos y resultados de densidad de δ ZX.....	83
Tabla 41: Datos y resultados de densidad de δ ZCr.....	85
Tabla 42: Resumen de datos y resultados de densidad de δ GU, δ ZV, δ ZX y δ ZCr.	87
Tabla 43: Datos cuantitativos de análisis elemental EDS del CGU	90

Tabla 44: Óxidos resultantes de análisis de CGU.....	91
Tabla 45: Comparación entre resultado existente y obtenido de óxidos de CGU	91
Tabla 46: Datos cuantitativos de análisis elemental EDS del ZV.....	94
Tabla 47: Óxidos resultantes de análisis de ZV	95
Tabla 48: Comparación entre resultado existente y obtenido de óxidos de ZV	95
Tabla 49: Datos cuantitativos de análisis elemental mediante EDS de ZX	98
Tabla 50: Óxidos resultantes de análisis EDS de ZX	99
Tabla 51: Comparación entre resultado existente y obtenido de óxidos de ZX	100
Tabla 52: Datos cuantitativos de análisis elemental EDS de ZCr.....	102
Tabla 53: Óxidos resultantes de análisis de ZCr.....	103
Tabla 54: Comparación entre resultado existente y obtenido de óxidos de ZCr.....	104
Tabla 55: Revisión de la actividad puzolánica de materiales estudiados	105

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Metodología empleada en la investigación.....	24
Gráfico 2: Curva granulométrica de molidas 1 y 2	58
Gráfico 3: Curva granulométrica de molidas 1 y 3	60
Gráfico 4: Curva granulométrica de molidas 2 y 4	62
Gráfico 5: Curva granulométrica de molidas 3 y 4	64
Gráfico 6: Curva granulométrica de molidas 5 y 6	66
Gráfico 7: Curvas Granulométricas obtenidas de Molidas de ZV	71
Gráfico 8: Resultados de finura de FGU.....	73
Gráfico 9: Resultados de ensayos de FZV	74
Gráfico 10: Resultados de finura de FZX	76
Gráfico 11: Resultados de finura de FZCr	77
Gráfico 12: Resumen de resultados de finura de FGU, FZV, FZX y FZCr	78
Gráfico 13: Resultados de densidad de δ_{GU}	81
Gráfico 14: Resultados de densidad de δ_{ZV}	82
Gráfico 15: Resultados de densidad de δ_{ZX}	84
Gráfico 16: Resultados de densidad de δ_{ZCr}	85
Gráfico 17: Resumen de resultados de ensayos de densidad de δ_{GU} , δ_{ZV} , δ_{ZX} y δ_{ZCr} ..	88
Gráfico 18: Análisis de composición química de CGU.....	90
Gráfico 19: Curva de comportamiento de los porcentajes atómicos y másicos masa de los óxidos de CGU	92
Gráfico 20: Análisis de composición química de ZV	94
Gráfico 21: Curva de comportamiento de los porcentajes atómicos y másicos de los óxidos de ZV	96
Gráfico 22: Análisis de composición química de ZX.....	98
Gráfico 23: Curva de comportamiento de los porcentajes atómicos y másicos de los óxidos de ZX.....	100
Gráfico 24: Análisis de composición química de ZCr.....	102
Gráfico 25: Curva de comportamiento de los porcentajes atómicos y másicos de los óxidos de ZCr.....	104
Gráfico 26: Porcentaje de actividad puzolánica de materiales estudiados.....	106

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación realizada tuvo como propósito estudiar a la zeolita natural como un sustituto parcial del cemento en su mejoría de condiciones en estado fresco y endurecido y la búsqueda de nuevas tecnologías de materiales de construcción que mitiguen y cuiden el medio ambiente.

Preliminarmente a la obtención de zeolitas se elaboró un catastro de minas que nos ayudó a conocer la información suficiente para su posterior adquisición y estudio del material. Teniendo en cuenta que la zeolita natural de mejor calidad se encuentra en una mayor elevación sobre nivel del mar.

La zeolita al ser un material con capacidad porosa; es decir, que guarda en su interior gran parte del agua en estado fresco y después lo expulsa, va a ganar calidad, resistencia, durabilidad y disminución de contracción por secado debido a su rápido fraguado y una mejora en la trabajabilidad de la pasta.

Dependiendo del tipo de zeolita se consiguió diferentes clasificaciones previas; a través de ensayos de morfología y composición química de la estructura interna del material, se logró determinar los elementos constituyentes y su cantidad representativa, para así poder hacer un análisis que determine la calidad de la pasta.

Para la obtención de resultados favorables, se debe tomar en cuenta la proporción óptima de sustitución de zeolita con el único fin de traer consigo ventajas técnicas, económicas y ecológicas para el uso en la construcción.

Palabras claves: materiales de construcción, zeolita

ABSTRACT

The present experimental research was to study natural zeolite as a partial substitute of cement in its improvement of conditions in a fresh and hardened state and the search for new technologies of construction materials that mitigate and take care of the environment.

Preliminarily to the obtaining of zeolites, a mine registry was developed that helps us to know enough information for its later purchase and study of the material. Taking into that the best quality natural zeolite is at a higher elevation above sea level.

The zeolite being a material with porous capacity, that is, it keeps in your inside a lot of part of the water in fresh state and then expels it, will earn quality, strength, durability and decrease in shrinkage by drying due to its rapid hardening and improvement in workability of pasta.

Depending of the type of zeolite you got different previous classifications; through of the tests of composition and chemical morphology of the internal structure of the material, it is possible to determine the mains elements and their representative quantity, in order to make an analysis that will determine the quality of the paste.

In order to obtain favorable results, the optimal zeolite replacement ratio must be taken into account with the sole purpose of bringing technical, economic and ecological advantages for use in construction.

Keyboards: Construction materials, zeolite

CAPITULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

1.1.1 Antecedentes

Existen varios estudios pertenecientes a distintos autores que utilizan una puzolana natural como sustituto parcial del cemento, en este caso la zeolita. La incorporación de este aluminosilicato ha representado una mejora de las propiedades en hormigones en estado fresco y endurecido.

Jacob y Das [1] nos demuestran a través de sus resultados que al incorporar aditivos minerales mejora la durabilidad de las mezclas, tales como disminución del asentamiento, bajo requerimiento de superplastificante, aumento de resistividad eléctrica, absorción de agua y permeabilidad al cloruro. Además, detalla que las propiedades del hormigón endurecido, como son la resistencia a la compresión, resistencia a tracción, resistencia a la flexión aumentan con una adición de 25% de zeolita en comparación con un hormigón tradicional a los 28 días. La zeolita natural tiene propiedades diferentes a las del cemento, caracterizándose así como un material ecológico que brinda el sostenimiento del medio ambiente debido a los problemas graves que atacan en la actualidad sobre todo por procesos industriales relacionados a la producción de materiales constructivos. Una de las importantes propiedades de la zeolita como material es la absorción de gases perjudiciales para la salud y no los emana, por lo tanto lo convierte en un componente complementario para la conservación del medio ambiente. El uso de nuevos materiales que sustituyan a los convencionales es de gran suceso para la tecnología moderna, evitando así causar un gran impacto ambiental al momento de producir un nuevo producto de uso en la construcción. Para obtener una producción de 1T de cemento el daño por emisión sobre el ambiente fluctúa entre 0.73 y 0.99 T de gases CO₂ debido a la calcinación del

Clinker, provocando así un desequilibrio atmosférico a largo plazo sobre el medio ambiente.

Markiv y otros [2] nos detallan en sus estudios que al sustituir parcialmente el cemento por una puzolana natural tendrá resultados que aumentan la durabilidad del hormigón y por consiguiente una mayor vida útil de la estructura. La reducción notable de la hidratación del cemento, disminución de hidróxido de calcio Ca(OH)_2 , hace que se mejore la durabilidad y el hormigón sea más resistente a la lixiviación de la cal por el flujo de agua y expansión debido al ataque de los sulfatos. La adición de zeolita en el hormigón (10%) muestra como resultado positivo una mejor resistencia al daño por congelación y descongelación en comparación del hormigón tradicional, puesto que se forma una mezcla puzolánica que da como efecto una reducción de la porosidad del hormigón permitiendo así que el interior no se agriete debido a la tensión interna que se produce. Así mismo, la contracción por secado se ve beneficiosa a causa de que la zeolita tiene la capacidad de material poroso que guarda en su interior gran parte del agua en estado fresco y después lo expulsa, lo que no permite que se afecte a la calidad y durabilidad del hormigón, por el contrario la mucha cantidad incorporada provoca efectos negativos como una reducción de resistencia a la compresión.

Según Najimi y otros [3] rescatan la utilización de la zeolita en el hormigón reduce el calor de hidratación mejorando la durabilidad del hormigón, aumentando así su efectividad en penetración de iones de cloruro, tasa de corrosión, contracción por secado y penetración de agua. Pero comprobaron que se dan resultados negativos en ambientes ácidos. La cantidad de reemplazo de 15% alcanzó una resistencia a la compresión adecuada, penetración de agua, penetración de iones de cloruro, velocidad de corrosión y tampoco necesito cantidades de superplastificante. Al adicionar parcialmente zeolita al cemento para la producción de hormigón, trae consigo buenos resultados a diferencia de un hormigón normal. La zeolita en la mezcla aumentó la viscosidad del hormigón fresco, por lo tanto su densidad va a ser menor que la muestra de hormigón normal lo que se va a necesitar mayor volumen de mezcla; la zeolita funciona mejor en mezclas de relaciones bajas de w/c.

Saltos [4] logra corroborar resultados de la incorporación de zeolita en el hormigón, teniendo como efecto que al sustituir un 10% se logra aumentar el valor de resistencia a la compresión simple y tracción después de los 28 días, se reduce el contenido de

aire en su interior, aumenta en un 12% el valor del modulo de elasticidad respecta a un hormigón convencional, mejoría en propiedades de densidad, absorción y porosidad.

Según Robalino [5] puntualiza en sus resultados un reemplazo parcial del 20% de zeolita para cumplir con los requerimientos ASTM C618-03 que requiere superar el índice actividad puzolánica de 75% que esa norma sugiere para el uso de puzolanas naturales en hormigón a los 7 y 28 días. Detallando así que el contenido de Óxido de Silicio(SiO_2) + Óxido de Aluminio(Al_2O_3) + Óxido Férrico(Fe_2O_3) debe ser al menos el 70% y de un contenido máximo de Trióxido de Azufre(SO_3) de 4% [6].

Por lo tanto, la incorporación de zeolita trae consigo ventajas técnicas, económicas y ecológicas para el uso en la construcción.

1.1.2 Justificación

La construcción moderna busca nuevas alternativas de construcción, tanto en los materiales como en su proceso constructivo, para esto busca alcanzar los más altos estándares para reducir el impacto ambiental producido principalmente por la emisión de CO₂. La industria cementera tiene como su problema principal la emisión atmosférica de gases de efecto invernadero que dan lugar a la reacción química de la descomposición de la piedra caliza. Con el crecimiento poblacional en el mundo y la industrialización, la producción de cemento generará en un tiempo no predecible el 17% de CO₂ emitido en el mundo[7].

El hormigón es un material durable y resistente constituido por unas mezclas de agua, conglomerantes, áridos y aditivos; por lo que actualmente se está implementando materiales sustituyentes parciales del cemento con el fin de lograr un aumento de la resistencia del hormigón, disminuir los costos y efectos en el medio ambiente [8].

La incorporación de materiales cementosos suplementarios, como es el caso de la zeolita natural, van ganando terreno en el ámbito constructivo. Estos poseen grandes características que permiten que el hormigón mejore sus propiedades físicas, químicas y mecánicas aumentando su durabilidad y trabajabilidad [2]. El reemplazo parcial de zeolita sobre el cemento debe ser el óptimo, tal como lo reporta Najimi y otros que la opción más apropiada para obtener datos favorables es del 15% [3] , caso contrario se darían resultados no muy satisfactorios.

Ecuador presenta diferentes yacimientos con una variedad de tipos de zeolita natural ubicados cerca del perfil costanero del Océano Pacífico clasificadas de acuerdo a su naturaleza, morfología, tamaño, etc. ; además cuenta con provechosos usos en agronomía, pecuaria y especialmente en construcción como material en la elaboración de pastas cementantes [9].

La utilización de zeolita natural como reemplazante parcial del cemento puede llegar a ser uno de los contribuyentes para la disminución de CO₂ sobre el ambiente [1], siendo este un material sostenible lo que permitirá tener favorables resultados aplicados en construcción con el fin de sacar el mayor provecho a la industria cementera.

1.1.3 Fundamentación Teórica

1.1.3.1 Zeolita

Su descubrimiento se basa por el geólogo sueco Axel Fredrik Cronstedt en el año de 1756, observando una roca se fijó que en el interior existían unos diminutos cristales bien definidos, los que sujetos al calor liberaban agua o una composición en forma de vapor, radicando así su nombre de material hirviente proveniente de las palabras griegas zein (hervir) y lithos (piedra)[10].

Las zeolitas naturales son una gran familia de minerales aluminosilicatados, cristalinos e hidratados, que contienen interiormente una vasta variedad de cationes, generalmente de calidad alcalina, alcalinotérrea, e inclusive clases radicales y aniones, que conforman lo que se conocen como cationes de intercambio[10].

Básicamente, la zeolita es una roca ígnea proveniente del proceso de transformación de lava derretida que se produce después de la erupción de un volcán cuando entra en contacto con el océano, tal fusión provoca una reacción química entre el magma caliente y la solución salina del mar que da lugar a la formación de este material que con el paso del tiempo se endurece [11].



*Imagen 1: Muestra de una mina de zeolita natural
Fuente: Diego Maldonado*

1.1.3.1.1 Composición Química de la Zeolita

La zeolita como material de sedimento volcánico se presenta como una variada armazón tridimensional cristalina y silicática de tetraedros con una superficie interna

muy porosa en diferencia de su superficie externa. Su estructura tiene el aspecto de una red de canales que guían a concavidades centrales que pueden alcanzar diámetros entre 12 angstroms circunstancia que da la capacidad de intercambio iónico y rehidratación reversible, las grandes cantidades de iones alcalinos o alcalino-térreos está ligado con la relación entre el silicio, aluminio y hierro en su estructura [10].

Particularmente dependiendo de sus compuestos químicos tiene diferentes formas como sistemas monoclinicos o rómbicos, existiendo formas tetragonales, trigonales o cúbicas. Dependiendo de su cantidad de impureza, especialmente de óxido de hierro y sustancias orgánicas pueden presentar variedad de tonalidades en su superficie o textura. Su dureza varía entre 3.5 a 5.3 en la escala de Mohs, su peso específico cambia entre 2 y 2.4 g/cm³[12].

Tabla 1: Composición química y mineralógica de la zeolita

Zeolita Natural			
Químico	%	Mineralogía	%
SiO ₂	75.34	Clinoptilolita	60
Al ₂ O ₃	8.77	Cuarzo	30
Fe ₂ O ₃	1.30	Otros	10
CaO	4.60		
MgO	0.55		
SO ₃	0.05		
Na ₂ O	1.22		
K ₂ O	2.41		

Fuente: T. Markiv, K. Sobol, M. Franus y W. Franus [2]

1.1.3.1.2 Propiedades de la Zeolita

Las diversas caracterizaciones de la zeolita presentan cualidades exclusivas para la aplicación práctica industrial y domestica según las necesidades. Entre las más importantes están: [13]

1. Elevado grado de hidratación
2. En deshidratación, posee apreciable volumen de vacíos y baja densidad
3. Cuando se deshidrata su marco estructural cristalino es estable
4. Cualidades de intercambio de cationes
5. En los cristales deshidratados se manifiesta paneles moleculares
6. Capacidad de absorción de vapores y gases

7. Cualidades catalíticas

Cabe destacar que la zeolita sirve como tamiz molecular, esta propiedad hace que mediante su estructura porosa consolida en su interior una gran área lo que permite el tránsito de partículas con diámetros diminutos los cuales son absorbidos por los paneles vacíos[12].

1.1.3.1.3 Aplicaciones de la Zeolita Natural

La utilización de zeolitas se basa en reducir el alto impacto medioambiental contaminado, el aire y agua son los más afectados. Por eso se buscan nuevas técnicas de utilización de materiales ecológicos con el fin de mitigar los efectos nocivos de los procesos industriales. Algunos de los campos en los que se ha utilizado se describen a continuación:

✓ Eliminación de Elementos Radioactivos

El intercambio iónico es la principal característica para la eliminación de químicos nocivos como es el caso del cesio y estroncio, con la capacidad de absorber de manera eficiente los agentes radioactivos y almacenarlos internamente en la zeolita o separarlos por medio de procesos químicos para su purificación[9].

✓ Tratamiento de Aguas Residuales

La zeolita por su capacidad de absorción ayuda en la extracción de amoníaco de los desechos sólidos ubicados en la profundidad de las aguas residuales, con esto aporta gradualmente el desarrollo de algas marinas, reducción de malos olores y conserva el nitrógeno sólido [9].

✓ Purificación de Gases

El cemento al utilizar procesos industriales y emanar gases tóxicos debido al procesamiento del Clinker; aproximadamente 0.73-0.99 T de CO₂ se emiten de la producción de 1T de cemento [1], por lo que una opción clara de conservación del medio ambiente es la zeolita natural que mediante su capacidad de absorber el SO₂ y CO₂ pero no emitirlo a la superficie terrestre trae consigo buenos resultados en. Un gramo de zeolita puede absorber hasta 200 mg de SO₂ [2].

✓ **Fertilización y Enmendación del Suelo**

Por su gran capacidad de intercambio catiónico y retención de agua permite soltar pausadamente los nutrientes necesarios del suelo para un mayor aprovechamiento de los cultivos y a su vez como ablandadores del agua retenida [9].

✓ **Agricultura**

El contenido de los nutrientes necesarios para el crecimiento eficiente de plantas y animales hacen que los agricultores usen la zeolita como purificadora y extractor de materiales pesados que pueden acumularse en los alimentos o perjudiquen indirectamente a la reproducción normal de la vida de estos seres vivos. La ingesta de este producto en animales trae consigo buenos resultados pues se reduce notablemente la humedad en los efectos de excremento, haciéndolo más fácil de manejar esos desechos [9].

✓ **Acuicultura**

La purificación del agua garantiza un adecuado desarrollo de la vida de especies marinas, por lo que el ambiente ecológico y biológico debe ser monitoreado continuamente para así garantizar una buena calidad de especies. La capacidad filtrante para la extracción de partículas en suspensión incluida la extracción de iones pesados nos garantiza un adecuado ecosistema de especies acuáticas [11].

✓ **Construcción**

Su principal uso en la construcción es en la elaboración de morteros, como sustituto parcial del cemento, dando muy buenos resultados caracterizados principalmente por la composición de este material, a continuación se detallan:

- ✓ La resistencia a compresión dependiendo del nivel de sustitución de zeolita que se emplee trae consigo un aumento significativo a diferencia de un hormigón tradicional [1].
- ✓ Disminuye la permeabilidad no permitiendo el ingreso de los sulfatos o agentes externos que lleguen a corroer o dañar la estructura del hormigón [13].
- ✓ Asegurar la humedad del hormigón en el proceso de fraguado, debido a su característica de retención de agua promueve un proceso pausado de

hidratación de los silicatos, a su vez la perfecta impregnación de las moléculas del cemento [13].

- ✓ Por su capacidad de absorción, se encarga de mitigar los cambios en fisuración y expansión de hormigones impidiendo así la formación de la reacción álcalis-sílice y álcalis-carbonato presentes durante el proceso de fraguado.
- ✓ Debido a que concentra una mayor hidratación se reduce la proporción de cemento, inclusive en relaciones w/c bajas [10].
- ✓ Produce un mejoramiento de la plasticidad y disminución de la segregación de los agregados, este fenómeno ocurre debido a que se produce un alza del volumen de los agregados finos de la mezcla y en consecuencia una mayor cantidad de agua provocando incremento de volumen de la mezcla, dando como resultado que los agregados gruesos se distanciarían entre sí disminuyendo la fricción entre ellos [10].
- ✓ Mejoría de la compacidad debido a que la adición de partículas finas rellenarían los espacios huecos de la mezcla [10].

1.1.3.1.4 Zeolitas en Ecuador

Los depósitos de minas de zeolitas existentes hasta la actualidad en su mayoría provienen de la meteorización de rocas ígneas, siendo la clinoptilolita y heulandita los minerales que se encuentran en mayor proporción, mientras que la modernita, laumintita, estilbita, erionita y faujasita en menor proporción [9]. Se debe recalcar que la calidad de la zeolita viene dada en función de su elevación; mientras más alto se la encuentre mayor cantidad de Silicio y Aluminio en su estructura tendrá, caso contrario menor porcentaje de estos minerales se encontrará.

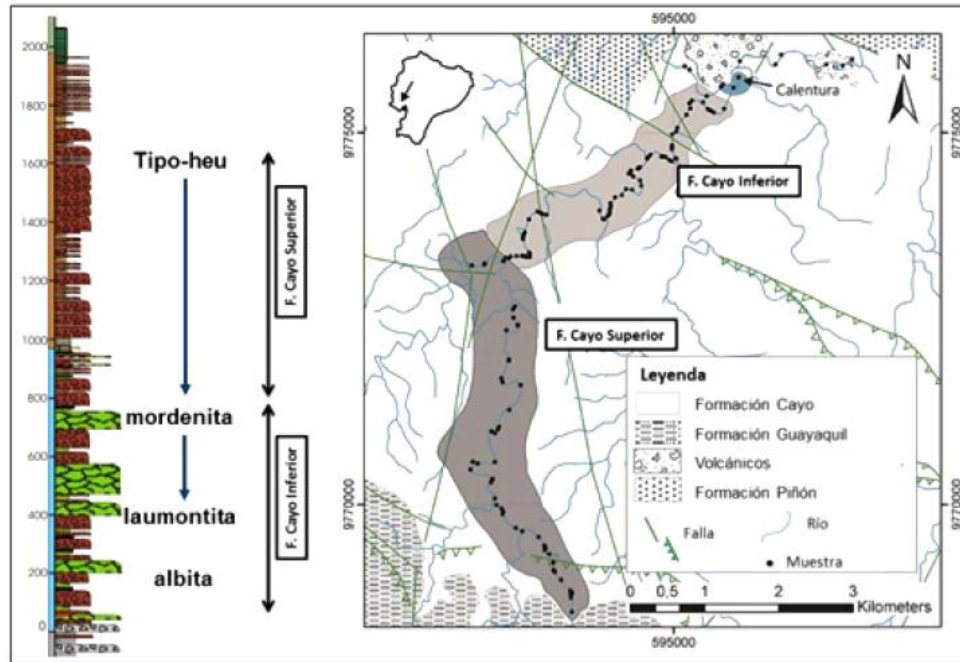


Imagen 2: Caracterización mineralógica de las zeolitas

Fuente: J. L. Costafreda Mustelier , D. A. Martín Sanchez y J. L. Costafreda Velázquez [10]

La formación más representativa de zeolita en Ecuador se da en la costa ecuatoriana como consecuencia de la Cordillera de los Andes, denominada así Cordillera Chongón-Colonche que se extiende desde Guayaquil provincia del Guayas hasta la comunidad de Olón ubicada en la provincia de Santa Elena. Esta cordillera consta de 3 formaciones geológicas de diferentes materiales; la agrupación Guayaquil compuesta de arcillas muy silicificadas, el grupo Cayo conformado por material piroclástico de procedencia volcánica y la formación Calentura formada por areniscas, tobas y lutitas [10].

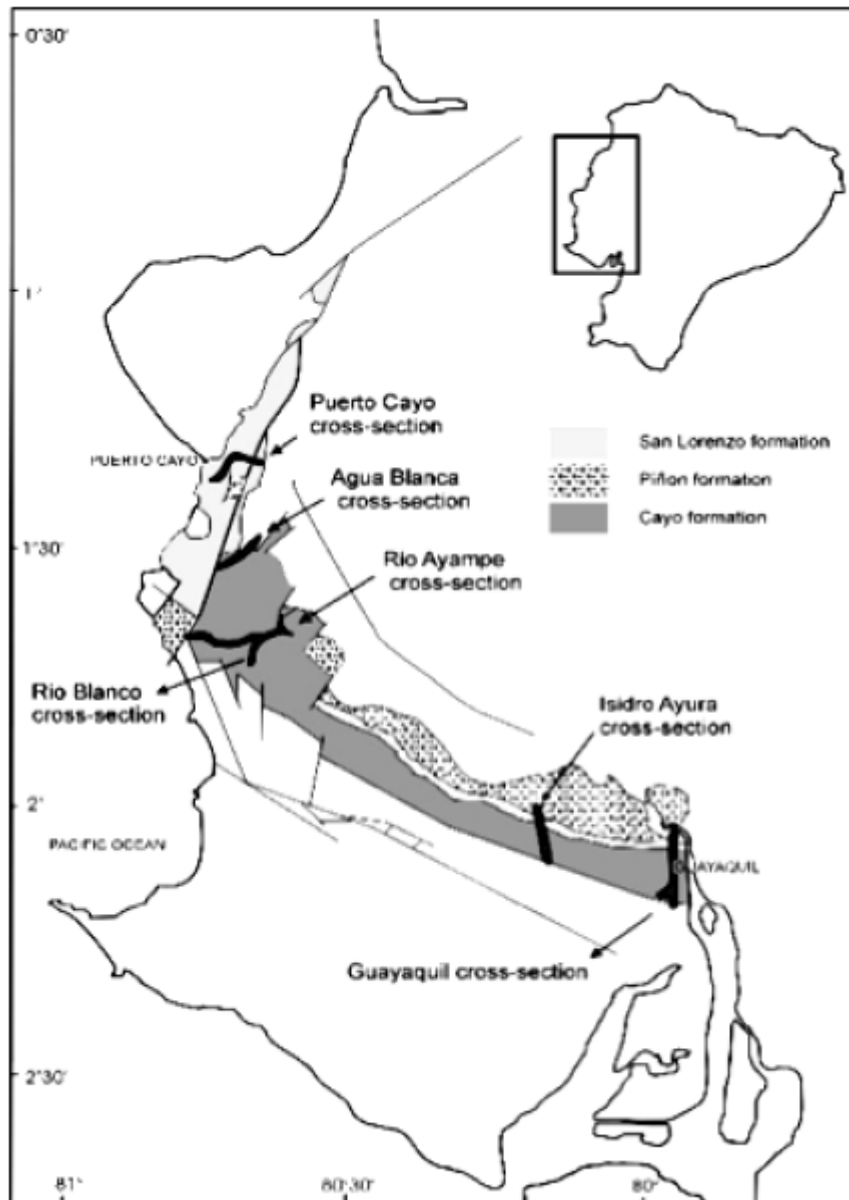


Imagen 3: Mineralogía de la Cordillera Chongón-Colonche
Fuente: J. L. Costafreda Mustelier , D. A. Martín Sanchez y J. L. Costafreda Velázquez [10]

1.1.3.2 Cemento

El cemento se define como un aglutinante hidráulico capaz de juntar elementos no aglutinantes por sí mismo en un solo conglomerado, o de unir materiales no adhesivos [14]. Se ha realizado una clasificación dependiendo de las características del cemento:

- ✓ Por su Fraguado: Pueden ser rápidos o lentos, dependiendo si su fraguado termina antes o después de una hora.

- ✓ Por su composición Química: Naturales, portland, escorias, puzolánicos y aluminosos.
- ✓ Por sus aplicaciones: De alta resistencia inicial y resistente a los sulfatos[15].

1.1.3.2.1 Cemento Portland

Es un cemento hidráulico elaborado a partir de una mezcla clínker (piedra caliza y yeso) y una base de silicio y aluminio. De esta combinación se obtiene un material muy fino verduoso que al combinarse con agua forma una pasta muy plástica y trabajable que posterior al proceso de fraguado se endurece y adquiere propiedades de resistencia y durabilidad[16], [17].

Tabla 2: Composición Química típica del Cemento Portland

Cal CaO	Sílice SiO ₂	Alúmina Al ₂ O ₃	Óxido Férrico Fe ₂ O ₃	Magnesia MgO	Rutilo TiO ₂	Óxido de Sodio Na ₂ O	Óxido de Potasio K ₂ O	Anhídrido Sulfúrico SO ₃	Pérdida de gases
60-66	19-25	3-8	1-5	0-5	0.24	0.54	0.64	2.3-4.5	0.3

Fuente: Hornbostel, C [14]

1.1.3.2.1 Tipos de Cemento Portland

En el ámbito constructivo se ha desarrollado una clasificación del cemento portland en función del uso que se le puede dar y de las condiciones de la obra. A continuación se detallan:

- ✓ **Tipo I:** Es un cemento normal y resulta de la mezcla del clínker con el yeso.
- ✓ **Tipo II:** Se utiliza cuando se requiere un fraguado lento y con un calor de hidratación moderado. Utilizado en pilares, alcantarillas, tubos y apoyos.
- ✓ **Tipo III:** Su reacción provoca una resistencia inicial elevada debido a que se produce más calor de hidratación para suprimir temperaturas bajas. Su resistencia es alta en niveles superiores.
- ✓ **Tipo IV:** Caracterizado por un fraguado lento en el que se produce muy poco calor de hidratación, donde debe prevenir el agrietamiento del hormigón. Se emplea en grandes obras, presas y túneles.
- ✓ **Tipo V:** Su propiedad es la resistencia a la actuación de los sulfatos, donde el hormigón este en contacto con suelos alcalinos[14].

Existen cementos portland tipo IA, IIA, IIIA tienen características de mejoramiento de resistencia a la acción de congelamiento y descongelamiento, provocando así mejoramiento plástico y fluido en el hormigón[16].

1.1.3.2 Cemento Hidráulico tipo GU

La norma NTE INEN 2380 para la producción de cemento en Ecuador presenta una clasificación de acorde a sus propiedades específicas, detalladas a continuación:

- ✓ Tipo GU: Construcción en general
- ✓ Tipo HE: Alta resistencia inicial
- ✓ Tipo MS: Moderada resistencia a sulfatos
- ✓ Tipo HS: Alta resistencia a sulfatos
- ✓ Tipo MH: Moderado calor de hidratación
- ✓ Tipo LH: Bajo calor de hidratación [18]

1.1.3.2 Ensayos de Laboratorio para las muestras

1.1.3.3.1 Finura

Se refiere al grado de procesamiento y molienda del material, mientras sea más fino la resistencia será mayor pero el calor de hidratación y cambios de volumen se aumentan, por lo que se vuelve más dispuesto a meteorización y disminuye su fuerza a las aguas agresivas[19].

Tabla 3: Módulo de Finura para diferentes tipos de cemento

Tipo de Cemento	Finura m ² /kg
I	370
II	370
III	540
IV	380
V	380

Fuente: Torre [16]

1.1.3.3.1 Tamizado Seco

Este procedimiento se basa en obtener la finura del cemento en función del material retenido en el tamiz #100 y tamiz #200, tomando en cuenta que se deben agregar aproximadamente 50g de cemento y agitar el tamiz alrededor de 1 minuto hasta tal punto que no pase del tamiz más de 0.05g y después con cálculos en conjunto con los pesos retenidos llegamos al modulo de finura[20], [21].

1.1.3.3.2 Densidad

Se describe como el volumen de la sección contenida en el interior de las partículas. Su utilidad depende del diseño y control de mezclas de hormigón, por lo que su valor varía entre 2.90-3.15 gr/cm³ [16].

Se basa en precisar la masa del cemento en función del volumen no reactivo desplazado a través del picnometro de 500ml[13], [22].

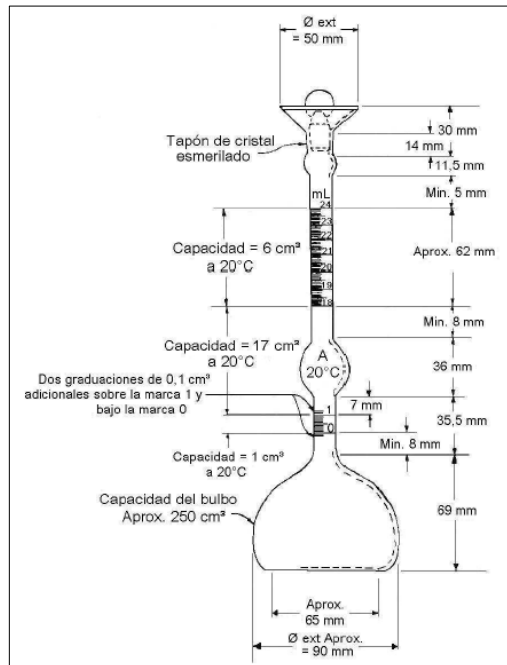
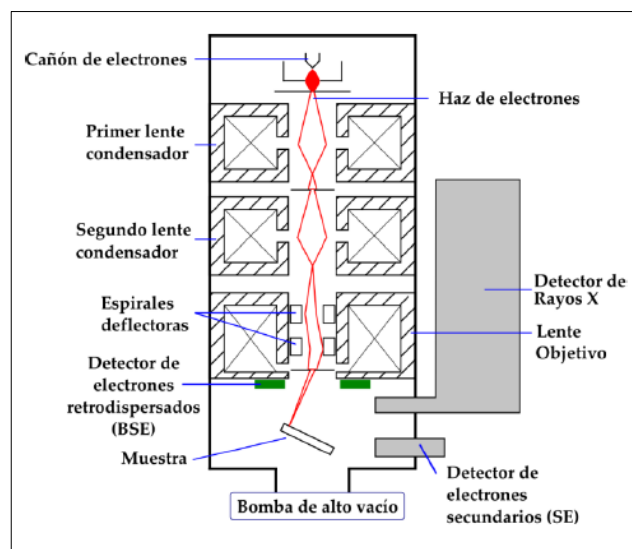


Imagen 4: Detalle del Frasco de Le Chatelier para ensayo de densidad
Fuente: INEN 156 [23]

1.1.3.3.3 Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Es un procedimiento de análisis basado en hacer incurrir un barrido de haz de electrones sobre una pequeña partícula de muestra; previamente recubierta con una capa de un material conductor, ya sea oro o plata. Produciendo un conjunto de señales que son visualizadas en diferentes partes del equipo, donde cada una de las partes muestra información de composición, morfología y conductividad eléctrica de la partícula, que al final detecta la cantidad de electrones y los convierte en una señal digital en función de su intensidad de color. Posee una capacidad máxima de alcance entre dos objetos de 2nm [24].

Usualmente, se utiliza este método en materiales para conocer la cristalografía, composición mineralogía, morfología, teniendo así en cuenta una verdadera composición química de cualquier material y de esta manera poder clasificarlo de acuerdo a las condiciones y características que este presenta [24].

