



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS  
DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

Tesis profesional

**“Valoración de morteros adicionados con sílice de las termoeléctricas de  
Los Azufres, Michoacán y Cerro Prieto, Baja California”**

Que para obtener el título de:

**Ingeniero Civil**

Presenta:

**Eduardo Carreón Hernández**

Asesor:

**Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán**

Co-asesores:

**Dr. José Luis Ruvalcaba Sil**

**M. en V. Florencio Moisés González Valdez**

## Contenido

Dedicatorias .....	8
Agradecimientos.....	9
I. Resumen.....	10
II. Abstract.....	11
III. Justificación.....	12
IV. Hipótesis.....	15
V. Objetivo general.....	15
VI. Objetivos específicos.....	15
1. Introducción.....	16
2. Marco teórico .....	17
2.1 Metodología .....	17
2.2 Antecedentes .....	20
2.3 Reseña histórica de los morteros.....	21
2.4 Adiciones y sustituciones de materiales residuales en morteros convencionales.....	22
2.5 Cemento Portland .....	23
2.5.1 Proceso de fabricación del cemento Portland .....	23
2.5.2 Clasificación del cemento .....	25
2.5.3 Propiedades del cemento.....	26
2.6 Agregados.....	30
2.6.1 Origen de los agregados .....	30
2.6.2 Clasificación de los agregados.....	31
2.6.3 Propiedades de los agregados.....	32
2.6.4 Agregados empleados en esta investigación .....	36
2.7 Agua.....	36
2.7.1 Agua empleada en esta investigación.....	37
2.8 Puzolanas .....	38
2.8.1 Origen de las puzolanas.....	38
2.8.2 Definición .....	38
2.8.3 Clasificación de las puzolanas .....	38

2.8.4	Actividad puzolánica.....	41
2.9	Morteros .....	41
2.9.1	Definición .....	41
2.9.2	Tipos de morteros .....	41
2.10	Materiales en estudio como adición o sustitución al mortero .....	43
2.10.1	Sílice .....	43
2.10.2	Sílice utilizada en esta investigación .....	44
2.11	Aditivos .....	47
2.11.1	Tipos y usos .....	47
2.11.2	Aditivo utilizado en la investigación .....	48
3.	Metodología .....	49
3.1	Caracterización de los materiales .....	49
3.1.1	Cemento Portland.....	49
3.1.2	Análisis del agregado .....	53
3.1.3	Análisis del agua .....	70
3.2	Pruebas realizadas al mortero fresco .....	71
3.2.1	Fluidez.....	71
3.2.2	pH.....	73
3.2.3	Temperatura.....	74
3.3	Elaboración de especímenes.....	75
3.3.1	Elaboración de cubos.....	75
3.3.2	Elaboración de prismas.....	77
3.3.4	Elaboración de briquetas.....	78
3.3.5	Curado de los especímenes.....	79
3.4	Pruebas realizadas al mortero endurecido .....	80
3.4.1	Pruebas no destructivas .....	81
Velocidad de propagación.....		87
Calidad del mortero .....		87
3.4.2	Pruebas destructivas.....	87
3.4.3	Pruebas por durabilidad .....	94
3.5	Pruebas realizadas al aditivo .....	99
3.1.3	Aditivo .....	99

4. Presentación y análisis de resultados .....	100
4.1 Caracterización del agregado fino. ....	100
4.2 Pruebas realizadas al mortero fresco .....	102
4.2.1 Fluidez .....	102
4.3 Pruebas realizadas al mortero endurecido .....	102
4.3.1 Pruebas no destructivas .....	102
4.3.2 Pruebas destructivas .....	106
.....	108
4.3.3 Pruebas por durabilidad .....	109
5. Conclusiones.....	114
Bibliografía .....	115
Apéndice A.....	120
1. Densidad .....	120
2. Gravedad específica .....	121
3. Resistividad eléctrica.....	122
4. Velocidad de pulso ultrasónico.....	123
5. Compresión .....	124
6. Flexión.....	125
7. Tensión directa.....	126
8. Tensión indirecta.....	127
9. Porosidad efectiva.....	128
10. Carbonatación .....	135

## Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1 Principales productores de energía geotérmica. (Think GeoEnergy Research 2020)</i> .....	14
<i>Ilustración 2 Esquema metodológico de la investigación. (Eduardo Carreón Hernández)</i> .....	19
<i>Ilustración 3 Esquema del proceso de la producción del cemento. (CANACEM, 2016)</i> .....	24
<i>Ilustración 4 Clasificación de los materiales puzolánicos (Karen Jennifer Beltrán Taipe, 2017)</i> .....	40
<i>Ilustración 5 Sílice geotérmica (Vaca Arciga, 2017)</i> .....	44
<i>Ilustración 6 Planta geotérmica Cerro Prieto, Baja California (Energy Management, 2019)</i> .....	45
<i>Ilustración 7 Planta geotérmica Los Azufres, Michoacán (Gobierno de México)</i> .....	45
<i>Ilustración 8 Secado a la intemperie de la sílice (Vaca Arciga, 2017)</i> .....	46
<i>Ilustración 9 Trituración de Sílice en la Máquina de desgaste de Los Ángeles. (Vaca Arciga, 2017)</i> .....	47
<i>Ilustración 10 Aditivo utilizado en la investigación. (Vaca Arciga, 2017)</i> .....	48
<i>Ilustración 11 Inventario de Bancos de Materiales, 2020. SCT</i> .....	53
<i>Ilustración 12 Ubicación del banco de la Unión y distancia a Ciudad Universitaria (Carreón Hernández, 2020)</i> .....	54
<i>Ilustración 13 Cuarteo por cuarteador mecánico. (Báez Ángel, 2018)</i> .....	55
<i>Ilustración 14 Cuarteo Manual (Vaca Arciga, 2017)</i> .....	56
<i>Ilustración 15 Secado de la arena en parrilla. (Vaca Arciga, 2017)</i> .....	57
<i>Ilustración 16 Secado superficial de la muestra mediante el molde troncocónico. (Vaca Arciga, 2017)</i> .....	58
<i>Ilustración 17 Realización de la prueba de MVSS (Báez Ángel, 2018)</i> .....	59
<i>Ilustración 18 Realización de la prueba de MVSV (Báez Ángel, 2018)</i> .....	60
<i>Ilustración 19 Material retenido de las diferentes mallas una vez pesadas. (Vaca Arciga, 2017)</i> .....	61
<i>Ilustración 20 Vaciado de la muestra representativa de arena dentro de las mallas. (VACA ARCIGA, 2017)</i> ..	61
<i>Ilustración 21 Límites granulométricos para agregado fino (Mezclas de concreto y mortero)</i> .....	63
<i>Ilustración 22 Prueba de colorimetría. (VACA ARCIGA, 2017)</i> .....	64
<i>Ilustración 23 Prueba de sedimentación. (Báez Ángel, 2017)</i> .....	65
<i>Ilustración 24 Prueba de terrones de arcilla. (Báez Ángel, 2017)</i> .....	67
<i>Ilustración 25 Determinación de la densidad de la arena por media del frasco de Chapman (Báez Ángel, 2017)</i> .....	68
<i>Ilustración 26 Llenado de capsula (Fotografía L. Colín)</i> .....	70
<i>Ilustración 27 Llenado del molde de bronce en dos capas. (Báez Ángel, 2017)</i> .....	72
<i>Ilustración 28 Compactación de la pasta. (VACA ARCIGA, 2017)</i> .....	72
<i>Ilustración 29 Enrasado con una espátula el exceso de mortero. (VELÁZQUEZ ROBLERO, 2017)</i> .....	72
<i>Ilustración 30 Expansión de la mezcla de forma manual haciendo girar la leva. (VACA ARCIGA, 2017)</i> .....	72
<i>Ilustración 31 Toma de mediciones para determinar la fluidez (Vaca Arciga, 2017)</i> .....	72
<i>Ilustración 32 Papel indicador puesto en contacto con el mortero (Báez Ángel, 2018)</i> .....	73
<i>Ilustración 33 Papel indicador de pH (Vaca Arciga, 2017)</i> .....	74
<i>Ilustración 34 Medición de temperatura. (VACA ARCIGA, 2017)</i> .....	74
<i>Ilustración 35 Elaboración de los especímenes. (Báez Ángel, 2017)</i> .....	75
<i>Ilustración 36 Repartición de golpes durante el llenado de los cubos</i> .....	76
<i>Ilustración 37 Moldes, llenado y colado de especímenes cúbicos (Báez Ángel, 2017)</i> .....	77
<i>Ilustración 38 Moldes y colado de prismas (Báez Ángel, 2017)</i> .....	78
<i>Ilustración 39 Elaboración de cilindros. (Santillán Barragán, 2017)</i> .....	78
<i>Ilustración 40 Elaboración de briquetas. (Báez Ángel, 2017)</i> .....	79
<i>Ilustración 41 Curado de los especímenes por sumersión. (Santillán Barragán, 2017)</i> .....	80
<i>Ilustración 42 Prueba de densidad. (VACA ARCIGA, 2017)</i> .....	82
<i>Ilustración 43 Prueba de Gravedad Específica. (Báez Ángel, 2017)</i> .....	84
<i>Ilustración 44 Prueba de resistividad eléctrica en especímenes. Carreón Eduardo, 2020)</i> .....	85
<i>Ilustración 45 Prueba Velocidad de Pulso Ultrasonico (Carreón Eduardo, 2020)</i> .....	87
<i>Ilustración 46 Prueba de compresión simple en cubos. (Carreón Eduardo, 2020)</i> .....	89

<i>Ilustración 47 Especímenes sometidos a flexión. (Carreón Eduardo, 2020)</i> .....	90
<i>Ilustración 48 Representación gráfica de la prueba a flexión en un punto de carga.</i> .....	91
<i>Ilustración 49 Prueba de tensión indirecta en cilindros. (Báez Ángel, 2017)</i> .....	92
<i>Ilustración 50 Prueba de tensión directa en briquetas. (Carreón Eduardo, 2020)</i> .....	93
<i>Ilustración 51 Colocación de los especímenes sobre la esponja húmeda. (Carreón Eduardo, 2020)</i> .....	96
<i>Ilustración 52 Exposición de los especímenes al ambiente (Báez Ángel, 2017)</i> .....	97
<i>Ilustración 53 Muestras con fenolftaleína aplicada a los especímenes. (Carreón Eduardo, 2020)</i> .....	98
<i>Ilustración 54 Aditivo preparado utilizado en las mezclas (Báez Ángel, 2017)</i> .....	99
<i>Ilustración 55 Distribución granulométrica de arena de Joyitas y límites inferior y superior (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).</i> .....	101
<i>Ilustración 56 Resultados de la prueba de densidad a 90, 180 y 1250 días</i> .....	103
<i>Ilustración 57 Resultados de la prueba de gravedad específica a las edades de 90, 180 y 1250 días</i> .....	104
<i>Ilustración 58 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a los 90, 180 y 1250 días</i> .....	105
<i>Ilustración 59 Resultados de Velocidad de pulso ultrasónico a 90, 180 y 1250 días</i> .....	105
<i>Ilustración 60 Resultados del ensayo a compresión simple a 90, 180 y 1250 días</i> .....	106
<i>Ilustración 61 Resultados del ensayo a flexión a 90, 180 y 1250 días</i> .....	107
<i>Ilustración 62 Resultados del ensayo a tensión directa a 90, 180 y 1250 días</i> .....	108
<i>Ilustración 63 Resultados del ensayo a tensión indirecta a 90, 180 y 1250 días</i> .....	108
<i>Ilustración 64 Análisis de regresión lineal, a partir de graficar el Índice de absorción vs <math>Vt</math> para el espécimen 4 de la mezcla Az.</i> .....	109
<i>Ilustración 65 Resultados carbonatación 90 días y proyección a 25 años</i> .....	110
<i>Ilustración 66 Resultados carbonatación 1250 días y proyección a 25 años</i> .....	111
<i>Ilustración 67 Resultados carbonatación 320 días y proyección a 25 años</i> .....	111
<i>Ilustración 68 Correlación entre la resistividad eléctrica y la compresión simple a edades de 90, 180 y 1250 días</i> .....	112
<i>Ilustración 69 Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y la compresión simple</i> .....	113
<i>Ilustración 70 Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y resistividad eléctrica</i> .....	113

## Índice de tablas

<i>Tabla 1 Componentes del cemento</i> .....	24
<i>Tabla 2 Clasificación de los cementos con la norma vigente (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)</i> .....	25
<i>Tabla 3 Componentes químicos del cemento (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, &amp; Tanesi, 2004)</i> .....	27
<i>Tabla 4 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas, (NMX-C-122-ONNCCE, 2014)</i> .....	37
<i>Tabla 5 Propiedades requeridas por especificación para cada tipo de mortero, (ASTM-C270, 2014)</i> .....	42
<i>Tabla 6 Ejemplo para reportar granulometría</i> .....	62
<i>Tabla 7 Especificaciones granulométricas (ASTM C33 / C33M - 16, 2016).</i> .....	63
<i>Tabla 8 Condiciones establecidas para el material que pasa por la malla N°200</i> .....	67
<i>Tabla 9 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (NMX-C-514-ONNCCE, 2016)</i> .....	85
<i>Tabla 10 Criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico (NMX-C-275-ONNCCE, 2016)</i> .....	87
<i>Tabla 11 Criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico (RED DURAR , 2000)</i> .....	87
<i>Tabla 12 Tabla de registro para resistencia compresión simple</i> .....	89
<i>Tabla 13 Resultados de la caracterización de la arena</i> .....	100
<i>Tabla 14 Resultados de la prueba de fluidez para cada adición</i> .....	102
<i>Tabla 15 Índice de actividad puzolánica a los 28 días</i> .....	106
<i>Tabla 16 Resultados de la prueba de porosidad efectiva a 1250 días</i> .....	109
<i>Tabla 17 Constantes de carbonatación</i> .....	110
<i>Tabla 18 Vida útil promedio de las mezclas por carbonatación</i> .....	112

## Dedicatorias

A mis padres,

**Angélica Hernández Reséndiz**, por demostrarme que cualquiera puede salir adelante, siempre hay una manera. Desde siempre me has enseñado que, sin importar lo difícil que parezca alcanzar una meta, esta solo está separada por tiempo, paciencia y disciplina. Siempre impulsas todos mis sueños y proyectos, me apoyas con todo lo que está a tu alcance y me pones los pies sobre la tierra cuando más lo necesito. Por aguantar mis viajes y ausencias, por demostrarme que la distancia solo separa cuerpos, pero nunca corazones y almas. Por enseñarme a encontrar ese balance entre la vida personal y profesional, a no cargar problemas ajenos y no dejarse hundir por los propios. Me enseñaste que está bien no estar bien y a moldearse de acuerdo a las circunstancias, se vale cambiar las pasiones y aficiones. Por inculcarme siempre un sentido de altruismo para ayudar a todo el que lo necesite por convicción y no por compromiso, así como nunca ver a nadie por encima del hombro.