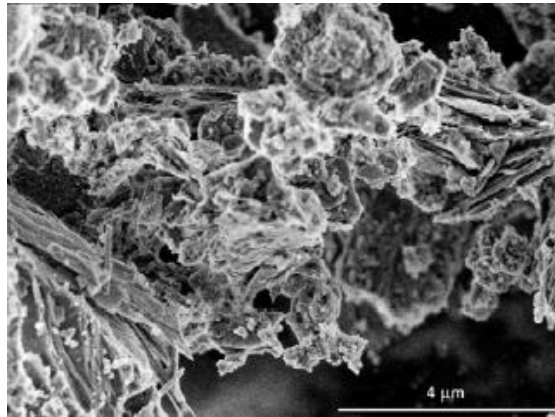


*Imagen 5: Esquema de un equipo SEM
Fuente: Clavijo [24]*

1.1.3.3.3.1 Características del SEM

- ✓ **Demasiada sensibilidad.**- La imagen representa aproximadamente 10-1000 e⁻ en cada pixel.
- ✓ **Gran frecuencia.**- Es responsable de estar atento a cambios involuntarios en la energía de la señal producido por el barrido de los detectores del equipo.

- ✓ **Dinamismo en la Amplitud.**- No debe de tener problemas de linealidad al momento de captar entre varios puntos.
- ✓ **Eficacia.**- De este factor depende el resultado final de la imagen, debe de ser uniforme en todo los lados de la muestra.
- ✓ **Características de cámara.**- Deben de ser estables antes cambios repentinos de vacío-aire, oscuridad-luz [25].



*Imagen 6: Imagen de una zeolita a través del SEM
Fuente: Najimi [3]*

1.1.3.3.4 Dispersión de Rayos X

El análisis de dispersión de rayos X se caracteriza por la visualización de la muestra por medio de un haz de electrones de alta energía a través de un microscopio electrónico de barrido que nos otorga la clasificación de los componentes químicos de la muestra estudiada [26].

Su principio es basado en la identificación de los elementos presentes de acuerdo a la evaluación de las energías E o de las longitudes de onda λ de los fotones X característicos proyectados [26].

Consiste en la detección de rayos X manifestados por la muestra mediante la localización de niveles de altura proporcional a la energía de cada muestra. Los pulsos de cada nivel de recepción de información son procesados por un analizador multicanal y posterior representados en un espectro que describe la cantidad de pulsos respecto a la energía detectada de cada pulso. Por consiguiente, mediante esta técnica se puede identificar vertiginosamente los elementos químicos constituyentes de la muestra [26].

Adicionalmente, con la intensidad de los rayos X es posible estudiar de forma cuantitativa la composición de elementos u óxidos presentes en el material ensayado.

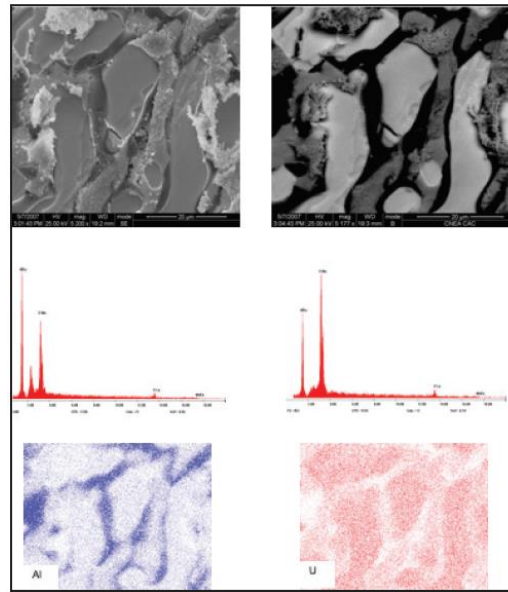


Imagen 7: Imágenes SEM y espectros EDS obtenidas por medio de microscopio electrónico de barrido
Fuente: Ipohorski [26]

1.1.4 Hipótesis

Hipótesis de Trabajo

El uso de zeolita natural como sustituto parcial del cemento tipo GU mejora sus propiedades físicas y mecánicas para su uso en la construcción.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 General:

Estudiar la zeolita natural como sustituto parcial del cemento tipo GU en la construcción.

1.2.2 Específicos:

- Comparar la morfología y composición química de 3 muestras de zeolitas naturales existentes en el Ecuador en relación con el cemento tipo GU.
- 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

MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 MATERIALES

Para el cumplimiento de los objetivos planteados se utilizó 3 tipos diferentes de zeolita natural y 1 tipo de cemento hidráulico tipo GU. Los materiales propuestos de zeolitas son de orígenes naturales y utilizados como sustitutos parciales del cemento.

2.1.1 Zeolita Natural

Proviene de una puzolana natural que es una roca ígnea proveniente del proceso de transformación de lava derretida que se produce después de la erupción de un volcán cuando entra en contacto con el océano, tal fusión provoca una reacción química entre el magma caliente y la solución salina del mar que da lugar a la formación de este material que con el paso del tiempo se endurece [11].

Se escogió 3 muestras de zeolitas naturales de diferentes lugares de extracción, tipos y características que se detallan a continuación:

2.1.1.1 Zeolita Natural ZV

La zeolita verde recolectada se presentó en forma de roca amorfa de 5 cm de diámetro aproximadamente con aristas irregulares, mostró una oxidación en la superficie más expuesta de la roca de color café debido a que se encontraba en la intemperie de la mina. En el interior de la zeolita se concentra un color homogéneo en toda su estructura, deduciendo que su morfología interna va a ser de los mismos componentes a lo largo de todo el material. Tiene una dureza de grado medio a diferencia de las rocas de zeolitas extraídas de los 2 inferiores estratos. Su característica física a detallar es que su aspecto es duro al tacto pero una estructura vidriosa al momento de impactarla con un objeto pesado.



*Imagen 8: Muestra de zeolita verde
Fuente: Diego Maldonado*

2.1.1.2 Zeolita Natural ZCr

Es una zeolita natural de tipo clinoptilolita comercializada en sacos de 50 kg por CRILARSA S.A; se compone de 92% de zeolita natural y 8% de agua, teniendo como componentes principales a la mezcla de óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de hierro, óxido de potasio, óxido de calcio, óxido de magnesio, óxido de sodio y agua. Utilizado como aditivo para mejorar la eficiencia alimenticia en pollo de engorde, gallina ponedora, cerdos, bovinos de carne y leche, camarones y peces. La finura de este producto vino dado en malla N°175 logrando observar que sus partículas se noten de un color verde oliva.



*Imagen 9: Saco de 50kg de zeolite activo de CRILARSA C.A
Fuente: <http://www.crilarsa.com/>*

2.1.1.3 Zeolita Natural ZX

La presentación del material es de color verde oliva en su totalidad y con la mezcla de diferentes colores de partículas, no se especifica su finura o tamaño de partículas pero se puede apreciar que el material es una mezcla de material fino y polvo; se debe de pasar por el tamiz para diferenciar el material que va a ser utilizada en los ensayos. Se aprecia que el material es esponjoso y se forma pequeños grumos pero al momento de presionarlos con los dedos se desprende suavemente el material fino.

No se tiene más características del material como para especificar su composición o características del mismo; no obstante, durante el desarrollo de la investigación se determinará propiedades específicas del material.

2.1.2 Cemento Holcim Fuerte tipo GU

Es un cemento hecho para todo tipo de construcción; teniendo a la resistencia, durabilidad y desempeño como principales cualidades, compuesto por clínker de cemento portland, sulfato de calcio y adición de puzolana natural. Los cementos propuestos por NTE INEN 2380 reducen la mitigación ambiental y minimizan hasta un 35% emisiones de CO₂ en comparación de cementos portland [18].



*Imagen 10: Holcim Fuerte tipo GU
Fuente: Holcim [18]*

Holcim Fuerte tipo GU posee varias características satisfactorias en la construcción, tales como:

- ✓ Aumento de trabajabilidad,
- ✓ Buena resistencia a la compresión,
- ✓ Minimiza el calor de hidratación

- ✓ Tiempo de fraguado propicio para obras civiles
- ✓ Brinda firmeza a ataques de sulfatos, cloruros y reacción álcali-agregado
- ✓ Ahorro económico por volumen de hormigón [18].

Tabla 4: Requisitos mínimos de Holcim Fuerte tipo GU

	INEN 2380	Valor Referencial
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0.80	-0.06
Tiempo de fraguado inicial, método de Vicat		
No menos de, minutos	45	190
No más de, minutos	420	
Contenido de aire en mortero, volumen %	-	3
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo		
1 día	-	9
3 días	13	17
7 días	20	22
28 días	28	31
Expansión en barras de mortero 14 días, % máx	0.020	0.002

Fuente: Holcim [18]

2.1.3 Gasolina Extra

Es un combustible producto de la destilación del petróleo, su composición se basa de butanos y butenos. La combustión de la gasolina provoca una importante cantidad de energía liberada que se puede utilizar para generar trabajo. Se debe de cumplir ciertos requerimientos que van desde el tipo de motor y cuidados medio ambientales para que una gasolina sea regulada y comercializada. Sus tipos dependen del grado de octanaje que posean, esta característica indica la presión y la temperatura a la que puede ser sujeto un combustible mezclado con aire antes de detonar automáticamente al alcanzar su temperatura de combustión. La gasolina extra posee 85 octanos por lo que tiene una menor capacidad para evitar una combustión prematura y no coordinada al tipo de compresión del motor, además para preservar el ambiente posee una reducción de azufre en el combustible. Su aspecto es de color verde transparente y brillante, su densidad varía a partir de 0.73 gr/cm^3 por lo que se puede utilizar para la realización de los ensayos de densidad [23].



*Imagen 11: Muestra de gasolina extra
Fuente: Diego Maldonado*

2.1.4 Agua Potable

El agua al ser un material constituyente para una mezcla de materiales debe de ser potable; ya que que incide directamente sobre las propiedades físicas de la mezcla, principalmente como agua de amasado.

Consecuentemente, debe de estar exenta de impurezas, materiales orgánicos, basuras, sustancias salinas, ácidas y azúcares. Además, debe contar con características físicas favorables de color, sabor, libre de olor y turbidez. Se debe de tomar muy en cuenta el lugar donde se obtiene o recoge el liquido vital ya que depende de sus características de pureza una mal o buena trabajabilidad en mezclas con cemento.

Haciendo hincapié en la elaboración de pastas y morteros se debe de tomar en consideración la temeptratura del agua de mezclado, ya que no debe variar de $23^{\circ}\text{C} \pm 1.7^{\circ}\text{C}$ para obtener resultados favorables a la hora de hacer los diferentes ensayos[27].

La influencia de agua en la elaboración de pastas de cemento se debe a la reacción química de hidratación que se produce, obteniendo así un grado de trabajabilidad óptimo de la mezcla.

La incorporación de la adecuada cantidad de agua provoca un beneficio en la hidratación en la etapa de fraguado y su posterior endurecimiento, mejorando la reducción de grietas en la superficie.

2.2 MÉTODO

Para la realización del presente proyecto de investigación se tuvo como base la aplicación de una metodología investigativa, bibliográfica, experimental y aplicada para cumplir con los objetivos planteados a través del proceso metodológico presentado a continuación.

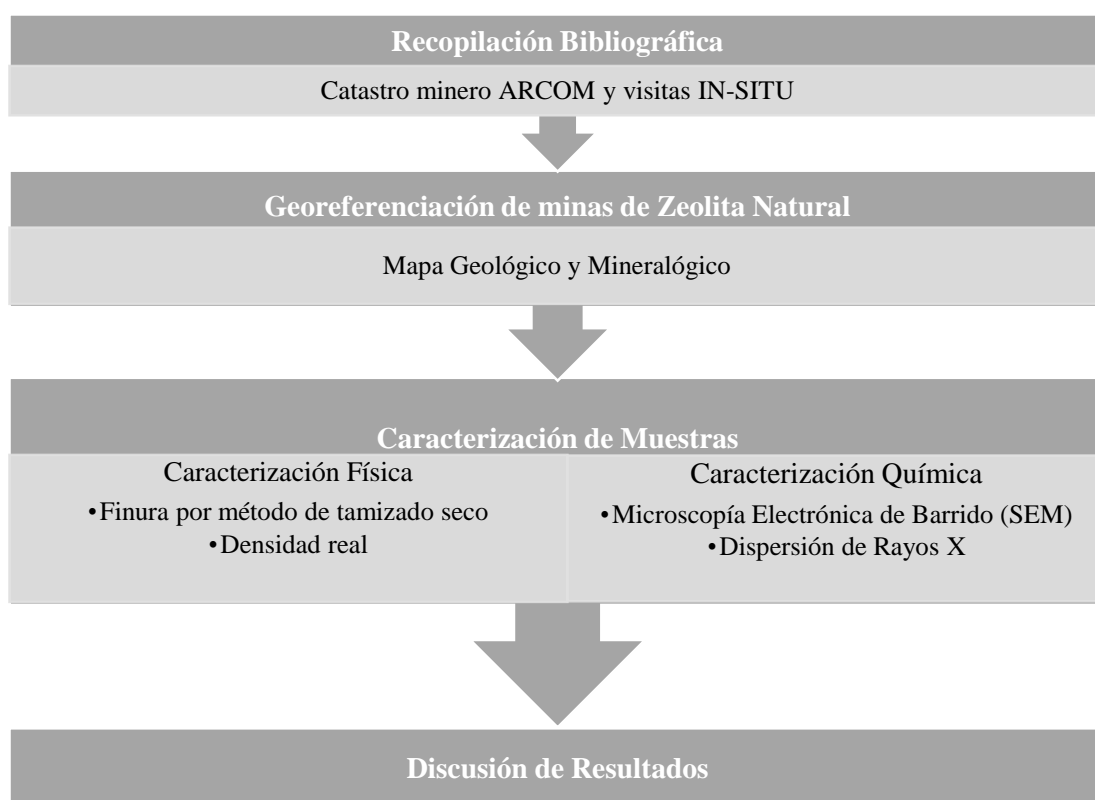


Gráfico 1: Metodología empleada en la investigación

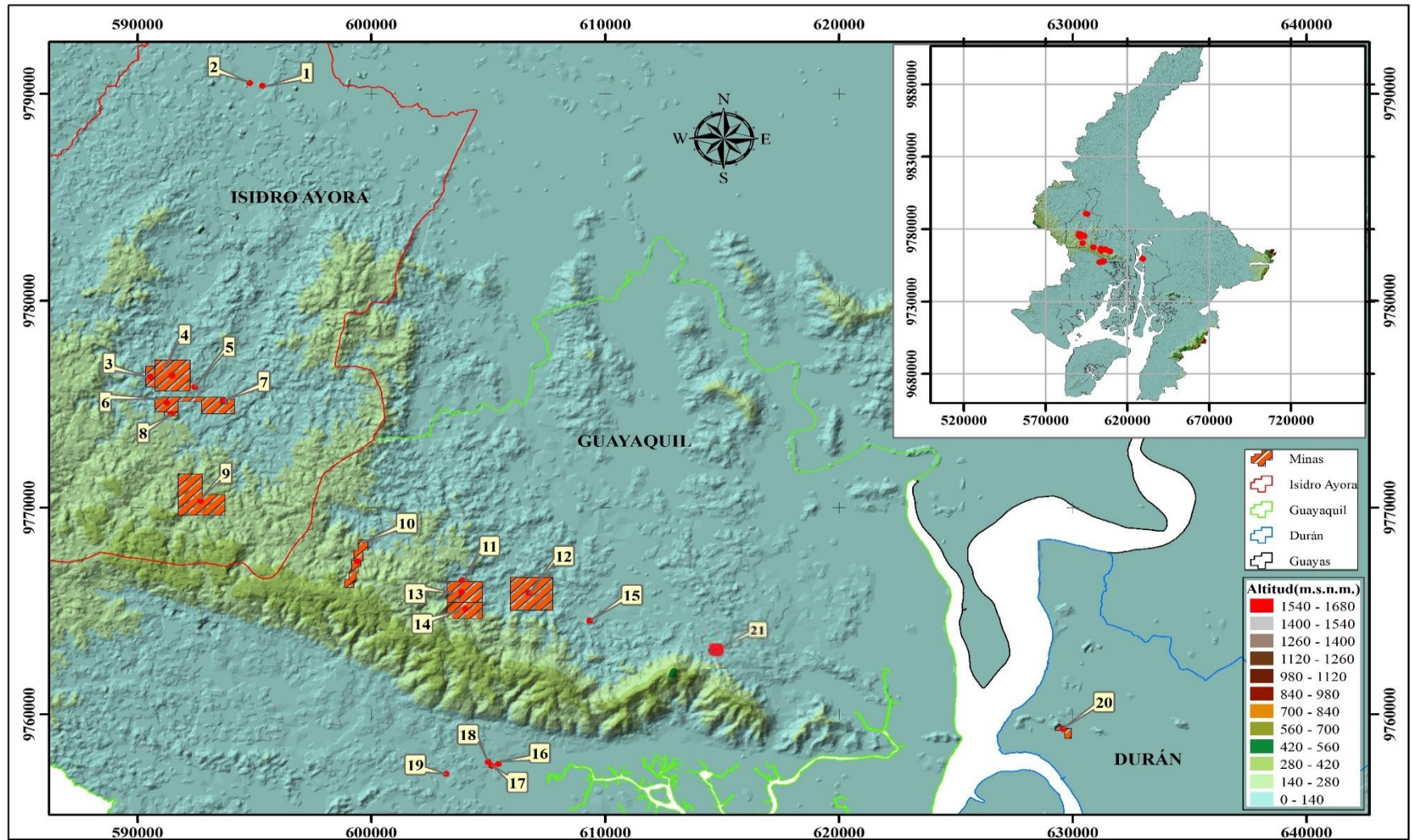
Fuente: Diego Maldonado

La selección de minas de zeolita se la realizó a través de un catastro de ubicación de ARCOM y por contacto con sus propietarios, teniendo en cuenta que algunas empresas o concesiones no brindaban la información suficiente para realizar un catastro más completo, por lo que mediante otros medios se buscaba lograr tener los datos específicos que nos ayudaron a cumplir con todos los requisitos propuestos para hacer una vista IN-SITU con el fin de corroborar información (**Tabla 5**) y obtener el material con características propuestas similares al cemento. Por último, en la **Imagen 12** se realizó un mapa de georeferenciación con toda la investigación necesaria y suficiente para la realización de mapas geológicos y mineralógicos que nos ayudarán ahí una mejor comprensión de ubicación y características de la zeolita.

Tabla 5: Castrato de minas de zeolita en Ecuador

Número	Minas	Nombre	Ubicación	Coordenadas UTM		Área (Ha)	Fuente
				X	Y		
1	NZ1	Zeonatec	Isidro Ayora	594939.00	9790357.00	-	IN-SITU
2	NZ2	Fausto	Isidro Ayora	595000.00	9790800.00	2	ARCOM
3	NZ3	Zeolita	Lomas de Sargentillo	590551.66	9776334.58	40	ARCOM
4	NZ4	Elena	Isidro Ayora	591486.02	9776385.89	225	ARCOM
5	NZ5	Diana	Isidro Ayora	592600.00	9776100.00	4	ARCOM
6	NZ6	Bexi	Isidro Ayora	591256.22	9775073.41	190	ARCOM
7	NZ7	Calcáreos del Pacífico S.A	Isidro Ayora	593698.65	9775185.19	8	ARCOM
8	NZ8	Río Paco	Isidro Ayora	591449.80	9774535.87	12	ARCOM
9	NZ9	Pincopaz	Isidro Ayora	592000.00	9770000.00	300	ARCOM
10	NZ10	Chongón	Chongón	599352.96	9767364.65	88	ARCOM
11	NZ11	Clinop	Chongón	604000.00	9766800.00	4	ARCOM
12	NZ12	El Refugio	Guayaquil	606200.00	9765400.00	288	ARCOM
13	NZ13	Pinto	Isidro Ayora	603500.00	9765800.00	150	ARCOM
14	NZ14	Pinto II	Isidro Ayora	603500.00	9765000.00	120	ARCOM
15	NZ15	Voluntad de Dios I	Guayaquil	609347.80	9764537.45	3.6	ARCOM
16	NZ16	Crilarsa C.A	Chongón	605437.20	9757613.8	-	IN-SITU
17	NZ17	Indami Cia. Ltda	Chongón	605155.00	9757511.00	-	IN-SITU
18	NZ18	Calmosacorp S.A	Chongón	604994.00	9757706.00	-	IN-SITU
19	NZ19	Biomarsa Kravetz	Chongón	603202.00	9757134.00	-	IN-SITU
20	NZ20	Cerro del Tres I	Durán	594939.00	9790357.00	24	ARCOM
21	NZ21	ESPOL	Guayaquil	615139.76	9762722.52	-	IN-SITU

Fuente: Diego Maldonado



*Imagen 12: Mapa de ubicación de zeolitas en la provincia del Guayas
Fuente: Diego Maldonado*

De acuerdo a la información recopilada y su posterior verificación de datos con una visita de campo a las diferentes minas propuestas en ARCOM, se tiene lugar que los cantones Isidro Ayora y Guayaquil es donde se reporta mayor presencia de este material. Siendo algunos datos del catastro inicial corroborados y señalados con una nomenclatura diferente para el mejor entendimiento de los mapas de zeolita, en la **Tabla 6** se elaboró un catastro definitivo de zeolitas tomando en cuenta la ubicación, coordenadas y situación actual teniendo como base el catastro de ARCOM complementado la información mediante visitas IN-SITU a los lugares de distribución de este material. Cabe acotar, que las ubicaciones de las minas propuestas por ARCOM la mayoría tuvo como resultado que eran los lugares donde se procesaba y comercializaba el producto, teniendo como dato importante que las únicas minas visitadas durante la visita de campo fueron Zeonatec S.A donde se extrajo el material en roca y Elena donde se consiguió el producto de material fino de zeolita, los demás productos fueron adquiridos directamente de la oficinas de las empresas ubicadas en las plantas de cada uno de los lugares.

Tabla 6: Catastro de minas de zeolita actualizado en la provincia de Guayas

Número	Nomenclatura	Nombre	Coordenadas UTM	
			X	Y
CANTÓN ISIDRO AYORA				
1	NZ1_M	Mina de Zeonatec S.A	592484.00	9775853.00
1	NZ1_P	Planta procesamiento y distribución de Zeonatec S.A	594939.00	9790357.00
2	NZ2_C	Concesión Fausto	595000.00	9790800.00
3	NZ3_C	Concesión Zeolita	590551.66	9776334.58
4	NZ4_M	Mina Elena	591486.02	9776385.89
5	NZ5_C	Concesión Diana	592600.00	9776100.00
6	NZ6_C	Concesión Bexi	591256.22	9775073.41
7	NZ7_C	Concesión Calcáreos del Pacífico S.A	593698.65	9775185.19
8	NZ8_C	Concesión Río Paco	591449.80	9774535.87
9	NZ9_C	Concesión Pincopaz	592000.00	9770000.00
CANTÓN GUAYAQUIL				
10	NZ10_C	Concesión Chongón	599352.96	9767364.65
11	NZ11_C	Concesión Clinop	604000.00	9766800.00

12	NZ12_C	Concesión El Refugio	606200.00	9765400.00
13	NZ13_C	Concesión Pinto	603500.00	9765800.00
14	NZ14_C	Concesión Pinto II	603500.00	9765000.00
15	NZ15_C	Concesión Voluntad de Dios I	609347.80	9764537.45
16	NZ16_P	Planta de procesamiento y distribución Crilarsa C.A	605437.20	9757613.8
17	NZ17_P	Planta de procesamiento y distribución Indami Cia. Ltda	605155.00	9757511.00
18	NZ18_P	Planta de procesamiento y distribución Calmosacorp S.A	604994.00	9757706.00
19	NZ19_P	Planta de procesamiento y distribución Biomarsa Kravetz	603202.00	9757134.00
21	NZ21_M	Mina ESPOL y Laboratorios	615139.76	9762722.52
CANTÓN DURÁN				
20	NZ20_C	Cerro del Tres I	594939.00	9790357.00

Fuente: Diego Maldonado

Cabe recalcar que las minas y/o concesiones de zeolita están ubicadas a lo largo de la Cordillera Chongón-Colonche, que se extiende desde Guayaquil provincia del Guayas pasando por Olón en la provincia de Santa Elena y terminando en el cantón Puerto López provincia de Manabí [10].

Para una mejor comprensión se presenta a continuación en la **Imagen 13** un mapa donde se detalló de forma representativa el relieve de la cordillera sobre el perfil costanero y las ciudades o poblados por lo que atraviesa; por ende, podemos decir que el estado de pureza o calidad que se encuentra la zeolita depende directamente de la altura sobre el nivel del mar. No obstante, la zeolita recolectada se encuentra en una elevación entre 0-660 m y ubicado en la parte inferior de la cordillera muy cercana a la provincia del Guayas, con la realización de los ensayos propuestos podremos determinar las características de las zeolitas estudiadas.

Se hace hincapié que según las visitas en campo realizadas dan como resultado la clasificación de las zeolitas con su nomenclatura correspondiente en minas, concesiones mineras y plantas procesadoras y distribución consideradas para su mejor visualización con color morado, azul y rojo respectivamente.

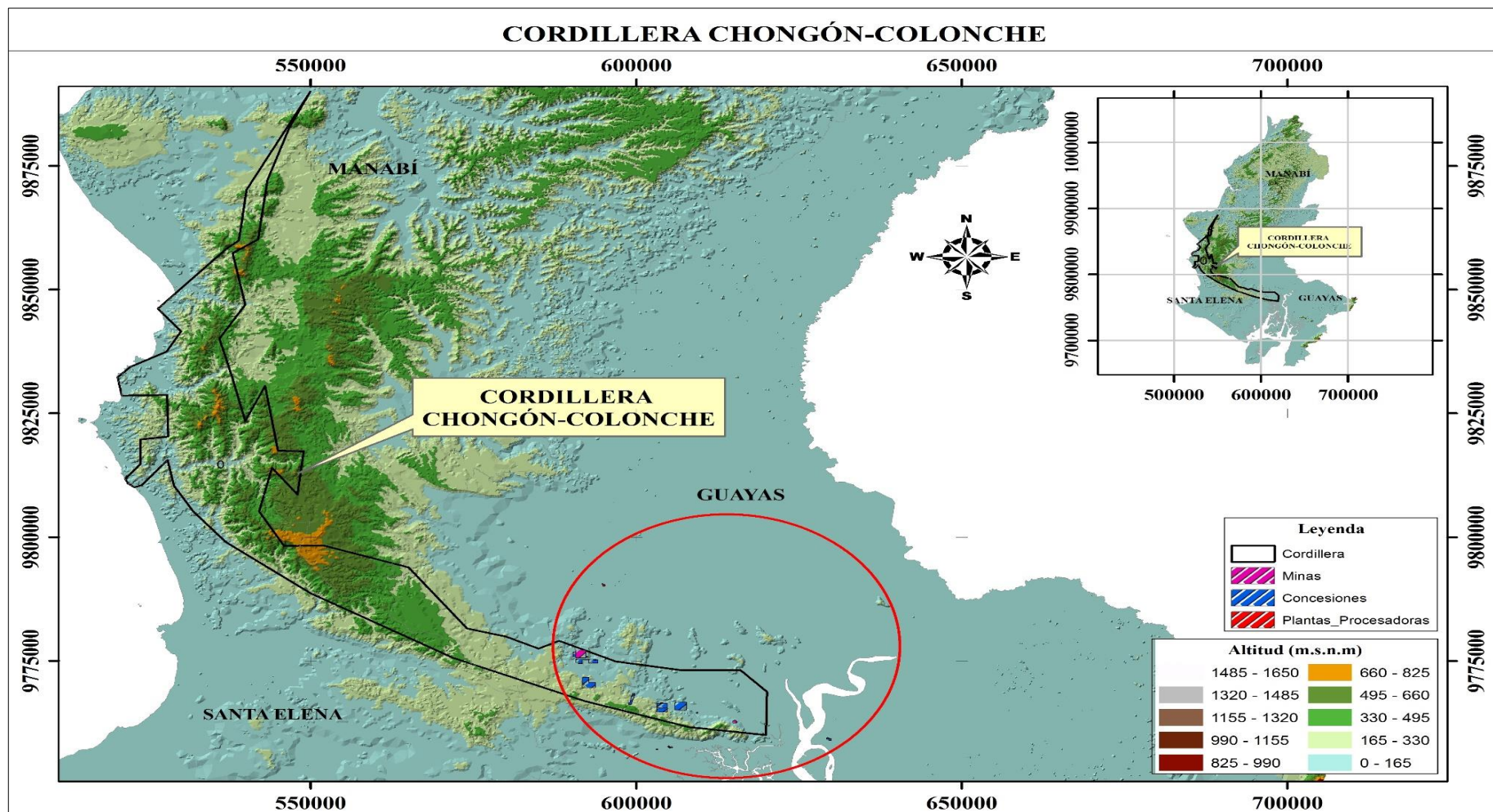


Imagen 13: Mapa de ubicación de la cordillera Chongón-Colonche
Fuente: Diego Maldonado

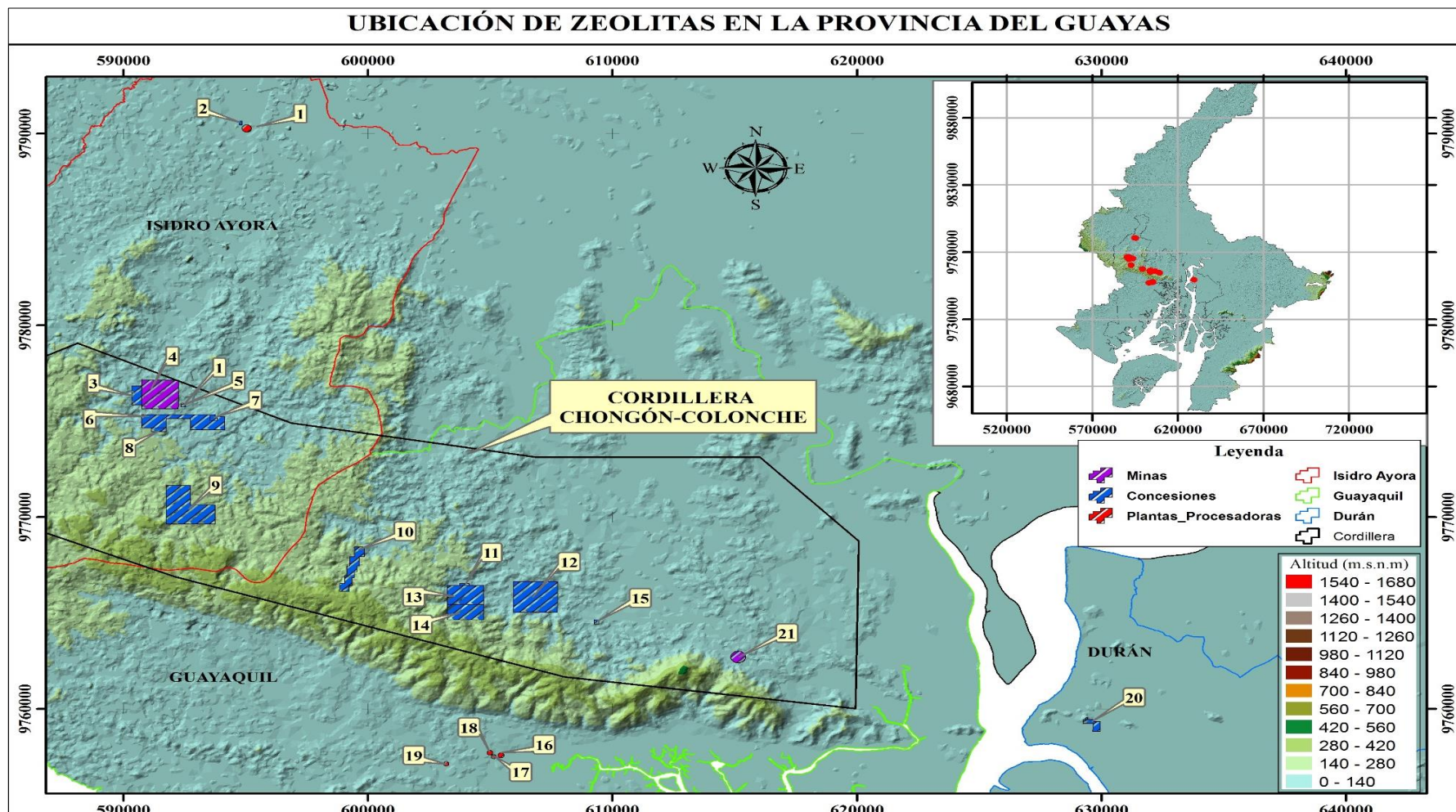


Imagen 14: Mapa de ubicación zeolitas en la provincia del Guayas sobre la cordillera Chongón-Colonche
Fuente: Diego Maldonado

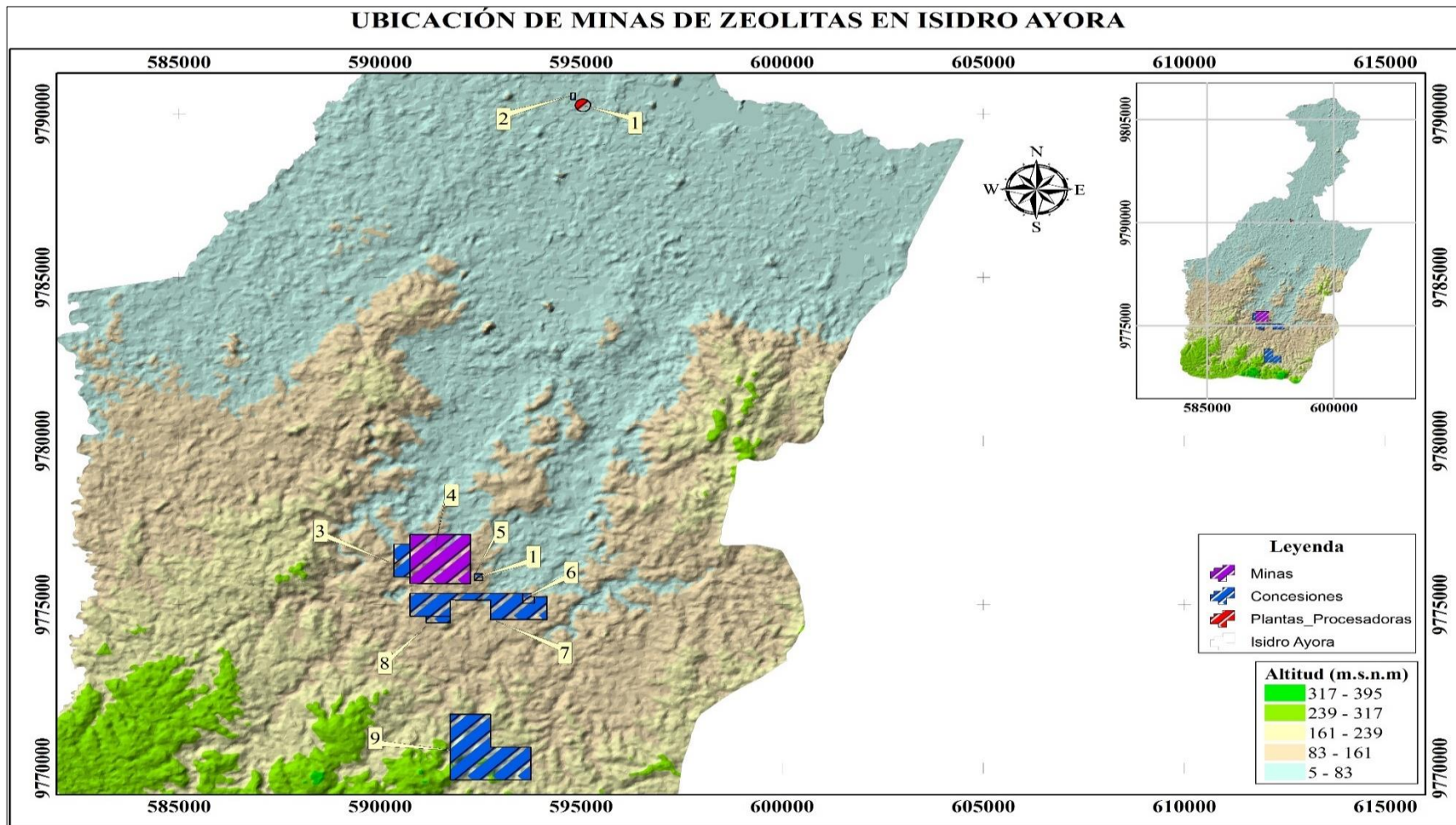


Imagen 15: Mapa de ubicación zeolitas en el cantón Isidro Ayora, provincia de Guayas
Fuente: Diego Maldonado