**Héctor Carreón Nieto**, por siempre instruirnos con el ejemplo. A mantenernos abiertos a nuevas posibilidades y oportunidades sin renunciar a nuestros ideales y convicciones. Por ser un referente de sacarle provecho a nuestras aptitudes y con ellas lograr lo que nos proponíamos. De ti aprendí que es de sabios detenerse en el camino o incluso retroceder para tomar impulso. Me enseñaste a cuestionar todo y no porque una opinión sea popular, significa sea la correcta. Por ti es que aprendí la importancia de escuchar, a hacer más preguntas y a hablar menos de mí. Es por ti que dejé de aferrarme a cosas efímeras y comencé a concentrarme más en las cosas que tienen un valor, como la familia, los amigos y los momentos, para separarme de aquellas que solo tienen un precio.

Por ambos es que sigo creciendo y aprendiendo día a día. La mejor herencia que me han podido dejar es todo su conocimiento y mi educación. Sin importar el tiempo, la distancia y las circunstancias, el amor y la admiración que tengo por ustedes, nunca va a cambiar.

## Agradecimientos

A mi familia, por forjarme del carácter necesario para seguir adelante y hacerme creer en mí para levantarme y aprender de los momentos difíciles.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por formarme con conocimientos y valores. Por darme la oportunidad de ser un nicolaíta e ir compartiendo su esencia a donde sea que vaya.

A la Facultad de Ingeniería Civil que, conformado por todos mis profesores, me han dado los conocimientos necesarios para seguir en mi carrera profesional. Por presentarme a quienes fueran mis grandes amigos dentro y fuera de las aulas, Yonatan, Ángel Saucedo, David Macedonio, José Pablo, Juan Pablo Herrejón, Azucena, Karen Rangel y Tania; sin ustedes, probablemente no estaría aquí en estos momentos.

Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, a todas las áreas dentro de él, siempre todos los laboratoristas y los alumnos de servicio social me ayudaron a desarrollar este proyecto, así como me dejaron participar en muchos más.

Al Dr. Wilfrido Martínez Molina, porque desde los primeros días de conocerme, vio en mí muchas cualidades que yo no sabía que tenía y me ayudó a desarrollarlas. Desde siempre puso su confianza en mí y sin este apoyo no habría podido lograr todos mis proyectos dentro y fuera de la institución. Gracias por siempre creer en mí y regresarme la fe en mí cuando más lo necesitaba.

A la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, al enseñarme que no es cuestión de suerte, sino cuestión de trabajo duro y horas de dedicación para llegar a donde uno se lo propone. Por enseñarme a tratarnos a todos por igual por el simple hecho de ser personas y lidiar con todos los comentarios externos, dándole la misma importancia a los negativos como a los halagos, sin ensañarnos en ninguno.

Sandra, Báez e Ingrid, por compartirme todo lo que saben, darme sus herramientas y ayudarme a lo largo de varios años. Desde el primer día, sin saber tanto de mí y sin prejuicios, me siguen apoyando y creen en mis ganas de seguir creciendo. Gran parte de este camino lo pude recorrer gracias a ustedes.

## I. Resumen

La construcción civil es actualmente una de las actividades humanas que afectan de manera considerable al medio ambiente, esto debido al consumo de recursos naturales y la generación de residuos derivada de ella.

Como parte de la solución a dicho problema, se propone usar sílice geotérmica (residuo derivado de las plantas geotérmicas), para disminuir el consumo de Cemento Portland (CP) en la elaboración de morteros, el motivo de este ejercicio es el disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la producción de CP, así como mejorar las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad en los morteros.

Se realizaron muestras de tres morteros con base de CP diseñadas en laboratorio bajo la norma ASTM-C-109, evaluando las propiedades de durabilidad y físico-mecánicas. Fueron una mezcla testigo, sin alterar y dos con sustituciones parciales del 5% de la masa del cemento por sílice. La primera, fue con sílice proveniente de la planta geotérmica Cerro Prieto, en Baja California, México. La segunda se realizó con material proveniente de Los Azufres en Michoacán de Ocampo, México. El agregado pétreo utilizado para las mezclas se caracterizó siguiendo la norma NMX-C-111-ONNCCE-2004. El diseño de las muestras fue con una relación agua/cementante de 0.65 y una fluidez de 110±5%.

La elaboración de las muestras fue en distintas geometrías; cúbicas, prismáticas, cilíndricas y en forma de briquetas. Dichas se evaluaron a 90 días, 180 y 1250 días.

Conforme a los resultados obtenidos, se observa que, este tipo de sustituciones pueden ser un reemplazo en las cantidades utilizadas de CP en morteros, se ve reflejada una mejora en la durabilidad y desempeño mecánico comparado con los morteros convencionales. Aunado a que, México es uno de los principales generadores de energía eléctrica con base a procesos geotérmicos y, por lo tanto, un generador del subproducto (sílice), su aplicación como material cementante en la construcción, podría significar un gran impacto ecológico a México.

**Palabras claves:** sílice, mortero, cemento Portland

## II. Abstract

Civil construction is currently one of the human activities that significantly affect the environment, this due to the consumption of natural resources and the generation of waste derived from it.

As part of the solution to this problem, it is proposed to use geothermal silica (waste derived from geothermal plants), to reduce the consumption of Portland Cement (CP) in mortar processing, the reason for this exercise is to reduce CO<sub>2</sub> emissions generated by cement production, as well as to improve the physical-mechanical and durability properties in mortars.

Samples of three CP-based mortars designed in the laboratory under ASTM-C-109 were sampled, evaluating durability and physique-mechanical properties. They were a witness mixture, un altered and two with partial substitutions of 5% of the cement mass by silica. The first was with silica from the Cerro Prieto geothermal plant in Baja California, Mexico. The second was made from material from Los Azufres in Michoacán de Ocampo, Mexico. The stone aggregate used for mixtures was characterized according to NMX-C-111-ONNCCE-2004. The sample design was with a water/cement ratio of 0.65 and a fluidity of 110±5%.

The preparation of the samples was in different geometries; cubic, prismatic, cylindrical and briquette-shaped. These were evaluated to 90 days and 1250 days.

According to the results obtained, it is observed that, this type of substitutions can be a replacement in the amounts used of CP in mortars, an improvement in mechanical durability and performance compared to conventional mortars is reflected. In addition, Mexico is one of the main generators of electrical energy based on geothermal processes and, therefore, a generator of the by-product (silica), its application as a cementing material in construction, could mean a great ecological impact to Mexico.

Keywords: silica, mortar, Portland cement

### III. Justificación

Al interior de la Tierra se transmite calor a través de los cuerpos de roca e interactúa con el agua subterránea y después de varios procesos de conducción y convección dan paso a sistemas geotérmicos. Dichos sistemas dan paso a la energía geotérmica, la cual es una fuente de energía renovable capaz de generar electricidad de manera constante las 24 horas del día. Actualmente se generan mediante las plantas geotérmicas entre 73 y 95 GW anualmente.

México tiene instalada una potencia neta de 720 MWe en la planta de Cierro Prieto, mientras en Los Azufres se tiene una de 270.5 MWe, en Los Humeros 119.8 MWe, Tres Vírgenes 10 MWe y la más nueva es Domo de San Pedro con 35.5 MWe. Colocándose en 2020 como la sexta potencia mundial en generación de energía geotérmica.

Debido a las condiciones meteorológicas y fisicoquímicas del fluido geotérmico, se da paso a procesos de incrustación. La sílice es la principal incrustación en las plantas geotérmicas y se presenta como especie disuelta en todos los líquidos dominantes de los recursos geotérmicos. Conforme la salmuera comienza a ascender y va enfriándose por separación del vapor, la concentración de sílice rebasa la solubilidad, debido a esto es que a temperaturas cercanas a los 100° Celsius a causa de la sobresaturación se separa la sílice. Posterior a este proceso, la sílice termina incrustándose en las tuberías transportadoras de salmuera y vapor.

Esta situación lleva a que el control de incrustaciones sea una actividad esencial para en los programas de operación y mantenimiento de los campos geotérmicos. Las incrustaciones impactan directamente en la eficiencia de los procesos y operaciones, teniendo repercusiones en pérdidas económicas y disminuyendo la oportunidad de negocio de esta industria.

Los residuos emitidos a la atmósfera debido a la elaboración de CP a nivel mundial han llegado a cifras alarmantes, ya que es el material de construcción más utilizado actualmente. En un estudio publicado en Earth System Science Data, se estima que la emisión de CO<sub>2</sub> a causa de la producción de cemento en el año 2018 fue de 1.5 Gton, el cual representa cerca del 8% de las emisiones totales en el planeta.

Para intentar contrarrestar estos impactos negativos en el medio ambiente, surge la necesidad de encontrar materiales alternos que disminuyan el consumo de recursos naturales, la demanda de energía en su fabricación y el costo final del producto, todo esto sin dejar de lado las propiedades y características del material.

Aprovechando que México es uno de los 10 mayores productores de energía geotérmica, se propone utilizar la sílice geotérmica, producto de deshecho de esta industria, como material puzolánico cementante en mortero y reducir de esta manera el consumo de CP, sin demérito de las propiedades del mortero aglutinante.

Geotermia en México.

Mediante la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se operan 4 campos geotérmicos de tipo hidrotermal con una capacidad instalada superior a los 900 Megawatts eléctricos, capacidad suficiente para satisfacer la demanda eléctrica de aproximadamente dos millones de hogares en territorio nacional. Por otra parte, Grupo Dragón, una empresa privada mexicana, opera el campo denominado Domo San Pedro, ubicado en Nayarit y con una capacidad de 10 MWe. Para el aprovechamiento de dichos recursos, se tienen alrededor de 230 pozos de producción que se encuentran entre 1,500 y 3,500 m de profundidad. (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, 2019)

Países por orden de capacidad geotermoeléctrica instalada:

- |                              |                  |
|------------------------------|------------------|
| 1. Estados Unidos de América | 4. Turquía       |
| 2. Indonesia                 | 5. Nueva Zelanda |
| 3. Filipinas                 | 6. México        |

En México existen dos proyectos privados, con base en permisos de autoabastecimiento y de pequeña producción expedidos bajo el marco regulatorio previo a la reforma energética. Estos proyectos se encuentran en Nayarit, hablamos del Domo San Pedro y del Volcán Ceboruco.

- a. Domo San Pedro
  - Ubicación: Nayarit

- Fase: Instalación de dos primeras unidades de 5 MW c/u
- Año de operación: 2015
- Objetivo a futuro: Una unidad de 25 MW

b. Volcán Ceboruco

- Ubicación: Nayarit
- Fase: Operación de los primeros pozos exploratorios
- Año de operación: 2015
- Objetivo a futuro: Potencial superior a los 100 MW (según la empresa Mexxus-RG)

Con todo esto se demuestra el potencial geotermoeléctrico del país es muy superior. Las reservas geotérmicas probadas y probables en los cuatro campos geotérmicos en explotación y en un quinto campo aun no explotado, denominado Cerritos Colorados, han sido estimadas en unos 430 MW adicionales. (Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica, 2018).

Con lo antes mencionado, se ve que México tiene un amplio potencial para desarrollarse en temas de energía geotérmica y por consiguiente una fuente generadora de sílice geotérmica.