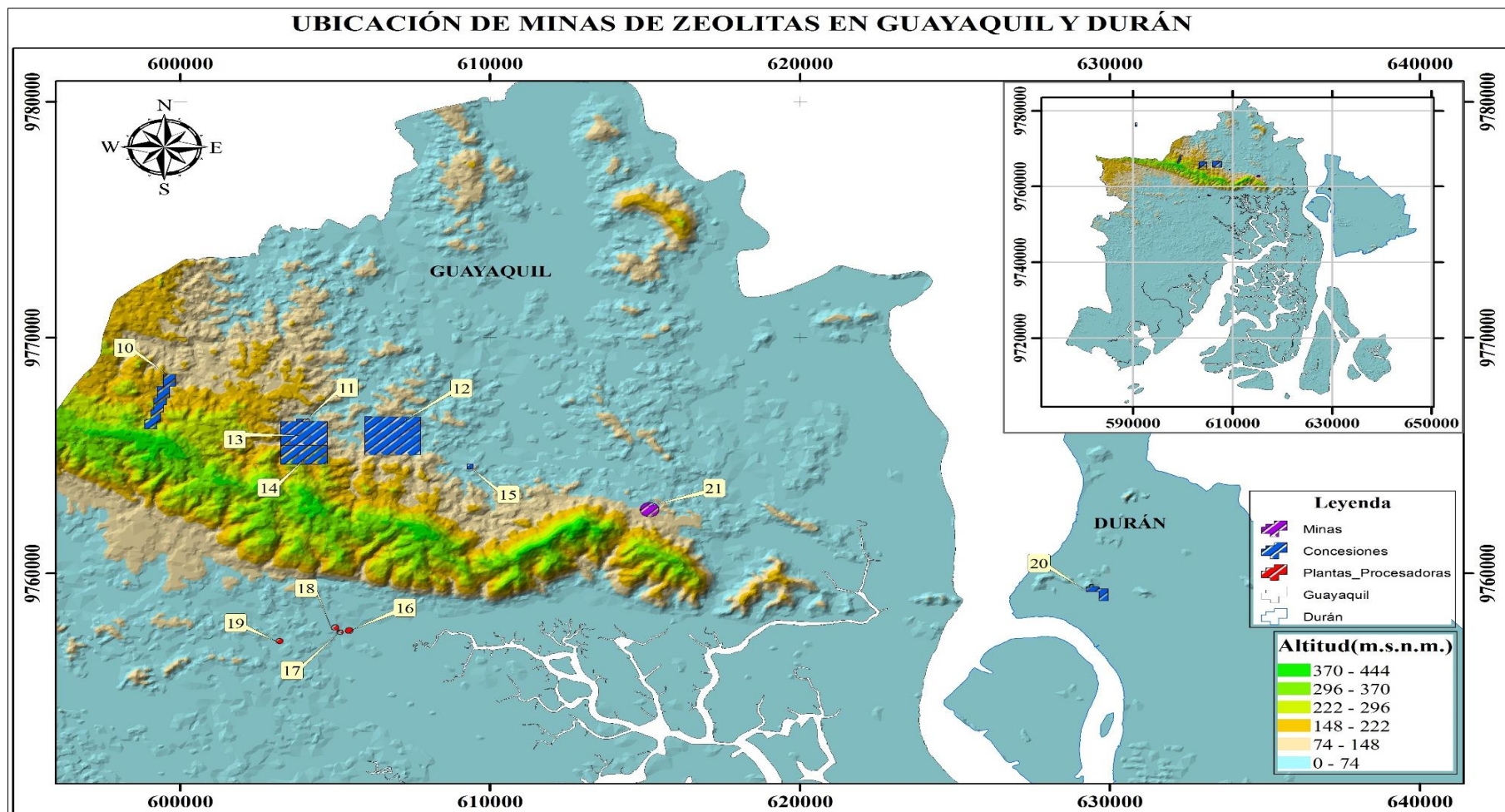


Imagen 16: Mapa de ubicación zeolitas en los cantones Guayaquil y Durán, provincia de Guayas
Fuente: Diego Maldonado

2.2.1 Obtención de zeolitas

2.2.1.1 Obtención de la Zeolita Natural ZV

La **Imagen 17** nos detalla al lugar donde se obtuvo la zeolita verde en roca directamente desde el lugar donde la explotan bajo propiedad de Zeonatec S.A con su propietario el Señor Edison Arciniegas, ubicada en el cantón Isidro Ayora a unos 20 km de distancia, unos 45 minutos aproximadamente de la planta de procesamiento, almacenaje y distribución (**Imagen 18**) de esta empresa localizada en el Km. 1.8 Vía a las Mercedes.



*Imagen 17: Mina de Zeonatec S.A
Fuente: Diego Maldonado*



*Imagen 18: Planta de procesamiento de Zeonatec S.A
Fuente: Diego Maldonado*

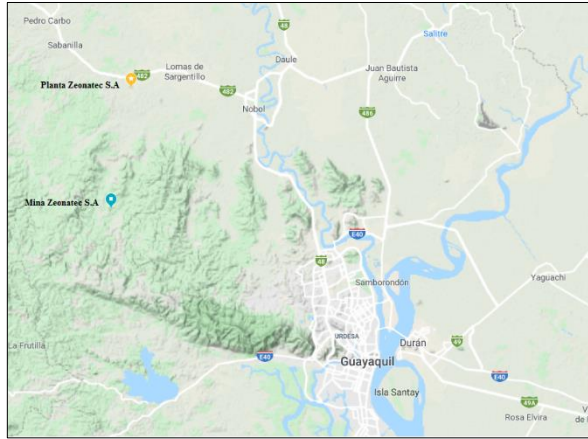


Imagen 19: Ubicación de mina y planta de Zeonatec S.A
Fuente: Google Maps

Para una mejor ubicación de la mina de Zeonatec S.A se tomó las coordenadas donde se extrajo el material (**Tabla 7**), cabe recalcar que el camino fue de piedra y de toda la superficie concesionada hasta la fecha se ha explotado alrededor de 4 hectáreas, debido a que la demanada no es mayor quedando así mucha área por explotar según se vayan dando demandas comerciales o constructivas.

Tabla 7: Puntos de ubicación de la mina de Zeonatec S.A

Punto	Coordenadas UTM		Elevación m
	X	Y	
ZM1	592533	9775847	127
ZM2	592497	9775824	126
ZM3	592467	9775862	121
ZM4	592492	9775880	127

Fuente: Diego Maldonado

Teniendo en cuenta las coordenadas de ubicación de la mina pudimos obtener por medio de las elevaciones y programas computacionales el relieve donde se encuentra este lugar. Llegando a realizar cortes transversales sobre la montaña, para básicamente tener una referencia del perfil topografico que tiene lugar a una representación grafica del terreno donde se obtuvo dicho material.

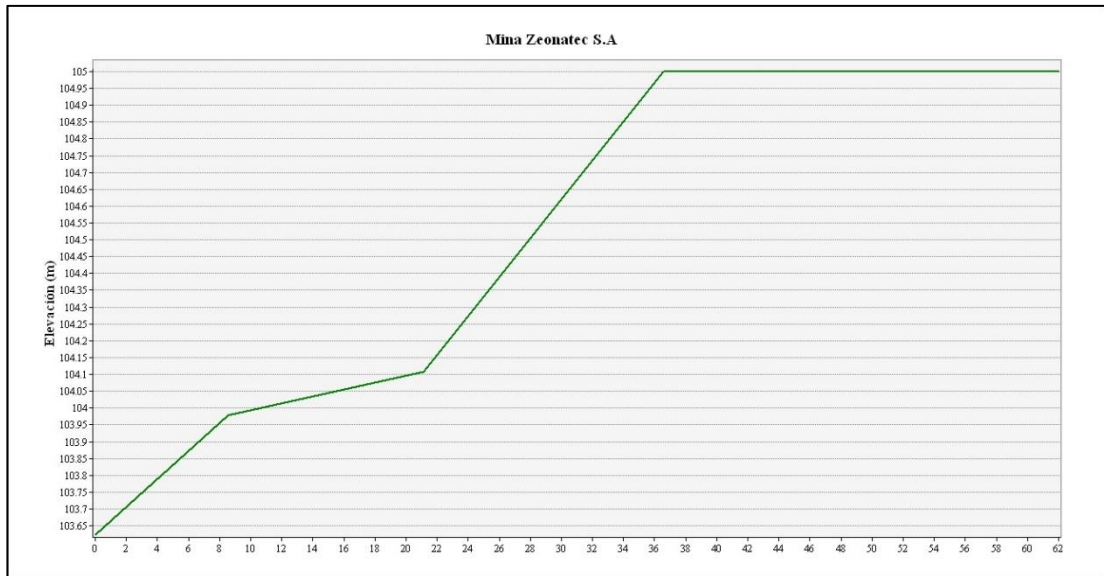


Imagen 20: Perfil Longitudinal de mina Zeonatec S.A
Fuente: Diego Maldonado

La roca de zeolita verde fue encontrada en la mina de Zeonatec S.A sobre una pantalla de roca de aproximadamente unos 10m de altura (**Imagen 21**) ; teniendo en cuenta que se encontró más estratos existentes, siendo el estrato verde oliva el superior a los dos estratos restantes de color café y azul. Se extrajeron rocas amorfas de diferentes medidas con aristas irregulares aproximadamente 8kg que nos servirán para realizar los ensayos requeridos. Su almacenamiento temporal y posterior transporte se lo realizó cubriendo su superficie externa en fundas plásticas y luego colocarla en lonas de yute para evitar el ingreso de humedad y contacto con el ambiente.



Imagen 21: Estratos extraídos de la mina Zeonatec S.A
Fuente: Diego Maldonado

En la **Imagen 22** se muestra la apariencia de la roca de zeolita que es de color verde oliva con un color más intenso en su exterior y un color suave en su interior; teniendo en cuenta que en su interior su tonalidad es homogénea en su totalidad de superficie mientras que en la parte externa por su exposición al ambiente tenía un aspecto café debido a la oxidación de sus metales constituyentes.



Imagen 22: Muestras en roca de zeolita verde
Fuente: Diego Maldonado

Preparación de la Muestra

Mediante la trituración de la roca se logró obtener la disminución de partículas, así obteniendo material que cumple con las indicaciones específicas para realizar los ensayos pertinentes.

En la **Tabla 8** se detalló las cantidades no sobrepasadas a 3kg para que la máquina al momento de triturar no tenga complicaciones y por ende sea un proceso eficiente y óptimo de trituración. A continuación se detalla la cantidad depositada en el tambor y más características de la muestra para su posterior trituración:

Tabla 8: Cantidades de zeolita verde puestas en el molino horizontal

Material	Cantidad (gr)	Tiempo de Molienda (min)	Observaciones
Zeolita Verde	2660	30	Piedras de diámetro grande, 3.5 – 4 cm aproximadamente
	1300	30	Piedras medianamente grandes, 1.5-2cm de diámetro
	1600	30	Piedras medianamente grandes, 1cm de diámetro
	1600	30	Piedras medianamente grandes, 1cm de diámetro

	1600	30	Piedras medianamente grandes, 1cm de diámetro
	978.7	30	Piedras de 1cm de diámetro con polvo resultante de anteriores molidas
	787	30	Piedras de 1cm de diámetro con polvo resultante de anteriores molidas
	2354	30	Piedras medianamente grandes, 1cm de diámetro
	2707.80	30	Piedras 1cm de diámetro más material que no pasa tamiz #200 (75µm)
	3200	30	Piedras de 1cm de diámetro más material sobrante de diferentes medidas de anteriores molidas
	2100	40	Piedras 0.8cm de diámetro más material que no pasa tamiz #200 (75µm)
	293.29	30	Piedras 0.5cm de diámetro más material que no pasa tamiz #200 (75µm)

Autor: Diego Maldonado

Se debe dejar descansar a la máquina después de largos lapsos de trituración para evitar un sobrecalentamiento del motor. Al final, se tamiza por el tamiz #200 (75µm) y se almacena el material que cumple esta característica para posterior realizar ensayos con la muestra indicada, este material cumple con características específicas similares a la del cemento.

2.2.1.2 Obtención de Zeolita Natural ZCr

Este producto vino en una presentación de saco blanco de 25kg y fue adquirido directamente en la planta de Crilarsa C.A con el gerente general de la empresa el Ing. Cristóbal Pazmiño (**Imagen 23**). La localización de la oficina y planta está en el Km 22 Vía a la Costa, lado derecho a aproximadamente 1700m de la carretera. Cabe destacar que esta empresa no está registrada en el ARCOM por lo que se realizó una búsqueda externa para poder contactar con sus propietarios.



Imagen 23: Oficina y planta de Crilarsa C.A
Fuente: Diego Maldonado

La adquisición del material se dió personalmente en la oficina de Crilarsa C.A, haciendo hincapié que en el mismo lugar de la compra existe la planta de procesamiento y trituración del material pero no se especifica el lugar de origen donde se explota y extrae la puzolana natural. Cabe recalcar que a esta empresa existe otra llamada Biomarsa Kravetz con la misma gerencia pero con el procesamiento de cal y otros materiales no metálicos. Para una mejor ubicación en la **Tabla 9** se georeferenció las coordenadas de ubicación del lugar mencionado.

Tabla 9: Coordenadas de la planta de procesamiento y distribución de Crilarsa C.A

Punto	Coordenadas UTM		Elevación m
	X	Y	
ZCr1	605437.20	9757613.80	23

Fuente: Diego Maldonado

El material fue producido por la trituración y procesamiento de zeolita verde, vino dado en un tamaño de partículas de aproximadamente malla 150 (104 μ). Este producto es usado regularmente como fertilizante ya que ayuda a sostener nutrientes tales como calcio, magnesio, potasio, nitrógeno dentro de su estructura interna para más tarde expulsarlos a través del intercambio iónico logrando obtener una reducción en los efectos de consumo de agua y de los nutrientes debido a que se reduce la pérdida de agua por disipación.

Preparación de la Muestra

El material presentado en el saco posee su estructura granular y tamaño del material no cumple con las especificaciones y características particulares para realizar los ensayos propuestos, por lo que se procedió a tamizar para que el material que pasa por el tamiz #200 (75 μ m) sea el adecuado para realizar la experimentación del material.

En la **Tabla 10** se detalló la tamizada de cantidades significativas del material, se va a lograr obtener material necesario para los diversos ensayos. Por lo tanto:

Tabla 10: Tamizado de cantidades de ZCr

Cantidad (gr)	Tiempo Tamizado (min)	Peso Retenido Tamiz #200 (gr)	Peso Pasa Tamiz #200 (gr)	% Que Pasa
367.3	15	222.7	144.6	39.37%
520.4	15	329.0	191.4	36.78%
419.5	15	253.3	166.2	39.62%
454.1	15	276.2	177.9	39.18%
576.6	15	361.9	214.7	37.24%
383.1	15	228.4	154.7	40.38%

Autor: Diego Maldonado



Imagen 24: Muestra original de ZCr

Fuente: Diego Maldonado



Imagen 25: Muestra de ZCr retenido en el tamiz #200 (75 μ m)

Fuente: Diego Maldonado



Imagen 26: Muestra de ZCr que pasa el tamiz #200 (75 μ m)
Fuente: Diego Maldonado

Se debe acotar que mediante el tamizado realizado a este tipo de material, se nota que gran parte se retiene en el tamiz #200 y que el material retenido no es del todo uniforme u homogéneo en todo el saco, se presentan partículas de diferentes tonalidades de color y tamaños por lo que se deduce que el material no tiene un estado de pureza, por lo que conduce a resultados variables en comparación con las demás zeolitas estudiadas.



Imagen 27: Material de ZCr con tamaños diversos mayores a 75 μ m
Fuente: Diego Maldonado

2.2.1.3 Obtención de Zeolita Natural ZX

Este tipo de zeolita natural vino dado en sacos de color blanco de 25kg proporcionados por el Señor Rafael Chávez, aunque se desconoce información suficiente de la composición del material podemos del catastro minero de ARCOM conocer ciertos datos de ubicación de la planta de procesamiento de la empresa.

El lugar de procesamiento del material se encuentra ubicado en la Cooperativa Luis Vargas Torres en la manzana A2 del cantón Isidro Ayora en la provincia del Guayas. Según datos de catastro se tiene un total de 225ha de explotación de material no metálico especialmente zeolita natural. (**Tabla 11**)

Tabla 11: Coordenadas de mina Elena

Punto	Coordenadas UTM		Elevación m
	X	Y	
ZX1	591486.02	9776385.89	24

Fuente: Diego Maldonado

Cabe recalcar que mediante información recolectada se pudo saber que el material de esta empresa en años atrás se habían realizado estudios con empresas de China y Alemania pero los resultados no fueron satisfactorios ya que no resultaba beneficiosa en el ámbito económico porque resultaba costoso la extracción de la roca por debajo de los 5 metros por donde se encontraba en estado puro este material. En la actualidad, esta empresa se encuentra paralizada y no está produciendo material sin embargo cuenta con sacos de material disponibles para estudios hasta que el gobierno les permita volver a realizar explotación, procesamiento y producción de zeolita natural.

Preparación de la Muestra

Acentuando en la presentación del saco de material, se divisó que el material es casi totalmente homogéneo por su contextura suave pero a su vez se presentan pequeños grumos que al tomar contacto con la mano se rompen muy fácilmente, por lo que se procede a realizar el tamizado a través del tamiz #200 (75µm) de diferentes cantidades para obtener el material apropiado y la cantidad necesaria para la realización de ensayos. Por lo tanto se detalló el proceso en la **Tabla 12:**

Tabla 12: Tamizado de cantidades de ZX

Cantidad (gr)	Tiempo de Tamizado (min)	Peso Retenido Tamiz #200 (gr)	Peso Pasa Tamiz #200 (gr)	% Que Pasa
724.6	15	312.6	410.9	56.71%
542.8	15	120.2	422.0	77.74%
626.1	15	174.7	450.5	71.96%
549.9	15	139.4	409.9	74.54%
223.0	15	32.1	190.3	85.34%
678.6	15	136.6	541.2	79.75%
612.3	15	124.0	487.5	79.62%
489.4	15	186.3	302.2	61.75%

Fuente: Diego Maldonado



Imagen 28: Muestra original de ZX
Fuente: Diego Maldonado

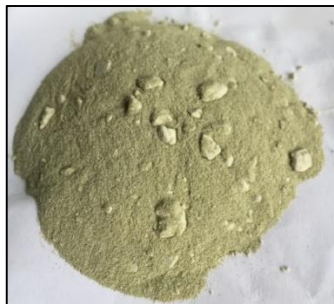


Imagen 29: Muestra de ZX retenido en el tamiz #200 (75µm)
Fuente: Diego Maldonado



Imagen 30: Muestra de ZX que pasa el tamiz #200 (75µm)
Fuente: Diego Maldonado

Haciendo hincapié en el material retenido en el tamiz #200 (75µm), se observó una mezcla de material y de grumos en forma de bolitas que si se los rompe con la mano sus partículas son pequeñas, por lo que quiere decir que el material tratado conservó características de aglomeración descartando la posibilidad de humedad debido a que se ha almacenó en su interior con una bolsa plástica dentro del saco y en su exterior con parafilm para evitar el contacto con el ambiente. Teniendo en cuenta que el material resultante posee características igual en color, textura y dimensiones.

2.2.2 Caracterización Geométrica de Zeolita Natural ZV

Luego de la extracción y recolección de la zeolita verde en roca de la mina de Zeonatec S.A se procedió a reducir el tamaño de roca realizando una trituration primaria en la Máquina de los Ángeles con el objetivo de tener material necesario para realizar los ensayos pertinentes, esto es llevándola a la piedra a una finura de características similares a la del cemento.



*Imagen 31: Muestra original de zeolita verde
Fuente: Diego Maldonado*

2.2.2.1 Características de la Máquina de los Ángeles

Esta máquina consiste en establecer por medio de movimientos giratorios la resistencia de los agregados a la abrasión. Al ser la zeolita un material no muy compacto a diferencia de los materiales pétreos se opta por usar esta máquina para realizar la trituration de la roca. Todo el equipo está inmerso en un armario de seguridad de dimensiones de aproximadamente 120x100x120 cm recubierta de láminas de acero que permite la reducción de ruido producido por la máquina con un peso aproximado de todo el accesorio de 530kg. En su interior, un tambor de acero enchapado de 70cm de diámetro y longitud interna de 50cm aproximadamente y con una compuerta de seguridad con tornillos de ajuste para evitar la salida del polvo, rota a una velocidad de 30-33 rpm. Dentro del tambor, se colocan 12 esferas con un peso variable entre 390 y 445 gr que posibilita el desgaste y trituration del material. Para poder girar el tambor se debe contar con un motor eléctrico que debe tener características de potencia de 740 W y conectada a un voltaje de 110 V. Para la descarga el material se deposita en un recipiente de acero ubicado en la parte inferior del tambor. En el exterior, la máquina cuenta con un contador automático que permite conocer el número de revoluciones en un tiempo determinado.



Imagen 32: Máquina de los Ángeles
Fuente: Diego Maldonado

Para realizar la disminución de tamaño de la roca verde y la obtención de material fino que cumplan con las características necesarias. Se coloca aproximadamente 2kg de rocas de diferentes medidas en la Máquina de los Ángeles (**Imagen 33**), adjuntando así al tambor las 12 esferas de acero y ajustando correctamente los tornillos de la compuerta para evitar la pérdida de material por los orificios de la misma. Finalmente, para que empiece el funcionamiento del motor se conecta el enchufe a una corriente alterna y se espera el proceso de trituración por 1 hora.



Imagen 33: Material listo para la trituración
Fuente: Diego Maldonado

Pasado el tiempo de trituración se procedió a retirar el material, primero esperar un momento luego de la detención del tambor para que el polvo se asiente en el fondo y sea más fácil su retiro. Luego, se aflojan los tornillos de la compuerta y con mucha precaución se da vuelta el tambor para que el agujero de la compuerta quede en la parte inferior de la máquina y con mucho cuidado retirar el material con la ayuda de la brocha y espátula. Cabe recalcar que se realizó estos procedimientos con la respectiva protección personal para evitar inconvenientes y complicaciones en nuestra salud.



Imagen 34: Material después de la trituración
Fuente: Diego Maldonado

Después de la trituración de las rocas verdes, se observó que de la roca original se divide en partes más pequeñas de 2cm aproximadamente y que gran cantidad de material es material fino que posterior puede servir para realizar los diferentes ensayos.

2.2.2.2 Características del Molino Horizontal

Debido a que se requiere determinar la dureza del material se tiene previsto realizar una caracterización de la muestra de zeolita verde teniendo en cuenta diferentes cantidades de material y posterior su trituración en el molino horizontal, para que finalmente el material resultante pasado por los tamices de agregado fino según la norma INEN 872 [28] y que nos represente una curva granulométrica del material dentro de los límites establecidos por la ASTM C-33. [29]

El molino horizontal utilizado para realizar este ensayo tiene especificaciones técnicas que cumplen con parámetros específicos para un buen uso del equipo. (**Tabla 13**)

Tabla 13: Características del molino horizontal

Capacidad de carga muestra seca	8.97 kg
Capacidad de muestra húmeda	16.41 kg
Potencia	0.5 HP
Voltaje	220V
Velocidad del tambor	74 rpm
Tiempo de molienda	1-10 horas
Alto	51cm
Diámetro del tambor	21cm
Longitud del tambor	34cm
Nivel de ruido	85dB

Fuente: Cabezas [30]

Adicionalmente para lograr la trituración se requiere bolas de acero que permiten con mucha eficacia moler el material ingresado en el tambor. (**Tabla 14**)

Tabla 14: Características de los cuerpos moledores del molino horizontal

Diámetro de bolas (mm)	# Bolas	Masa (kg)
22	90	3.65
20	45	1.45
15	25	1.7
12	15	0.1
Total	175	6.9

Fuente: Cabezas [30]

La máquina en su exterior está cubierta con una estructura diseñada para proporcionar rigidez, así mismo para sostener el peso de los componentes internos de la máquina. Para evitar la salida de material por el agujero del tambor se encuentra una compuerta que en sus lados exteriores se ajustan con caucho para dar un mayor aseguramiento, a su vez es sostenida con 8 picaportes, 2 en cada lado, asegurados con un tornillo para evitar la fuga de material[30].

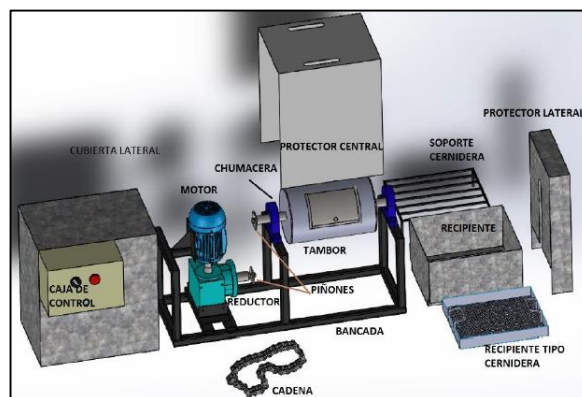


Imagen 35: Esquema del molino horizontal

Fuente: Cabezas [30]

Para reducir el ruido se tomó en cuenta una cubierta tipo protector para que el sonido de los movimientos de las bolas no se propague al ambiente. Cabe recalcar que se realizó estos procedimientos con la respectiva protección personal para evitar inconvenientes y complicaciones en nuestra salud.

Luego de pasar el material por los procedimientos descritos anteriormente, se tuvo como resultado material suficiente de diferentes medidas para realizar la caracterización en función de la molida en un tiempo determinado y el tamizado de la muestra.

No obstante, se realizó una clasificación del material en base al diámetro de sus partículas (**Tabla 15**) y se obtuvo la siguiente información y resultados, para luego continuar con la caracterización de la muestra.

Tabla 15: Cantidades y tamaños de ZV

Material	Tamaño de tamices	Dimensiones de partículas	Peso Total
Zeolita Verde	Pasa tamiz 3/8 “ y retiene tamiz #4	Menores a 9.5mm y mayores a 4.75mm	660.2 gr
	Pasa tamiz #4 y retiene tamiz #10	Menores a 4.75mm y mayores a 2mm	1014.7 gr
	Retiene tamiz #30 , #50, #100 y #200	Diferentes medidas mayores a 75µm, 150µm, 300µm y 600µm	1030.3 gr

Fuente: Diego Maldonado

Teniendo las cantidades necesarias, se continuó con el proceso de molienda en el molino horizontal tomando en cuenta cantidades de material ingresadas al molino, tiempo de molienda y posterior tiempo de tamizado (**Tabla 16**) para así por medio de los valores retenidos en cada serie de tamiz se construyó la curva granulométrica del material.

Tabla 16: Cantidades para molienda de ZV

No. Molida	Cantidad ingresada al molino (gr)	Dimensiones de partículas	Tiempo de molido (min)	Tiempo de tamizado (min)
1	350	Menores a 9.5mm y mayores a 4.75mm	40	30
2	Resultado de molida 1	Menores a 9.5mm y mayores a 4.75mm	20	30
3	300	Menores a 9.5mm y mayores a 4.75mm	40	30
4	Resultado de molida 3	Menores a 9.5mm y mayores a 4.75mm	20	30
5	1000	Menores a 4.75mm y mayores a 2mm	60	30
6	Resultado de molida 5	Menores a 4.75mm y mayores a 2mm	60	30
7	1000	Diferentes medidas mayores a 75µm, 150µm, 300µm y 600µm	120	30

Fuente: Diego Maldonado

Enfocando al proceso de molienda, se tomó en cuenta que en la molienda 2 se toma el mismo material de la molienda 1 luego de su respectivo tamizado, para su posterior ingreso de nuevo al molino para completar el tiempo de molienda total de 60min; así mismo con la molienda 4. Para la molienda 6 se procedió al mismo procedimiento de las dos anteriores molidas pero en este caso completando un tiempo total de molienda de 120min.

En el proceso de tamizado, se tuvo previsto realizar esta operación con la serie de tamices para la gradación del árido fino [28].

Tabla 17: Características de para la granulometría de material fino

TAMIZ INEN	PORCENTAJE QUE PASA
9.5 mm	100
4.75 mm	95 a 100
2.36 mm	80 a 100
1.18 mm	50 a 85
600 μm	25 a 60
300 μm	10 a 30
150 μm	2 a 10

Fuente: INEN 872 [28]

Efectivamente para que el material de agregado fino tenga una curva granulométrica bien graduada debe de estar dentro de los rangos normalizados, como son los límites superiores y límites inferiores con respecto a los porcentajes que pasa en cada uno de los tamices[29].

Luego de haber colocado el material sobre la serie de tamices se procede a tomar dato de todos los pesos retenidos en el tamiz teniendo en cuenta la total obtención del material del tamiz con una brocha y tomando las precauciones necesarias de conservación de los equipos. Además, se debe de tomar en cuenta la protección necesaria para evitar perjuicios en la salud.

2.2.3 Finura de cemento y zeolitas por método de Tamizado Seco

Este ensayo nos permitió conocer el tamaño de partículas que posee un material ya que esta característica influye directamente en el calor y velocidad de hidratación, consecuentemente ligado al valor que incide en la velocidad de las reacciones químicas

que tienen lugar durante su fraguado y su primer endurecimiento. Para la realización de este ensayo se debe tomar en cuenta que la temperatura del laboratorio, materiales y equipos debe mantenerse entre 18°C y 24°C, la humedad relativa del laboratorio no debe ser menor del 50% y para realizar la medición de masa se la realizó en una balanza analítica con una sensibilidad de 0.001g[20].



Imagen 36: Equipos para realizar ensayo de finura
Fuente: Diego Maldonado

Procedimiento

- ✓ Limpiar y verificar que los equipos estén en buen estado.
- ✓ Pesar en un recipiente una muestra de 50g de material.
- ✓ Preparar el tamiz sobre la fuente y colocar dicha cantidad sobre el tamiz #100 (150 μ), limpio y seco.
- ✓ Realizar sin la tapa sobre el tamiz movimientos de rotación suaves hasta que la mayor parte del material fino pase a través de la malla, por un tiempo estimado de 4 minutos.
- ✓ Una vez acabada la acción anterior, golpear suavemente los bordes del tamiz con la brocha para evitar que se queden partículas pegadas sobre el tamiz.
- ✓ Pesar el retenido en el tamiz #100 y lo que pasó en la bandeja, limpiar con un paño limpio y anotar los valores.
- ✓ Colocar la tapa sobre el tamiz y realizar los mismos movimientos descritos anteriormente pero por un lapso de 5 a 10 minutos.
- ✓ Realizar los golpes sobre el tamiz, pesar los retenidos y limpiar y anotar los valores.
- ✓ Realizar ensayos de un minuto sujetando el tamiz puesto la tapa e inclinado ligeramente, proporcionarle golpes suaves en el costado aproximadamente 150

por minuto, contra la palma de la mano; cada 25 golpes girar el tamiz un sexto de revolución (60°) en la misma dirección.

- ✓ Continuar repetitivamente por 1 minuto hasta que no pasen más de 0.05g del material puesto en la bandeja.
- ✓ Tener en cuenta que se debe de limpiar bien los bordes del tamiz para poder anotar en cada repetición los valores resultantes[20].

La máxima diferencia entre ensayos para cada material no debe excederse del 2% caso contrario debe repetirse el ensayo[20].

Este procedimiento de finura se lo realizó para el cemento CGU, Zeolita Natural ZV, Zeolita Natural ZCr y Zeolita Natural ZX.



*Imagen 37: Finura de la zeolita verde
Fuente: Diego Maldonado*

2.2.4 Densidad real por método del picnómetro de cemento y zeolitas

Este ensayo nos permitió obtener la densidad de materiales finos a través de la relación de la masa del material y el volumen de un líquido no reactante de la masa que se traslada en un matraz, puede ser frasco Le Chatelier o picnómetro. El líquido no reactante debe de ser querosén libre de agua o nafta que tenga una densidad mayor que 0.73 g/cm^3 , que esté a una temperatura constante de $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$. Toda medición de masa se la debe realizar en una balanza con precisión de 0.05g [23].

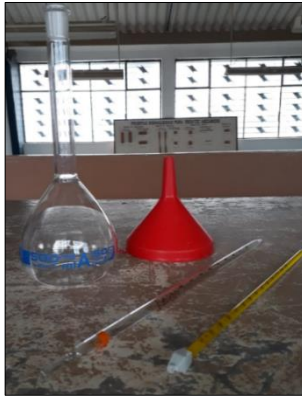


Imagen 38: Equipos para realizar ensayo de densidad
Fuente: Diego Maldonado

Procedimiento:

- ✓ Limpiar y verificar que los equipos estén en buen estado.
- ✓ Pesar los equipos en la balanza electrónica y anotar.
- ✓ Pesar 64g de material previamente preparado y con una aproximación de 0.05g.
- ✓ Colocar el material dentro del picnómetro cuidadosamente con un embudo y asegurar que el peso del conjunto sea el correcto.
- ✓ Previamente calibrada la temperatura de la gasolina, se coloca gasolina hasta un poco menos de la marca de aforo.
- ✓ Girar cuidadosamente el picnómetro en un plano horizontal para que puedan salir las burbujas de la mezcla por aproximadamente 2 minutos o hasta que no hayan burbujas.
- ✓ Rellenar con gasolina hasta la marca de aforo, cerciorándose que la parte inferior de la bomba de la gasolina quede en la línea de aforo.
- ✓ Pesar el conjunto y anotar.
- ✓ Desechar la mezcla en un recipiente vacío y posterior proceder a lavar el picnómetro con agua, limpiarlo y secarlo con un compresor de aire para que no se varíe el peso inicial del picnómetro.
- ✓ Así mismo teniendo en cuenta la temperatura anterior, llenar con gasolina el picnómetro hasta la marca de aforo teniendo en cuenta las anteriores consideraciones.
- ✓ Pesar, anotar y limpiar los equipos para un posterior ensayo.

- ✓ Utilizar el procedimiento volumétrico de desplazamiento para determinar los valores correspondientes a masa, volumen y densidad de los materiales [23].

Para la obtención de resultados favorables se debe tomar muy en cuenta la temperatura, por lo que si la gasolina está a una temperatura superior a la establecida se pierde precisión en los resultados.

Los ensayos para cada material serán mínimo de 2 y se tendrá en cuenta que dos resultados positivos hechos por un operador se encuentren en rango de $\pm 0.03 \text{ g/cm}^3$ de todos los resultados obtenidos con el material [23].

Este procedimiento de ensayo de densidad se lo realizó para el cemento CGU, Zeolita Natural ZV, Zeolita Natural ZCr y Zeolita Natural ZX.

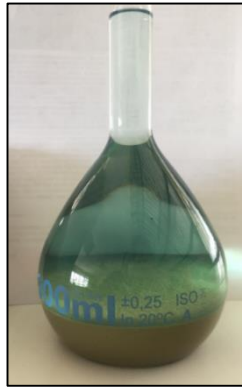


Imagen 39: Densidad real del cemento
Fuente: Diego Maldonado.

2.2.5 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

La determinación de la morfología del cemento Holcim GU y los 3 tipos de zeolitas naturales (ZV, ZX y ZCr) se lo realizó en un equipo SEM de marca JEOL JSM – IT 100.

En la **Tabla 1** podemos observar las características de la fuente de electrones del SEM JEOL JSM-IT 100.

Tabla 18: Características del cañón de electrones TE

	Canon de electrones (TE)	
	Tungsteno	Cristal (LaB ₆)
Tamaño de fuente de electrones	15 ~ 20 μm	10 μm
Brillo ($\text{Acm}^{-2} \text{ rad}^{-2}$)	10^5	10^6

Propagación de energía (kV)	3 ~ 4	2 ~ 3
Tiempo	50 h	500 h
Temperatura del cátodo (K)	2800	1900
Fluctuación actual (por hora)	<1%	<2%

Fuente: Tescan, 2014 [31]

Antes de realizar la microscopía electrónica de barrido (SEM) se procedió a la preparación de las muestras para la realización del mismo. Se utilizó una pequeña cantidad de material aproximadamente 1cm³ o de una muestra en roca esto depende del grado de aumento al que se quiere visualizar la estructura interna; por lo tanto se debe de cumplir que el material este seco y sea conductor.

Se secan las muestras en el horno durante 24 horas a una temperatura constante de 40°C siempre preservando la armadura original del material y que solo se elimine la humedad (**Imagen 40**). Una pequeña cantidad es colocada en cintas de carbono doble faz y para que la visualización en el microscopio sea óptima se recubren las muestras con un material conductor mediante sputtering con oro para que se pueda obtener imágenes de buena calidad al realizar el análisis SEM y EDS ya que las zeolitas no son conductoras [26]. Las imágenes SEM se realizan en alto vacío (High Vacuum), a una energía de 15 KeV (High Voltage) que son recolectadas con el detector de electrones secundarios para pasar a los fotomultiplicadores que procesan las imágenes por transformadas de Fourier para generar una imagen en grises.

En el microscopio, se procede a divisar las muestras y mediante la variedad de enfoques se estudia, analiza y escoge las características superficiales del material teniendo en cuenta el tamaño de visualización de la muestra y la preservación de la estructura interna[26].



Imagen 40: Muestras preparadas para ensayos químicos
Fuente: Diego Maldonado.

2.2.6 Dispersión de rayos X

Para desarrollar la técnica de espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS) mediante el análisis de una sección de las imágenes SEM examinadas por medio del microscopio electrónico de barrido (SEM), para obtener los espectros EDS de las 4 muestras de este estudio. En el eje horizontal corresponde a la energía de rayos X, mientras que el eje vertical corresponde a los recuentos de rayos X con una energía específica.

El análisis EDS se realiza con un voltaje de 15.00 KeV, en una sección específica de las imágenes SEM con un aumento de dimensión de las partículas de 2000x donde se detectan todos los elementos químicos y óxidos presentes en las muestras de estudio. El procedimiento de detección de los elementos se programa al equipo para que encuentre hasta un tiempo de 25 s, aunque el tiempo real de estudio se basa sobre los 25.80 s.

En la **tabla 19** se detallan las condiciones de adquisición del equipo JEOL JSM-IT 100 de donde se realizaron los espectros EDS de las muestras estudiadas.

Tabla 19: Condiciones de adquisición

Instrumento	IT100LA
Voltaje	15.00 KeV
Tiempo de Proceso	T4
Tiempo Programado	25.00 s
Tiempo Real	25.80 s
Tiempo Muerto	4.00 %
Conteo	1429.00 CPS

Fuente: Tescan, 2014 [31]

CAPITULO III

RESULTADOS Y DISCUSION

3.1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Luego de analizar al cemento y las 3 muestras de zeolita natural se detalla a continuación un resumen de los resultados obtenidos para cada una de las propiedades físicas como finura, densidad, propiedades químicas como microscopía electrónica de barrido y análisis de dispersión de rayos X, y la caracterización geométrica del material.

En el análisis granulométrico de la zeolita verde se tiene que dependiendo del tamaño de partículas se tiene un porcentaje total que logra pasar el tamiz #200 ($75\mu\text{m}$) y logra cumplir con las características propuestas de material para hacer los ensayos.

Los rangos obtenidos de porcentaje de material menor a $75\mu\text{m}$ son para tamaños menores a 9.5mm y mayores a 4.75mm dado como resultado que el porcentaje de material varía entre 36.72% y 41.91%; mientras que para tamaños menores a 9.5mm y mayores a 4.75mm el porcentaje de material varía entre 33.76% y 36.99%; y para tamaños aproximados de $600\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$, $150\mu\text{m}$ y $75\mu\text{m}$ nos da un porcentaje de material de 33.13%.

Para los ensayos de finura se obtuvo resultados para el cemento GU desde 99.94% hasta 99.96%, mientras que las zeolitas naturales arrojaron valores desde 99.74% hasta 99.98%. Como consecuencia se tiene que los materiales estudiados poseen partículas homogéneas y muy finas menores a $75\mu\text{m}$, y cumplen con los requerimientos para realizar los ensayos.

En los ensayos de densidad del cemento GU va de un rango desde 2.800 gr/cm^3 hasta 2.815 gr/cm^3 , mientras que en las zeolitas podemos observar que existe una variación de densidades que van desde 2.158 gr/cm^3 hasta 2.572 gr/cm^3 . Cabe anotar que la variación de densidad entre zeolitas tiene lugar a composición física, calidad y pureza del material.

Nomenclatura de los ensayos realizados

Tabla 20: Nomenclatura empleada en ensayos realizados

Nomenclatura	Descripción
GU	Cemento Holcim tipo GU
ZV	Zeolita Verde
ZX	Zeolita mina Elena
ZCr	Zeolita Crilarsa C.A
FGU	Finura de cemento GU
FZV	Finura de Zeolita Verde
FZX	Finura de Zeolita mina Elena
FZCr	Finura de Zeolita Crilarsa C.A
FGU _p	Promedio de finura de cemento GU
FZV _p	Promedio de finura de Zeolita Verde
FZX _p	Promedio de finura de Zeolita mina Elena
FZCr _p	Promedio de finura de Zeolita Crilarsa C.A
δGU	Densidad de cemento GU
δZV	Densidad de Zeolita Verde
δZX	Densidad de Zeolita mina Elena
δRZCr	Densidad de Zeolita Crilarsa C.A
δRGU _p	Promedio de densidad real de cemento GU
δRZV _p	Promedio de densidad real de Zeolita Verde
δRZX _p	Promedio de densidad real de Zeolita mina Elena
δRZCr _p	Promedio de densidad real de Zeolita Crilarsa C.A
μm	Micrómetros
SEM	Microscopía electrónica de barrido
EDS	Espectroscopia de rayos X de dispersión de energía



Fuente: Diego Maldonado

3.1.1 Caracterización Geométrica de la Zeolita Natural ZV

La metodología de este ensayo se basa en la realización de una curva granulométrica por medio del tamizado de ciertas cantidades de material de zeolita verde previamente clasificadas por su tamaño de partículas y posterior mediante un proceso de molienda y trituración del material en el molino horizontal por un tiempo específico, se logra obtener datos de pesos del material en cada una de los tamices de la serie de Taylor según lo estipulado en la norma [28].

La ejecución de este procedimiento tiene lugar al estudio del comportamiento y dimensiones de las partículas luego del respectivo proceso de molienda, poniendo énfasis en el retenido por cada tamiz y el porcentaje de material que pasa el tamiz #200 (75µm) o el retenido en la fuente para así poder deducir la dureza del material teniendo en cuenta el tamaño y cantidad de las partículas iniciales.

Tabla 21: Datos y características de molida 1

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES 						
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						
1	Tamaño de muestra		Menores a 9.5mm y mayores a 4.75 mm			
	Peso antes molida (g)		350	% pérdida tamizado	0.70%	
	Peso después molida (g)		341.70	Fecha	22/01/2020	
	Norma		INEN 872	% pérdida molino	2.37%	
	Tiempo molida (min)		40			
	Tiempo tamizado (min)		30			
	Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
	3/8"	9.5	0	0	0%	100%
	N°4	4.75	99.40	99.40	29.09%	70.91%
	N°8	2.36	6.30	105.70	30.93%	69.07%
	N°16	1.18	1.70	107.40	31.43%	68.57%
	N°30	0.59	4.90	112.30	32.87%	67.13%
	N°50	0.297	24.20	136.50	39.95%	60.05%
N°100	0.149	74.30	210.80	61.69%	38.31%	
N°200	0.075	67.40	278.20	81.42%	18.58%	
Fuente	-	61.10	339.30	99.30%	-	
Retenido fuente		17.88%				

Fuente: Diego Maldonado

Tabla 22: Datos y características de molida 2

2		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
		Tipo de muestra		Menores a 9.5mm y mayores a 4.75 mm de molida 1	
Peso antes molida (g)		339.30	% pérdida tamizado		0.64%
Peso después molida (g)		330.50	Fecha		22/01/2020
Norma		INEN 872	% pérdida molino		2.59%
Tiempo molida (min)		40+20			
Tiempo tamizado (min)		30			
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
3/8"	9.5	0	0	0%	100%
N°4	4.75	80.00	80.00	24.21%	75.79%
N°8	2.36	4.30	84.30	25.51%	74.49%
N°16	1.18	2.10	86.40	26.14%	73.86%
N°30	0.59	7.20	93.60	28.32%	71.68%
N°50	0.297	56.70	150.30	45.48%	54.52%
N°100	0.149	85.10	235.40	71.23%	28.77%
N°200	0.075	53.10	288.50	87.29%	12.71%
Fuente	-	39.90	328.40	99.36%	-
Retenido fuente		12.07%			

Fuente: Diego Maldonado

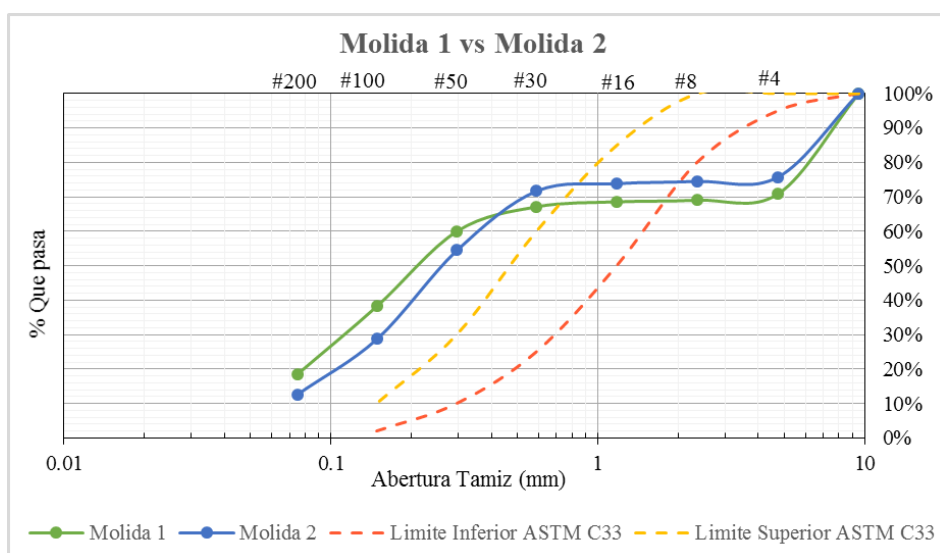


Gráfico 2: Curva granulométrica de molida 1 y 2

Fuente: Diego Maldonado

Interpretando el **Gráfico 2** tenemos en cuenta el mismo tamaño de partículas que van desde menores a 9.5mm y mayores a 4.75mm por un tiempo de la molida 1 de 40 minutos y de la molida 2 que se complementa con la molida 1 moliendo 20 minutos más hasta completar 60 minutos y por un proceso de tamizado de 30 minutos, se tiene que el material que pasa el tamiz #200 (75 μ m) o el retenido en la fuente es de 17.88% y 12.07% respectivamente.

Haciendo referencia a las **Tabla 21** y **Tabla 22** se tiene como resultado que el porcentaje de partículas de 4.75mm disminuyen en la molida 2 a diferencia de la molida 1, teniendo en cuenta que al triturar estas partículas hace que el porcentaje de retenido en los tamices #50 y #100 de la molida 2 resulten superiores a los resultados parciales de los mismos tamices en la molida 1, por lo tanto se tiene un mayor impacto de los cuerpos molidores sobre las partículas de mayor tamaño.

Basado en los porcentajes de material que pasa se tiene que el tamiz #16 (1.18mm) cumple con una buena graduación dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C-33 [29], como consecuencia se tiene que el material presenta una mala graduación debido a la no uniformidad de las partículas.

En su efecto al ser el material muy pequeño (< 75 μ m) tiende a adherirse a los cuerpos molidores del molino horizontal o en su efecto a partículas de mayor tamaño, por lo que da como resultado la disminución del mismo material molido dentro de dos tiempos específicos.

Tabla 23: Datos y características de molida 3

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
		Tipo de muestra	Menores a 9.5mm y mayores a 4.75 mm		
Peso antes molida (g)	300.00	% pérdida tamizado	0.43%		
Peso después molida (g)	300.20	Fecha	22/01/2020		
Norma	INEN 872	% pérdida molino	-0.07%		
Tiempo molida (min)	40				
Tiempo tamizado (min)	30				
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
3/8"	9.5	0	0	0%	100%
N°4	4.75	91.40	91.40	30.45%	69.55%
N°8	2.36	4.40	95.80	31.91%	68.09%
N°16	1.18	1.60	97.40	32.45%	67.55%
N°30	0.59	5.20	102.60	34.18%	65.82%
N°50	0.297	33.90	136.50	45.47%	54.53%
N°100	0.149	66.70	203.20	67.69%	32.31%
N°200	0.075	61.00	264.20	88.01%	11.99%
Fuente	-	34.70	298.90	99.57%	-
Retenido fuente		11.56%			

Fuente: Diego Maldonado

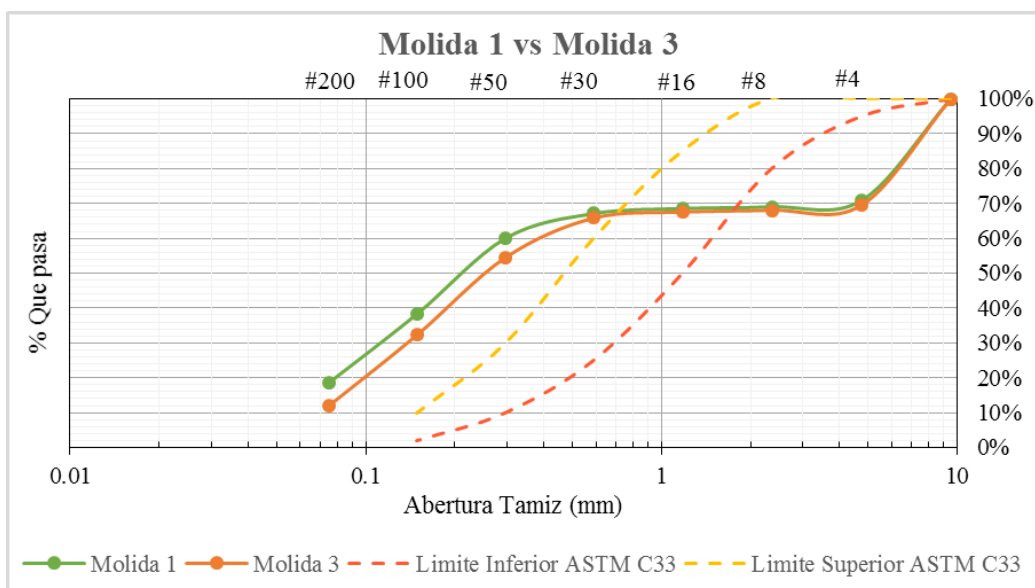


Gráfico 3: Curva granulométrica de molida 1 y 3

Fuente: Diego Maldonado

Observando los resultados del **Gráfico 3** que mantiene características similares de cantidad de 300gr, tamaño de partículas que van desde menores a 9.5mm y mayores a 4.75mm, tiempo de molienda de 60 minutos y tamizado de 30 minutos, se tiene que la molienda 1 y la molienda 3 presentan una variación de porcentaje de material que pasa el tamiz #200 (75 μ m) de 17.88% y 11.56% respectivamente.

Los resultados de la **Tabla 21** y **Tabla 23** hacen hincapié en los retenidos parciales en los tamices #100 y #200 se nota un aumento de material de la molienda 1 a diferencia de la molienda 2, lo que hace deducir que la molienda 1 logra tener un mayor rendimiento de trituración lo que hace que el material entre 150 μ m y 75 μ m se trituren hasta partículas más finas que logran cumplir con características específicas de tamizado.

Basado en los porcentajes de material que pasa se tiene que el tamiz #16 (1.18mm) cumple con una buena graduación dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C-33 [29], como consecuencia se tiene que el material presenta una mala graduación debido a la no uniformidad de las partículas.

Se debe tener en cuenta que debido a la realización de otras molidas se prevé que los cuerpos molidores estén cubiertos de material y no rindan de acuerdo a las especificaciones de la máquina.

Tabla 24: Datos y características de molida 4

4		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
		Tipo de muestra		Menores a 9.5mm y mayores a 4.75 mm de molida 3	
Peso antes molida (g)		298.90	% pérdida tamizado		2.24%
Peso después molida (g)		330.10	Fecha		22/01/2020
Norma		INEN 872	% pérdida molino		-10.44%
Tiempo molida (min)		40+20			
Tiempo tamizado (min)		30			
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
3/8"	9.5	0	0	0%	100%
N°4	4.75	76.60	76.60	23.21%	76.79%
N°8	2.36	4.00	80.60	24.42%	75.58%
N°16	1.18	1.30	81.90	24.81%	75.19%
N°30	0.59	9.70	91.60	27.75%	72.25%
N°50	0.297	33.80	125.40	37.99%	62.01%
N°100	0.149	77.30	202.70	61.41%	38.59%
N°200	0.075	81.90	284.60	86.22%	13.78%
fuelle	-	38.10	322.70	97.76%	-
Retenido fuente		11.54%			

Fuente: Diego Maldonado

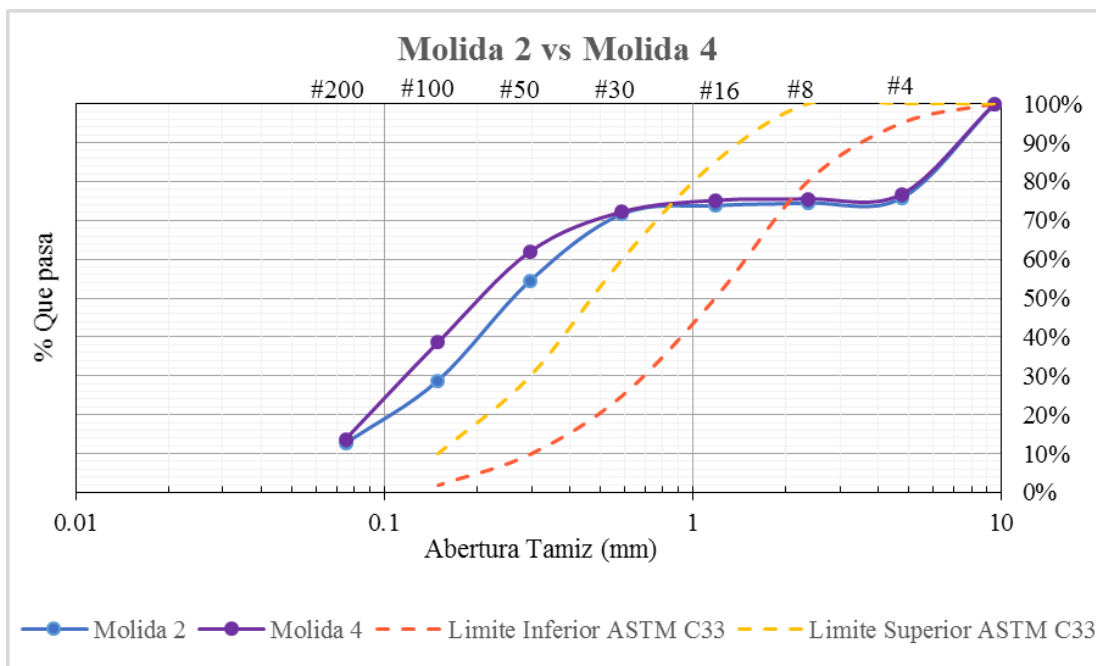


Gráfico 4: Curva granulométrica de molida 2 y 4

Fuente: Diego Maldonado

A través del **Gráfico 4** se mantiene características similares de cantidad de 300gr, tamaño de partículas que van desde menores a 9.5mm y mayores a 4.75mm, tiempo de molido de 60 minutos y tamizado de 30 minutos, se tiene que la molida 2 y la molida 4 muestran valores similares de porcentaje de material que pasa el tamiz #200 (75 μ m) entre 12.07% y 11.54% respectivamente.

Poniendo énfasis a las **Tabla 22** y **Tabla 24** se tiene que en los retenidos parciales en los tamices #50 y #100 se tiene un valor casi igual en de tamaño de partículas retenidas en el tamiz #4, pero se tiene un aumento considerable de material retenido en los tamices #50 y #100 de la molida 2 en relación a la molida 4, pero en función de los demás tamices se equilibra los retenidos parciales y hacen que el resultado de partículas menores a 75mm sean casi parecidos.

Basado en los porcentajes de material que pasa se tiene que el tamiz #16 (1.18mm) cumple con una buena graduación dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C-33 [29], como consecuencia se tiene que el material presenta una mala graduación debido a la no uniformidad de las partículas.

Por lo que nos quiere decir que durante ese tiempo de 60 minutos y bajo una misma cantidad de 300 gr y un tiempo de tamizado de 30 minutos el porcentaje de material que pasa el tamiz #200 (75 μ m) va a variar entre 11.54% y 12.07%, siendo valores favorables y aceptables a la hora de deducir la dureza de la zeolita verde.

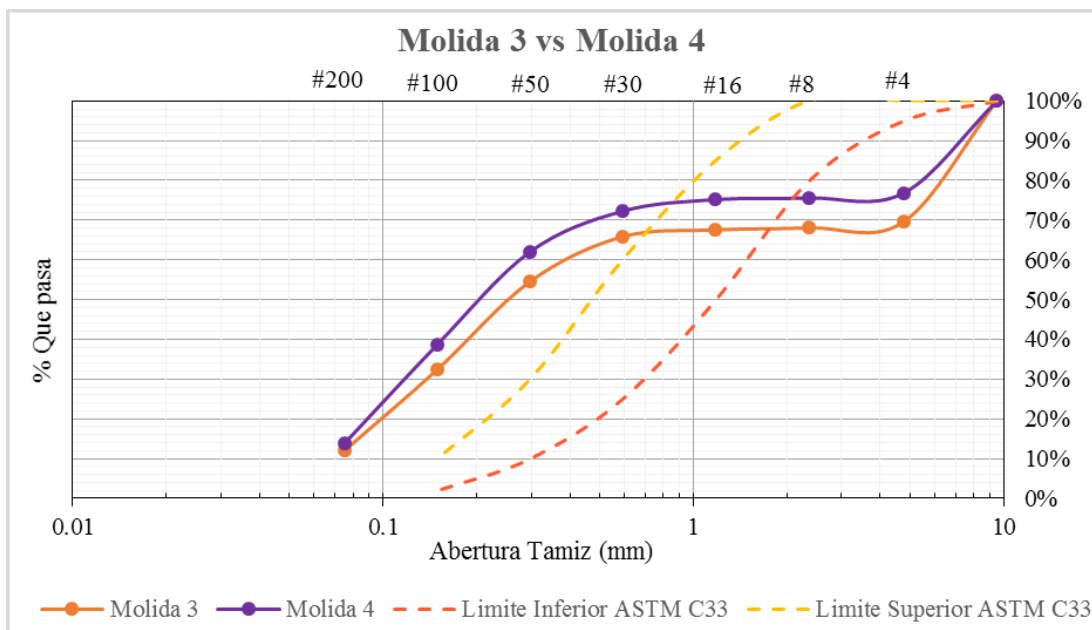


Gráfico 5: Curva granulométrica de molida 3 y 4
Fuente: Diego Maldonado

En el **Gráfico 5** se tiene en cuenta el mismo tamaño de partículas que van desde menores a 9.5mm y mayores a 4.75mm por un tiempo de la molida 3 de 40 minutos y de la molida 4 que se complementa con la molida 3 moliendo 20 minutos más hasta completar 60 minutos y por un proceso de tamizado de 30 minutos, se tiene que el material que pasa el tamiz #200 (75 μ m) de 11.56% y 11.54% respectivamente.



Divisando la **Tabla 23** y **Tabla 24** se tiene como resultado que el porcentaje de partículas de 4.75mm disminuyen en la molida 4 a diferencia de la molida 3, teniendo en cuenta que al triturar estas partículas hace que el porcentaje de retenido que se retiene en los tamices #100 y #200 de la molida 4 resulten superiores a los resultados parciales de los mismos tamices en la molida 3.

Basado en los porcentajes de material que pasa se tiene que el tamiz #16 (1.18mm) cumple con una buena graduación dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C-33 [29], como consecuencia se tiene que el material presenta una mala graduación debido a la no uniformidad de las partículas.

Pero independientemente de los retenidos parciales en cada tamiz se tiene que el porcentaje retenido cumple con valores semejantes, lo que hace concluir que el material de la molida 3 se conserva y puede que el material más fino se adhiere a las

partículas de mayor tamaño y que para la molida 4 el procedimiento del molino sea reducir partículas grandes evitando el contacto con el material fino.

Tabla 25: Datos y características de molida 5

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES 						
5	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
	Tipo de muestra		Menores a 4.75mm y mayores a 2 mm			
	Peso antes molida (g)		1000	% pérdida tamizado		1.41%
	Peso después molida (g)		980.50	Fecha		22/01/2020
	Norma		INEN 872	% pérdida molino		1.95%
	Tiempo molida (min)		60			
	Tiempo tamizado (min)		30			
	Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
	3/8"	9.5	0	0	0%	100%
	N°4	4.75	0.00	0.00	0.00%	100.00%
	N°8	2.36	14.00	14.00	1.43%	98.57%
	N°16	1.18	5.10	19.10	1.95%	98.05%
	N°30	0.59	11.70	30.80	3.14%	96.86%
N°50	0.297	127.90	158.70	16.19%	83.81%	
N°100	0.149	306.10	464.80	47.40%	52.60%	
N°200	0.075	430.70	895.50	91.33%	8.67%	
fuelle	-	71.20	966.70	98.59%	-	
Retenido fueulle		7.26%				

Fuente: Diego Maldonado

Tabla 26: Datos y características de molida 6

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO			
		Tipo de muestra		Menores a 4.75mm y mayores a 2 mm de molida 5	
Peso antes molida (g)		966.70	% pérdida tamizado		1.95%
Peso después molida (g)		953.90	Fecha		22/01/2020
Norma		INEN 872	% pérdida molino		1.32%
Tiempo molida (min)		60			
Tiempo tamizado (min)		30			
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
3/8"	9.5	0	0	0%	100%
N°4	4.75	0.00	0.00	0.00%	100.00%
N°8	2.36	3.00	3.00	0.31%	99.69%
N°16	1.18	3.70	6.70	0.70%	99.30%
N°30	0.59	20.70	27.40	2.87%	97.13%
N°50	0.297	155.30	182.70	19.15%	80.85%
N°100	0.149	319.80	502.50	52.68%	47.32%
N°200	0.075	318.00	820.50	86.02%	13.98%
fuelle	-	114.80	935.30	98.05%	-
Retenido fuente		12.03%			

Fuente: Diego Maldonado

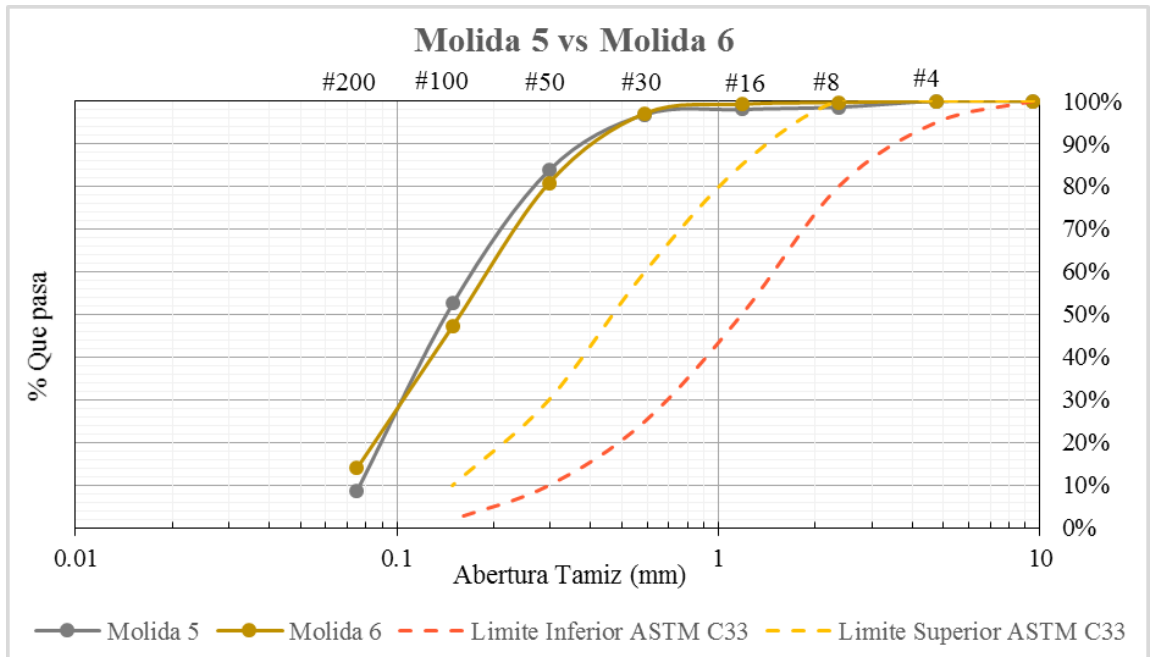


Gráfico 6: Curva granulométrica de molida 5 y 6

Fuente: Diego Maldonado


En el **Grafico 6** se toma en cuenta la misma cantidad de 1000g, el mismo tamaño de partículas que van desde menores a 4.75mm y mayores a 2mm por un tiempo de la molida 5 de 60 minutos y de la molida 6 que se complementa con la molida 5 moliendo 60 minutos más hasta completar 120 minutos y por un proceso de tamizado de 30 minutos, se tiene que el material que pasa el tamiz #200 (75µm) de 7.20% y 12.03% respectivamente.

Interpretando la **Tabla 25** y **Tabla 26** tenemos como resultado que en la molida 5 al tener partículas medianamente grandes durante el tiempo de molida se tritura hasta un 43% partículas retenidas en el tamiz #200 del material total; mientras que para la molida 6 se reduce el tamaño de partículas en la molida por lo que los cuerpos molidores trabajan eficientemente en la trituración de material más pequeño, teniendo como resultado un incremento significativo de material que pasa el tamiz #200 (75µm).

Basado en los porcentajes de material que pasa se tiene que el tamiz #4 (4.75mm) y tamiz #8 (2.36mm) cumple con una buena graduación dentro de los límites establecidos por la norma ASTM C-33 [29], como consecuencia se tiene que el material presenta una mala graduación debido a la no uniformidad de las partículas.

Se tiene que mientras se tenga material de partículas pequeñas menor al tamiz #50 (297µm) se va a triturar de una manera rápida y eficaz, obteniendo mejores resultados y por ende un mayor porcentaje de material que pasa el tamiz #200 (75µm).

Tabla 27: Datos y características de molida 7

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES 						
7	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
	Tipo de muestra		Tamaño de 600µm, 300µm, 150µm, 75µm			
	Peso antes molida (g)		1000.00	% pérdida tamizado		0.14%
	Peso después molida (g)		974.60	Fecha		22/01/2020
	Norma		INEN 872	% pérdida molino		2.54%
	Tiempo molida (min)		120			
	Tiempo tamizado (min)		30			
	Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
	N°200	0.075	650.30	650.30	66.72%	33.28%
	fuelle	-	322.90	973.20	99.86%	66.72%
Retenido fuente		33.13%				

Fuente: Diego Maldonado

La **Tabla 27** hace referencia a una misma cantidad de 1000g, el mismo tamaño de partículas que van de 600 μ m, 300 μ m, 150 μ m y 75 μ m por un tiempo de la molida 7 de 120 minutos y por un proceso de tamizado de 30 minutos, se tiene que el material que pasa el tamiz #200 (75 μ m) es de 33.13%. En efecto al ser material de partículas diversas de dimensiones pequeñas se observa que pasa el tamiz #200 (75 μ m) una gran cantidad de material fino, no obstante la mayoría de cantidad del material total queda retenido y no cumple con las características necesarias para los ensayos.

Se tiene que el material cuenta con una estructura interna bien confinada por lo que resulta que en partículas que sean pequeñas no se trituren de una manera fácil; por lo tanto, se justifica que la zeolita verde tiene una dureza alta que no permite que su material sea desprendido en partículas más pequeñas.