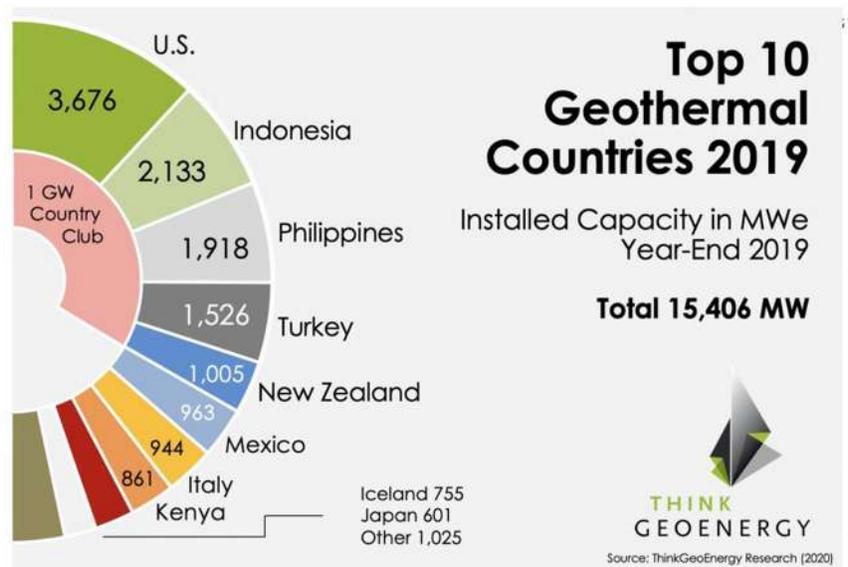


Ilustración 1 Principales productores de energía geotérmica. (Think GeoEnergy Research 2020)

## IV. Hipótesis

La sílice geotérmica presenta características puzolánicas, se busca que en combinación con el hidróxido de calcio del cemento genere un componente llamado silicato de calcio, el cual se propone pueda ser una sustitución que iguale o mejore las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad en los morteros convencionales.

## V. Objetivo general

Determinar si el uso de residuos industriales geotérmicos es óptimo para la elaboración de mortero base cemento Portland sin ver afectadas sus propiedades físicas, mecánicas y durables, así como sus aplicaciones en la industria de la construcción, de esta manera sustituir parcialmente el cemento en los proporcionamientos de morteros y promoviendo su utilidad en la industria de la construcción.

## VI. Objetivos específicos

Diseñar, elaborar y evaluar el desempeño de mezclas de mortero con sustituciones parciales de sílice con base a su masa de CP, la finalidad de esto es mejorar sus características físicas, mecánicas y de durabilidad.

Proponer que el material residuo de un proceso geotérmico sea una alternativa que ayude a disminuir el consumo de recursos naturales en la industria cementera y de la construcción.

Disminuir la cantidad de dióxido de carbono emitido a la atmósfera en el proceso de producción de CP.

Evaluar que las características físicas, mecánicas y durables de esta mezcla con sustitución, sean iguales o mejores que los morteros convencionales con base CP.

## 1. Introducción

Desde hace varios años, el cemento portland ha sido uno de los materiales más utilizados en la construcción debido a sus múltiples aplicaciones, así como sus grandiosas propiedades mecánicas presentes al momento de fraguar o endurecer.

En el año 2018 se tuvo una producción de 43 millones de toneladas de cemento gris solamente en México (CANACEM, 2020) y esta cifra va en aumento anualmente a consecuencia del crecimiento demográfico de nuestra población. Aunado a esto, la producción de una tonelada de cemento libera cerca de una tonelada de CO<sub>2</sub> y gases de NO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, asociados a la descarbonatación de la caliza en el horno de clinkerización, colocando de esta manera la producción de CP como uno de los procesos más contaminantes en el proceso de obtención del clinker.

En el caso puntual de la industria de la construcción, se ve que, en el proceso de fabricación de los materiales hay una gran demanda de recursos naturales y se generan grandes cantidades de residuos, entre ellos la emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera en cantidades alarmantes. Todo esto, sin contar la cantidad de energía utilizada en los procesos.

Debido a esto, la industria cementera y grupos de investigadores a nivel mundial han tomado la iniciativa de optimizar sus procesos de producción y desarrollar materiales alternativos para que la creación de CP no sea tan agresiva con el medio ambiente, pero al mismo tiempo conservar las características y calidad del CP.

Se enfocó esta investigación en los residuos geotérmicos (sílice) empleados como materiales alternativos en la construcción. La evaluación se realizó a mezclas de mortero con sustitución del 5% de la masa del CP por sílice geotérmica. Se realizaron dos mezclas con sílices de distintos orígenes, la primera fue de la planta geotérmica Cerro Prieto, Baja California, México y la segunda fue con sílice de Los Azufres, Michoacán, México.

## 2. Marco teórico

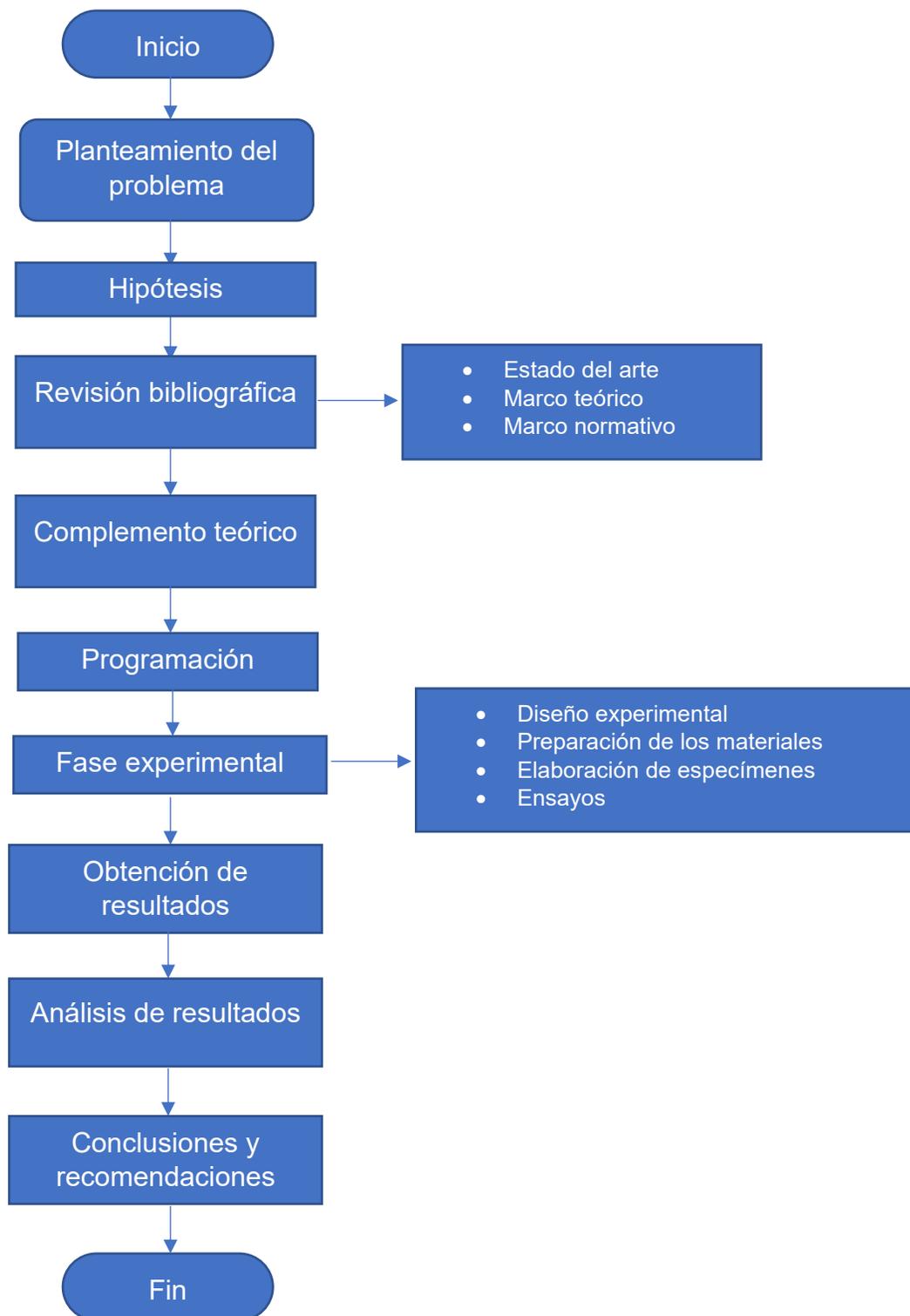
### 2.1 Metodología

La metodología utilizada para el desarrollo de esta investigación fue segmentada en 9 etapas y se ilustran en la Figura 1:

1. **Planteamiento del problema:** El hecho del alto consumo de CP a nivel mundial, trae consigo una alta emisión de CO<sub>2</sub> a la atmósfera durante su fabricación, dañando de esta manera severamente el medio ambiente. Se propone el uso de sílice como sustituto parcial como posible solución.
2. **Hipótesis:** Se plantea la idea y el desempeño esperado al realizar y al finalizar la investigación.
3. **Revisión bibliográfica:** Se divide en dos, revisar el estado del arte de la investigación de morteros con sustituciones/adiciones de materiales residuales y el marco teórico-normativo que fundamente su comportamiento en términos de durabilidad.
4. **Complemento teórico:** Al estudiar el marco teórico y el normativo sobre matrices de mortero, se llegó a la conclusión que se requiere complementar la teoría normativa para los diferentes métodos de ensayos a realizar. Al ser así, en esta fase se desarrolló la consulta en investigaciones realizadas a matrices de mortero y concreto para poder concretar un mejor procedimiento de los ensayos a realizar.
5. **Calendarización:** Teniendo la explicación teórica del fenómeno fundamentada, se calendarizan las actividades a realizar, tales como el diseño experimental, fechas de elaboración de especímenes y fechas de ensayos a realizar.
6. **Fase experimental:** Para esta fase se presenta el diseño del experimento, preparación de los materiales seleccionados para su uso, elaboración de especímenes, métodos de prueba y normas empleadas.
7. **Obtención de resultados:** Se realiza la presentación de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales.

8. **Análisis de resultados:** Se discute el significado de los resultados en términos de sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad
9. **Conclusiones y recomendaciones:** Al final, se presentan algunas de las conclusiones obtenidas mediante esta investigación y de la misma manera, recomendaciones que puedan tomarse como sugerencia para el futuro desarrollo del tema.

Para poder entender gran parte de las actividades y propósitos de esta investigación, se presentan primeramente los resultados obtenidos de la bibliografía consultada, otorgando así una perspectiva resumida del estado actual del estudio del material, sus sustituciones y sus adiciones con residuos industriales a matrices de mortero.



*Ilustración 2* Esquema metodológico de la investigación. (Eduardo Carreón Hernández).

## 2.2 Antecedentes

Existen principalmente dos tipos de incrustaciones formadas a altas temperaturas en los campos geotérmicos. Se van generando capas gruesas de productos corrosivos o depósitos minerales insolubles en agua, estas se quedan en la superficie de los equipos y se terminan incrustando en ellas. En las aguas geotérmicas altamente concentradas, especialmente salmueras calientes, es un problema común la incrustación y conforme la temperatura de este fluido disminuye en el trayecto por los sistemas de distribución, la incrustación se convierte en un problema más serio. No todos los fluidos se comportan igual y la incrustación varía de diferentes maneras dependiendo de su composición física y química, algunos factores son: temperatura, salinidad, pH, densidad, gases disueltos, saturación, cinética y termodinámica del proceso de precipitación y régimen de flujo. (Báez Ángel, 2018)

En todos los líquidos dominantes de los recursos geotérmicos se presenta una especie disuelta que se convierte en la principal incrustación de los campos geotérmicos, la sílice. Los fluidos geotérmicos ascendentes disuelven  $\text{SiO}_2$  (sílice amorfa) de las formaciones rocosas y alcanzan la saturación con respecto al cuarzo en sistemas acuosos a altas temperaturas.

En la actualidad, existen algunas plantas que extraen sílice para comercializar con ella, generando de esta manera una ganancia extra para la industria geotérmica.

El  $\text{SiO}_2$  es empleado en la producción de materiales para superficies de caminos, fabricación de ladrillos para viviendas de bajo costo, con la adición de fibras plásticas para mejorar resistencia mecánica y a la intemperie, también para la elaboración de dispositivos cerámicos y vidrio. La sílice es una sustancia que puede aparecer en diferentes tipos de estructuras: celular, esponjosa, laminar densa, bloques sólidos, porosa (con un rango entre 40 a 80%). También se pueden generar geles viscosos que cristalizan como deposiciones de ópalo. Una remoción temprana del  $\text{SiO}_2$  evita problemas de incrustación y permite una producción adicional al vapor. (Báez Ángel, 2018)

### 2.3 Reseña histórica de los morteros

El descubrimiento de la cal como ligante y el mortero de cal es un tema de especulación, ya que algunos autores (Furlan, 1975) renuncian a datar los primeros morteros de cal, mientras que otros (Malinowski, 1991) lo sitúan muy al comienzo de la Historia del hombre cuando éste empezó a usar el fuego para calentarse en cuevas de rocas calizas o cuando se preparaba la comida en hogares construidos de dicho material. La caliza calcinada se apagaba en contacto con la humedad o la lluvia, y el polvo resultante tenía propiedades ligantes de materiales.

El origen del empleo del mortero de cal parece remontarse a la época neolítica. El presente estudio ofrece una revisión histórica del desarrollo de los morteros como materiales ligantes en construcción a través de las distintas civilizaciones, todo ello desde la perspectiva de las técnicas de aplicación, de la composición de las mezclas, durabilidad y calidad de las mismas.

Los egipcios dominaban la preparación y aplicación de los morteros de yeso, mismo que se encuentra en el mampostado de los bloques de la pirámide de Keops, construcción que data del 2600 A.C. (Báez Ángel, 2018). Griegos y romanos perfeccionaron enormemente la técnica de mortero de cal, a partir del descubrimiento que ciertos materiales volcánicos (cenizas) mezclados con caliza y arena producían un mortero de gran fuerza. Estas cenizas las encontraron en un lugar llamado Puteoli, conocido hoy como Puzzuoli, de aquí que a este cemento se le llamase cemento de puzolana. En el medievo la situación socioeconómica influyó de forma decisiva en que no se destacara ningún progreso técnico notable. En el S. XVIII comienza la aparición de ligantes hidráulicos modernos que desembocará en el siglo siguiente con el revolucionario cemento Portland.