Tabla 28: Tamizado de partículas finas de molida 1

1		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
		Peso después molida (g)	341.70	% pérdida tamizado		1.00%
Tiempo tamizado (min)		30				
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa	
N°200	0.075	199.30	199.30	58.33%	41.67%	
fuelle	-	139.00	338.30	99.00%	58.33%	
		Retenido	40.68%			

Fuente: Diego Maldonado

Tabla 29: Tamizado de partículas finas de molida 2



2		ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO				
		Peso después molida (g)	330.50	% pérdida tamizado		0.42%
Tiempo tamizado (min)		30				
Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa	
N°200	0.075	190.60	190.60	57.67%	42.33%	
fuelle	-	138.50	329.10	99.58%	57.67%	
		Retenido	41.91%			

Fuente: Diego Maldonado

En la **Tabla 28** y **Tabla 29** se toma una misma cantidad de 300g, el mismo tamaño de partículas que van desde menores a 9.5mm hasta mayores a 4.75mm por un tiempo de la molida 1 de 20 minutos y de la molida 2 que se complementa con la molida 1 moliendo 20 minutos más hasta completar 60 minutos, por un proceso de tamizado de 30 minutos, donde el material que pasa el tamiz #200 (75µm) es de 40.68% y 41.91% respectivamente.



Como resultado se obtiene que después de la molida 2 se reduce el retenido de material en el tamiz #200 (75µm), que quiere decir que tiene un proceso mejorado de trituración y por ende el material con tamaños menores a 75µm va a ser mayor. El porcentaje de material que pasa el tamiz #200 (75µm) está sobre el 40% del material total, lo que hace justificar que la zeolita verde tiene una dureza alta que permite que sus partículas no se trituren fácilmente y por efecto no lograr alcanzar óptimas cantidades con características necesarias para realizar los ensayos.

Tabla 30: Tamizado de partículas finas de molida 5

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES 						
5	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
	Peso después molida (g)	980.50		% pérdida tamizado	1.12%	
	Tiempo tamizado (min)	30				
	Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
	Nº200	0.075	606.80	606.80	61.89%	38.11%
	fuelle	-	362.70	969.50	98.88%	61.89%
	Retenido	36.99%				

Fuente: Diego Maldonado

Tabla 31: Tamizado de partículas finas de molida 6

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE MATERIALES 						
6	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO					
	Peso después molida (g)	953.90		% pérdida tamizado	2.14%	
	Tiempo tamizado (min)	30				
	Tamiz	Abertura (mm)	Retenido parcial (g)	Retenido acumulado (g)	Retenido acumulado (%)	% que pasa
	Nº200	0.075	611.50	611.50	64.11%	35.89%
	fuelle	-	322.00	933.50	97.86%	64.11%
	Retenido	33.76%				

Fuente: Diego Maldonado

En la **Tabla 30** y **Tabla 31** se toma en cuenta la misma cantidad de 1000g, el mismo tamaño de partículas que van desde menores a 4.75mm hasta mayores a 2mm por un tiempo de la molida 5 de 60 minutos y de la molida 6 que se complementa con la molida 5 moliendo 60 minutos más hasta completar 120 minutos, por un proceso de tamizado de 30 minutos, se tiene que el material que pasa el tamiz #200 (75µm) es de 36.99% y 33.76% respectivamente.

Como resultado se obtiene que después de la molida 6 se aumenta el retenido de material en el tamiz #200 (75µm), que quiere decir que tiene un proceso no eficiente de trituración de material fino y por ende el material con tamaño menores a 75µm va a ser menor al esperado.

Teniendo en cuenta que se coloca diferente cantidad de material para la trituración en el molino, se observa que el comportamiento de la dureza del material es alto ya que el material que pasa el tamiz #200 (75µm) está aproximado al 40% del material total, que permite justificar que las partículas de zeolita verde presentan una alta resistencia al impacto y por efecto no se logra alcanzar óptimas cantidades con características necesarias para realizar los ensayos.

3.1.1.1 Resumen de Curvas Granulométricas de molidas de ZV

Mediante la **Tabla 32** se detalla un resumen de las diferentes curvas granulométricas obtenidas de las molidas de zeolita natural ZV de tamaños desde 9.5mm hasta 2mm, con tiempos variables de 20min, 40min, 60min y un posterior tamizado del material por 30min mediante la tamizadora automática de los Laboratorios de Suelos de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.

Tabla 32: Resumen y caracterización de Molidas de ZV

	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	TIEMPO
Molida 1	350 gr	Menores a 9.5mm y mayores a 4.75 mm	40 min
Molida 2	339.50 gr	Menores a 9.5mm y mayores a 4.75 mm de molida 1	20 min
Molida 3	300 gr	Menores a 9.5mm y mayores a 4.75 mm	40 min
Molida 4	298.90 gr	Menores a 9.5mm y mayores a 4.75 mm de molida 3	20 min
Molida 5	1000 gr	Menores a 4.75mm y mayores a 2 mm	60 min
Molida 6	966.70 gr	Menores a 4.75mm y mayores a 2 mm de molida 5	60 min

Fuente: Diego Maldonado

A través del **Gráfico 7** visualizamos las diferentes curvas granulométricas realizadas sobre diversas cantidades de zeolita natural ZV. Teniendo que la molida 1, 2, 3 y 4 representadas por tamaños menores a 9.5mm y mayores a 4.75 mm grafican una graduación no uniforme de las muestras, dándose a obtener una curva en forma invertida de “s” alargada que tiene lugar a que el material presenta una forma lineal entre el material que pasa el tamiz #4 (4.75mm) y el retenido en el tamiz #30 (500 μ m) debido al proceso mecánico del molino horizontal y el efecto de los cuerpos moledores con el material; además, mientras que en 10-20 % del material obtenido que pasa el tamiz #200 (<75 μ m) logra una tendencia hacia material fino muy superior con el limite estipulado en la norma ASTM C-33 [29].

Mientras que el material con partículas menores a 4.75mm y mayores a 2 mm tiene una afinidad a material muy fino, se logra obtener una curva en forma de “codo abierto” que permite establecer que se presenta una forma lineal entre el material que pasa el tamiz #4 (4.75mm) y el retenido en el tamiz #30 (500 μ m) debido al proceso mecánico del molino horizontal y el efecto de los cuerpos moledores con el material; tomando posterior una pendiente pronunciada hasta alcanzar en 10-20 % del material obtenido que pasa el tamiz #200 (<75 μ m), logrando una tendencia hacia material fino muy superior con el limite estipulado en la norma ASTM C-33 [29].

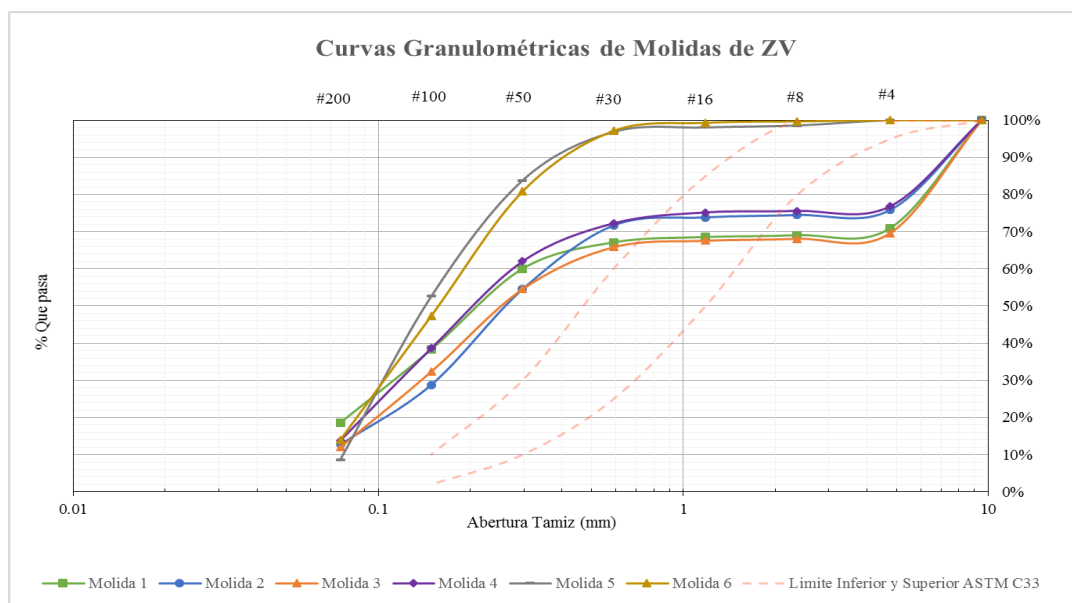


Gráfico 7: Curvas Granulométricas obtenidas de Molidas de ZV
Fuente: Diego Maldonado



3.1.2 Finura del cemento y zeolitas por método de Tamizado Seco

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, teniendo en cuenta las consideraciones e indicaciones que nos presenta la norma para este tipo de procedimientos [20]. Se realiza los ensayos de 4 repeticiones cada uno para un cemento hidráulico Holcim tipo GU y para tres diferentes zeolitas naturales tanto ZV, ZCr y ZX que fueron adquiridas con anterioridad y posterior su preparación así mismo para que cumplan ciertas características con las que se va a realizar los ensayos.

3.1.2.1 Finura del cemento GU (FGU)

Para la realización de las 4 repeticiones de este ensayo se toma en cuenta la conservación y pureza que se encuentra el material para evitar resultados desfavorables al momento de procesar información.

Tabla 33: Datos y resultados de finura de FGU

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENEIRÍA CIVIL LABORATORIO DE QUÍMICA						
	Temperatura (°C):	21	22	23	21	
	Humedad relativa (%)	55	65	60	63	
	Diámetro (um)	< 75				
	Condición del clima	Día nublado				
MÉTODO DE FINURA POR TAMIZADO SECO						
TIPO DE MUESTRA :			HOLCIM GU			
ENSAYADO:	DIEGO MALDONADO	FECHA	15/01/2020	15/01/2020	15/01/2020	15/01/2020
NORMA:	NTE INEN 489	HORA	11:00	12:00	13:00	14:00
DATOS	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	FGU₁	FGU₂	FGU₃	FGU₄
m	Peso del Material	g	50	50	50	50
#	Repeticiones 1min	NA	2	2	2	2
< 0,05	Peso en fuente por norma	g	0.05	0.02	0.05	0.02
Rs	Peso residuo del material	g	0.03	0.03	0.02	0.03
F	Finura	%	99.94	99.94	99.96	99.94
Fp	Finura Promedio	%	99.95			

Fuente: Diego Maldonado

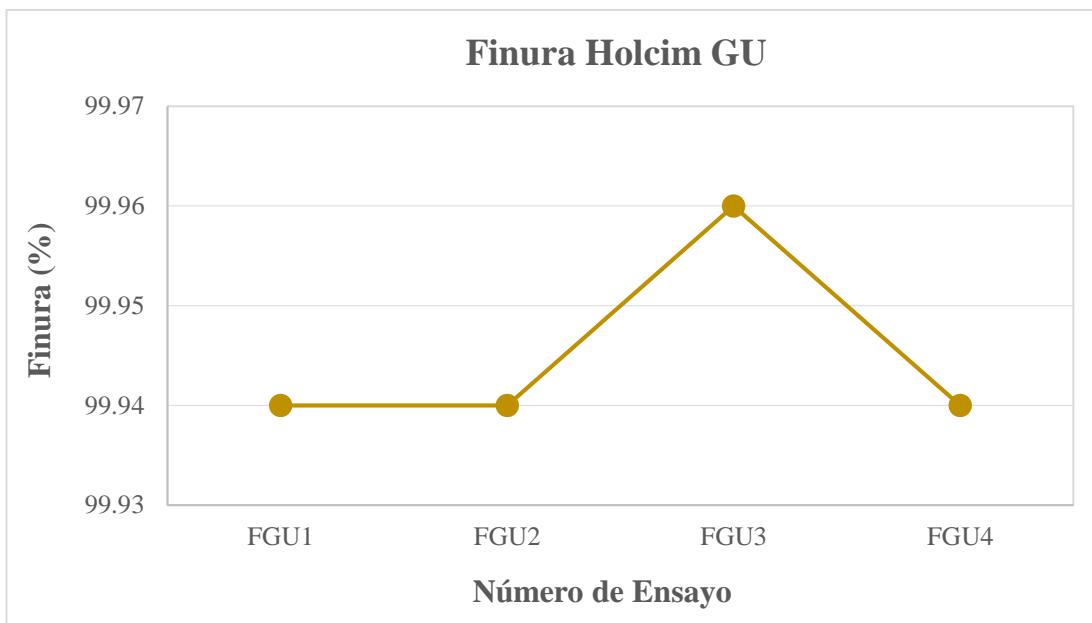


Gráfico 8: Resultados de finura de FGU
Fuente: Diego Maldonado



A través de la **Tabla 33** se determina la finura del cemento Holcim GU se realiza 4 ensayos tomando en cuenta las características iniciales del ensayo. Dando como resultado en el primer ensayo 99.94%, segundo de 99.96%, tercero de 99.96% y el cuarto con 99.94%, como consecuencia un promedio de finura FGU_p por el método de tamizado seco de 99.95%.

Mediante el **Grafico 8** se interpreta que el rango de material que retiene el tamiz #100 (150 μ m) es de 0.02g hasta 0.03g, lo que justifica que el material utilizado inicialmente para la realización del ensayo es homogéneo y posee en su mayoría partículas de material fino menores a 75 μ m.

Se debe tener en cuenta que los resultados de este ensayo son las características iniciales para comparar con los 3 tipos diferentes de zeolitas. Dependiendo del rango de finura en el que se encuentre el cemento deben de estar los demás materiales con un rango aproximado de 2% del resultado de finura de FGU.

3.1.2.2 Finura de Zeolita Verde (FZV)

Tabla 34: Datos y resultados de finura de FZV

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE QUÍMICA						
Temperatura (°C):		22	22	23	21	
Humedad relativa (%):		64	55	54	67	
Diámetro (µm)		< 75				
Condición del clima		Día parcialmente soleado				
MÉTODO DE FINURA POR TAMIZADO SECO						
TIPO DE MUESTRA :			ZV			
ENSAYADO:	DIEGO MALDONADO	FECHA	07/01/2020	08/01/2020	08/01/2020	08/01/2020
NORMA:	NTE INEN 489	HORA	16:00	10:30	12:00	15:00
DATOS	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	FZV ₁	FZV ₂	FZV ₃	FZV ₄
m	Peso del Material	g	50	50	50	50
#	Repeticiones 1min	NA	9	10	14	11
< 0,05	Peso en fuente por norma	g	0.02	0.03	0.04	0.05
Rs	Peso residuo del material	g	0.11	0.11	0.09	0.07
F	Finura	%	99.78	99.78	99.82	99.86
Fp	Finura Promedio	%	99.81			

Fuente: Diego Maldonado

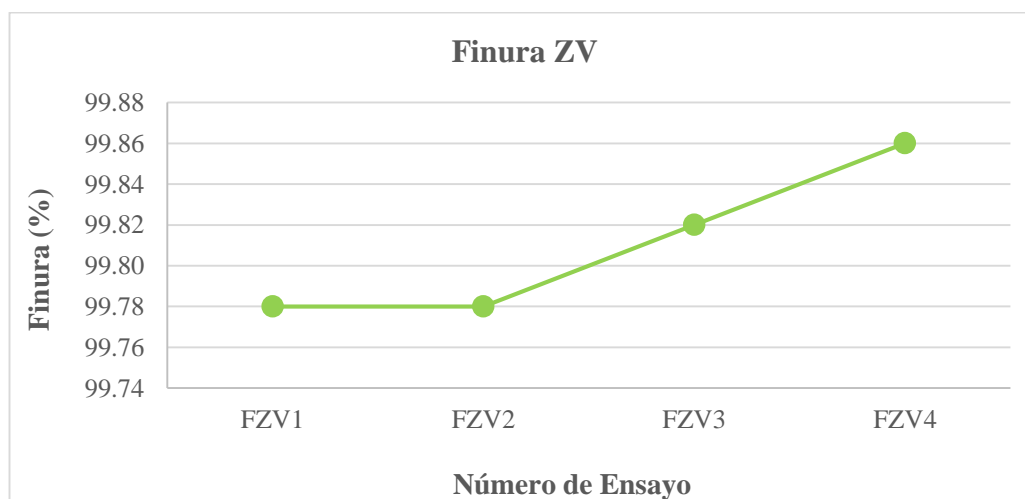


Gráfico 9: Resultados de ensayos de FZV

Fuente: Diego Maldonado



A través de la **Tabla 34** se determina la finura de ZV se realiza 4 ensayos tomando en cuenta las características iniciales del ensayo. Dando como resultado en el primer ensayo 99.78%, segundo de 99.78%, tercero de 99.82% y el cuarto con 99.86%, en efecto un promedio de finura FZV_p por el método de tamizado seco de 99.81%.

Por medio del **Gráfico 9** consideramos el rango de material que retiene el tamiz #100 (150µm) es de 0.07g hasta 0.11g, lo que significa que el material utilizado inicialmente para la realización del ensayo es homogéneo y posee en su mayoría partículas de material fino menores a 75µm.

Se debe tener en cuenta que los resultados de este ensayo son comparables con los del cemento y no debe variar los resultados de ambos en más de 2% para que sean aceptables y favorables para el desarrollo de la investigación. En efecto; el promedio de finura entre FGU y FZV presenta una variación en los resultados de 0.14%, lo que representa una aceptación de las características físicas para el estudio de ZV como sustituto parcial de GU.

3.1.2.3 Finura de Zeolita Mina Elena (FZX)

Tabla 35: Datos y resultados de finura de FZX

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE QUÍMICA 						
	Temperatura (°C):		22	23	21	23
	Humedad relativa (%):		65	66	65	57
	Diámetro (um)		< 75			
	Condición del clima		Día parcialmente soleado			
MÉTODO DE FINURA POR TAMIZADO SECO						
TIPO DE MUESTRA :			ZX			
ENSAYADO:	DIEGO MALDONADO	FECHA	09/01/2020	09/01/2020	10/01/2020	10/01/2020
NORMA:	NTE INEN 489	HORA	15:00	16:00	15:00	16:00
DATOS	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	FZX₁	FZX₂	FZX₃	FZX₄
m	Peso del Material	g	50	50	50	50
#	Repeticiones 1min	NA	7	10	6	6
< 0,05	Peso en fuente por norma	g	0.03	0.03	0.01	0.02
Rs	Peso residuo del material	g	0.01	0.01	0.02	0.03
F	Finura	%	99.98	99.98	99.96	99.94
Fp	Finura Promedio	%	99.97			

Fuente: Diego Maldonado

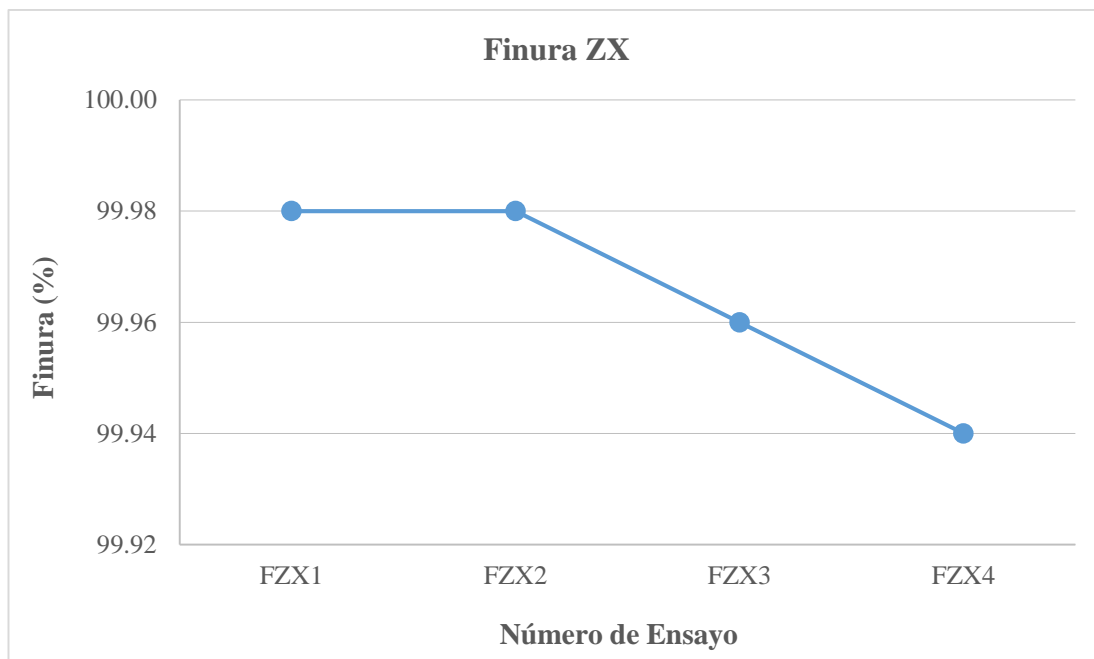


Gráfico 10: Resultados de finura de FZX
Fuente: Diego Maldonado



A través de la **Tabla 35** se determina la finura de ZX se realiza 4 ensayos tomando en cuenta las características iniciales del ensayo. Dando como resultado en el primer ensayo 99.98%, segundo de 99.98%, tercero de 99.96% y el cuarto con 99.94%, como resultado un promedio de finura FZX_p por el método de tamizado seco de 99.97%.

Interpretando el **Gráfico 10** tenemos que el rango de material que retiene el tamiz #100 (150 μ m) es de 0.01g hasta 0.03g, lo que significa que el material utilizado inicialmente para la realización del ensayo es homogéneo y posee totalmente material fino menores a 75 μ m.

Se debe tener en cuenta que los resultados de este ensayo son comparables con los del cemento y no debe variar los resultados de ambos en más de 2% para que sean aceptables y favorables para el desarrollo de la investigación. En efecto; el promedio de finura entre FGU y FZX presenta una variación en los resultados de 0.02%, lo que da como resultado que ZX presenta las mejores características físicas similares a las del cemento, lo que permite una aceptación de ZX como sustituto parcial de GU.

3.1.2.4 Finura de Zeolita Crilarsa (FZCr)

Tabla 36: Datos y resultados de finura de FZCr

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE QUÍMICA						
Temperatura (°C):		22	23	22	23	
Humedad relativa (%):		65	57	61	55	
Diámetro (um)		< 75				
Condición del clima		Día parcialmente soleado				
MÉTODO DE FINURA POR TAMIZADO SECO						
TIPO DE MUESTRA :		ZCr				
ENSAYADO:	DIEGO MALDONADO	FECHA	09/01/2020	09/01/2020	10/01/2020	10/01/2020
NORMA:	NTE INEN 489	HORA	15:00	16:00	15:00	16:00
DATOS	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	FZCr₁	FZCr₂	FZCr₃	FZCr₄
m	Peso del Material	g	50	50	50	50
#	Repeticiones 1min	NA	2	3	4	4
< 0,05	Peso en fuente por norma	g	0.05	0.05	0.04	0.05
Rs	Peso residuo del material	g	0.02	0.15	0.08	0.13
F	Finura	%	99.96	99.70	99.84	99.74
Fp	Finura Promedio	%	99.81			

Fuente: Diego Maldonado

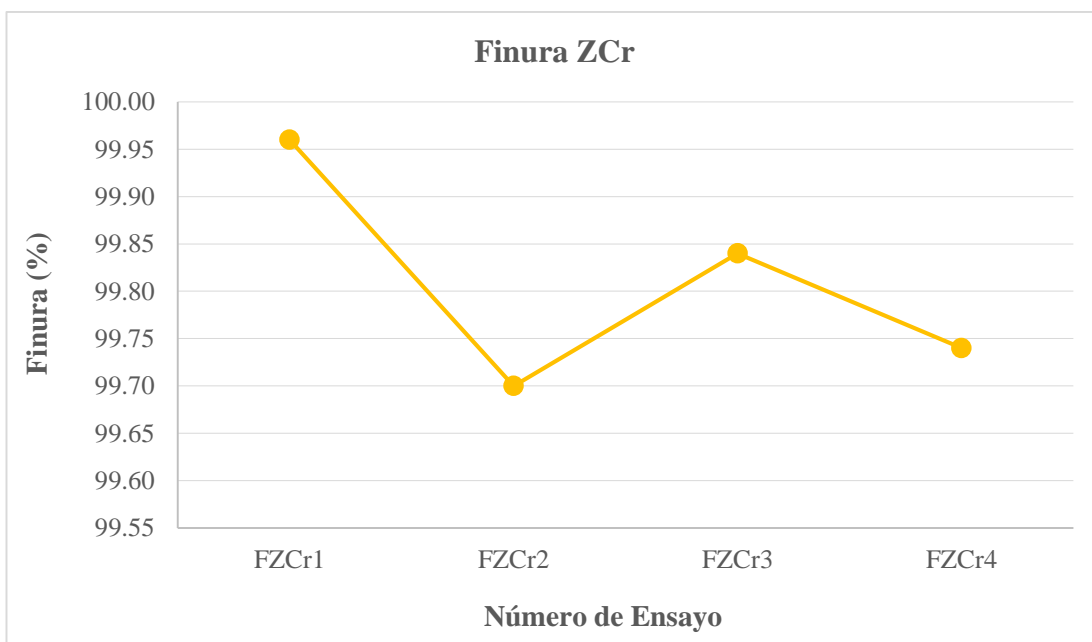


Gráfico 11: Resultados de finura de FZCr

Fuente: Diego Maldonado

A través de la **Tabla 36** se determina la finura de ZCr se realiza 4 ensayos tomando en cuenta las características iniciales del ensayo. Dando como resultado en el primer ensayo 99.96%, segundo de 99.70%, tercero de 99.84% y el cuarto con 99.74%, como consecuencia un promedio de finura FZCr_p por el método de tamizado seco de 99.81%.

Mediante el **Gráfico 11** representamos el rango de material que retiene el tamiz #100 (150 μ m) es de 0.02g hasta 0.15g, lo que significa que el material utilizado inicialmente para la realización del ensayo presenta una variación en el tamaño de sus partículas pero aun así muestra gran cantidad de material fino menor a 75 μ m.

Se debe tener en cuenta que los resultados de este ensayo son comparables con los del cemento y no debe variar los resultados de ambos en más de 2% para que sean aceptables y favorables para el desarrollo de la investigación. En efecto; el promedio de finura entre FGU y FZCr presenta una variación en los resultados de 0.14%, lo que representa una aceptación de las características físicas para el estudio de ZCr como sustituto parcial de GU.

3.1.2.5 Resumen de Finuras de Cemento y Zeolitas

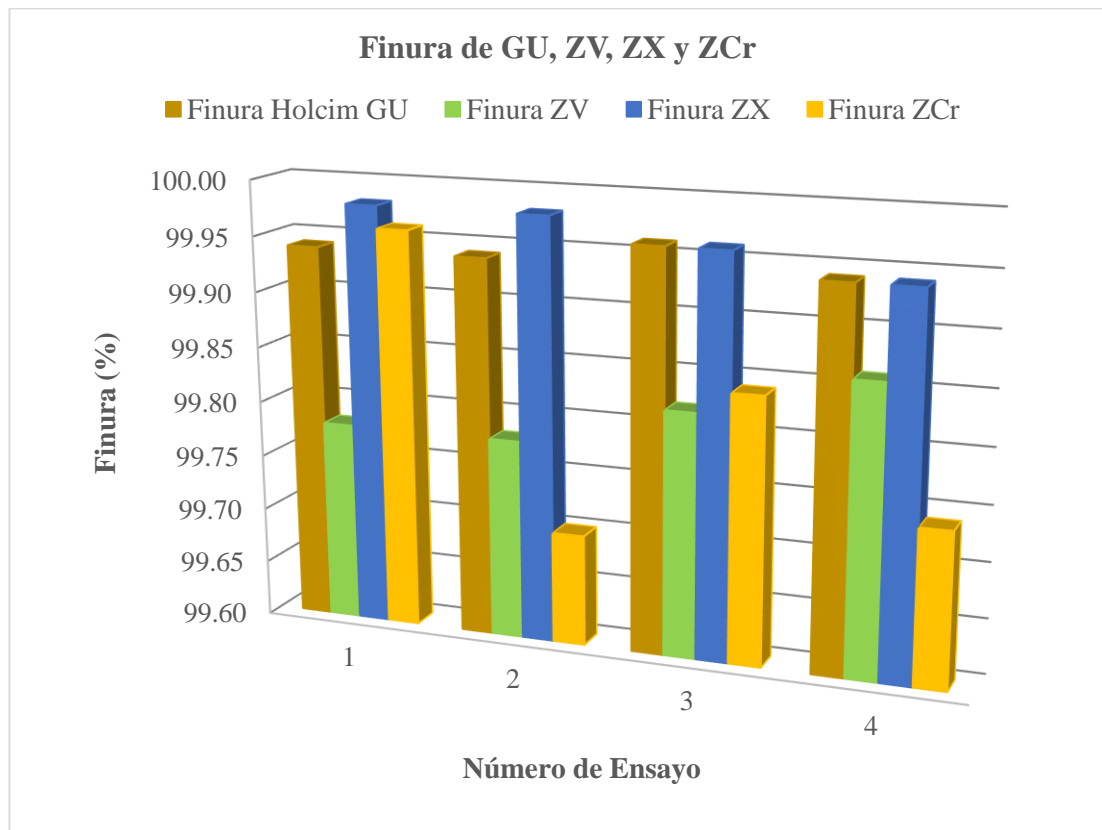


Gráfico 12: Resumen de resultados de finura de FGU, FZV, FZX y FZCr
Fuente: Diego Maldonado

Tabla 37: Resumen de datos y resultados de finura de FGU, FZV, FZX y FZCr

TABLA RESUMEN																		
Ensayado por:		DIEGO MALDONADO																
Temperatura (°C):		21	22	23	21	22	22	23	21	22	23	21	23	22	23	22	23	
Humedad relativa (%):		55	65	60	63	64	55	54	67	65	66	65	57	65	57	61	55	
Diámetro (um)		< 75				< 75				< 75				< 75				
		Día nublado				Día parcialmente soleado				Día parcialmente soleado				Día parcialmente soleado				
MÉTODO DE FINURA POR TAMIZADO SECO		HOLCIM GU				ZV				ZX				ZCr				
ENSAYADO:	Diego Maldonado	FECHA	15/01/2020	15/01/2020	15/01/2020	15/01/2020	07/01/2020	08/01/2020	08/01/2020	08/01/2020	09/01/2020	09/01/2020	10/01/2020	10/01/2020	09/01/2020	09/01/2020	10/01/2020	10/01/2020
NORMA:	NTE INEN 489	HORA	11:00	12:00	13:00	14:00	16:00	10:30	12:00	15:00	15:00	16:00	15:00	16:00	15:00	16:00	15:00	16:00
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	FGU ₁	FGU ₂	FGU ₃	FGU ₄	FZV ₁	FZV ₂	FZV ₃	FZV ₄	FZX ₁	FZX ₂	FZX ₃	FZX ₄	FZCr ₁	FZCr ₂	FZCr ₃	FZCr ₄
m	Peso de la Material	g	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50
#	Repeticiones lmin	NA	2	2	2	2	9	10	14	11	7	10	6	6	2	3	4	4
< 0,05	Peso en fuente por norma	g	0.05	0.02	0.05	0.02	0.02	0.03	0.04	0.05	0.03	0.03	0.01	0.02	0.05	0.05	0.04	0.05
Rs	Peso residuo del material	g	0.03	0.03	0.02	0.03	0.11	0.11	0.09	0.07	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.15	0.08	0.13
F	Finura	%	99.94	99.94	99.96	99.94	99.78	99.78	99.82	99.86	99.98	99.98	99.96	99.94	99.96	99.70	99.84	99.74
F _p	Finura Promedio	%	99.95				99.81				99.97				99.81			
OBSERVACIONES:						Se tomo para realizar el ensayo el material que pasa el tamiz #200 debido a que existia material de otro tamaño en el saco				Se tomo para realizar el ensayo el material que pasa el tamiz #200 debido a que existia material aglomerado y de tamaño mas grande				Se tomo para realizar el ensayo el material que pasa el tamiz #200 debido a que existia material aglomerado y de tamaño mas grande				

Fuente: Diego Maldonado

Análisis e interpretación

Mediante la **Tabla 37** se tiene como resultado que los promedio de finura F_p por el método de tamizado seco de FGU, FZV, FZX y FZCr son 99.95%, 99.81%, 99.97% y 99.81% respectivamente, acentuando que el margen de error de 2% de la comparación de resultados entre FGU y FZV, FZX, FZCr no supera dicho valor. Teniendo en cuenta que la composición física de los 4 tipos de materiales es de carácter homogéneo y presenta en su mayoría partículas de material fino menores a $75\mu\text{m}$, tiene como consecuencia una aceptación de las características físicas de ZV, ZX y ZCr como sustituto parcial de GU.



3.1.3 Densidad real por método del picnómetro de cemento y zeolitas

Los ensayos se realizaron en el laboratorio de Química de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, teniendo en cuenta las consideraciones e indicaciones que nos presenta la norma para este tipo de procedimientos [23]. Se realiza los ensayos de 3 repeticiones cada uno para un cemento hidráulico Holcim tipo GU y para tres diferentes zeolitas naturales tanto ZV, ZCr y ZX que fueron preparadas para que cumplan ciertas características con las que se va a realizar los ensayos.

Se debe tomar muy en cuenta que para la realización de este ensayo la temperatura juega un papel muy importante dentro de la presentación de los resultados finales, por lo que es necesario trabajar con una temperatura normalizada y constante (23°C) para que los resultados sean favorables.