En el siglo XIX, Vicat realizó una serie de investigaciones que describían el comportamiento hidráulico de las mezclas de caliza y arcilla, y propuso en 1818 el sistema de fabricación que se sigue empleando en la actualidad. (Vaca Arciga, 2017) Vicat encaminó la fabricación del cemento por medio de mezclas calizas y arcillas dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente. Este sistema es de vía húmeda y orientó el inicio del actual proceso de fabricación.

En 1824, James Parker y Joseph Aspdin patentan el Cemento Portland dándole este nombre por motivos comerciales, en razón de su color y dureza que recuerdan a las piedras de Portland, materia que obtuvieron de la calcinación a alta temperatura de una caliza arcillosa.

#### 2.4 Adiciones y sustituciones de materiales residuales en morteros convencionales

La tecnificación del material en el siglo XXI produce desde las últimas décadas un desplazamiento de los morteros hechos in situ a favor de los morteros industriales. Finalmente, la mayor exigencia ambiental y control en las propiedades de los morteros, provoca en los últimos años una fuerte tendencia hacia el desarrollo de morteros elaborados con materiales alternos que presenten ser ecológicos y generen un impacto positivo ambientalista.

Ingenieros de la UMSNH (Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo), Job Daniel Álvarez Pita (ALVAREZ PITA, 2016), Luis Colín Velázquez (VELÁZQUEZ, 2016), Laura Arcelia Vaca Arciga (VACA ARCIGA, 2017), Alonso Alejandro Velázquez Roblero (VELÁZQUEZ ROBLERO, 2017), Ingrid Susana Santillán Barragán (Santillán Barragán, 2017), Víctor Manuel Báez Ángel (BÁEZ ÁNGEL, 2018) por mencionar solo algunos, han sido autores en investigaciones independientes sobre matrices de mortero con adiciones y sustituciones de materiales residuales y ecológicos. Siendo el presente trabajo una continuación a la investigación iniciada por Ingrid Santillán Barragán y Víctor Manuel Báez Ángel en 2018.

Las invenciones que se han tenido pretenden la formulación de una mezcla de mortero eficaz y eficiente, definido como un mortero ecológico-alternativo con base en una mezcla de materiales residuales que mejoren o igualen las propiedades mecánicas, físicas y durables de un mortero convencional y que a su vez se les dé un uso a estos materiales residuales.

## 2.5 Cemento Portland

El cemento es un material que se le atribuye las propiedades adhesivas, así como cohesivas, y a partir de ellas le otorgan la capacidad de aglutinar permitiendo el ligamento de fragmentos de minerales entre sí, estableciendo un elemento compacto. El cemento para albañilería o mortero, es el material formado por un cementante hidráulico finamente pulverizado que puede contener uno o más de los materiales: clinker Portland, piedra caliza, arcilla puzolana, escoria granulada de alto horno, ceniza volante y yeso; que el agregarle agua y arena tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el agua y formar una masa endurecida que adquiere resistencia mecánica con el paso del tiempo hasta un punto máximo. (NMX-C-021-ONNCCE, 2015).

### 2.5.1 Proceso de fabricación del cemento Portland

El cemento Portland se produce por la pulverización del Clinker, el cual consiste principalmente en silicatos de calcio hidráulicos, también contiene algunos aluminatos de calcio y ferro aluminatos de calcio y una o más formas de sulfato de calcio (yeso) se muele conjuntamente con el Clinker para la fabricación del producto final. Los materiales utilizados en la fabricación del cemento Portland deben contener cantidades apropiadas de los compuestos de calcio, sílice, alúmina y hierro. Cada planta de cemento es diferente, no hay instalaciones típicas para la producción del cemento, tiene diferencias significantes en disposición, equipos o apariencia general, se considera el siguiente proceso de obtención del cemento Portland (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

1. La roca se reduce hasta un tamaño de 125 mm (5 pulgadas) para después reducirla a 20 mm (3/4 pulgadas) y después se almacena.
2. Las materias primas se muelen hasta que se vuelvan polvo y se mezclan con el agua para formar una lechada.
3. Se transforman químicamente las materias primas mediante la calcinación para obtener el Clinker de cemento.
4. Se mezcla el Clinker con el yeso para convertirlos en cemento Portland y se almacena para después envasarlo.

Todos estos compuestos reaccionan dando como resultado nuevas especies químicas que son los principales componentes del cemento Portland, tabla 1.

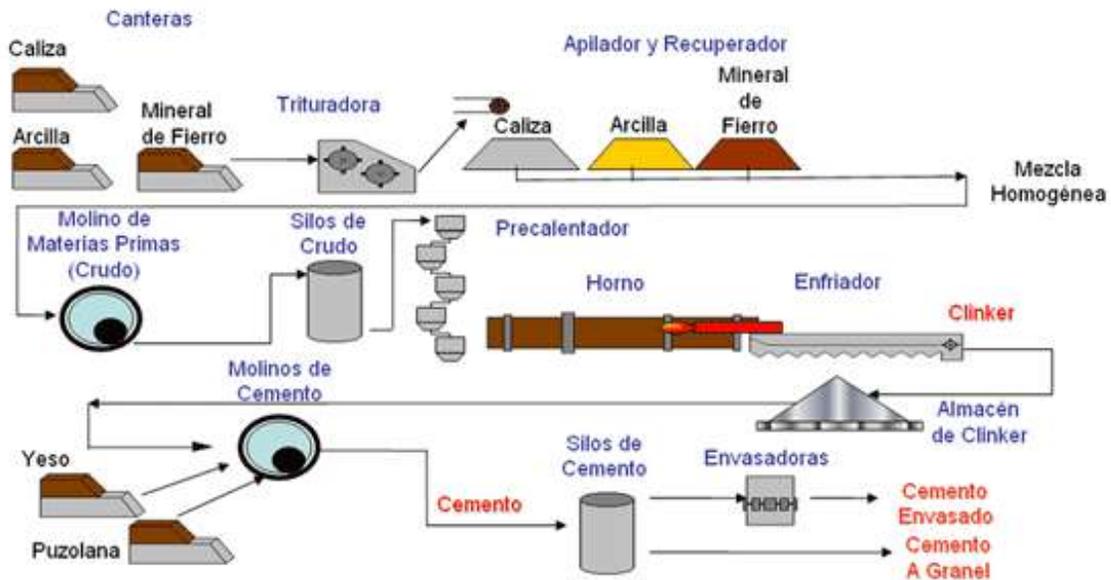


Ilustración 3 Esquema del proceso de la producción del cemento. (CANACEM, 2016)

T

Tabla 1 Componentes del cemento

Componente	Fórmula	Fórmula Abreviada
Silicato Dicálcico (belita)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C <sub>2</sub> S
Silicato Tricálcico (alita)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C <sub>3</sub> S
Aluminato Tricálcico (celita)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C <sub>3</sub> A
Ferroaluminato tetracálcico o Aluminoferrito tetracálcico (felita)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ o $\text{Fe}_2\text{O}_3$	C <sub>4</sub> AF

El silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S, alita) es la fase más abundante, y que le confiere las propiedades características al CP, con una hidratación rápida, resistencias iniciales altas y finales óptimas, calor de hidratación moderadamente alto y responsable de las mayores resistencias mecánicas del cemento. El silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S, belita) es de hidratación lenta, resistencias iniciales bajas y finales buenas, y calor de hidratación bajo. Aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A), de hidratación muy rápida, calor de

hidratación elevado que proporciona resistencias tempranas, pero produce retracción en la hidratación. Además, es el componente que reacciona con los sulfatos produciendo fases expansivas como la etringita. El ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF), es de hidratación lenta y regular, apenas contribuye al desarrollo de resistencias, con calor de hidratación moderado, tiene un color pardo oscuro, que junto con la magnesia (MgO), da un color verde grisáceo oscuro, siendo por lo tanto responsable del color característico del CP. Es la fase que menos importancia tiene en las propiedades del cemento, variando según la proporción de aluminio o hierro disponible.

### 2.5.2 Clasificación del cemento

Actualmente en México tenemos una clasificación en los cementos, marcada por la NMX-C-414-ONNCCE, 2017 como se muestra en la tabla 2. Esta clasificación es a nivel nacional, para nomenclaturas internacionales, se utiliza la proporcionada por la ASTM.

*Tabla 2 Clasificación de los cementos con la norma vigente (NMX-C-414-ONNCCE, 2017)*

Tipo	Denominación	Clase Resistente	Características Especiales
<b>CPO</b>	Cemento Portland Ordinario	20	RS (Resistente a los Sulfatos)
<b>CPP</b>	Cemento Portland Puzolánico	30	BRA (Baja Reactividad Álcali Agregado)
<b>CPEG</b>	Cemento Portland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R (R= Resistencia rápida)	BCH Bajo calor de Hidratación
<b>CPC</b>	Cemento Portland Compuesto	40	B (Blanco)
<b>CPS</b>	Cemento Portland con Humo de Sílice	40 R	-
<b>CEG</b>	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	-	-

### 2.5.3 Propiedades del cemento

Analizar las propiedades del CP, nos permite conocer algunas características y beneficios de su uso como material cementante. Estas propiedades pueden ser de carácter químico, físico y mecánico; dependiendo del estado en el cual se encuentre.

#### *Propiedades físicas*

Podemos considerar el cemento como un material aglomerante, al ser tratado como tal, cuenta con propiedades físicas, de las cuales resaltamos: densidad, finura, consistencia normal, tiempos de fraguado y expansión. Con estas propiedades, podemos formar un criterio de evaluación al cemento, mortero y concreto, estas pueden variar dependiendo del cemento a utilizar.

- **Densidad:** Se establece como la relación de una masa entre el volumen absoluto de esa masa. El valor de la densidad en el cemento Portland suele variar muy poco y tener un valor cercano al  $3.15 \text{ gr/cm}^3$ . Para cementos modificados o con adiciones, es menor, ya que el contenido de clinker por tonelada de cemento es inferior, dando resultados alrededor de  $2.9 \text{ g/cm}^3$ , dependiendo del porcentaje de adiciones. Directamente la densidad de un cemento, no nos dicta la calidad de él, pero nos puede ayudar a saber si ha tenido modificaciones con adiciones o sustituciones.
- **Finura:** Es en el proceso de molienda del clinker y yeso donde se ve determinada la finura del cemento, en otras palabras, es el tamaño de las partículas del cemento. La finura del cemento participa directamente en procesos como la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia. La presencia de una alta finura en un cemento, tenemos una velocidad de endurecimiento mayor (debido a una rapidez de hidratación mayor) y tiene un desarrollo rápido de resistencia.
- **Consistencia normal:** Se refiere a la movilidad o habilidad de fluir cuando se tiene una mezcla fresca de pasta o mortero. Se realizan distintas mezclas de mortero para determinar una relación agua-cemento fija o proporcionar

una fluidez dentro de un rango antes establecido. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 23 y 33%.

- **Tiempos de fraguado:**
  - **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que se realiza la adición de cemento y agua hasta el momento en que la pasta deja de tener fluidez y ser plástica.
  - **Fraguado final:** tiempo necesario para que la pasta alcance un grado de endurecimiento y resistencia a cargas ligeras sin ser deformado. Se refleja como una mayor hidratación en el cemento.
  - **Fraguado falso:** se presenta en el momento que se tiene una pérdida considerable de plasticidad, justo después del mezclado, pero sin presencia de calor. Esto ocurre cuando una gran cantidad de sulfatos se deshidrata en el molino de cemento formando yeso.
- **Expansión:** Se refiere a la habilidad de la pasta de cemento en mantener su volumen. La falta de sanidad o la expansión destructiva retardada se puede causar por la cantidad excesiva de cal libre o magnesia supercalcinadas. La mayoría de las especificaciones para cemento Portland limitan el contenido de magnesia (periclusa) y la expansión máxima (ASTM-C-151-00, 2014).

#### *Propiedades químicas*

Durante la producción del cemento se produce una transformación de las materias primas a productos con mejores características, por medio de reacciones en estado sólido. Los cuatro compuestos principales del cemento se forman a partir de óxidos, como se muestra en la tabla 3.

*Tabla 3 Componentes químicos del cemento (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)*

<b>Nombre</b>	<b>Composición</b>	<b>Abreviatura</b>
<i>Silicato Tricálcico</i>	$3CaO.SiO_2$	$C_3S$
<i>Silicato Dicálcico</i>	$2CaO.SiO_2$	$C_2S$
<i>Aluminato Tricálcico</i>	$3CaO.Al_2O_3$	$C_3A$

*Aluminoferrito Tetracálcico*

$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$

$C_4AF$

Todos y cada uno de los componentes del cemento contribuyen de una u otra forma a la resistencia, pues es claro que todos los productos de hidratación llenan espacios, reduciendo con ellos la porosidad en el mortero y concreto.

- **Hidratación del cemento:** la reacción mediante la cual el cemento Portland se transforma en un agente de enlace, se genera por los procesos químicos responsables de la formación de compuestos durante la adición del agua al cemento, los cuales originan propiedades mecánicas útiles en aplicaciones estructurales.
- **Calor de hidratación:** es el calor generado por la reacción exotérmica creada al momento de mezclar el agua y el cemento. Esta temperatura puede variar y depende de factores como la cantidad de dos componentes químicos que son  $C_3A$  y el  $C_3S$  que son los más relevantes en la evolución de calor en la mezcla. Un aumento en la finura, contenido de cemento y temperatura de curado pueden aumentar el calor de hidratación.

#### *Propiedades Mecánicas*

- **Resistencia a la compresión:** es aquella obtenida por la prueba de cubos o cilindros, representa la carga por unidad de área, realizándose a morteros de acuerdo con las normas (NMX-C-061-ONNCCE, 2015), (ASTM-C-109-M, 2002) y (AASHTO-T-106, 2002)
- **Resistencia a la flexión:** prueba en la que se pretende conocer el comportamiento del mortero (una parte de cemento y 2.75 de arena graduada) cuando es sometido a esfuerzos de flexión en prismas de 40mm x 40mm x 160 mm, siguiendo el procedimiento establecido en la norma (ASTM-C-348, 1997).

#### *Cemento usado en la Investigación*

El cemento que se utiliza en esta investigación es un CPC 30R RS. Esto significa que es un Cemento Portland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 28 días de 30 MPa y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-ONNCCE, 2014)

El cemento Portland resistente a los sulfatos, es aquel que presenta a un bajo contenido de Aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) la norma inglesa para este cemento, (BS-4027:1980, 2000), estipula un contenido de  $C_3A$ , del 3.5%. La finura mínima es 250  $m^2/kg$ .

Ha sido diseñado para estructuras que necesiten moderada resistencia a los sulfatos o bajo calor de hidratación. Se recomienda en edificios y construcciones industriales, puentes, estructuras expuestas a suelos, al agua con concentración moderada de sulfatos o al agua de mar o estructuras con gran volumen de concreto, en estos cementos el contenido de  $C_3A$  se limita a 8% (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Desde el punto de vista químico, se debería esperar que el  $C_4AF$  formara sulfoaluminato de calcio y sulfoferrita de calcio y, por lo tanto, que produjera expansión. Sin embargo, la acción del sulfato de calcio en el cemento hidratado disminuye al reducirse la relación  $Al_2O_3:Fe_2O_3$ .

Este cemento ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos y se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de éstos, especialmente donde los suelos o aguas freáticas tengan alto contenido de sulfato. El cemento CPC 30R RS, genera moderado calor de hidratación ya que el  $C_3S$  y el  $C_3A$ , que son los que producen alto calor de hidratación, disminuyen notablemente.

El ataque de los sulfatos ocurre porque el Aluminato tricálcico ( $C_3A$ ), reacciona químicamente con los sulfatos presentes en el medio ambiente formando un compuesto de mayor volumen, llamado sulfoaluminato de calcio, el cuál por ocupar más espacio, origina esfuerzos internos en la pasta de cemento que pueden llegar a desintegrarla.

Es por ello que el cemento CPC 30R RS hace una fuerte reducción del contenido de sulfoaluminato de calcio, para que cuando el concreto sea atacado por los

sulfatos, se evite que la sustancia que se forma cuando esta endurecido, produzca su destrucción. (Instituto del Concreto, 1997)

## 2.6 Agregados

Los agregados pétreos, tanto finos (arenas) como gruesos (gravas) son parte fundamental al querer comprender un concreto o mortero, ya que constituyen entre el 60% y 75% del volumen (70% al 85% de la masa) en estas mezclas. A causa de este alto porcentaje en volumen ocupado por estos materiales, su influencia en el comportamiento de las mezclas es considerable, tanto en estado fresco como endurecido, por ello debemos muestrear y ensayar correctamente nuestros agregados para garantizar que sean los óptimos en nuestros diseños.

No solo se analizan para ver cómo afecta la resistencia de las mezclas, sino que también llegan a influir en la durabilidad y rendimiento estructural del concreto.

Con las primeras mezclas de concreto, el agregado pétreo se consideraba como un material inerte, bajo en costo y disperso en la pasta de cemento, capaz de producir un gran volumen de concreto. Sin embargo, es todo menos inerte, ya que sus propiedades físicas, térmicas y químicas, influyen en el desempeño correcto de un concreto, esto puede ser desde mejorar su durabilidad o dar estabilidad de volumen sobre los de la pasta de cemento.

### 2.6.1 Origen de los agregados

Los agregados naturales para concreto por lo general con una mezcla de rocas y minerales. El mineral es un sólido natural con una estructura interna ordenada y una composición química que varía dentro de los límites estrechos. Las rocas se clasifican según su origen principalmente en ígneas, sedimentarias o metamórficas, generalmente se componen con varios minerales. El intemperismo y la erosión de las rocas producen partículas de grava, arena, limo y arcilla.

- **Rocas Ígneas:** Se forman a partir del enfriamiento y solidificación de roca fundida (magma). Estas rocas representan una gran parte de la superficie de la corteza terrestre, este magma sale a la superficie mediante las erupciones

volcánicas. Cuando este enfriamiento se realiza sobre la corteza, se denomina extrusiva, mientras que al enfriarse al interior de la tierra se denomina intrusiva. Puede darse el caso en que se tenga una composición interna totalmente cristalina o vítrea o una combinación de ellas, dependiendo de su velocidad de enfriamiento. También se pueden clasificar conforme al contenido de sílice, estas pueden ser: ácidas, intermedias y básicas.

- **Rocas Sedimentarias:** En este grupo podemos englobar la mayoría de las materias primas para la elaboración de materiales de construcción. Estas rocas se forman a partir de otras rocas o minerales en la superficie terrestre y sometidos a cambios causados por la atmósfera, agua, plantas u otros organismos. Estos cambios suelen ser mecánicos o químicos. En el caso del mecánico simplemente se forman partículas más pequeñas, pero no cambia su composición. Por otro lado, el intemperismo químico es un proceso que afecta la composición del material transformándolo en uno nuevo. Estos materiales modificados, se sedimentan, litifican y cristalizan formando una roca nueva. Este proceso se va dando por capas formando estratos entre cada una de ellas.
- **Rocas Metamórficas:** Partiendo que el metamorfismo en la geología es la transformación de un tipo de roca en otra, podemos determinar que las rocas metamórficas se pueden derivar de rocas ígneas, sedimentarias e incluso de otras metamórficas. Estas pueden ser clasificadas por sus propiedades físicas y estructura interna, principalmente son dos factores, los minerales que la forman y las texturas que presentan. Se podrían englobar entre foliadas y no foliadas. (Neville & Brooks, 2010)

#### 2.6.2 Clasificación de los agregados

Conforme a la norma N-CMT-2-02-002/19, los agregados los podemos clasificar en:

- **Agregado fino:** Es arena natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño comprendido entre setenta y cinco (75) micrómetros (malla No. 200) y cuatro punto setenta y cinco (4.75)

milímetros (malla No. 4), pudiendo contener finos de menor tamaño, dentro de las proporciones establecidas en esta norma.

- **Agregado grueso:** Puede ser grava natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, escorias de altos hornos enfriadas en aire o una combinación de dichos materiales, con partículas de tamaño máximo, generalmente comprendido entre diecinueve (19) milímetros y setenta y cinco (75) milímetros (3 in), pudiendo contener fragmentos de roca y arena dentro de las proporciones establecidas en esta norma.
- **Fragmento de roca:** Son los agregados con tamaño mayor de setenta y cinco (75) milímetros (3 in) y una masa máxima de treinta (30) kilogramos, como los boleos y la piedra braza, entre otros, que se utilizan comúnmente para fabricar concreto ciclópeo.
- **Agregado ligero:** Son los agregados finos o gruesos que, por su baja densidad, se utilizan en la fabricación de concreto estructural ligero, de baja masa volumétrica y resistencia limitada a la compresión, constituidos predominantemente por materiales inorgánicos de estructura celular, preparados por expansión, calcinación o fusión incipiente de productos tales como escorias de altos hornos, arcillas comunes, diatomitas, cenizas volantes, lutitas y pizarras, o bien, mediante otros tratamientos de materiales naturales tales como piedra pómez, perlitas, tezontles, escorias y tobas.

#### 2.6.3 Propiedades de los agregados

Múltiples de las propiedades en nuestros agregados van a depender de la matriz rocosa de la cual se extrajo como, por ejemplo: su composición química, mineral, clasificación petrográfica, gravedad específica, rigidez, resistencia, estabilidad física y química, porosidad, color, etcétera. Adicionado a esto, hay algunas propiedades que no necesariamente tienen que ver directamente con su matriz, como lo son forma, tamaño, textura y absorción. Todas estas propiedades tienen una influencia considerable en la calidad de nuestras mezclas en estado fresco y endurecido. (Neville & Brooks, 2010)

Aun conociendo todas estas propiedades, es complicado definir lo que sería un buen agregado para concreto. Tanto con un agregado que cumpla satisfactoriamente las pruebas, puede hacerse un buen concreto, pero también con un agregado que haya quedado ligeramente por debajo de los parámetros se puede crear un buen concreto, es ahí donde entra el criterio del desempeño en el concreto debe ser empleado.

### *Propiedades físicas*

Diversas características físicas comunes se ven presentes en los agregados, es de gran importancia el estudiarlas y analizarlas para poder tener un mejor desempeño en nuestras mezclas. Las propiedades que nos van a interesar para nuestra investigación son: granulometría, porosidad, masa unitaria, forma y textura de las partículas.

- **Granulometría:** Es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, el cual es determinado por su paso a través de tamices (cedazos, cribas). Dentro de las razones por las que se busca establecer límites granulométricos y tamaño máximo nominal de los agregados, es por cómo afectan las proporciones relativas, la demanda de agua y cemento, trabajabilidad, bombeabilidad, costo, porosidad, contracción (retracción) y durabilidad del concreto. También se puede ver afectada la uniformidad seriamente. Otro ejemplo de su influencia es que, las arenas muy finas suelen ser antieconómicas, mientras las arenas y gravas gruesas producen mezclas sin trabajabilidad. Debemos buscar que se integren en la curva granulométrica de manera suave y tendremos los resultados óptimos. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)
- **Porosidad:** Es la cantidad de poros que encontramos en las partículas del agregado. Está ligado principalmente a la permeabilidad y absorción, la cual nos influencia en su enlace con la pasta de cemento, la resistencia al congelamiento y deshielo, así como a la estabilidad química, resistencia a la abrasión y gravedad específica.

- **Masa unitaria:** Es la masa o peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen a que se refiere aquí es aquel ocupado por las partículas y los vacíos entre ellas.
- **Forma y textura:** Las características externas del agregado nos puede decir mucho sobre el origen del agregado y la roca madre de la que proceda, por ejemplo, una partícula redondeada ha sido expuesta a una abrasión mayor. Esta propiedad nos afecta más al concreto fresco que al endurecido. Aquellas partículas con textura áspera, angulares o alongadas requieren más agua para producir una mezcla trabajable, a diferencia de los agregados lisos, redondeados y compactos. Además, las partículas de agregados angulares requieren más cemento para mantener la misma relación agua-cemento. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

#### *Propiedades químicas*

Estudiamos estas propiedades para revisar si tienen presentes sustancias o componentes minerales agresivos que pueden afectar la reacción entre la pasta de cemento y así afectar el desempeño mecánico del concreto en estado endurecido.

- **Reacción álcali-agregado:** La reacción más común se produce entre los óxidos de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) en sus formas inestables y los óxidos alcalinos de la pasta de cemento ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ). Esta reacción que es del tipo sólido-líquido, produce un gel hinchable que aumenta de volumen a medida que absorbe agua, lo cual origina presiones internas en el concreto que conducen a la expansión, agrietamiento y ruptura de la pasta de cemento, esto se conoce como reacción álcali-sílice, ya que también existe otra reacción similar entre algunos tipos de caliza dolomítica y los álcalis del cemento, en lo que se llama una reacción álcali-carbonato, que es menos frecuente.

Esta es una reacción desfavorable porque origina esfuerzos de tensión dentro de la masa endurecida del mortero o del concreto; dichos esfuerzos pueden causar fallas en la estructura debido a que la resistencia a la tensión del mortero o del concreto es baja, del orden de un 10% de su resistencia a la compresión. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

### *Propiedades mecánicas*

- **Resistencia:** El agregado grueso, en mayor medida que el fino, va a resultar relacionado con el comportamiento de las resistencias del concreto, por su aporte en tamaños de grano dentro de la masa de la mezcla. En tal sentido, una de las posibilidades de ruptura de la masa es por medio del agregado grueso (las otras son por la pasta y por la interface de contacto entre pasta y agregado). De esta manera, la resistencia de los agregados cobra importancia y se debe buscar que éste nunca falle antes que la pasta de cemento endurezca. La falla a través del agregado grueso se produce bien sea porque tiene una estructura pobre entre los granos que constituyen las partículas o porque previamente se les han inducido fallas a sus partículas durante el proceso de explotación (especialmente cuando éste se hace por voladura) o por un inadecuado proceso de trituración.
- **Adherencia:** Es la interacción que existe en la zona de contacto agregado pasta, la cual es producida por fuerzas de origen físico-químico. Entre más adherencia se logre entre la pasta de cemento endurecida y los agregados, mayor será la resistencia del concreto. La adherencia depende de la calidad de la pasta de cemento y en gran medida, del tamaño, forma, rigidez y textura de las partículas del agregado, especialmente cuando se trata de resistencia a flexión. Hoy en día, no se conoce ningún método que permita medir la buena o mala adherencia de los agregados, pero es claro que aumenta con la rugosidad superficial de las partículas.
- **Tenacidad o resistencia a la falla por impacto:** Es una propiedad que depende de la roca de origen y se debe tener en cuenta ya que tiene mucho que ver con el manejo de los agregados, porque si estos son débiles ante las cargas de impacto, se puede alterar su granulometría y también disminuir la calidad del concreto que con ellos se elabore.
- **Dureza:** Esta propiedad que depende de la constitución mineralógica, la estructura y la procedencia del agregado. En la elaboración de concretos sometidos a elevadas tasas de desgaste por roce o abrasión, como aplicaciones en pavimentos o revestimientos de canales, la dureza del

agregado grueso es una propiedad decisiva para la selección de los materiales. (Neville & Brooks, 2010)

#### 2.6.4 Agregados empleados en esta investigación

Los agregados utilizados en la investigación, de acuerdo a la clasificación son agregados finos, los cuales provienen del banco de materiales llamado “Joyitas”, ubicado en la carretera Morelia-Jiquilpan en el kilómetro 14+500 entrada a San Bernabé, municipio de Morelia, en el estado de Michoacán.