3.1.3.1 Densidad de cemento GU (δ_{GU})

Tabla 38: Datos y resultados de densidad de δ_{GU}

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE QUÍMICA					
TIPO:	HOLCIM GU				
ENSAYADO:	DIEGO MALDONADO				
NORMA:	NTE INEN 156 / ASTM C 188-03				
	DÍA DE ENSAYO:	17/12/2019			
	HORA DE ENSAYO:	10.00	11.00	14.00	
MÉTODO DEL PICNÓMETRO					
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	δ_{GU_1}	δ_{GU_2}	δ_{GU_3}
M_1	Masa del picnómetro	gr	153.25	153.25	153.25
M_2	Masa del picnómetro + Muestra	gr	217.25	217.25	217.25
M_3	Masa del picnómetro + Muestra + Gasolina	gr	567.36	567.33	567.42
$M_4=M_3-M_2$	Masa Gasolina Añadida	gr	350.11	350.08	350.17
M_5	Masa del picnómetro + 500cm ³ Gasolina	gr	520.1	520.1	520.1
$M_6=M_5-M_1$	Masa 500cm ³ Gasolina	gr	366.85	366.85	366.85
$DG=M_6/500\text{cm}^3$	Densidad de la Gasolina	gr/cm ³	0.734	0.734	0.734
$M_7=M_6-M_4$	Masa de la Gasolina desalojada por la muestra	gr	16.74	16.77	16.68
$MC=M_2-M_1$	Masa de la Muestra	gr	64.00	64.00	64.00
T	Temperatura	°C	23	22	23
$VG=M_7/DG$	Volumen de Gasolina Desalojada	cm ³	22.82	22.86	22.73
$\delta_R=MC/VG$	Densidad Real de la Muestra	gr/cm ³	2.805	2.800	2.815
$\delta_{Rp=}$	Densidad Real Promedio de la Muestra	gr/cm ³	2.807		

Fuente: Diego Maldonado

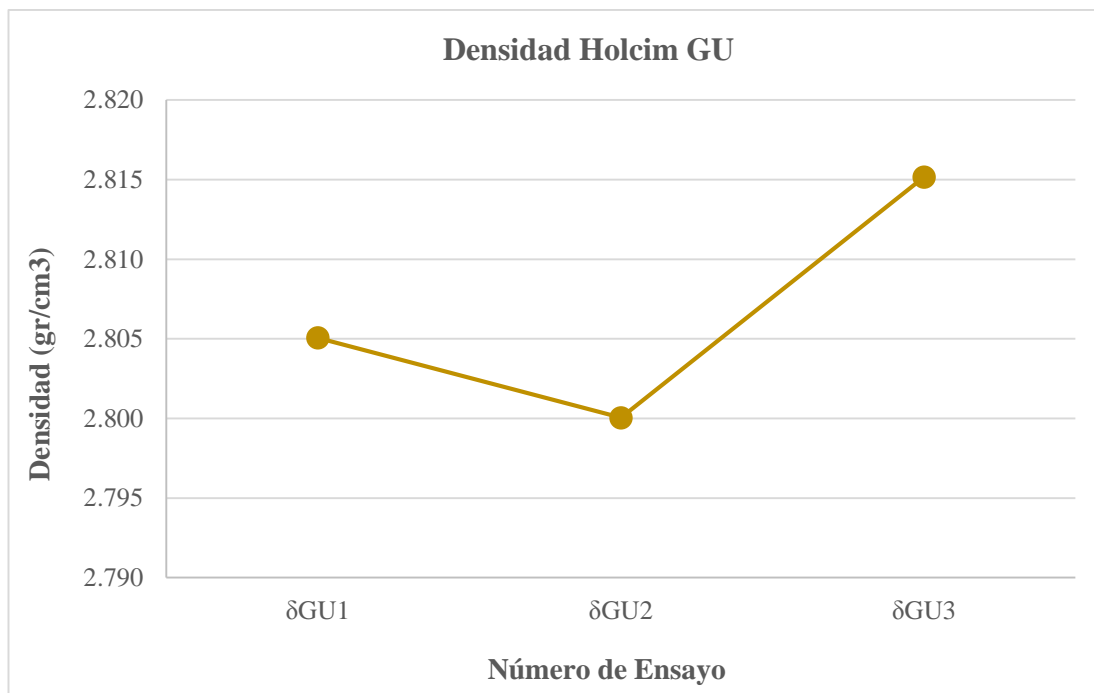


Gráfico 13: Resultados de densidad de δGU
Fuente: Diego Maldonado

A través de la **Tabla 38** se determina la densidad del cemento Holcim GU se realiza 3 ensayos tomando en cuenta las características iniciales del ensayo. Dando como resultado en el primer ensayo 2.805 gr/cm^3 , segundo de 2.800 gr/cm^3 y el tercero de 2.815 gr/cm^3 ; debido a que las normas ASTM C 188 [22] y NTE INEN 156 [23] nos estipula para que los resultados de densidad sean favorables no deben variar en más de 0.03 gr/cm^3 entre los valores obtenidos por cada ensayo, se tiene que los ensayos δGU_1 , δGU_2 y δGU_3 cumplen con esta característica teniendo como consecuencia un promedio de las densidades δRGU_p entre estos resultados es de 2.807 gr/cm^3 tal como se indica en el **Gráfico 13**.

Se debe tener en cuenta que los resultados de este ensayo son las características iniciales para comparar con los 3 tipos diferentes de zeolitas. Dependiendo del rango de densidad en el que se encuentre δGU se debe hacer un análisis de comparación con los 3 tipos diferentes de zeolitas.

3.1.3.2 Densidad de Zeolita Verde (δZV)

Tabla 39: Datos y resultados de densidad de δZV

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE QUÍMICA					
TIPO:	ZV				
ENSAYADO POR:	DIEGO MALDONADO				
NORMA:	NTE INEN 156 / ASTM C 188-03				
DÍA DE ENSAYO:		20/12/2019			
HORA DE ENSAYO:		12.30	15.15	16.15	
MÉTODO DEL PICNÓMETRO					
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	δZV_1	δZV_2	δZV_3
M_1	Masa del picnómetro	gr	151.82	151.82	151.82
M_2	Masa del picnómetro + Muestra	gr	215.82	215.82	215.82
M_3	Masa del picnómetro + Muestra + Gasolina	gr	568.53	568.58	568.76
$M_4=M_3-M_2$	Masa Gasolina Añadida	gr	352.71	352.76	352.94
M_5	Masa del picnómetro + 500cm ³ Gasolina	gr	523.00	523.08	523.34
$M_6=M_5-M_1$	Masa 500cm ³ Gasolina	gr	371.18	371.26	371.52
$DG=M_6/500\text{cm}^3$	Densidad de la Gasolina	gr/cm ³	0.742	0.743	0.743
$M_7=M_6-M_4$	Masa de la Gasolina desalojada por la muestra	gr	18.47	18.50	18.58
$MC=M_2-M_1$	Masa de la Muestra	gr	64.00	64.00	64.00
T	Temperatura	°C	23	23	23
$VG=M_7/DG$	Volumen de Gasolina Desalojada	cm ³	24.88	24.92	25.01
$\delta R=MC/VG$	Densidad Real de la Muestra	gr/cm ³	2.572	2.569	2.559
$\delta R_p=$	Densidad Real Promedio de la Muestra	gr/cm ³	2.567		

Fuente: Diego Maldonado

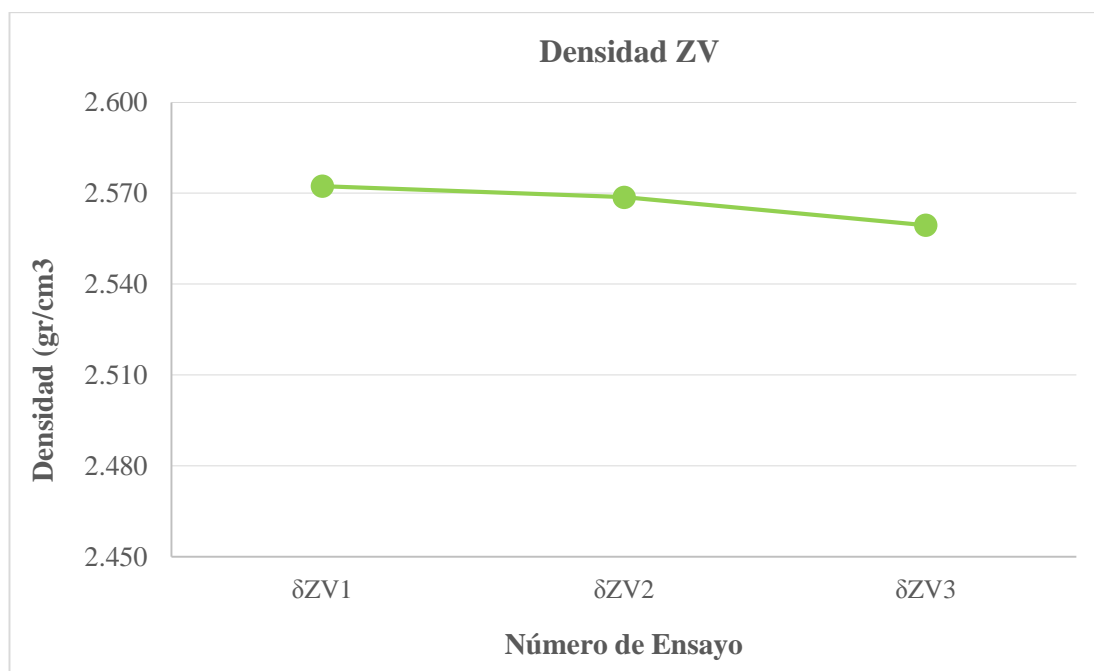


Gráfico 14: Resultados de densidad de δZV


Fuente: Diego Maldonado

A través de la **Tabla 39** se determina la densidad ZV se realiza 3 ensayos tomando en cuenta las características iniciales del ensayo. Dando como resultado en el primer ensayo 2.572 gr/cm^3 , segundo de 2.569 gr/cm^3 y el tercero de 2.559 gr/cm^3 ; entre los valores obtenidos por cada ensayo que no varían en más de 0.03 gr/cm^3 según las normas ASTM C 188 [22] y NTE INEN 156 [23], se tiene que los ensayos δZV_1 , δZV_2 y δZV_3 cumplen con esta característica teniendo como consecuencia un promedio de densidades δRZV_p entre estos resultados de 2.567 gr/cm^3 .

Se tiene en el **Gráfico 14** que la densidad promedio δRZV_p es menor a δRGU_p con una variación del resultado de 0.240 gr/cm^3 debido a que ZV tiene un menor porcentaje de finura en comparación con GU, lo que hace que el volumen de material desplazado por el líquido no reactivo no sea mayor. No obstante en comparación con los otros 2 tipos de zeolita, ZV presenta un mayor resultado de densidad en consecuencia que este material se presentó en roca, por ende se tiene un mayor grado de pureza y calidad del material al momento de realizar los ensayos presentados.

3.1.3.3 Densidad de Zeolita mina Elena (δZX)

Tabla 40: Datos y resultados de densidad de δZX

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE QUÍMICA					
TIPO:	ZX				
ENSAYADO POR:	DIEGO MALDONADO				
NORMA:	NTE INEN 156 / ASTM C 188-03				
DÍA DE ENSAYO:		18/12/2019	19/12/2019		
HORA DE ENSAYO:		11.15	11.00	14.15	
MÉTODO DEL PICNÓMETRO					
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	δZX_1	δZX_2	δZX_3
M_1	Masa del picnómetro	gr	151.80	151.80	151.81
M_2	Masa del picnómetro + Muestra	gr	215.8	215.8	215.81
M_3	Masa del picnómetro + Muestra + Gasolina	gr	565.08	565.26	565.77
$M_4=M_3-M_2$	Masa Gasolina Añadida	gr	349.28	349.46	349.96
M_5	Masa del picnómetro + 500cm^3 Gasolina	gr	522.24	522.5	522.82
$M_6=M_5-M_1$	Masa 500cm^3 Gasolina	gr	370.44	370.70	371.01
$DG=M_6/500\text{cm}^3$	Densidad de la Gasolina	gr/cm^3	0.741	0.741	0.742
$M_7=M_6-M_4$	Masa de la Gasolina desalojada por la muestra	gr	21.16	21.24	21.05
$MC=M_2-M_1$	Masa de la Muestra	gr	64.00	64.00	64.00
T	Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	23	23	23
$VG=M_7/DG$	Volumen de Gasolina Desalojada	cm^3	28.56	28.65	28.37
$\delta R=MC/VG$	Densidad Real de la Muestra	gr/cm^3	2.241	2.234	2.256
$\delta R_p=$	Densidad Real Promedio de la Muestra	gr/cm^3	2.244		

Fuente: Diego Maldonado

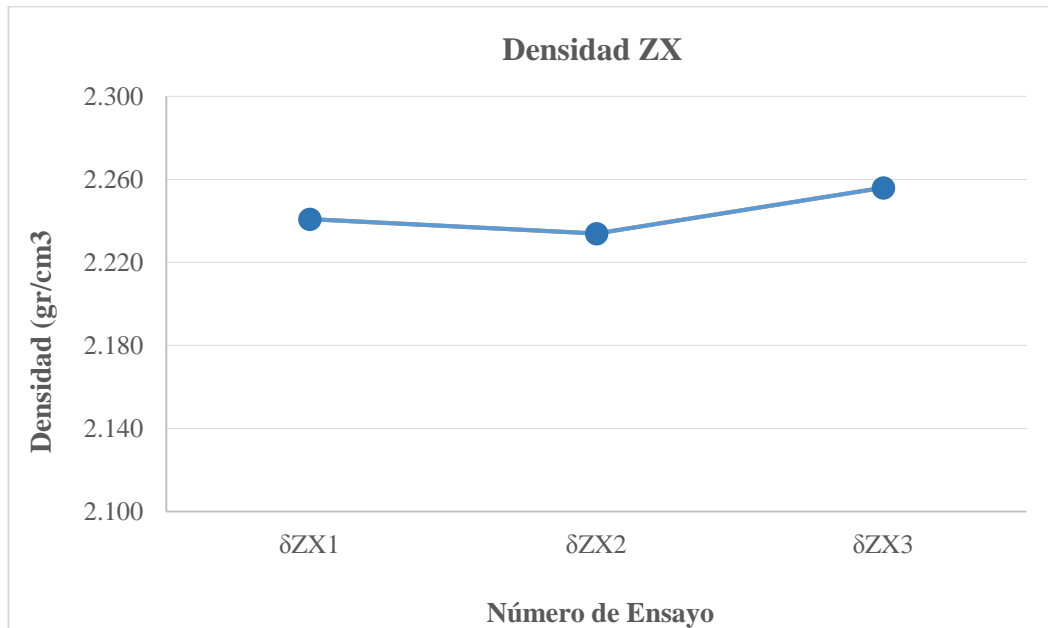


Gráfico 15: Resultados de densidad de δZX
Fuente: Diego Maldonado

A través de la **Tabla 40** se determina la densidad ZX se realiza 3 ensayos tomando en cuenta las características iniciales del ensayo. Dando como resultado en el primer ensayo de 2.241 gr/cm^3 , segundo de 2.234 gr/cm^3 y tercero de 2.256 gr/cm^3 ; entre los valores obtenidos por cada ensayo que no varían en más de 0.03 gr/cm^3 según las normas ASTM C 188 [22] y NTE INEN 156 [23], se tiene que los ensayos δZX_1 , δZX_2 y δZX_3 cumplen con esta característica teniendo como consecuencia un promedio de densidades δRZX_p entre estos resultados de 2.244 gr/cm^3 .

Se tiene en el **Gráfico 15** muestra que la densidad promedio δRZX_p es menor a δRGU_p con una variación del resultado de 0.563 gr/cm^3 debido a que ZX tiene un menor porcentaje de finura en comparación con GU, lo que hace que el volumen de material desplazado por el líquido no reactivo no sea mayor. No obstante en comparación con los otros 2 tipos de zeolita, ZX presenta un resultado medio de densidad teniendo en consideración importante que este material se presentó en sacos y se realiza un proceso de preparación de la muestra para que sea utilizada en los ensayos. Haciendo hincapié que el material estaba aglomerado en pequeñas bolas y contenían partículas de diferente tamaño superior a $75\mu\text{m}$, lo que impide que la muestra de material sea totalmente homogéneo.

3.1.3.3 Densidad de Zeolita Crilarsa (δZCr)

Tabla 41: Datos y resultados de densidad de δZCr

 UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL LABORATORIO DE QUÍMICA 						
TIPO:	ZCr					
ENSAYADO:	DIEGO MALDONADO					
NORMA:	NTE INEN 156 / ASTM C 188-03					
			06/01/2020			
			11.00 15.30 17.00			
MÉTODO DEL PICNÓMETRO						
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	δZCr_1	δZCr_2	δZCr_3	
M_1	Masa del picnómetro	gr	161.98	161.98	161.98	
M_2	Masa del picnómetro + Muestra	gr	225.98	225.98	225.98	
M_3	Masa del picnómetro + Muestra + Gasolina	gr	577.11	578.32	578.78	
$M_4=M_3-M_2$	Masa Gasolina Añadida	gr	351.13	352.34	352.80	
M_5	Masa del picnómetro + 500cm ³ Gasolina	gr	534.55	535.81	536.28	
$M_6=M_5-M_1$	Masa 500cm ³ Gasolina	gr	372.57	373.83	374.30	
$DG=M_6/500\text{cm}^3$	Densidad de la Gasolina	gr/cm ³	0.745	0.748	0.749	
$M_7=M_6-M_4$	Masa de la Gasolina desalojada por la muestra	gr	21.44	21.49	21.50	
$MC=M_2-M_1$	Masa de la Muestra	gr	64.00	64.00	64.00	
T	Temperatura	°C	22	23	23	
$VG=M_7/DG$	Volumen de Gasolina Desalojada	cm ³	28.77	28.74	28.72	
$\delta R=MC/VG$	Densidad Real de la Muestra	gr/cm ³	2.224	2.227	2.228	
$\delta R_p=$	Densidad Real Promedio de la Muestra	gr/cm ³	2.226			

Fuente: Diego Maldonado

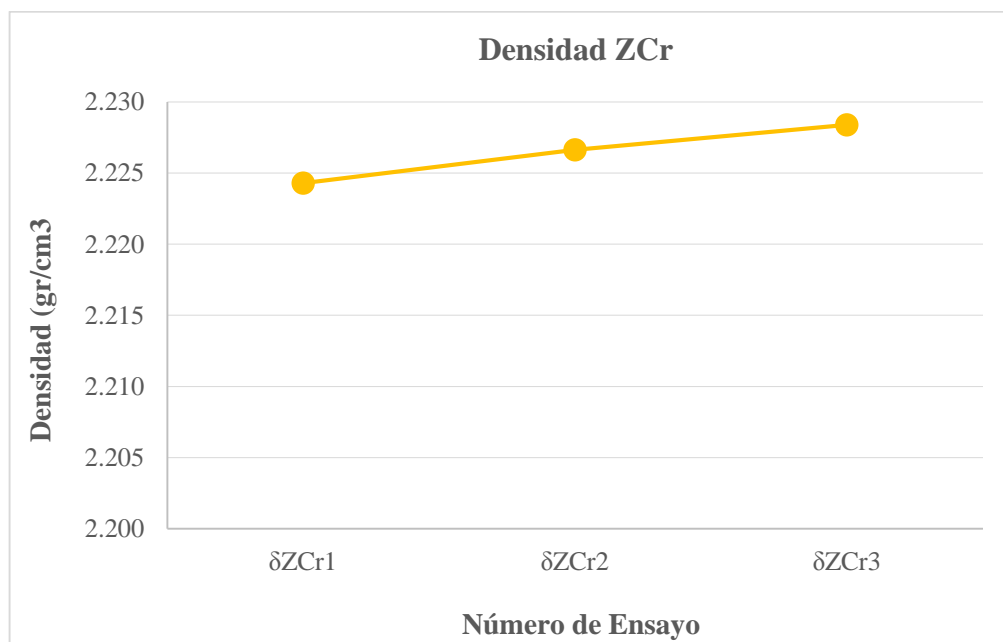


Gráfico 16: Resultados de densidad de δZCr

Fuente: Diego Maldonado

A través de la **Tabla 41** se determina la densidad ZCr se realiza 3 ensayos tomando en cuenta las características iniciales del ensayo. Dando como resultado en el primer ensayo de 2.224 gr/cm^3 , segundo de 2.227 gr/cm^3 y el tercero de 2.228 gr/cm^3 ; debido a que las normas ASTM C 188 [22] y NTE INEN 156 [23] nos estipula para que los resultados de densidad sean favorables no deben variar en más de 0.03 gr/cm^3 entre los valores obtenidos por cada ensayo, se tiene que los ensayos δZCr_1 , δZCr_2 y δZCr_3 cumplen con esta característica teniendo como consecuencia un promedio de densidades $\delta RZCr_p$ entre estos resultados de 2.226 gr/cm^3 .

Se tiene que en el **Gráfico 16** que la densidad promedio $\delta RZCr_p$ es menor a δRGU_p con una variación del resultado de 0.581 gr/cm^3 debido a que ZCr tiene un menor porcentaje de finura en comparación con GU, lo que hace que el volumen de material desplazado por el líquido no reactivo no sea mayor.

No obstante en comparación con los otros 2 tipos de zeolita, ZCr presenta el más bajo de densidad teniendo en consideración importante que este material se presentó en sacos y se realiza un proceso de preparación de la muestra para que sea utilizada en los ensayos. En efecto el material presenta una mezcla de partículas con tamaños superiores a $75 \mu\text{m}$ y con una combinación de diferentes tipos de colores de zeolita, lo que impide que la muestra de material sea totalmente homogéneo.

3.1.3.5 Resumen de Densidad de Cemento y Zeolitas

Tabla 42: Resumen de datos y resultados de densidad de δGU , δZV , δZX y δZCr

MÉTODO DEL PICNÓMETRO	TIPO	HOLCIM GU			ZV			ZX			ZCr			
ENSAYADO:	Diego Maldonado	FECHA	17/12/2019	17/12/2019	17/12/2019	20/12/2019	20/12/2019	20/12/2019	18/12/2019	19/12/2019	19/12/2019	06/01/2020	06/01/2020	06/01/2020
NORMA:	INEN 156 / ASTM C 188	HORA	10:00	11:00	11:00	12.30	14.00	16.15	11.15	11.00	14.15	11.00	15.30	17.00
DATOS	DESIGNACIÓN	UNIDAD	δGU_1	δGU_2	δGU_3	δZV_1	δZV_2	δZV_3	δZX_1	δZX_2	δZX_3	δZCr_1	δZCr_2	δZCr_3
MC	Masa de la muestra	g	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64	64
M ₃	+ Gasolina	g	567.36	567.33	567.42	568.53	568.58	568.78	565.08	565.26	565.77	577.11	578.32	578.78
M ₅	Masa del picnómetro + 500cm ³	g	520.10	520.10	520.10	523.00	523.08	523.34	522.24	522.5	522.82	534.55	535.81	536.28
T	Temperatura	°C	23	22	22	23	23	23	23	23	23	23	23	23
δR	Densidad Real	gr/cm ³	2.805	2.800	2.815	2.572	2.569	2.559	2.241	2.234	2.256	2.224	2.227	2.228
δR_p	Densidad Real Promedio	gr/cm ³	2.807			2.567			2.244			2.226		

Fuente: Diego Maldonado

Mediante el cuadro resumen de la **Tabla 42** se tiene como resultado que los promedios de densidad DR_p por el método del picnómetro de δGU , δZV , δZX y δZCr son 2.807 gr/cm³, 2.567 gr/cm³, 2.244 gr/cm³ y 2.226 gr/cm³ respectivamente. Teniendo en cuenta que la pureza, condición y tamaño de las partículas de cada material juega un papel importante dentro de los resultados obtenidos porque depende de la cantidad de material desplazado por el líquido durante el ensayo. A pesar que el cemento presenta características de composición química diferentes a las de las zeolitas, se tiene que los resultados obtenidos de densidad por las zeolitas se mantienen en un rango aceptable por lo que se toma como positivo para el estudio como un reemplazo parcial de este material en el cemento.

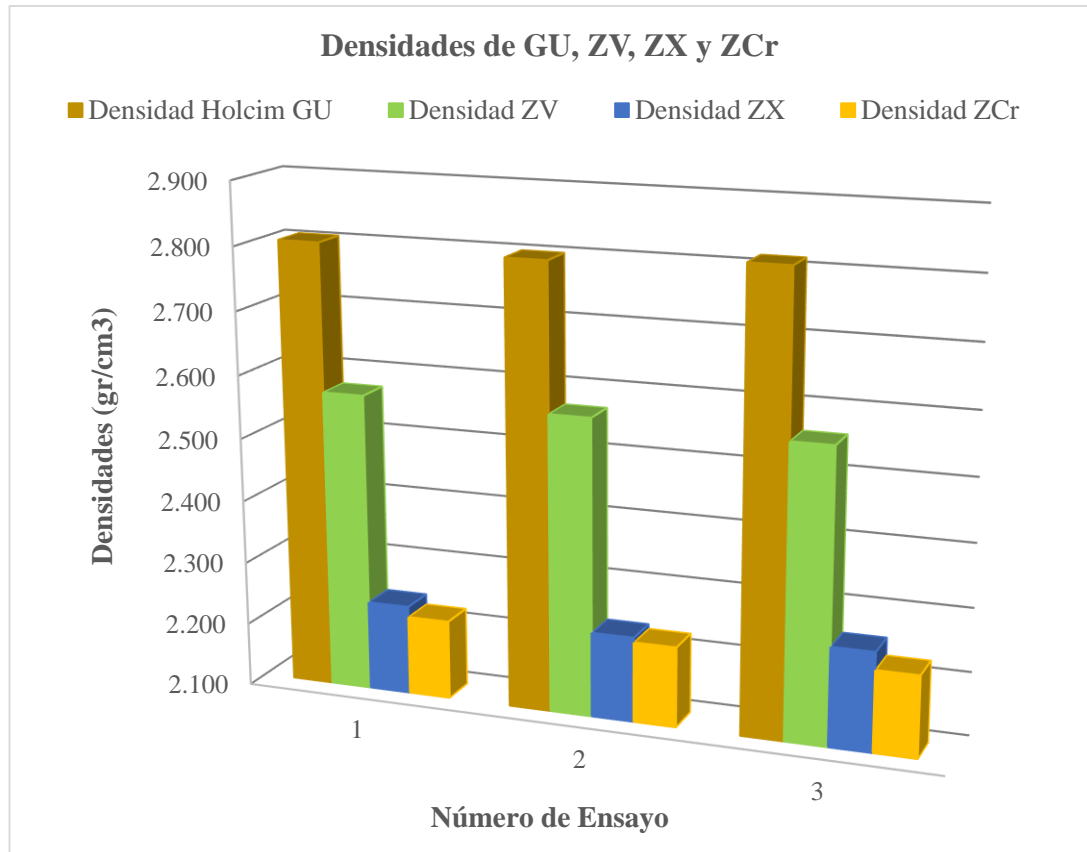
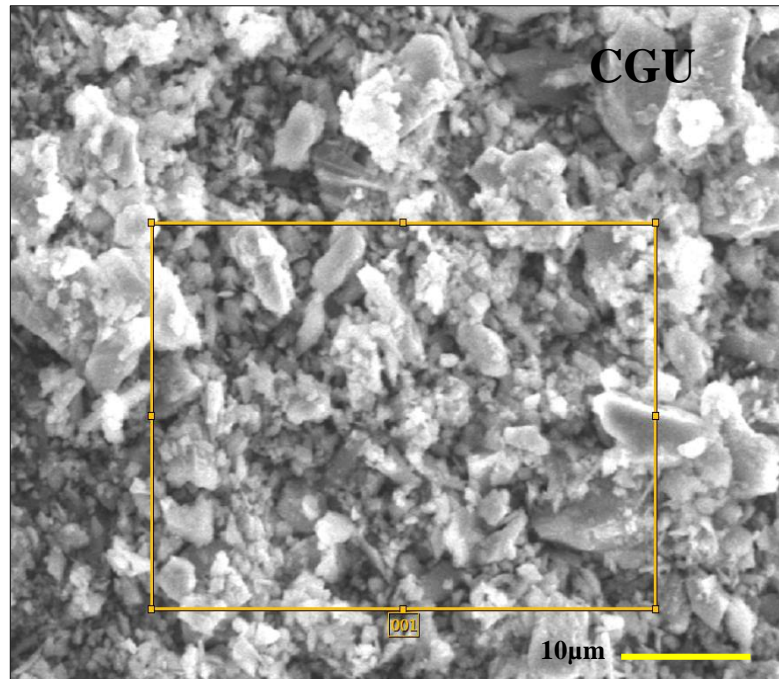


Gráfico 17: Resumen de resultados de ensayos de densidad de δGU , δZV , δZX y δZCr
Fuente: Diego Maldonado

3.1.4 Microscopía electrónica de barrido y Dispersión de rayos X de cemento y zeolitas

A través del equipo de microscopía electrónica de barrido (SEM) marca JEOL JSM-IT 100 se ha realizado caracterización morfológica y química obteniendo IMÁGENES SEM y ESPECTROS EDS. El microanálisis del cemento GU y las muestras de zeolita natural tipo ZV, ZX y ZCr por medio de la técnica de espectroscopia de rayos X de dispersión de energía (EDS) presente en el microscopio electrónico de barrido (SEM) obteniendo los elementos y los compuestos químicos presentes de manera cualitativa y cuantitativa. También la morfología presentada en las imágenes SEM de los materiales estudiados nos permite conocer mediante la caracterización superficial (forma, tamaño, etc.) de las microestructuras presentes en el material y por medio de la composición química podemos determinar el porcentaje de actividad puzolánica presente en los materiales a ensayar. La calidad de la muestra de zeolita está relacionado directamente con el tipo de elementos químicos compuestos, de esto depende el uso constructivo que se le puede dar al material.

3.1.4.1 Cemento GU

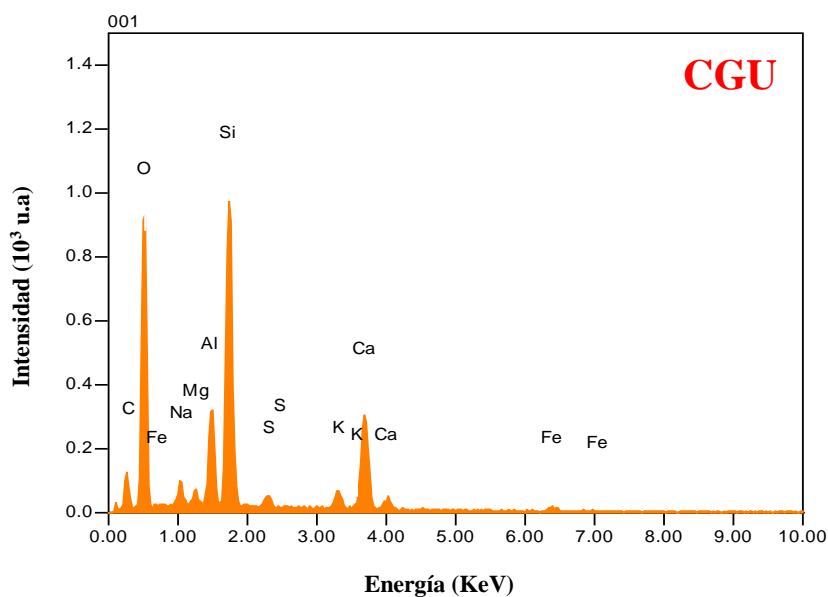


*Imagen 41: Imagen SEM de CGU realizada a 15 KeV con un aumento de 2000x
Fuente: JEOL EDS System, 2020*

Observando minuciosamente la **Imagen 41** del cemento GU que presenta diversas formas amorfas debido a que no existe simetría entre sus caras y posee zonas punzantes en los extremos que hacen que los lados tomen diferentes dimensiones. Además, en su interior presenta diversidad de tamaños que van desde unidades hasta algunas decenas de micras, teniendo así un material no homogéneo entre sus partículas.

Se realiza el análisis de composición química en una sección de dimensiones de 50µm y 35µm aproximadamente de la **Imagen 41**, tomando en cuenta que sea totalmente de la muestra de cemento con el fin de evitar interferencias en los resultados.

En la **Gráfico 18** podemos ver el espectro EDS donde presenta los picos de los elementos presentes en la muestra del cemento GU y las condiciones de adquisición del espectro.



Condiciones de Adquisición
 Instrumento: IT100LA
 Voltaje: 15.00 keV
 Tiempo de Proceso: T4
 Tiempo programado: 25.00 sec.
 Tiempo real: 25.80 sec.
 Tiempo muerto: 4.00 %
 Conteo: 1429.00 CPS

(a)

(b)

Gráfico 18: Análisis de composición química de CGU a) Espectro EDS de CGU b) Condiciones de adquisición del espectro EDS

Fuente: JEOL EDS System, 2020

En el **Gráfico 18a** se muestra los dos picos de alturas cercanas que representan al Silicio y Oxígeno; además, la presencia de Magnesio, Sodio, Calcio, Azufre, Potasio y Hierro. Corroboramos así que los elementos Ca, Si y O como imprescindibles y fundamentales en la formación del cemento[14].

Las condiciones de adquisición del espectro (**Gráfico 18b**) son con una energía de 15 KeV y con 4 ciclos de repetición, la duración de este ensayo es de 25.80 segundos por repetición para obtener una mejor representatividad y promedio de los elementos presentes en la muestra.

La **Tabla 43** detalla los porcentajes en masa y porcentaje atómico de los elementos del **Gráfico 18a**, así tenemos Carbono, Oxígeno, Sodio, Magnesio, Aluminio, Silicio, Azufre, Potasio, Calcio y Hierro, donde los elementos representativos del CGU son Si con un 11.98%, Al con 3.67% y Ca presentando un 6.50%.

Tabla 43: Datos cuantitativos de análisis elemental EDS del CGU

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE CGU		
Elemento Químico	% Masa	% Atómico
C	4.92	17.35
O	21.12	55.87
Na	0.86	1.58

Mg	0.38	0.66
Al	2.34	3.67
Si	7.95	11.98
S	0.40	0.52
K	1.02	1.11
Ca	6.16	6.50
Fe	1.00	0.76

Fuente: JEOL EDS System, 2020

Por medio de cálculos con factores de conversión se obtienen los óxidos presentes en el CGU, como se indica en la **Tabla 44**. La relación Si/Al de CGU se calcula de la relación de ambos elementos siendo estos los más representativos en el material, su valor es de **3.85** lo que hace que contenga un alto valor cementante debido al Silicio contenido [10].

Tabla 44: Óxidos resultantes de análisis de CGU

ÓXIDOS COMPONENTES DE CGU					
Elemento	% masa	Óxido	Factor Ox.	% masa	% atómico
Na	0.86	Na ₂ O	1.348	1.16	3.30
Mg	0.38	MgO	1.6583	0.63	1.79
Al	2.34	Al ₂ O ₃	1.8895	4.42	12.57
Si	7.95	SiO ₂	2.1393	17.01	48.35
K	1.02	K ₂ O	1.2046	1.23	3.49
Ca	6.16	CaO	1.3992	8.62	24.50
Fe	1.00	Fe ₂ O ₃	1.1113	1.11	3.16
S	0.40	SO ₂	2.4972	1.00	2.84
TOTAL	20.11			35.18	100.00

Fuente: Diego Maldonado

De acuerdo a estudio previo [31] realizado sobre este material con iguales características se tiene que tiene los 3 elementos representativos (**Tabla 45**) siendo en este caso el Óxido de Calcio (CaO) predominante con 48.40 % seguido del Óxido de Silicio (SiO₂) con 30.80% y un valor considerable de Óxido de Aluminio (Al₂O₃) de 7.98% que dan a notar que en nuestra muestra el % de CaO es la mitad del reportado pero la relación Si/Al es la misma 3.85.

Tabla 45: Comparación entre resultado existente y obtenido de óxidos de CGU

Presente investigación	Garófalo, 2015	Compuesto
48.35%	30.80%	Óxido de Silicio (SiO ₂)
12.57%	7.98%	Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)
24.50%	48.40%	Óxido de Calcio (CaO)

Fuente: Diego Maldonado

El bajo contenido de Óxido de Sodio (Na_2O) con 3.30% permite que el cemento no desarrolle reacciones químicas desfavorables [9] cuando entre en contacto con los áridos del hormigón, mientras que el pequeño porcentaje de Óxido de Magnesio (MgO) de 1.79% permite que no se desarrolle problemas de expansión del cemento al momento del fraguado disminuyendo la generación de grietas[10].

El Óxido de Azufre (SO_2) con 2.84% y Óxido de Hierro (Fe_2O_3) de 3.16% podría causar un posterior ataque por sulfatos al momento de la hidratación del cemento, puesto que puede sufrir un deterioro de la calidad de la pasta cementante[10].