### 2.7 Agua

Casi cualquier agua considerada potable puede ser empleada para realizar mezclas de morteros y concretos, prestamos atención a que sea prácticamente incolora y sin sabor. Sin embargo, también podemos utilizar agua que no necesariamente sea potable, mientras contenga menos de 2000 ppm (partes por millón) de sólidos disueltos. Si rebasa dicho límite habría que analizar la influencia de dichas partículas sobre la resistencia y tiempos de fraguado.

Estas impurezas no solo llegan a afectar resistencia y tiempos de fraguado, también suelen causar la presencia de eflorescencias, manchado, corrosión del esfuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por lo tanto, se pueden marcar ciertos límites opcionales para cloruros, sulfatos, álcalis y sólidos en el agua de mezcla.

Las aguas a las que se refiere la norma (NMX-C-122-ONNCCE, 2014), que se pretendan usar para la elaboración y curado del mortero y/o concreto hidráulico, excluyendo de ellas las aguas de mar, deben cumplir con los requisitos que aparecen en la tabla 4. El agua de mar no es apropiada para la preparación de concreto reforzado con acero y no se debe usar en concreto pretensado, debido al riesgo de la corrosión de la armadura, principalmente en ambientes cálidos y húmedos. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

**Tabla 4** Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas, (NMX-C-122-ONNCCE, 2014)

Sales e impurezas	Cementos ricos en calcio límites en p.p.m.	Cementos sulforesistentes límites en p.p.m.
<b>Sólidos en suspensión</b>		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
<b>Cloruros como el CL (a)</b>		
Para concreto con acero de pre esfuerzo y piezas de puente	400 (c)	600 (c)
Para otros concretos reforzados en ambiente húmedos o en contacto con metales como el aluminio, fierro galvanizado y otros similares	700 (c)	1000 (c)
Sulfato como SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (a)	3000	3500
Magnesio como Mg <sup>++</sup> (a)	100	150
Carbonatos como CO <sub>3</sub>	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO <sub>2</sub>	5	3
Álcalis totales como Na <sup>+</sup>	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o Aceites	0	0
Materia orgánica (oxígeno consumido en medio ácido)	150 (b)	150 (b)
Valor del pH	No menor de 6	No menor de 6.5
<p>(a) Las aguas que exceden los límites enlistados para cloruros, sulfatos y magnesios, pueden emplearse si se demuestra que la concentración calculada de estos compuestos en el agua total de la mezcla, incluyendo el agua de absorción de los agregados u otros orígenes, no exceden dichos límites.</p> <p>(b) El agua se puede usar siempre y cuando las arenas que se empleen en el concreto acusen un contenido de materia orgánica cuya coloración sea inferior a 2 de acuerdo con el método de la NMX-C-088.</p> <p>(c) Cuando se use cloruro de calcio CaCl<sub>2</sub> como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.</p>		

### 2.7.1 Agua empleada en esta investigación

El agua utilizada en la presente investigación es proveniente de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

El agua se utilizó tal y como llega al laboratorio, esto con el fin de usarla lo más apegado a condiciones estándar.

## 2.8 Puzolanas

### 2.8.1 Origen de las puzolanas

Fue alrededor del 400 A.C. cuando los griegos comenzaron a implementar puzolanas en los morteros de cal convencionales. Años más tarde, los romanos comenzaron a pulverizar piezas cerámicas, ladrillos, tejas para crear puzolanas artificiales, mientras que también descubrieron nuevas maneras de fabricar morteros con el uso de algunos suelos volcánicos junto con cal, creando así morteros hidráulicos; morteros que endurecían al entrar en contacto con el agua, haciéndolos más duraderos que los convencionales de cal. Tales suelos fueron encontrados en los alrededores de la población de Pozzuoli, cerca de Nápoles, y de aquí el nombre de puzolana. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

### 2.8.2 Definición

Son materiales naturales o artificiales que contienen sílice reactiva y/o aluminio, con poca o nula calidad aglomerante que, mezcladas con cal en presencia de agua, fraguan y endurecen como un cemento. Asimismo, son ingredientes importantes en la producción de materiales alternativos al cemento Portland. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

### 2.8.3 Clasificación de las puzolanas

Los materiales puzolánicos o adiciones activas de mayor interés en la industria del cemento pueden dividirse en dos grandes grupos: naturales y artificiales (subproductos industriales). Al primer grupo pertenecen las verdaderas puzolanas y las tobas volcánicas, así como una serie de otros productos naturales, que tienen en común un comportamiento similar frente a la cal. En el segundo grupo están, principalmente, las escorias de altos hornos, las cenizas volantes y las arcillas calcinadas. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

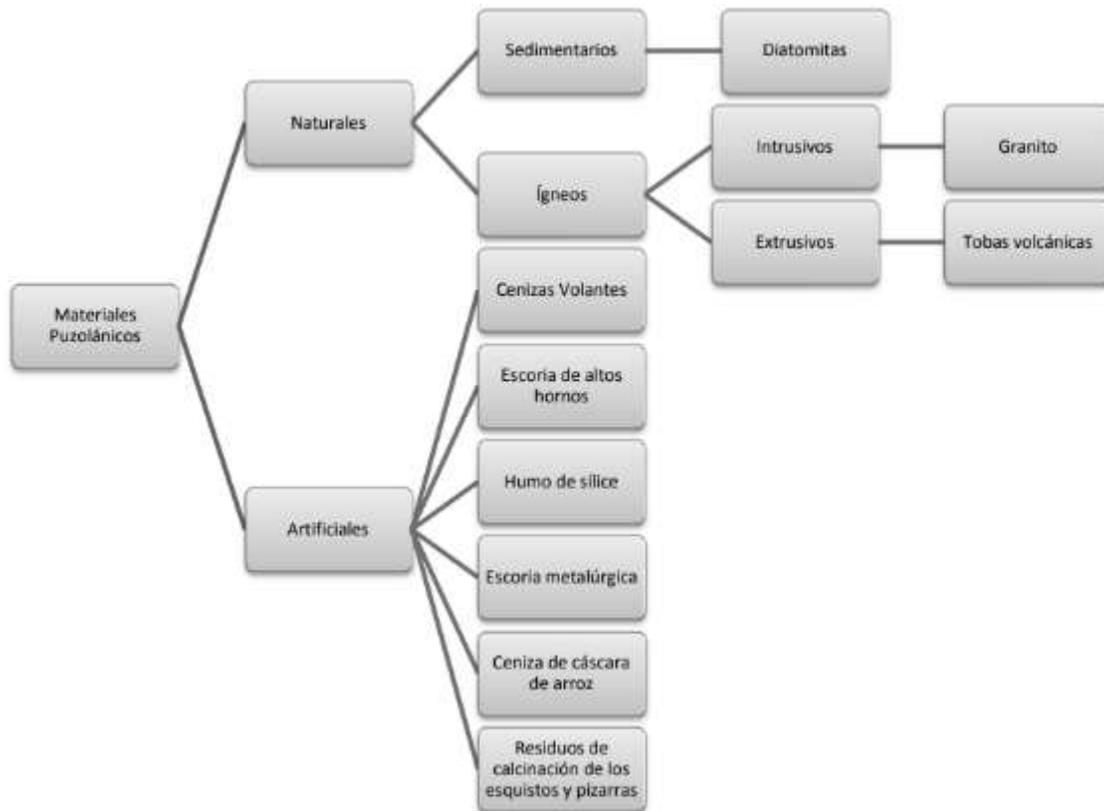
### *2.8.3.1 Puzolanas naturales*

Las puzolanas naturales son productos silíceos, este nombre se debe al alto contenido en silicio y aluminio. Éstas se caracterizan por tener un comportamiento similar a la cal.

Las puzolanas naturales esencialmente son cenizas volcánicas de actividades volcánicas geológicamente recientes. El proceso de los materiales puzolánicos naturales incluye usualmente trituración, molienda y clasificación por tamaños, en algunos casos también se realiza una activación térmica, exceptuando las diatomitas todas las puzolanas naturales se derivan de rocas y minerales volcánicos.

- Cenizas volcánicas Se forman por erupciones de carácter explosivo, en pequeñas partículas que son templadas a temperatura ambiente, originando la formación del estado vítreo.
- Tobas volcánicas (zeolitas) Producto de la acción hidrotermal sobre las cenizas volcánicas y de su posterior cementación diagenética.
- Tierras de diatomeas (diatomitas) Es una puzolana de origen orgánico, formada por rocas porosas silíceas sedimentarias, en su mayor parte se forman por depósitos de caparzones o esqueletos silíceos procedentes de organismos unicelulares, tales como las algas acuáticas unicelulares (diatomeas) y los protozoos radiolarios.

Las tierras de diatomeas cuando son puras son materiales puzolánicos, sin embargo, cuando están contaminadas con materiales arcillosos es necesario calcinarlas para mejorar su actividad puzolánica.



*Ilustración 4 Clasificación de los materiales puzolánicos (Karen Jennifer Beltrán Taipei, 2017)*

### *2.8.3.2 Puzolanas artificiales*

Se derivan de diferentes procesos industriales o agrícolas, generalmente como subproductos y materiales tratados térmicamente. Debido a esta situación, comienza a generarse un problema de almacenamiento, derivando en un notable impacto ambiental. Es por ello que se busca utilizarlos como materia prima en otras industrias, las cuales también pueden derivar en ventajas como:

- Alargar la vida de los recursos naturales
- Rentabilidad del residuo, mejorando así el balance económico de la empresa que lo produce.

Se entra así en el concepto de gestión racional de las materias primas. Se pasa de un elemento contaminante a uno útil, lo que representa una acción regenerativa de la cual la técnica puede sentirse más satisfecha. En este segundo grupo están, principalmente, las cenizas de la combustión de carbón, la sílice volatilizada (humo de sílice) durante ciertas operaciones metalúrgicas y escorias de alto horno granuladas de la metalurgia férrea y no férrea, y las cenizas volantes. (Báez Ángel, 2018)

#### 2.8.4 Actividad puzolánica

La puzolana cuando se introduce en una muestra de cemento, reacciona con el hidróxido de calcio (CH) formado en la hidratación del cemento y genera productos resistentes tales como hidrato de silicato de calcio (CSH) y aluminato de calcio hidratado (CAH) y/o aluminato de silicato de calcio hidratado (SACH).

El término actividad puzolánica incluye todas las reacciones que involucran los componentes activos de la puzolana, hidróxido de calcio y agua; en general este término se refiere a dos factores, que son: la cantidad máxima de hidróxido de calcio que puede reaccionar con la puzolana, y la velocidad a la que se procesa tal combinación (Massazza, 1998). La primera depende de la relación  $\text{Ca(OH)}_2$  / fases activas y el equilibrio entre las fracciones de cal combinados y libres en el sistema. El segundo se relaciona fuertemente con la superficie específica de las partículas.

La reacción puzolánica tiene que ser una reacción que se desencadena debido a la reactividad de la sílice y alúmina al hidróxido de calcio, la debilidad y la inestabilidad de sus enlaces estructurales en el material original. Esta se caracteriza por un consumo lento de la CH libre, después de la hidratación del cemento, generando CSH (hidrato de silicato de calcio) adicional.

Las partículas finamente divididas de puzolana residual (que no reaccionan con los productos de hidratación de cemento) y otros compuestos formados durante la reacción puzolánica, tales como aluminato de calcio hidratado (CAH), actúan sólo como rellenos de vacíos (filler), reduciendo la porosidad de la estructura resultante. La combinación de efectos puzolánicos y de filler en la reacción puzolánica representa una importante contribución a la resistencia y durabilidad de la pasta endurecida en medios ácidos. (Báez Ángel, 2018)

### 2.9 Morteros

Desde tiempos de los romanos, se comenzaron a hacer mezclas de arena y pasta de cal, al recipiente donde transportaban dicha mezcla, lo denominaron “mortarius”. Con el paso del tiempo, terminó siendo el nombre adoptado para nombrar a la mezcla que ha sido utilizada en cimentaciones, muros, pavimentos y revestimientos. (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

#### 2.9.1 Definición

Los morteros son mezclas plásticas aglomerantes que resultan de combinar arena y agua con uno o dos materiales cementantes, que pueden ser cemento Portland, cemento Portland y cal, cemento Portland y cemento de albañilería (cementante premezclado que contiene cemento Portland, cal y aditivo plastificadores). (N-CMT-2-01-004-02, 2002)

#### 2.9.2 Tipos de morteros

La clasificación de los morteros es muy amplia e implica una gran cantidad de variables, en este caso solo nos enfocaremos en los morteros según su tiempo o

tipo de fraguado, así como su composición química o física dependiendo el uso para el cual se diseñe:

- Mortero físico: El paso del estado pastoso o semilíquido a un sólido se presenta mediante el secado o fraguado que se da sin recursos químicos, esto puede aplicarse a los morteros de barro, morteros de suelo refractario, morteros de asfalto y los modernos morteros con adhesivos a base de materiales sintéticos.
- Mortero químico: El fraguado se lleva a cabo por medio de una reacción química, por ejemplo, en este tipo de mortero se cuenta con los morteros de cal, cemento, yeso y mortero comercial. Las mezclas entre estos tipos de morteros y el empleo de distintos aditivos también se hacen frecuentes.
- Mortero aéreo: Es aquel que fragua al contacto con el aire, como los morteros de arcilla, yeso y cal hidratada.
- Mortero bituminoso: Son los morteros en los cuales se emplean emulsiones asfálticas o cemento asfáltico para su elaboración.
- Mortero hidráulico: Tiene la propiedad de endurecer rápidamente, además tiene las propiedades de fraguar en contacto con el agua o en presencia de humedad como el yeso hidráulico, cal hidráulica, mortero comercial y de cemento (Mendoza Anaya, Brito Benitez, & Arenas Alatorre, 2004). La norma (ASTM-C270, 2014), establece los diferentes tipos de morteros, así como parámetros de resistencia y contenido de aire que deben cumplir; describe también la combinación entre ellos y algunas de las propiedades (Tabla 5).

*Tabla 5 Propiedades requeridas por especificación para cada tipo de mortero, (ASTM-C270, 2014)*

<b>Mortero</b>	<b>Tipo</b>	<b>Esfuerzo a compresión promedio a 28 días, mínimo, psi (MPa)</b>	<b>Retención de agua, mínimo, %</b>	<b>Contenido de aire, máximo, %, b</b>
<b>Cemento-Cal</b>	<i>M</i>	2500 (17.2)	75	12
	<i>S</i>	1800 (12.4)	75	12
	<i>N</i>	750 (5.2)	75	14c
	<i>O</i>	350 (2.4)	75	14c
<b>Mortero Cemento</b>	<i>M</i>	2500 (17.2)	75	12
	<i>S</i>	1800 (12.4)	75	12
	<i>N</i>	750 (5.2)	75	14c
	<i>O</i>	350 (2.4)	75	14c
	<i>M</i>	2500 (17.2)	75	18

<b>De cemento para albañilería</b>	S	1800 (12.4)	75	18
	N	750 (5.2)	75	20d
	O	350 (2.4)	75	20d
<b>ESPECIFICACIONES:</b>				
<i>Todas las especificaciones de la tabla deben ser obtenidas en laboratorio</i>				
<i>b) El contenido de aire de morteros de CPC-cal sin inclusión de aire es generalmente menor que 8%.</i>				
<i>c) Cuando es incorporado acero de refuerzo en morteros de cemento-cal o mortero cemento, el contenido máximo de aire debe ser de 12%.</i>				
<i>d) Cuando es incorporado acero de refuerzo en morteros de cemento para albañilería, el contenido máximo de aire debe ser de 18%.</i>				

## 2.10 Materiales en estudio como adición o sustitución al mortero

Utilizar adiciones y sustituciones minerales en la producción convencional de cemento Portland, conduce a una reducción del consumo de recursos naturales y se refleja en una disminución en la erosión y deforestación del suelo. Consecuentemente, el reemplazo de cemento por adiciones y sustituciones constituye una solución global adecuada a algunos problemas de índole tecnológica, económica y de protección del medio ambiente. Desde hace ya algunos años, se busca adicionar con distintos materiales procedentes de recursos naturales (puzolana, material calcáreo), de desechos de otras industrias (escoria, ceniza volante, humo de sílice, ceniza de cáscara de arroz) o bien activadas térmicamente (arcillas, metacaolín). (Castellano, 2013)

El objetivo de adicionar estos materiales puzolánicos al mortero es mejorar sus propiedades mecánicas y evitar una mayor contaminación con la producción del CPO, generando un ahorro considerable, además de reutilizar un producto considerado desecho en la industria geotérmica.

### 2.10.1 Sílice

La sílice es un material muy duro que se encuentra en casi todas las rocas. La sílice es el componente principal de la arena, arenisca, cuarcita, granito, etc. La sílice ocurre naturalmente en tres formas, pero sólo la forma cristalina, o la llamada sílice cristalina, representa un peligro a la salud.

La sílice desde épocas muy remotas y hasta nuestros días ha sido uno de los minerales más usados en todo el mundo, llámense mayas, aztecas, egipcios, desde la prehistoria el hombre ha hecho uso de este mineral para darle infinidad de usos desde hacer monumentos dedicados a sus dioses cosa que era de relevante importancia en aquellos tiempos, así como en la confección de ciertas armas que le servían para defenderse de los animales y además les servían para pelear en los combates, también ya desde entonces la utilizaban para hacer diversos artículos de porcelana vidrio, y ahora cemento para la construcción.

La composición química del dióxido de silicio o sílice ( $\text{SiO}_2$ ) se compone principalmente de minerales silíceos como lo son el cuarzo, la calcedonia y el ópalo. Se encuentra cuarzo en la mayoría de las rocas magmáticas sedimentarias y metamórficas. Es un elemento característico de los granitos, los neises y las cuarcitas. Es un anhídrido de ácido caracterizado por su gran estabilidad que puede adoptar varias formas cristalinas.

El  $\text{SiO}_2$  es utilizado para producir materiales de superficies de caminos y fabricar ladrillos para casa de bajo costo con la adición de fibras plásticas para mejorar tanto la resistencia mecánica como la resistencia al clima, así como también para la fabricación de dispositivos cerámicos. La sílice aparece en diferentes tipos de estructuras: celular, esponjosa, laminar densa, bloques sólidos, porosa con un rango de porosidad de 40 a 80%. Otras formas incluyen geles viscosos que cristalizan como deposiciones de ópalo – calcedonia, con fuerte adherencia. (Báez Ángel, 2018)

#### 2.10.2 Sílice utilizada en esta investigación

Los procesos de incrustación que ocurren en los campos geotérmicos de México, son promovidos por las características de los fluidos geotérmicos y las condiciones climáticas, la principal incrustación es particularmente la que está constituida de sílice amorfa ( $\text{SiO}_2$ ) y sulfuro de hierro ( $\text{FeS}$ ) de color negro, y es una capa densa muy adherente y dura la cual afecta la capacidad de producción de los pozos geotérmicos. (Báez Ángel, 2018)

Esta investigación presenta una nueva alternativa para obtener mortero de alto desempeño agregando sílice geotérmica como puzolana. La sílice empleada en la investigación, se obtuvo de la Planta geotérmica de Cerro Prieto, ubicada en Baja California, México y de la Planta geotérmica de Los Azufres ubicada en Michoacán, México.



*Ilustración 5 Sílice geotérmica (Vaca Arciga, 2017)*



*Ilustración 6 Planta geotérmica Cerro Prieto, Baja California (Energy Management, 2019)*

Cerro Prieto es el campo geotérmico más importante de México y está localizado en la superficie aluvial del Valle de Mexicali, Baja California. Tectónicamente está situado en el límite de las placas del Pacífico y Norteamérica y cercano a la falla de San Andrés. El plano es un delta y la sección geológica está hecha de arcillas sin consolidar, arena y grava, las cuales descansan en rocas sedimentarias de arena comprimida, lutitas y limonitas.

Los Azufres está localizado a 200 Km **Este Noroeste** de la ciudad de México a 2800 m sobre el nivel del mar a 19.47° latitud Norte y 100.39° longitud Oeste. Una diferencia básica con Cerro Prieto es que la superficie rocosa de este campo incluye grandes masas rocas volcánicas ácidas: silicatos e intermedarios (granito-riolitas, dioritas, andesitas, etc.) sobre la superficie.



*Ilustración 7 Planta geotérmica Los Azufres, Michoacán (Gobierno de México)*

Para el empleo de la sílice geotérmica en la elaboración de las mezclas de mortero fue necesario llevar a cabo un tratamiento previo de preparación y caracterización, descrito a continuación:

Con el secado se busca eliminar la humedad presente en el material mediante dos tipos de secado: el primero se realizó al sol por un período de entre 6 y 8 horas continuas (Ilustración 8), el segundo se llevó a cabo en hornos a temperatura de 60°C por un período de 48 horas.



*Ilustración 8 Secado a la intemperie de la sílice (Vaca Arciga, 2017)*

- Tratamiento mecánico de la sílice geotérmica:

El porcentaje utilizado como sustitución al cemento fue 5%. Se utilizó después de haber sido sometida a un tratamiento mecánico en el molino de desgaste de Los Ángeles (Ilustración 9). Esta decisión se tomó posterior a realizar un cribado manual del material, en el cual nos dimos cuenta que al dejar las partículas de mayor tamaño fuera, desperdiciaríamos el 80% del material, es por esta razón que se decidió moler el material para obtener una mejor reacción con el cemento. Además, que al molerlo aumentamos el área de reacción de las partículas ASTM (C618-15).



*Ilustración 9 Trituración de Sílice en la Máquina de desgaste de Los Ángeles.  
(Vaca Arciga, 2017)*

## 2.11 Aditivos

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto que, además del CP, del agua y de los agregados, se adicionan a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado. Se utilizan con el propósito fundamental de modificar convenientemente el comportamiento del concreto en estado fresco, y/o de inducir o mejorar determinadas propiedades deseables en el concreto.

Los aditivos son químicos que se agregan al concreto en la etapa de mezclado para modificar algunas de sus propiedades de la mezcla; nunca deben ser considerados un sustituto de un buen diseño de mezcla, de mano de obra o del uso de buenos materiales (IMCYC, 2016).

### 2.11.1 Tipos y usos

Según la NMX, los aditivos se pueden clasificar según sus funciones, como sigue:

- Aditivos incorporadores de aire (inclusores de aire).
- Aditivos reductores de agua.
- Plastificantes (fluidificantes).
- Aditivos aceleradores (acelerante).
- Aditivos retardadores (retardantes).
- Aditivos de control de la hidratación.
- Inhibidores de corrosión.
- Reductores de retracción.
- Inhibidores de reacción álcali-agregado.
- Aditivos colorantes.

- Aditivos diversos, tales como aditivos para mejorar la trabajabilidad (manejabilidad), para mejorar la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadas, formadores de gas, anti-deslave, espumante y auxiliares de bombeo.

El concreto debe ser trabajable, fácilmente acabado, fuerte, durable, estando y resistente al desgaste. Estas calidades se les pueden obtener fácil y económicamente con la selección de los materiales adecuados preferiblemente al uso de aditivos.

Las razones principales para el uso de aditivos son:

- Reducción del costo de la construcción del concreto.
- Obtención de ciertas propiedades en el concreto de manera más efectiva que otras.
- Manutención de la calidad del concreto durante las etapas del mezclado, transporte, colado (colocación) y curado en condiciones de clima adverso.
- Superación de ciertas emergencias durante las operaciones de mezclado, transporte, colocación y curado.

A pesar de estas consideraciones, se debe observar que ningún aditivo de cualquier tipo o en cualquier cantidad se lo puede considerar como un sustituto de las buenas prácticas de construcción.

La eficiencia de un aditivo depende de factores tales como: tipo, marca y cantidad de material cementante; contenido de agua; forma, granulometría y proporción de los agregados; tiempo de mezclado y temperatura del concreto (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

#### 2.11.2 Aditivo utilizado en la investigación

El aditivo que se utilizó en esta investigación fue el Crisotan® R-5, producido por la empresa Christianson, S.A. de C.V., está clasificado como un aditivo plastificante (fluidificante). La presentación que se utilizó es en polvo, tiene un color café oscuro.



*Ilustración 10 Aditivo utilizado en la investigación. (Vaca Arciga, 2017)*

### 3. Metodología

Describiremos el ensayo del experimento, materiales empleados para los especímenes, procedimientos seguidos y la normativa que reguló los ensayos realizados.

#### 3.1 Caracterización de los materiales

##### 3.1.1 Cemento Portland

El CP utilizado para la experimentación fue un CPC 30R RS de la marca CEMEX. Sus características se describen a continuación: El cemento CPC 30R RS está especialmente formulado para reducir la aparición de grietas por contracción plástica en el concreto expuesto a condiciones ambientales extremas, mejorar la consistencia de la mezcla, producir una mezcla más fácil de manejar y evitar el proceso de curado.

Ventajas:

- Reduce la aparición de grietas generadas por contracción plástica que se promueven en condiciones ambientales extremas de alta temperatura y velocidad del viento.
- Les brinda a las mezclas de concreto mayor cohesión, adherencia y trabajabilidad, aún con agregados problemáticos.
- Reduce el riesgo y la segregación de las mezclas de concreto.
- Sustituye el uso de membranas de curado, al promover por sí mismo el proceso de curado, lo que representa ahorros significativos en las obras.

##### *3.1.1.1 Método de prueba estándar para la consistencia normal del cemento.*

Es la cantidad de agua necesaria para que la aguja de 1 cm de diámetro del aparato de Vicat, penetre dentro de la pasta de cemento elaborada con dicha agua, 10 mm  $\pm$  1 mm bajo la superficie libre, durante 30 segundos después de haber iniciado la prueba.

El objetivo es obtener la cantidad de agua necesaria para combinarla con una determinada masa de cemento que sirva como referencia para efectuar las pruebas de sanidad del cemento y determinación de los tiempos de fraguado. Para esta prueba, seguimos el procedimiento de las normas (NMX-C-057-ONNCCE, 2015); (ASTM C187 - 04, 2004)

#### **Procedimiento**

Debido a lo laborioso de la explicación del desarrollo, lo desglosaremos en los siguientes incisos.