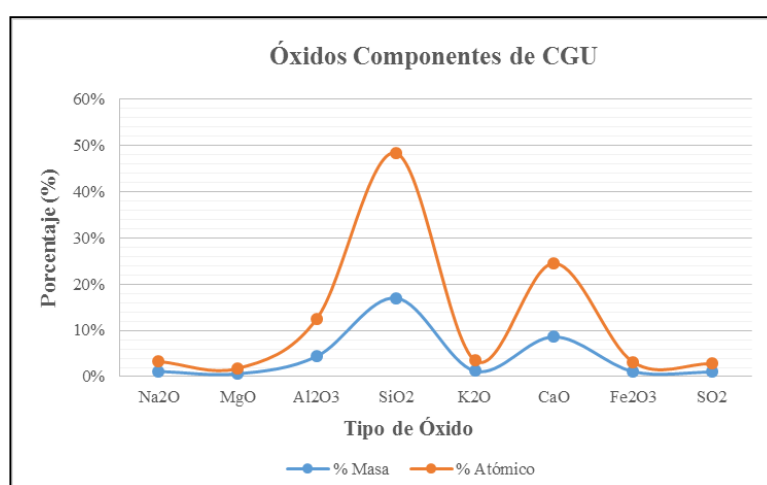
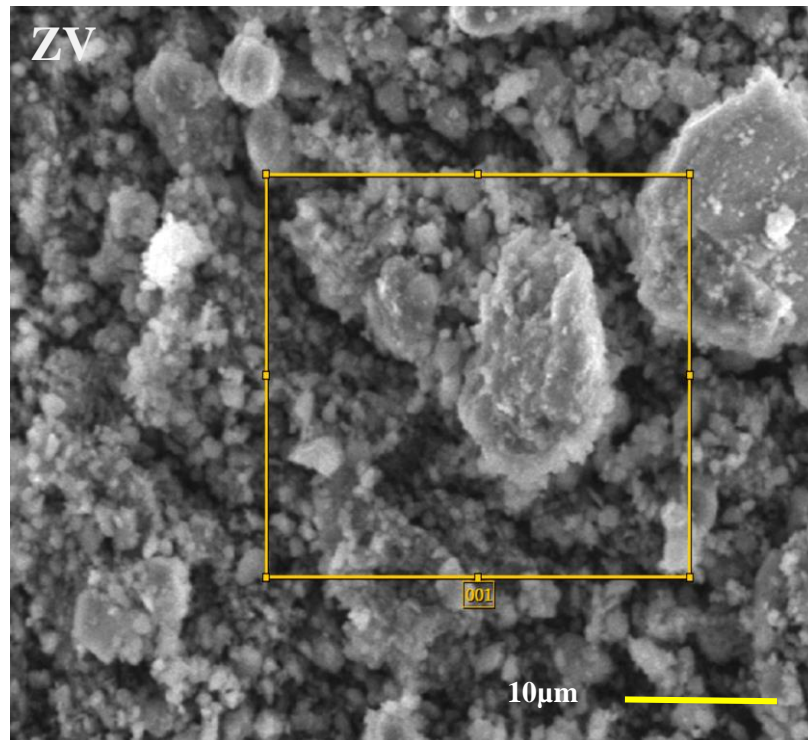


Gráfico 19: Curva de comportamiento de los porcentajes atómicos y másicos masa de los óxidos de CGU

Fuente: Diego Maldonado

El **Gráfico 19** se realiza con los % másicos y atómicos de la **Tabla 44** que evidencia un alto contenido de Óxido de Silicio (SiO_2) con 48.35% y un mediano contenido de Óxido de Calcio (CaO) con 24.50% de representación atómica en la muestra. Además, un porcentaje minoritario de Óxido de Aluminio (Al_2O_3) de 12.57 % y contenidos de óxidos menores a 5% presentes en este material. En consecuencia, la reacción química de estos óxidos con la humedad hace que se forme una pasta que posee propiedades aglomerantes [10].

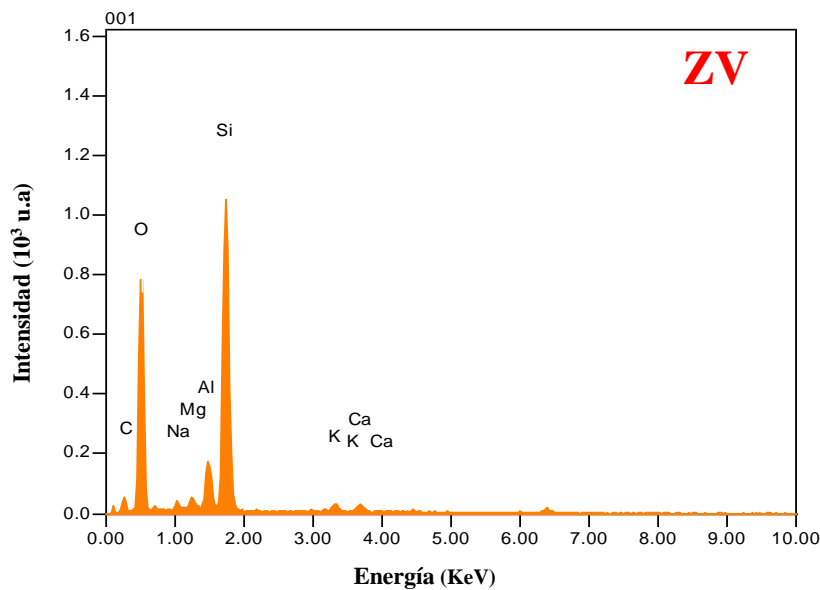
3.1.4.2 Zeolita Natural ZV



*Imagen 42: Imagen SEM de ZV realizada a 15 KeV con un aumento de 2000x
Fuente: JEOL EDS System, 2020*

La **Imagen 42** muestra estructuras esféricas muy pequeñas en la muestra ZV (1µm), también se pueden observar formas ovoidales y esféricas de entre 5 – 10 µm al parecer formadas por aglomeraciones de las estructuras más pequeñas, también se pueden ver 2 formas semi-esféricas de dimensiones mayores de 10µm, con superficies ondeantes irregulares, la más grande de aproximadamente 7µm x 15µm que es una estructura ovoidal. Algunas esferas medianas presentan superficies limpias y lisas.

Se realiza el análisis de composición química en una sección de dimensiones de 35µm x 25µm aproximadamente de la imagen SEM de ZV. En el **Gráfico 20** visualizamos el espectro EDS en la muestra de ZV analizada.



Condiciones de Adquisición

Instrumento: IT100LA
 Voltaje: 15.00 keV
 Tiempo de Proceso: T4
 Tiempo programado: 25.00 sec.
 Tiempo real: 25.64 sec.
 Tiempo muerto: 2.00 %
 Conteo: 1072.00 CPS

(a)

(b)

Gráfico 20: Análisis de composición química de ZV a) Espectro EDS de ZV b) Condiciones de adquisición del espectro EDS
 Fuente: JEOL EDS System, 2020

En el **Gráfico 20a** se observa dos picos altos próximos de alturas que representan al Silicio seguido del Oxígeno; además, la presencia de Aluminio, Magnesio, Sodio, Potasio y Calcio.

Las condiciones de adquisición del espectro (**Gráfico 20b**) son con una energía de 15 KeV y con 4 ciclos de repetición, la duración de este ensayo es de 25.64 segundos por repetición para obtener una mejor representatividad y promedio de los elementos presentes en la muestra.

La **Tabla 46** describe los porcentajes en masa y porcentaje atómico de los elementos del **Gráfico 20a**, así tenemos Carbono, Oxígeno, Sodio, Magnesio, Aluminio, Silicio, Potasio y Calcio, debido a que el material estudiado ZV es un aluminosilicato se tiene como elementos representativos al Si con un valor de 19.93% y Al con 2.95%.

Tabla 46: Datos cuantitativos de análisis elemental EDS del ZV

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ZV		
Elemento Químico	% Masa	% Atómico
C	2.85	16.15
O	13.54	57.63
Na	0.27	0.79

Mg	0.32	0.91
Al	1.17	2.95
Si	8.22	19.93
K	0.48	0.84
Ca	0.47	0.81

Fuente: JEOL EDS System, 2020

Por medio de cálculos con factores de conversión se obtienen los óxidos presentes en ZV, como se indica en la **Tabla 47**. La relación Si/Al de ZV se calcula de la relación de ambos elementos siendo estos los más representativos en el material; su valor es de **7.95** lo que representa una mayor presencia de Silicio en relación al Aluminio, lo que nos indica una gran velocidad de reacción química al ser hidratado y describe a una zeolita tipo Mordenita que va desde un rango de 4.00 – 7.00 y menor a 20[33].

Tabla 47: Óxidos resultantes de análisis de ZV

ÓXIDOS COMPONENTES DE ZV					
Elemento	% masa	Óxido	Factor Ox.	% masa	% atómico
Na	0.27	Na ₂ O	1.348	0.36	1.66
Mg	0.32	MgO	1.6583	0.53	2.42
Al	1.17	Al ₂ O ₃	1.8895	2.21	10.08
Si	8.22	SiO ₂	2.1393	17.59	80.20
K	0.48	K ₂ O	1.2046	0.58	2.64
Ca	0.47	CaO	1.3992	0.66	3.00
Fe	0	Fe ₂ O ₃	1.1113	0.00	0.00
S	0	SO ₂	2.4972	0.00	0.00
TOTAL	10.93			21.93	100.00

Fuente: Diego Maldonado

De acuerdo a estudio previo [34] realizado sobre este material con iguales características se tiene que tiene los 3 elementos representativos (**Tabla 48**) siendo el Óxido de Silicio (SiO₂) predominante con 64.39% seguido de Óxido de Aluminio (Al₂O₃) con 11.76% y además un valor considerable de Óxido de Calcio (CaO) 3.64% [34]. Teniendo una comparación clara entre ambos resultados tenemos valores de óxidos aceptables dentro de la investigación; pero la relación Si/Al varía entre ambas investigaciones entre 7.95 y 5.52, no obstante ambos resultados estarían en un rango para que sea considerada como una zeolita tipo Mordenita[33].

Tabla 48: Comparación entre resultado existente y obtenido de óxidos de ZV

Presente Investigación	Rosell, 2011	Compuesto
80.20%	64.39%	Óxido de Silicio (SiO ₂)

10.08%	11.67%	Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)
3.00%	3.64%	Óxido de Calcio (CaO)

Fuente: Diego Maldonado

El bajo contenido de Óxido de Sodio (Na₂O) con 1.66% permite que el cemento no desarrolle reacciones químicas desfavorables [9] cuando entre en contacto con los áridos del hormigón, mientras que el pequeño porcentaje de Óxido de Magnesio (MgO) de 2.42% permite que no se desarrolle problemas de expansión del cemento al momento del fraguado disminuyendo la generación de grietas[10].

Debido a que el material es una puzolana natural no tiene presencia de Óxido de Azufre (SO₂) y Óxido de Hierro (Fe₂O₃)[10].

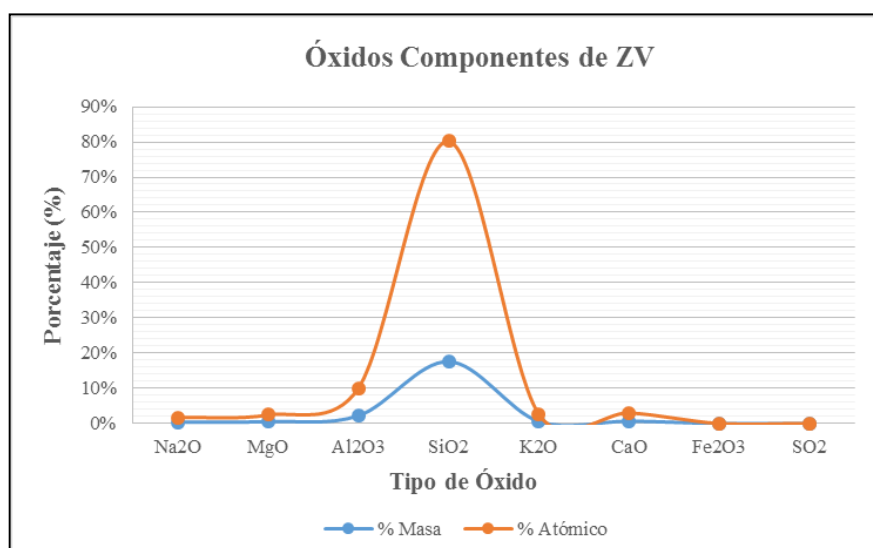


Gráfico 21: Curva de comportamiento de los porcentajes atómicos y másicos de los óxidos de ZV

Fuente: Diego Maldonado

El **Gráfico 21** se realiza con los % másicos y atómicos de la **Tabla 47** que evidencia una amplia relación entre el contenido de Óxido de Silicio (SiO₂) con 80.20% y un mediano contenido de Óxido de Aluminio (Al₂O₃) con 10.08 %, un porcentaje minoritario de Óxido de Calcio (CaO) con 3.00 % y contenidos de óxidos menores a 5% presentes en este material. Por consiguiente se puede deducir que este material posee una alta actividad puzolánica debido a su representativo contenido y a la reacción de los óxidos ácidos presentes, SiO₂ y Al₂O₃.

3.1.4.3 Zeolita Natural ZX

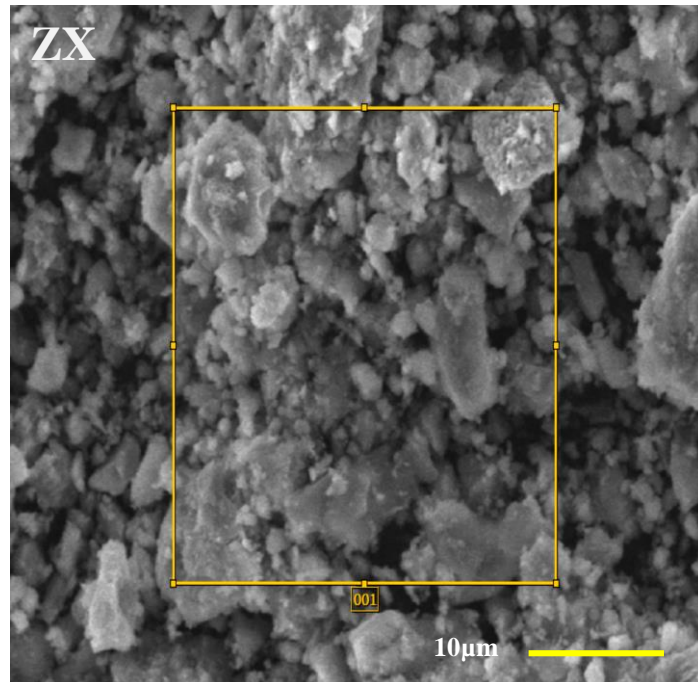
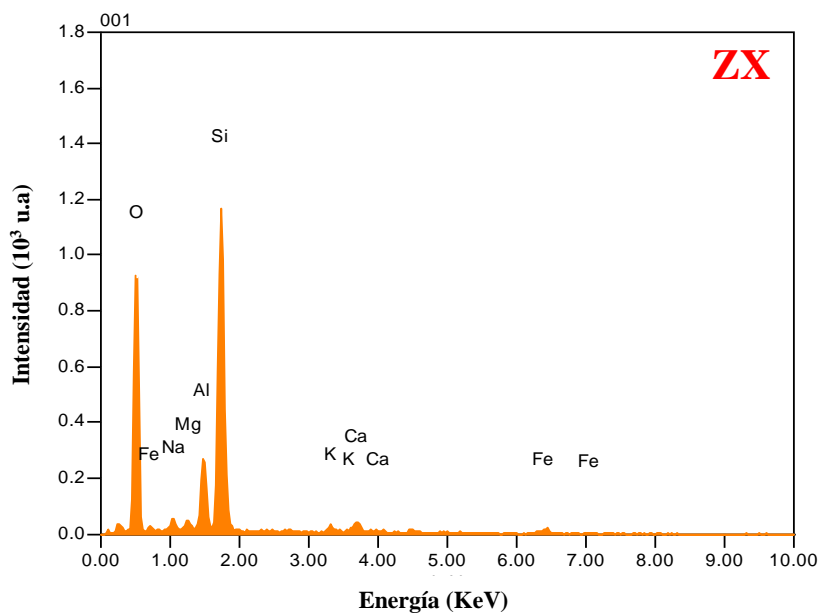


Imagen 43: Imagen SEM de ZX realizada a 15 KeV con un aumento de 2000x
Fuente: JEOL EDS System, 2020

La **Imagen 43** muestra estructuras esféricas pequeñas muy pequeñas en la muestra ZX (1 μ m), también se pueden observar formas cúbicas irregulares y esféricas de tamaños entre 3 – 6 μ m al parecer formadas por aglomeraciones de las estructuras más pequeñas, también se pueden ver 4 formas cúbicas de dimensiones entre 5 – 10 μ m, una estructura rectangular irregular de 10 μ m de dimensión aproximadamente y diversas formas esféricas de tamaños menores a 5 μ m. Poseen superficies ondeantes irregulares y algunas esferas medianas presentan superficies limpias y lisas.

Se realiza el análisis de composición química en una sección de dimensiones de 30 μ m y 35 μ m aproximadamente de la imagen SEM de ZX. En el **Gráfico 22** visualizamos el espectro EDS de los elementos presentes en la muestra de ZX analizada.



(a)

Condiciones de Adquisición

Instrumento: IT100LA

Voltaje: 15.00 keV

Tiempo de Proceso: T4

Tiempo programado: 25.00 sec.

Tiempo real: 25.74 sec.

Tiempo muerto: 3.00 %

Conteo: 1232.00 CPS

(b)

Gráfico 22: Análisis de composición química de ZX a) Espectro EDS de ZX b) Condiciones de adquisición del espectro EDS

Fuente: JEOL EDS System, 2020

El **Gráfico 22a** nos muestra dos picos altos cercanos que representan al Silicio y Oxígeno; además de la presencia de Aluminio, Magnesio, Potasio, Hierro y Sodio que componen la estructura química del material.

Las condiciones de adquisición del espectro (**Gráfico 22b**) se dan con una energía de 15 KeV y con 4 ciclos de repetición, la duración de este ensayo es de 25.74 segundos por repetición para obtener una mejor representatividad y promedio de los elementos presentes en la muestra.

La **Tabla 49** describe los porcentajes en masa y porcentaje atómico de los elementos del **Gráfico 22a**, así tenemos Oxígeno, Sodio, Magnesio, Aluminio, Silicio, Potasio, Calcio y Hierro, debido a que el material estudiado ZV es un aluminosilicato se tiene como elementos representativos al Si con un valor de 24.55% y Al con 5.35%.

Tabla 49: Datos cuantitativos de análisis elemental mediante EDS de ZX

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ZX		
Elemento Químico	% Masa	% Atómico
O	13.75	64.43
Na	0.40	1.29
Mg	0.26	0.81

Al	1.93	5.35
Si	9.19	24.55
K	0.37	0.70
Ca	0.74	1.39
Fe	1.10	1.48

Fuente: JEOL EDS System, 2020

Por medio de cálculos con factores de conversión se obtienen los óxidos presentes en ZX, como se indica en la **Tabla 50**. La relación Si/Al de ZX se calcula de la relación de ambos elementos siendo estos los más representativos en el material; su valor es de **4.58** lo que nos indica una mayor presencia de Silicio en la muestra en relación al Aluminio, lo que justifica que representa a una zeolita tipo Mordenita que va desde un rango de 4.00 – 7.00 o un tipo Heulandita que va desde 2.50 – 5.00 [33].

Tabla 50: Óxidos resultantes de análisis EDS de ZX

ÓXIDOS COMPONENTES DE ZX					
Elemento	% masa	Óxido	Factor Ox.	% masa	% atómico
Na	0.40	Na₂O	1.348	0.54	2.00
Mg	0.26	MgO	1.6583	0.43	1.60
Al	1.93	Al₂O₃	1.8895	3.65	13.52
Si	9.19	SiO₂	2.1393	19.66	72.87
K	0.37	K₂O	1.2046	0.45	1.65
Ca	0.74	CaO	1.3992	1.04	3.84
Fe	1.10	Fe₂O₃	1.1113	1.22	4.53
S	0.00	SO₂	2.4972	0.00	0.00
TOTAL	13.99			26.98	100.00

Fuente: Diego Maldonado

De acuerdo a estudio previo [34] realizado sobre este material con iguales características se tiene que tiene los 3 elementos representativos (**Tabla 51**) siendo el del Óxido de Silicio (SiO₂) predominante con 64.39% seguido de Óxido de Aluminio (Al₂O₃) con 11.76% y además un valor considerable de Óxido de Calcio (CaO) 3.64% [34]. Teniendo una comparación clara entre ambos resultados tenemos valores de óxidos aceptables dentro de la investigación; pero la relación Si/Al varía entre ambas investigaciones entre 4.58 y 5.52, no obstante ambos resultados estarían en un rango para que sea considerada como una zeolita tipo Mordenita o tipo Heulandita[33].

Tabla 51: Comparación entre resultado existente y obtenido de óxidos de ZX

Presente Investigación	Rosell, 2011	Compuesto
72.87%	64.39%	Óxido de Silicio (SiO ₂)
13.52%	11.67%	Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)
3.84%	3.64%	Óxido de Calcio (CaO)

Fuente: Diego Maldonado

El bajo contenido de Óxido de Sodio (Na₂O) con 2% permite que el cemento no desarrolle reacciones químicas [9] cuando entre en contacto con los áridos del hormigón, mientras que el pequeño porcentaje de Óxido de Magnesio (MgO) de 1.60% permite que no se desarrolle problemas de expansión del cemento al momento del fraguado disminuyendo la generación de grietas[10].

Se tiene presencia de Óxido de Hierro (Fe₂O₃) de 4.53% que nos alerta sobre un posterior ataque por sulfatos al momento de la hidratación del cemento, puesto que puede sufrir un deterioro de la calidad de la pasta cementante[10].

Debido a que el material es una puzolana natural no tiene presencia de Óxido de Azufre (SO₂).

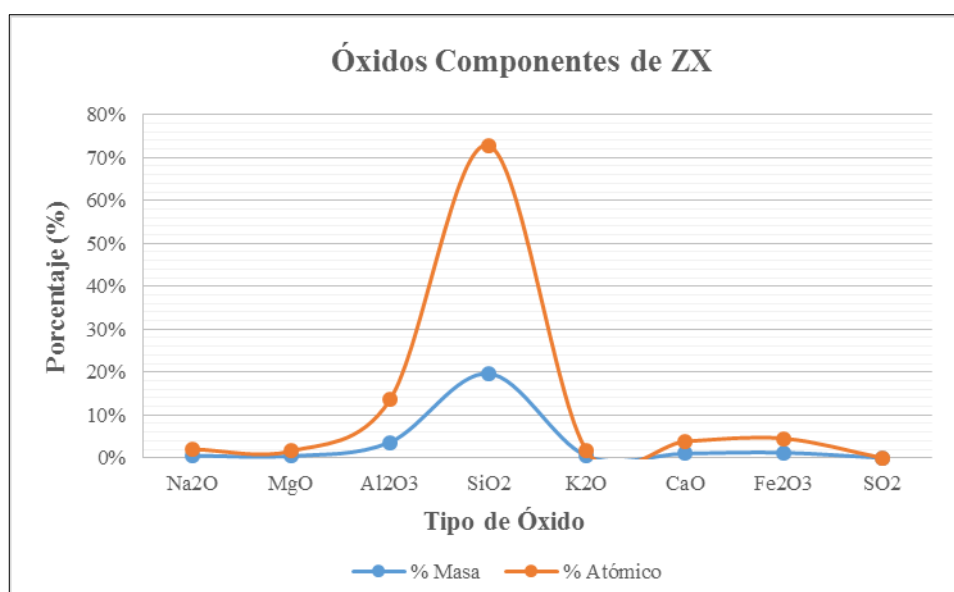
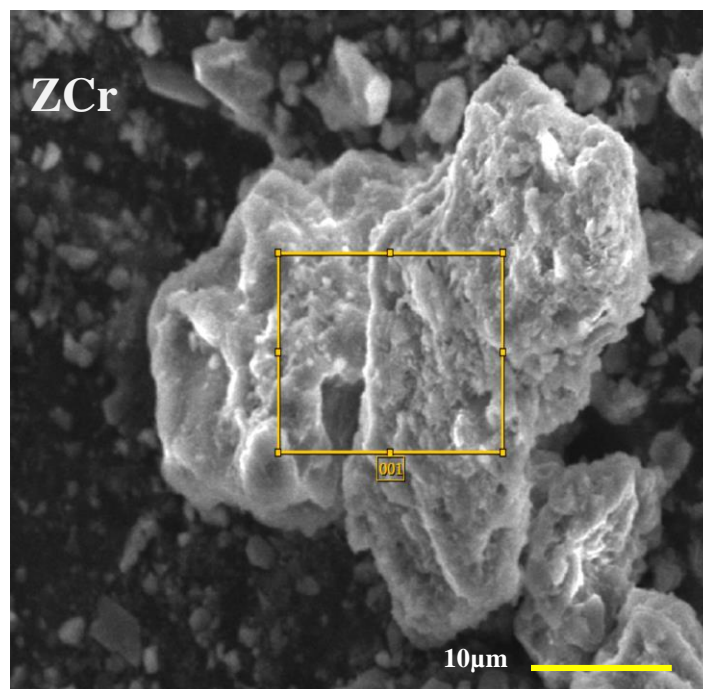


Gráfico 23: Curva de comportamiento de los porcentajes atómicos y másicos de los óxidos de ZX

Fuente: Diego Maldonado

El **Gráfico 23** se realiza con los % másicos y atómicos de la **Tabla 49** que demuestra una amplia diferencia entre el contenido de Óxido de Silicio (SiO_2) con 72.87% en relación al poco contenido de Óxido de Aluminio (Al_2O_3) con 13.52% y un porcentaje considerable de Óxido de Calcio (CaO) con 3.84% del total de la muestra. Por efecto se determina que este material posee una alta actividad puzolánica debido a su representativo contenido y a la reacción de los óxidos ácidos presentes, SiO_2 y Al_2O_3 .

3.1.4.4 Zeolita Natural ZCr



*Imagen 44: Imagen SEM de ZCr realizada a 15 KeV con un aumento de 2000x
Fuente: JEOL EDS System, 2020*

La **Imagen 44** muestra estructuras esféricas muy pequeñas en la muestra ZCr ($1\mu\text{m}$), también se observa estructura ovoidal alargada grande de unos $30\mu\text{m}$ aproximadamente junto a esta una estructura esférica de tamaño entre $15\text{-}20\mu\text{m}$; además, se presentan diversas formas ovoidales de tamaños entre $4\text{--}8\mu\text{m}$ al parecer formadas por aglomeraciones de las estructuras más pequeñas. Poseen superficies ondeantes irregulares y algunas esferas medianas presentan superficies limpias y lisas.

Se realiza el análisis de composición química en una sección de dimensiones de $20\mu\text{m}$ y $15\mu\text{m}$ aproximadamente de la imagen SEM de ZCr. En el **Gráfico 24** visualizamos el espectro EDS de los elementos presentes en la muestra de ZX analizada.

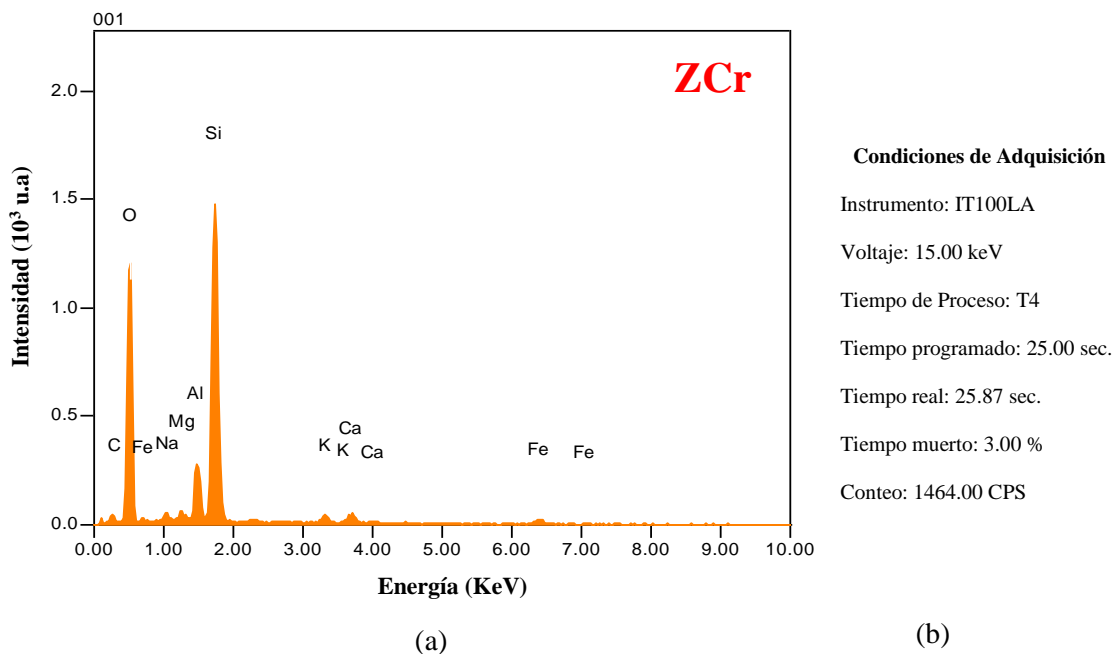


Gráfico 24: Análisis de composición química de ZCr a) Espectro EDS de ZCr b) Condiciones de las adquisición del espectro EDS
Fuente: JEOL EDS System, 2020

El **Gráfico 24a** nos indica dos picos altos próximos entre sí que representan al Silicio y Oxígeno; además de Aluminio, Magnesio y Sodio que constituyen la estructura química del material.

Las condiciones de adquisición del espectro (**Gráfico 24b**) se desarrollan con una energía de 15 KeV y con 4 ciclos de repetición, la duración de este ensayo es de 25.87 segundos por repetición para obtener una mejor representatividad y promedio de los elementos presentes en la muestra.

La **Tabla 52** describe los porcentajes en masa y porcentaje atómico de los elementos del **Gráfico 24a**, así tenemos Carbono, Oxígeno, Sodio, Magnesio, Aluminio, Silicio, Potasio, Calcio y Hierro, debido a que el material estudiado ZCr es un aluminosilicato se tiene como elementos representativos al Si con un valor de 20.77% y Al con 3.84%.

Tabla 52: Datos cuantitativos de análisis elemental EDS de ZCr

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE ZCr		
Elemento Químico	% Masa	% Atómico
C	2.61	10.69
O	19.54	60.13

Na	0.49	1.06
Mg	0.25	0.50
Al	2.11	3.84
Si	11.85	20.77
K	0.60	0.76
Ca	0.83	1.02
Fe	1.41	1.24

Fuente: JEOL EDS System, 2020

Por medio de cálculos con factores de conversión se obtienen los óxidos presentes en ZCr, como se indica en la **Tabla 53**. La relación Si/Al de ZCr se calcula de la relación de ambos elementos siendo estos los más representativos en el material; su valor es de **5.41** lo que nos indica una mayor presencia de Silicio en la muestra en relación al Aluminio, lo que justifica que representa a una zeolita tipo Mordenita que va desde un rango de 4.00 – 7.00[33].

Tabla 53: Óxidos resultantes de análisis de ZCr

ÓXIDOS COMPONENTES DE ZCr					
Elemento	% masa	Óxido	Factor Ox.	% masa	% atómico
Na	0.49	Na₂O	1.348	0.66	1.95
Mg	0.25	MgO	1.6583	0.41	1.22
Al	2.11	Al₂O₃	1.8895	3.99	11.77
Si	11.85	SiO₂	2.1393	25.35	74.86
K	0.6	K₂O	1.2046	0.72	2.13
Ca	0.83	CaO	1.3992	1.16	3.43
Fe	1.41	Fe₂O₃	1.1113	1.57	4.63
S	0	SO₂	2.4972	0.00	0.00
TOTAL	17.54			33.86	100.00

Fuente: Diego Maldonado

De acuerdo a estudio previo [34] realizado sobre este material con iguales características se tiene que tiene los 3 elementos representativos (**Tabla 54**) siendo el del Óxido de Silicio (SiO₂) predominante con 64.39% seguido de Óxido de Aluminio (Al₂O₃) con 11.76% y además un valor considerable de Óxido de Calcio (CaO) 3.64% [34]. Teniendo una comparación clara entre ambos resultados tenemos valores de óxidos aceptables dentro de la investigación y una relación Si/Al casi similares entre las investigaciones 5.62 y 5.52, por lo que ambos resultados satisfactoriamente estarían en un rango para que sea considerada como una zeolita tipo Mordenita[33].

Tabla 54: Comparación entre resultado existente y obtenido de óxidos de ZCr

Presente Investigación	Rosell, 2011	Compuesto
74.86%	64.39%	Óxido de Silicio (SiO ₂)
11.77%	11.67%	Óxido de Aluminio (Al ₂ O ₃)
3.43%	3.64%	Óxido de Calcio (CaO)

Fuente: Diego Maldonado

El bajo contenido de Óxido de Sodio (Na₂O) con 1.95% permite que el cemento no desarrolle reacciones químicas desfavorables [9] cuando entre en contacto con los áridos del hormigón, mientras que el pequeño porcentaje de Óxido de Magnesio (MgO) de 1.22% permite que no se desarrolle problemas de expansión del cemento al momento del fraguado disminuyendo la generación de grietas[10].

Se tiene presencia de Óxido de Hierro (Fe₂O₃) de 4.63% que nos alerta sobre un posterior ataque por sulfatos al momento de la hidratación del cemento, puesto que puede sufrir un deterioro de la calidad de la pasta cementante[10].

Debido a que el material es una puzolana natural no tiene presencia de Óxido de Azufre (SO₂)[10].

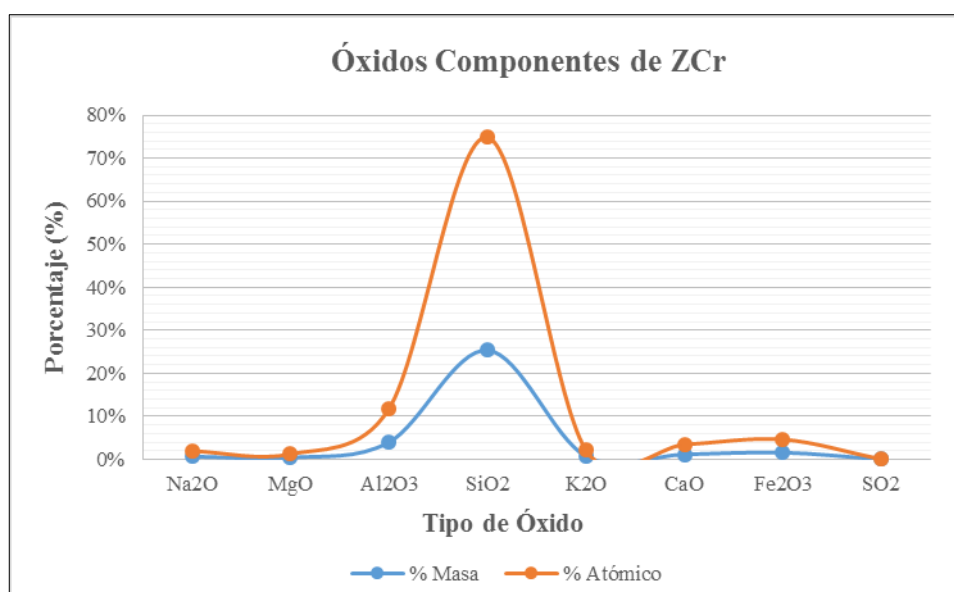


Gráfico 25: Curva de comportamiento de los porcentajes atómicos y másicos de los óxidos de ZCr

Fuente: Diego Maldonado

El **Gráfico 25** se realiza con los % máscicos y atómicos de la **Tabla 53** que constata un rango amplio de diferencia entre el contenido de Óxido de Silicio (SiO_2) con 74.86% en relación al pequeño contenido de Óxido de Aluminio (Al_2O_3) con 11.77 % y un porcentaje minoritario de Óxido de Calcio (CaO) con 3.43 % del total de la muestra. En consecuencia se tiene que este material posee una alta actividad puzolánica debido a su representativo contenido y a la reacción de los óxidos ácidos presentes, SiO_2 y Al_2O_3 .

3.1.5 Actividad Puzolánica de cemento y zeolitas

Tomando en cuenta las especificaciones de la norma ASTM C618-03 [6] para el uso de puzolanas naturales como adición mineral, se procede a verificar mediante el análisis químico que las zeolitas naturales estudiadas cumplan con lo especificado que debe tener al menos el 70% de la suma de Óxido de Silicio(SiO_2) + Óxido de Aluminio(Al_2O_3) + Óxido Férrico(Fe_2O_3) y así mismo de un contenido máximo de Trióxido de Azufre(SO_3) de 4%.

De acuerdo al análisis con la norma ASTM C618-03 [6] de los óxidos presentes en cada tipo de muestra estudiada, se tiene que la actividad puzolánica de los materiales estudiados presentan resultados diversos y aceptables dentro del límite inferior teniendo a ZV con 90.28%, ZX con 90.92% y ZCr con 91.26% detallados en la **Tabla 55**.

Tabla 55: Revisión de la actividad puzolánica de materiales estudiados

ANÁLISIS QUÍMICO DE MUESTRAS				
	CGU	ZV	ZX	ZCr
SiO₂	48.35	80.20	72.87	74.86
Fe₂O₃	3.16	0.00	4.53	4.63
Al₂O₃	12.57	10.08	13.52	11.77
Total	64.08	90.28	90.92	91.26
Si/AL	3.85	7.96	5.39	6.36

Fuente: Diego Maldonado

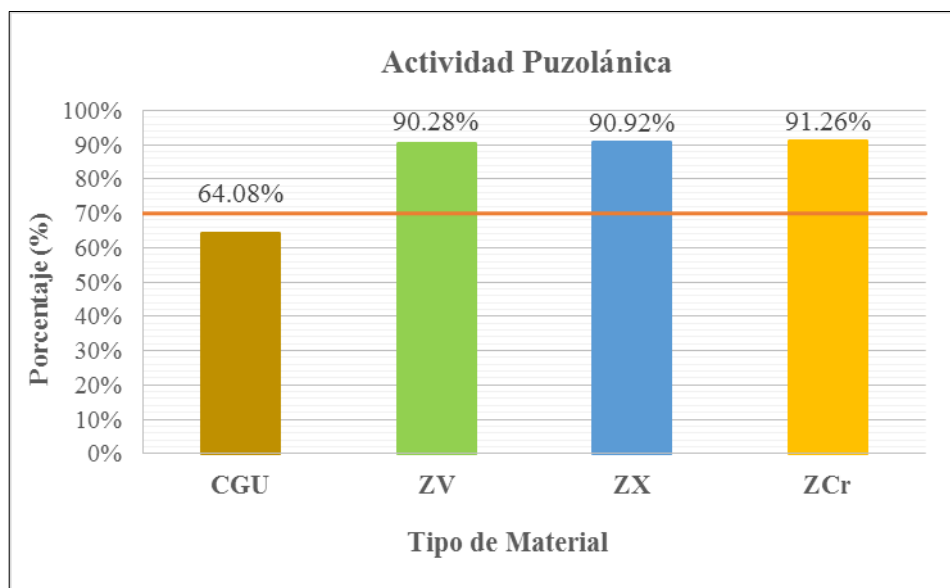


Gráfico 26: Porcentaje de actividad puzolánica de materiales estudiados
Fuente: Diego Maldonado

El **Gráfico 26** nos indica que las zeolitas estudiadas cumplen con el rango mínimo de requerimiento de la norma ASTM C-618-03 [6] y pueden ser usadas como material de adición mineral de puzolanas naturales. Teniendo así en las 3 muestras de zeolita, una alta presencia de Óxido de Silicio (SiO_2) y una moderada presencia de Óxido de Aluminio (Al_2O_3) que se asocia a la presencia de silicatos y al alto contenido de hierro indicando la formación de óxidos e hidróxidos de hierro, verificando así mediante la suma de estos óxidos presentes la calificación del carácter ácido del material puzolánico.

Cabe recalcar que el cemento GU contiene una baja actividad puzolánica, por lo que no cumple con los requerimientos de la norma ASTM C-618-03 [6]. Esto define a que este material son ricos en alúmina y contiene menos cantidad de puzolana. Por lo tanto en los resultados exhibidos es un valor referencial de comparación con las zeolitas naturales.

3.2 VERIFICACIÓN DE HIPÓTESIS

Hipótesis de Trabajo

El uso de zeolita natural como sustituto parcial del cemento tipo GU mejora sus propiedades físicas y mecánicas para su uso en la construcción.

Verificación de Hipótesis

En base a los resultados obtenidos de los diferentes análisis físicos y químicos al cemento y a las zeolitas naturales se puede confirmar la hipótesis presentada anteriormente, verificando que la zeolita natural mejora las propiedades físicas y químicas al realizar una sustitución parcial al cemento trayendo consigo ventajas técnicas, económicas y ecológicas para el uso en la construcción

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

Con la realización de los ensayos propuestos se presentan las siguientes conclusiones:

- ✓ Se estudió a la zeolita natural evaluando su composición química y características físicas como una alternativa de sustitución parcial del cemento, trayendo consigo múltiples ventajas técnicas, económicas y ecológicas para su uso en la construcción.
- ✓ Se determinó que mediante la granulometría realizada a ZV podemos decir que este material presenta una dureza relativamente alta lo que nos permite justificar que el material es de buena calidad y podría ser apto para la elaboración de pasta de cemento.
- ✓ Se justificó que en las curvas de granulométricas de ZV se presenta una zona frecuente lineal en todas las molidas que van a partir del material que pasa el tamiz #4(4.75mm) y el retenido en el tamiz#30(500 μ m), lo que es debido al tamaño de los cuerpos moledores del molino horizontal y el proceso mecánico de trituración no le permite moler cantidades con tamaños de los rangos antes señalados.
- ✓ Se concluyó que mediante el ensayo de finura por el método de tamizado seco según la norma NTE INEN 489, se obtiene que GU presenta un porcentaje de finura de 99.95%, ZV se tiene 99.81%, ZX con un valor de 99.97% y ZCr con un porcentaje de 99.81%. Con esto podemos decir que los resultados de porcentaje de finura de los materiales no varían en un rango de 2% entre sí cumpliendo con lo estipulado en la norma NTE INEN 489.
- ✓ Se comprobó que mediante el ensayo de tamizado seco se puede observar que los 4 tipos de materiales ensayados presentan una caracterización homogénea y que la totalidad de sus partículas se presentan en tamaños menores a 75 μ m, como consecuencia ZV, ZX y ZCr se pueden utilizar como un sustituto parcial del cemento para su uso en construcción.

- ✓ Se resolvió que las zeolitas naturales al tener tamaños muy finos ($< 75\mu\text{m}$) pueden actuar como un filler que cubre los huecos vacíos en la pasta cementante haciendo que tenga mejores características adherentes, provocando una alta compacidad proporcionando trabajabilidad a la mezcla y permitiendo presentar una reducción de la permeabilidad en la mezcla.
- ✓ Se determinó que mediante el ensayo de densidad real según la norma NTE INEN 156, se consiguen valores de densidad dado para GU con un valor de 2.807 gr/cm^3 , ZV con un valor de 2.567 gr/cm^3 , ZX con resultado de 2.244 gr/cm^3 y ZCr con una estimación de 2.807 gr/cm^3 , siendo el valor de GU el valor más alto de los materiales ensayos y entre las zeolitas naturales el resultado de ZV es el de mayor valor y el más próximo al de GU.
- ✓ Se justificó que dependiendo de la calidad, pureza y tamaño de partículas que contenga el material estudiado se va a obtener una gran incidencia en obtención de resultados mayores de densidad.
- ✓ Se definió a través de las imágenes SEM realizadas a las muestras estudiadas que los materiales en general presentan formas amorfas y con zonas punzantes, especialmente tipos de estructuras esféricas y cúbicas irregulares.
- ✓ Se diagnosticó que mediante el análisis de microscopía electrónica (SEM), las muestras por lo común presentan tamaños de partículas variables inferiores a $5\mu\text{m}$. Excepto en el caso de ZCr que debido a que el material expone grumos, el tamaño de sus partículas para el análisis es superior a $5\mu\text{m}$ por consiguiente se obtiene una imagen SEM mucho más ampliada que los otros materiales.
- ✓ Se documentó que mediante los espectros EDS realizados a los materiales, que el material predominante es el Silicio ya que alcanza altos valores de porcentaje de composición química basado en los análisis de las muestras. Teniendo estos valores en el cemento GU de 11.98%, ZV con 19.93%, ZX tiene 24.55% y ZCr con 20.77%.
- ✓ Se estableció que los materiales estudiados poseen altos contenidos de Silicio de sus composiciones químicas lo que le permite tener una óptima reacción química interna, con la finalidad de incrementar una resistencia al ataque de sulfatos y cloruros pudiendo reducir en su totalidad la formación de una reacción álcali-sílice en las pastas de hormigón.

- ✓ Se concluyó que mediante por medio de estudios de microscopía electrónica (SEM) con la técnica de espectroscopía de rayos X de dispersión de energía (EDS) según la norma ASTM C618-03, se obtiene que ZV presenta un porcentaje de actividad puzolánica de 90.28%, ZX tiene 90.92% y ZX con un valor de 91.26% .Con esto se puede deducir que los resultados de porcentaje de actividad puzolánica están sobre el rango descrito en la norma que es mayor de 70% para que una puzolana natural pueda ser usado como adición mineral.
- ✓ Se argumentó que el cemento Holcim GU presenta un porcentaje de actividad puzolánica por debajo de lo dispuesto en la norma ASTM C618-03 debido que el material no es una puzolana natural y presenta bajo porcentajes de Silicio, Hierro y Aluminio.
- ✓ Se documentó que las puzolanas naturales en especial las zeolitas estudiadas tales como ZV, ZX y ZCr están compuestas mayoritariamente por sílice amorfa y poseer nulo valor cementante. Sin embargo que en presencia de humedad reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio y forman un compuesto que posee propiedades aglomerantes, dando como resultado una opción de sustituto parcial del cemento en la construcción.
- ✓ Se precisó que a partir del estudio de las propiedades físicas y químicas de las zeolitas naturales se puede constatar un aumento de la durabilidad en el empleo de este material como sustituto parcial del cemento.
- ✓ Se evaluó que a través de las diversas propiedades que brindan las zeolitas naturales, se debe valorar al material como una alternativa ecológica y económica para la construcción y además sacarle provecho en otros ámbitos como agricultura, acuicultura entre otras.

4.2 RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta consideraciones suscitadas durante el desarrollo de la investigación y realización de los ensayos, se toma en cuenta lo siguiente:

- ✓ Se recomienda almacenar la zeolita natural dada en rocas o sacos de material fino en fundas plásticas impermeables o saquillos y posterior ubicarlos en lugares donde no tenga una exposición directa con el ambiente, debido a que la zeolita absorbe la humedad y corre riesgo de contaminación con otros elementos.
- ✓ Se recomienda que durante la preparación de la muestra para la realización de los ensayos se debe tomar en cuenta que el material cumpla con las características físicas solicitadas en el proyecto ($<75\mu\text{m}$) y que no existan impurezas ni materia orgánica dentro del contenido del material.
- ✓ Se recomienda que durante la molienda y el tamizado se debe tener mucha precaución al momento de limpiar y recoger las partículas para así evitar la pérdida considerable de material.
- ✓ Se recomienda que al realizar cada ensayo de finura, los equipos se limpien de una manera detenida y en lo posible sopleteándolos con aire para evitar que se quede material retenido en los tamices en uso y así obtener resultados óptimos y reales.
- ✓ Se recomienda que se debe tener muy en cuenta la temperatura del ensayo de densidad, consistencia normal y tiempo de fraguado (23°C), ya que la variación de esta influye directamente en la obtención de resultados favorables.
- ✓ Se recomienda el uso de protección personal adecuada para así evitar perjuicios en nuestra salud.
- ✓ Se recomienda que antes de realizar los ensayos de composición química; la muestra debe de ser preparada de una manera homogénea y uniforme, con el fin que se presentes resultados más favorables de los análisis.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. M. Jacob y L. G. Das, «"Ecofriendly Concrete by Partial Replacement of Cement by Zeolite",» *Engineering and Technology*, vol. 6, n° 5, pp. 8194-8200, 2017.
- [2] T. Markiv, K. Sobol, M. Franus y W. Franus, «Mechanical and durability properties of concretes incorporating natural zeolite,» *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 16, n° 4, pp. 554-562, 2016.
- [3] M. Najimi, J. Sobhani, B. Ahmadi y M. Shekarchi, «An experimental study on durability properties of concrete containing zeolite as a highly reactive natural pozzolan,» *Construction and Building Materials*, vol. 35, pp. 1023-1033, 2012.
- [4] C. Saltos, *Efectos de la adición de zeolita en las propiedades mecánicas de un hormigón convencional de cemento Portland Tipo I*, Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), 2005.
- [5] P. Robalino, *El uso de la zeolita como una adición mineral para producir cemento puzolánico*, Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), 2004.
- [6] I. ASTM, «ASTMC618-03: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,» *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 1-3, 2010.
- [7] C. Parra y J. Bermúdez, *Cementos Alcalinamente activados a base de zeolitas naturales*, Guayaquil: Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), 2011.
- [8] J. Jiménez y M. Cornejo, «Estudio y simulación del comportamiento del cemento portland tipo I, con adición del 20% de Zeolita Ecuatoriana mediante el curado al aire,» *ResearchGate*, vol. 33, n° 244, p. 9, 2016.
- [9] F. Morante, *Las Zeolitas de la costa del Ecuador (Guayaquil): Geología, Caracterización y Aplicaciones*, Madrid: Universidad Politécnica de Madrid, 2004.
- [10] J. L. Costafreda Mustelier, D. A. Martín Sanchez y J. L. Costafreda Velázquez, *Las Zeolitas Naturales de Iberoamérica*, Madrid, España: Fundación Gómez Pardo, 2018.
- [11] R. Paredes, A. María, P. Alamilla y A. Mandujano, «Alternativa Ecológica y económica para la agricultura de temporal de México,» Celsa Impresos, Celaya, México, 2013.
- [12] C. Casals Corella, «Las Zeolitas Mineral del Siglo XXI,» Ediciones Publicigraf, Holguín, Cuba, 1988.

- [13] Y. Valenzuela, *Análisis Comparativo De La Resistencia A Compresión Del Hormigón Tradicional, Con Hormigón Al Emplear Zeolita Natural En Reemplazo Parcial Del Cemento.*, Ambato: Universidad Técnica de Ambato, 2017.
- [14] C. Hornbostel, *Materiales para Construcción*, Estados Unidos: Editorial Limusa S.A, 2005.
- [15] S. Medina, «Ensayo de Materiales II,» Ambato, Ecuador, 2014.
- [16] A. Torre, *Curso Básico de Tecnología de Concreto*, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería, 2004.
- [17] A. Neville, *Tecnología del Concreto*, México: Cámara Nacional de la Industria Editorial, 2013.
- [18] Holcim, «Cemento hidráulico Tipo GU para la construcción en general,» Guayaquil, 2015.
- [19] M. Quiroz y L. Salamanca, *Apoyo Didáctico Para La Enseñanza Y Aprendizaje En La Asignatura De "Tecnología Del Hormigón"*, Cochabamba, 2006.
- [20] INEN, *INEN 489: Cementos. Determinación De La Finura Por Tamizado Seco*, Quito, 2009.
- [21] I. ASTM, «ASTMC430-17: Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by the 45- μm (No. 325) Sieve,» *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 96, n° 325, p. 8, 2000.
- [22] I. ASTM, «ASTMC188-16: Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement,» *Annual Book of ASTM Standards*, vol. 95, pp. 1-2, 2016.
- [23] INEN, *NTE INEN 156: Cemento Hidráulico. Determinación De La Densidad*, Quito, 2009.
- [24] J. Clavijo, «Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM),» *Elementos*, vol. 3, n° 3, p. 14, 2013.
- [25] J. Piqueras y M. Faura, «Principios básicos del Microscopio Electrónico de Barrido,» *Centro de investigación hospital "La Fé"*, pp. 73-92, 1994.
- [26] M. Ipohorski y P. Bozzano, «Microscopía Electrónica De Barrido En La Caracterización De Materiales,» *Ciencia e Investigación*, vol. 63, n° 3, pp. 43-53, 2013.
- [27] INEN, *NTE INEN 155: Cemento Hidráulico. Mezclado Mecánico De Pastas Y Morteros De Consistencia Plástica.*, Quito, 2009.
- [28] INEN, *NTE INEN 872: Áridos Para Hormigón. Requisitos*, Quito, 2011.

- [29] I. ASTM, «ASTMC33-03: Standard Specification for Concrete Aggregates,» *Annual Book of ASTM Standards*, pp. 1-15, 2002.
- [30] E. Cabezas, *Diseño Y Construcción De Un Molino De Bolas Para Aplicaciones De Pulvimetalurgia En Los Laboratorios De Ingeniería Mecánica De La Facultad De Ingeniería Civil Y Mecánica De La Universidad Técnica De Ambato*, Ambato: Universidad Técnica de Ambato, 2017.
- [31] Tescan, «Scanning Electron Microscope,» Brno: República Checa, 2014.
- [32] A. Garófalo, *EVALUACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS CEMENTOS A PARTIR DE LA CORRELACIÓN DE SUS PROPIEDADES ASOCIADAS CON LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN*, Guayaquil: Escuela Politécnica del Litoral, 2015.
- [33] M. Agosto, *Estudio de zeolitas procedentes de depósitos Argentinos. Aspectos tecnológicos que posibiliten su aplicación en agroindustria y contralor ambiental*, Buenos Aires: Universidad Nacional de la Plata, 2012.
- [34] M. Rosell Lam, J. Costafreda Mustelier, J. Parra y Alfaro y B. Calvo Pérez, «INFLUENCIA DE LA ADICION DE ZEOLITA EN LAS PROPIEDADES MICRO Y MACROESTRUCTURALES EN PASTAS Y MORTEROS,» *Centro Tecnico Para El Desarrollo De Materiales De Construcción*, pp. 1-12, 2011.

ANEXOS

A1. MINA DE ZEOLITA DE ZEONATEC S.A



Lugar de mina de Zeonatec S.A



Estratos de roca de mina



Tipo de zeolita natural



Zeolita Verde

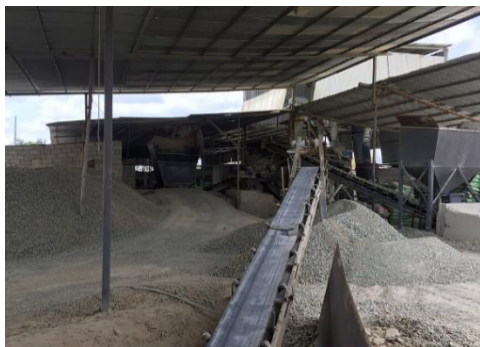
A2. PLANTA DE PROCESAMIENTO, PRODUCCIÓN Y ALMACENAMIENTO DE ZEOLITA DE ZEONATEC S.A



Material extraído de la mina



Proceso de selección de material



Trituración primaria del material



Resultado de trituración del material



Trituración y pulverización del material



Material fino procesado en diferentes mallas

A3. PROCESO DE TRITURACIÓN DE ZEOLITA VERDE EN LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES



Colocación del material en la máquina de los Ángeles



Ajuste de cierre y posterior encendido del equipo



Material procesado por la máquina



Limpieza interior del equipo

A4. PROCESO DE TRITURACIÓN DE ZEOLITA VERDE EN EL MOLINO HORIZONTAL



Zeolita verde de tamaño mayor a 4.75mm y menor a 9.50mm



Zeolita verde de tamaño mayor a 2mm y menor a 4.75mm



Material depositado en el tambor del molino horizontal



Proceso de trituración del molino horizontal

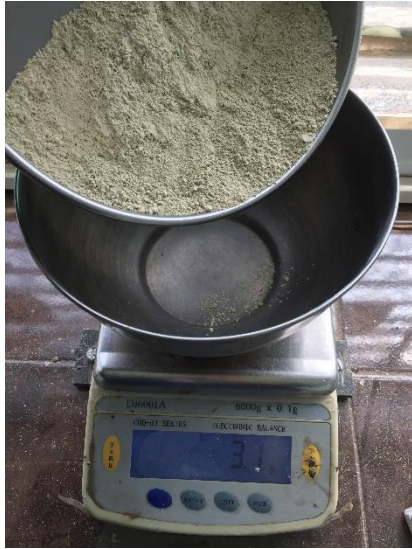


Material resultante de la trituración



Proceso de tamizado del material resultante de la trituración

A5. PROCESO DE TAMIZADO DE MATERIAL QUE NO CUMPLE CON REQUERIMIENTOS DE ENSAYOS



Material que no cumple con características para realizar los ensayos



Tamizado del material a través del tamiz #200 (75 μ m)

A6. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE FINURA POR MEDIO DEL MÉTODO DE TAMIZADO SECO



Cantidad de material necesario para ensayo de finura



Equipos necesarios para el ensayo



Colocación del material en los tamices



Proceso inicial de movimientos rotatorios suaves



Proceso de movimientos giratorios acompañados de golpes en la parte externa del tamiz



Lectura del material retenido en el tamiz #100 (150µm)

A7. DETALLE DE RESULTADOS DE ENSAYOS DE FINURA POR MEDIO DE TAMIZADO SECO

A7.1 Ensayos de Finura de Cemento GU

ENSAYO 1/ Holcim GU									
FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489									
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250.65	285.06	0	-	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	250.72	334.99	50	0	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	264.89	320.75	35.69	14.24	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	259.84	311.54	26.48	9.19	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	277.00	285.18	0.12	26.35	NA	NA
	1	150	8	250.70	285.09	0.03	0.05	0.06	99.94

ENSAYO 2/ Holcim GU									
FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489									
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250.64	285.04	0	-	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	250.76	334.92	50	0	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	269.69	315.90	30.86	19.05	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	258.03	308.50	23.46	7.39	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	274.03	285.11	0.07	23.39	NA	NA
	1	150	8	250.66	285.07	0.03	0.02	0.06	99.94

ENSAYO 3/ Holcim GU									
FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489									
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250.65	285.14	0	-	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	250.73	335.06	50	0	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	258.87	326.80	41.66	8.22	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	254.88	322.56	37.42	4.23	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	288.04	285.18	0.04	37.39	NA	NA
	1	150	8	250.70	285.16	0.02	0.05	0.04	99.96

ENSAYO 4/ Holcim GU									
FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489									
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250.65	285.06	0	-	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	250.75	334.96	50	0	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	272.01	313.64	28.58	21.36	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	254.28	309.99	24.93	3.63	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	275.48	285.14	0.08	24.83	NA	NA
	1	150	8	250.67	285.09	0.03	0.02	0.06	99.94

A7.2 Ensayos de Zeolita ZV

ENSAYO 1/ ZV									
FINURA DE ZEOLITA SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489									
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	% retenido	% pasa
Peso inicial	-	NA	NA	250.73	278.89	0	-	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	250.79	328.83	50	0	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	254.99	324.45	45.56	4.26	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	254.20	320.87	41.98	3.47	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	264.35	320.87	41.98	13.62	NA	NA
	1	150	8	259.84	297.97	19.08	9.11	NA	NA
	1	150	8	258.08	290.57	11.68	7.35	NA	NA
	1	150	8	256.99	290.57	11.68	6.26	NA	NA
	1	150	8	256.99	284.32	5.43	6.26	NA	NA
	1	150	8	253.92	281.13	2.24	3.19	NA	NA
	1	150	8	252.23	279.68	0.79	1.50	NA	NA
	1	150	8	251.20	279.2	0.31	0.47	NA	NA
	1	150	8	250.89	279.04	0.15	0.16	NA	NA
	1	150	8	250.75	279.00	0.11	0.02	0.22	99.78

ENSAYO 2/ ZV									
FINURA DE ZEOLITA SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489									
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	% retenido	% pasa
Peso inicial	-	NA	NA	252.75	284.58	0	-	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	252.82	334.51	50	0	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	255.32	331.93	47.35	2.57	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	254.08	330.56	45.98	1.33	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	256.15	327.19	42.61	3.40	NA	NA
	1	150	8	261.75	318.1	33.52	9.00	NA	NA
	1	150	8	262.29	308.53	23.95	9.54	NA	NA
	1	150	8	258.64	302.64	18.06	5.89	NA	NA
	1	150	8	258.95	296.4	11.82	6.20	NA	NA
	1	150	8	257.46	291.67	7.09	4.71	NA	NA
	1	150	8	255.85	288.45	3.87	3.10	NA	NA
	1	150	8	254.67	286.56	1.98	1.92	NA	NA
	1	150	8	254.01	285.21	0.63	1.26	NA	NA
	1	150	8	253.22	284.77	0.19	0.47	NA	NA
	1	150	8	252.85	284.71	0.13	0.10	NA	NA
	1	150	8	252.78	284.69	0.11	0.03	0.22	99.78

ENSAYO 3/ ZV									
FINURA DE ZEOLITA SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489									
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	% retenido	% pasa
Peso inicial	-	NA	NA	252.75	284.58	0	-	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	252.82	334.51	50	0	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	255.26	331.73	47.15	2.51	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	253.65	330.76	46.18	0.90	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	258.05	325.40	40.82	5.30	NA	NA
	1	150	8	256.39	321.70	37.12	3.64	NA	NA
	1	150	8	259.28	315.24	30.66	6.53	NA	NA
	1	150	8	258.50	309.33	24.75	5.75	NA	NA
	1	150	8	257.80	304.25	19.67	5.05	NA	NA
	1	150	8	255.87	301.16	16.58	3.12	NA	NA
	1	150	8	256.56	297.27	12.69	3.81	NA	NA
	1	150	8	256.19	293.82	9.24	3.44	NA	NA
	1	150	8	256.70	289.88	5.30	3.95	NA	NA
	1	150	8	255.09	287.56	2.98	2.34	NA	NA
	1	150	8	254.45	285.78	1.20	1.70	NA	NA
	1	150	8	253.49	284.98	0.40	0.74	NA	NA
	1	150	8	253.13	284.74	0.16	0.38	NA	NA
	1	150	8	252.79	284.67	0.09	0.04	0.18	99.82

ENSAYO 4/ ZV									
FINURA DE ZEOLITA SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489									
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	252.75	284.58	0	-	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	252.81	334.52	50	0	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	255.02	332.08	47.50	2.27	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	254.38	330.23	45.65	1.63	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	261.91	321.01	36.43	9.16	NA	NA
	1	150	8	262.10	311.59	27.01	9.35	NA	NA
	1	150	8	261.11	303.18	18.60	8.36	NA	NA
	1	150	8	256.93	299.01	14.43	4.18	NA	NA
	1	150	8	257.24	294.49	9.91	4.49	NA	NA
	1	150	8	256.01	291.21	6.63	3.26	NA	NA
	1	150	8	255.75	288.18	3.60	3.00	NA	NA
	1	150	8	254.80	286.09	1.51	2.05	NA	NA
	1	150	8	253.71	285.14	0.56	0.96	NA	NA
	1	150	8	253.11	284.73	0.15	0.36	NA	NA
	1	150	8	252.80	284.65	0.07	0.05	0.14	99.86

A7.3 Ensayos de Zeolita ZX

ENSAYO 1/ ZX									
FINURA DE ZEOLITA SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489									
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	252.75	280.86	0	-	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	252.83	330.78	50	0	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	254.46	328.94	48.08	1.71	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	254.84	326.72	45.86	2.09	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	264.04	315.36	34.50	11.29	NA	NA
	1	150	8	264.97	303.12	22.26	12.22	NA	NA
	1	150	8	265.05	290.79	9.93	12.30	NA	NA
	1	150	8	259.95	283.58	2.72	7.20	NA	NA
	1	150	8	255.04	281.34	0.48	2.29	NA	NA
	1	150	8	253.16	280.90	0.04	0.41	NA	NA
	1	150	8	252.78	280.87	0.01	0.03	0.02	99.98

ENSAYO 2/ ZX									
FINURA DE ZEOLITA SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489									
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	252.75	280.86	0	-	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	253.01	330.60	50	0	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	260.16	323.22	42.36	7.41	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	252.89	322.99	42.13	0.14	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	254.30	321.35	40.49	1.55	NA	NA
	1	150	8	260.65	313.40	32.54	7.90	NA	NA
	1	150	8	267.98	298.15	17.29	15.23	NA	NA
	1	150	8	260.04	290.80	9.94	7.29	NA	NA
	1	150	8	257.46	286.06	5.20	4.71	NA	NA
	1	150	8	255.37	283.44	2.58	2.62	NA	NA
	1	150	8	254.37	281.74	0.88	1.62	NA	NA
	1	150	8	253.29	281.12	0.26	0.54	NA	NA
	1	150	8	252.96	280.91	0.05	0.21	NA	NA
	1	150	8	252.78	280.87	0.01	0.03	0.02	99.98

ENSAYO 3/ ZX									
FINURA DE ZEOLITA SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489									
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250.65	279.12	0	-	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	250.72	329.05	50	0	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	253.62	325.96	46.84	2.97	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	255.00	321.54	42.42	4.35	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	270.75	301.34	22.22	20.10	NA	NA
	1	150	8	265.56	286.41	7.29	14.91	NA	NA
	1	150	8	256.35	280.66	1.54	5.70	NA	NA
	1	150	8	251.87	279.40	0.28	1.22	NA	NA
	1	150	8	250.90	279.18	0.06	0.25	NA	NA
	1	150	8	250.66	279.14	0.02	0.01	0.04	99.96

ENSAYO 4/ ZX									
FINURA DE ZEOLITA SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489									
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250.66	279.12	0	-	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	250.70	329.08	50	0	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	256.94	322.60	43.48	6.28	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	254.21	318.94	39.82	3.55	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	270.30	299.29	20.17	19.64	NA	NA
	1	150	8	264.87	285.07	5.95	14.21	NA	NA
	1	150	8	255.28	280.39	1.27	4.62	NA	NA
	1	150	8	251.71	279.32	0.20	1.05	NA	NA
	1	150	8	250.72	279.19	0.07	0.06	NA	NA
	1	150	8	250.68	279.15	0.03	0.02	0.06	99.94

A7.4 Ensayos de Zeolita ZCr

ENSAYO 1/ ZCr										
FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250.82	284.56	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	250.82	334.56	50	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	298.69	286.66	286.66	298.69	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	252.59	284.89	284.89	252.59	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	250.97	284.75	284.75	250.97	NA	NA	NA
	1	150	8	250.975	284.77	0.02	250.975	0.005	0.04	99.96

ENSAYO 2/ ZCr										
FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250.82	284.56	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	250.82	334.56	50	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	292.16	293.18	293.18	292.16	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	297.76	287.54	287.54	297.76	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	299.09	286.20	286.2	299.09	NA	NA	NA
	1	150	8	302.77	284.84	284.84	302.77	3.68	569.68	96.32
	1	150	8	302.775	284.75	0.15	302.775	0.005	0.3	99.70

ENSAYO 3/ ZCr										
FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
	t (min)	N°	N°	Wf (g)	Wt (g)	Wr (g)	Wm (g)	W (< 0,05)	% retenido	% pasa
Peso inicial		NA	NA	250.82	284.56	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	-	NA	NA	250.82	334.56	50	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	294.43	290.95	5.89	43.78	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	296.98	288.40	3.34	46.33	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	299.02	286.36	1.30	48.37	NA	NA	NA
	1	150	8	300.26	285.12	0.06	49.61	1.24	0.12	98.76
	1	150	8	300.52	284.86	-0.20	49.87	0.26	-0.4	99.74
	1	150	8	300.524	284.82	0.08	49.874	0.004	0.16	99.84

ENSAYO 4/ ZCr										
FINURA DEL CEMENTO SEGÚN EL METODO DEL TAMIZADO SECO INEN 489										
Pasos	Tiempo	golpes	giros 60°	PESO FUENTE	Peso tamiz #100	Peso residuo tamiz	Peso muestra en fuente	Peso muestra pasa en 1min	Porcentaje retenido	Porcentaje pasa
Peso inicial		NA	NA	250.82	284.56	0	-	NA	NA	NA
Colocar muestra	0	NA	NA	250.82	334.56	50	0	NA	NA	NA
mov-giratorio	4	NA	NA	290.61	294.77	-13.73	32.58	NA	NA	NA
mov-giratorio	8	NA	8	297.32	288.06	-20.44	39.29	NA	NA	NA
golpe-giro	1	150	8	299.36	286.02	-22.48	41.33	NA	NA	NA
	1	150	8	300.11	285.27	-23.23	42.08	0.75	-46.46	99.25
	1	150	8	300.42	284.96	-23.54	42.39	0.31	-47.08	99.69
	1	150	8	300.425	284.955	0.13	42.395	0.005	0.26	99.74

A8. PROCEDIMIENTO DE ENSAYO DE DENSIDAD REAL POR MEDIO DEL MÉTODO DE PICNÓMETRO



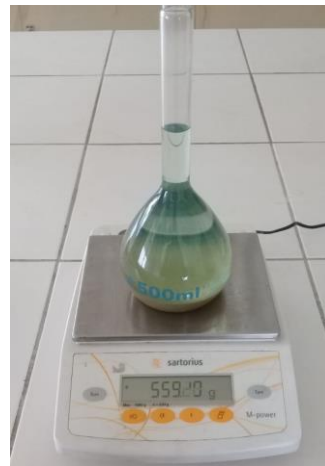
Cantidad necesaria para ensayo de densidad



Colocación del material en el picnómetro



Picnómetro con determinada cantidad de material



Incorporación de gasolina hasta la medida de aforo al picnómetro con material



Cantidad de gasolina hasta la marca de aforo



Proceso de movimientos giratorios para sacar burbujas de aire



Toma de la lectura de la temperatura



Limpieza del cuello del picnómetro luego de realizar todos los pasos