- a) Obtención de la muestra representativa de cemento.
- b) Preparación de la pasta de cemento.
  1. Se pesan 650 g de cemento y se vierten sobre una mesa con superficie lisa e impermeable y se forma una especie de cráter con el cemento ayudados con una pequeña espátula.
  2. Se fija una cantidad de agua expresada en porcentaje. Respecto a la masa del cemento seco, se mide en la probeta graduada y se vierte en el centro del cráter (echando a andar un cronómetro al caer el agua sobre el cemento).
  3. Con la espátula se lleva el material de las orillas del cráter hacia el centro hasta lograr que todo el cemento se humedezca. (Esto debe de hacerse en un máximo de 30 segundos).
  4. En otro ciclo de 30 segundos consecuentes a los anteriores se deja reposar la mezcla para que la humedad se homogenice. (Aprovechando el operador para colocarse guantes de hule ligeramente húmedos).
  5. Se hace el amasado de la pasta en un tiempo global de 1.5 minutos contados a partir de los anteriores.
    - a. En los primeros 30 segundos se mezcla perfectamente la masa con las manos, golpeando la mezcla, con la parte pesada de las manos hasta lograr una pasta uniforme y homogénea.

En otros 30 segundos se forma una esfera con la pasta y se pasa de una palma a otra a una distancia de aproximada de 15 centímetros, este ciclo de pasar de una mano a otra se debe de repetir 6 veces terminado lo anterior. En los últimos 30 segundos de los 1.5 minutos, descansamos la bola en la palma de la mano, se introduce a presión por la boca mayor del anillo cónico del aparato de Vicat, el cual se sostiene con la otra mano, llenando completamente el anillo con pasta (la otra boca se descansa sobre un cristal). El exceso de esta que permanezca en la boca grande se remueve con un movimiento simple de la palma de la mano. A continuación, se coloca el anillo descansando en su base mayor, sobre una placa de vidrio y se enrasa la boca superior con una pasa de boca de albañil o una espátula que se mantendrá formando un pequeño ángulo en el borde de la cuchara durante las operaciones de enrasado y enlisado, debe tenerse cuidado de no comprimir la pasta.

Determinación de la consistencia. La pasta confinada en el anillo que descansa sobre una placa, debe de centrarse debajo de la barra B, cuyo extremo que forma un embolo se pone en contacto con la superficie de la pasta y se aprieta el tornillo sujetador después se coloca el indicador móvil F en la marca cero en la parte superior de la escala o se hace una lectura inicial (todo lo anterior se puede hacer previo al realizado de la mezcla para ya no entretenerse ya que esto se debe hacer dentro de los 30 segundos).

Se deja caer la aguja sobre la superficie de la pasta de cemento, se dejan pasar 30 segundos y se toma la lectura de penetración de la aguja, si la lectura es de  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$  (Ilustración 4), se toma esa cantidad de agua como la necesaria para obtener la consistencia normal del cemento (si la lectura no es de  $10 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ , se repite el procedimiento antes visto hasta conseguir la cantidad de agua necesaria para obtener la consistencia normal del cemento).

#### *3.1.1.2 Método de prueba estándar para el tiempo de fraguado del cemento hidráulico.*

Este ensayo permite la determinación de los tiempos de fraguado inicial y final de la pasta de cemento mediante la penetración de las agujas del aparato de Gillmore. El tiempo de fraguado es una característica de la pasta de CP en la cual intervienen factores como la cantidad de agua obtenida en la prueba de consistencia normal, de la temperatura y humedad del ambiente. Este ensayo debe ser realizado inmediatamente después de concluir el ensayo de consistencia normal, con la pasta de CP adicionada con la cantidad óptima de agua.

#### Definiciones:

Tiempo de fraguado inicial: Es el tiempo que transcurre, a partir del momento de contacto inicial del cemento con el agua, hasta que el mortero obtenido por el cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de 3.4 MPa (35 kgf/cm<sup>2</sup>).

Tiempo de fraguado final: es el tiempo que transcurre, a partir del momento que el cemento entra contacto con el agua, hasta que el mortero obtenido por el cribado del concreto presenta una resistencia a la penetración de 27.5 MPa (280 kgf/cm<sup>2</sup>).

Temperatura y humedad: La temperatura del laboratorio, material y equipo deben mantenerse entre 20° y 27° C. La del agua de mezclado y la cámara de humedad no varía de 23° C en más de  $\pm 2^\circ \text{ C}$ . La humedad relativa del laboratorio no será inferior a 50%.

Preparación de la pasta de CP: Siguiendo el procedimiento descrito en la preparación de mezcla para la consistencia normal se mezclaron 650g del cemento con el agua necesaria para su consistencia normal.

Moldeado del espécimen: Con la pasta de cemento preparada y sobre una placa de vidrio cuadrada, plana y limpia de aproximadamente 4" por lado, se hace una pastilla de poco más o menos 7.5 centímetros de diámetro y 1.3 centímetros de espesor en la parte central, disminuyendo hacia los bordes. Para moldearla, se aplanan primero la pasta de CP sobre el vidrio y después se va moviendo la cuchara desde los bordes hacia el centro, aplanado a continuación la parte central superior, se coloca la pastilla en el cuarto húmedo y se deja ahí, salvo cuando vaya efectuarse determinaciones del tiempo de fraguado.

Determinación de los tiempos de fraguado: al determinar el tiempo de fraguado, se mantienen las agujas en posición vertical y se ponen en contacto ligeramente con la superficie de la pastilla, se considera que el CP ha alcanzado su fraguado inicial cuando soporta a las agujas de Gillmore inicial (la menos pesada), sin que marque huellas apreciables. Se considera que el CP ha alcanzado su fraguado final cuando soporta la aguja de Gillmore Final (la más pesada), sin que marque huella apreciable (ASTM C266 - 15, 2015).

**Recomendaciones:** El tiempo de fraguado se afecta no solo por el porcentaje y temperatura del agua empleada, y cantidad de amasado que haya recibido la pasta, sino también por la temperatura y humedad, entonces su determinación es sólo aproximada.

#### *3.1.1.3 Método de prueba estándar para la determinación de la densidad del cemento hidráulico.*

Para efectos de este ensaye, se entiende por densidad del cemento hidráulico, la relación de la masa de cemento en gramos, entre el volumen en milímetros que desplaza este al introducirse en un líquido, con el cual no efectuó reacción química alguna.

#### **Procedimiento:**

1. Se llena el matraz Le Chatelier con keroseno libre de agua o nafta a un nivel medido entre cero y un mililitro. La parte interior del matraz arriba del nivel del líquido, se debe secar en caso necesario. Se registra la primera lectura después de haber sumergido el matraz en un baño de agua a la temperatura del laboratorio.
2. Se debe tener la precaución de que la temperatura del baño sea constante durante la prueba de modo que, a variación de la temperatura del líquido en el matraz al momento de tomar la lectura inicial y final, no tenga una variación mayor de 0.2°C.
3. Se pesa aproximadamente 60 g de cementante con una aproximación de 0.05 g y se introduce en pequeñas porciones dentro del matraz.
4. Se debe tener cuidado de evitar salpicaduras y que el cementante se adhiera a las paredes interiores del cuello superior del matraz.
5. Se coloca el tapón al matraz y se desaloja el aire que haya sido atrapado al introducir el cementante en el líquido, para lograr esto, se gira el frasco tomándolo entre las manos, en posición inclinada, o se hace rodar en posición inclinada sobre una superficie plana que conviene cubrir con un material que proteja al matraz de una posible ruptura.
6. La segunda lectura se debe tomar estando el líquido en la parte graduada superior y después de sumergir el frasco en el baño de agua durante un tiempo suficiente para estabilizar la temperatura.

#### **Cálculo:**

La diferencia entre lecturas inicial y final representa el volumen del líquido desplazado por la masa de cementante empleado en la prueba. Se utiliza la ecuación mostrada a continuación.

$$D = \frac{M}{V} = \frac{60}{Lf - Li}$$

Donde:

D = densidad del cementante hidráulico, en g/cm<sup>3</sup>.

M = masa del cementante hidráulico, en g.

V = volumen del líquido desalojado, en cm<sup>3</sup>

Precisión:

Las pruebas se efectuarán por duplicado para no tener errores de más de 0.01 g/ml.

### 3.1.2 Análisis del agregado

El agregado fino (arena) a utilizar, fue obtenido del banco de materiales “Joyitas” ubicado en el kilómetro 14+500 de la carretera Morelia-Jiquilpan entrada a San Bernabé, municipio de Morelia en el estado de Michoacán (ilustración 11). El material obtenido es del tipo volcánico y el tratamiento que se le da es el de trituración parcial y cribado; no requiere explosivos para la obtención del material.

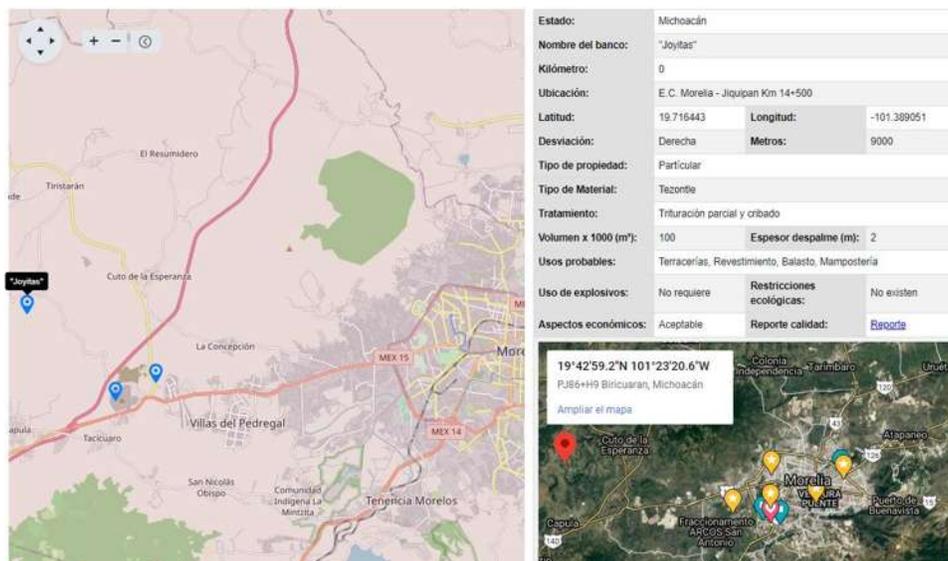
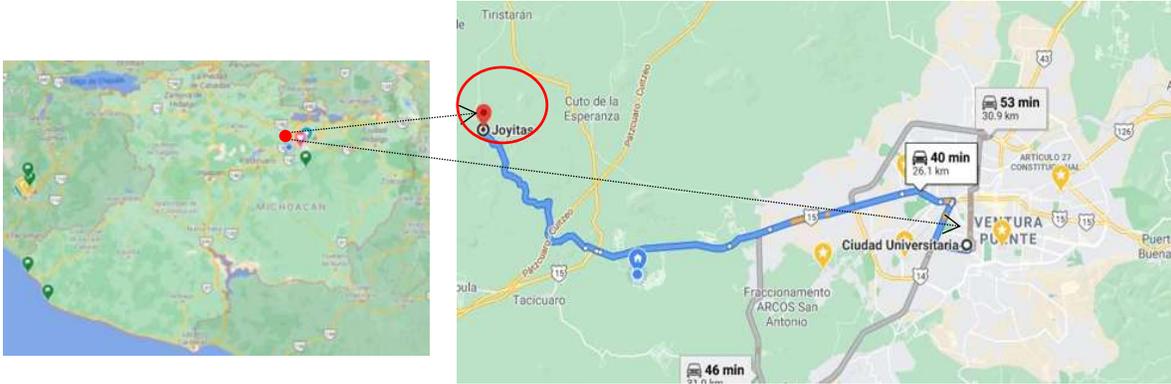


Ilustración 11 Inventario de Bancos de Materiales, 2020. SCT.



*Ilustración 12 Ubicación del banco de la Unión y distancia a Ciudad Universitaria (Carreón Hernández, 2020)*

A continuación, describimos las pruebas realizadas al material para conocer sus propiedades y características.

#### *3.1.2.1 Cuarteo de la arena*

El cuarteo se determinó según la norma (NMX-C-170-ONNCCE, 1997)

El objetivo del cuarteo es obtener las muestras representativas con sus tamaños adecuados para la realización de las diferentes pruebas a realizar a este agregado, así como para la misma realización de los morteros.

Para obtener la reducción de este agregado existen tres maneras para lograrlo, de las cuales solo se usaron dos de ellas; las cuales se describen a continuación.

#### **- Método “A” Cuarteo Mecánico, divisor de muestra.**

Equipo a emplear:

- Cuarteador de muestras
- Charolas grandes de lámina.
- Palas de boca recta.
- Cucharones.

**Procedimiento:**

1. De nuestro agregado se toma la muestra y se coloca en una de las charolas grandes de lámina, procurando que la muestra se tome de diferentes ángulos para obtener una distribución más homogénea. Después se realiza el vaciado sobre la parte superior del cuarteador de muestras, procurando que ésta se distribuya en todo lo extenso del divisor para así lograr que en cada conducto se distribuya la misma cantidad de material.



*Ilustración 13 Cuarteo por cuarteador mecánico. (Báez Ángel, 2018)*

2. Del material recibido en uno de los dos recipientes se elimina o se reintegra a la bolsa donde se extrajo. Si se desea una muestra más pequeña, se repite este proceso de división y eliminación hasta lograr la muestra del tamaño que se requiera.

- **Método “B” Cuarteo Manual, Cuarteo con palas**

Equipo a emplear:

- Pala de boca recta
- Cucharón de punta recta
- Escoba.

**Procedimiento:**

1. Se vacía la muestra de material en un extremo de una charola grande o en un lugar plano, anteriormente limpiado para evitar la contaminación de nuestro material.
2. Se cambia el material al extremo opuesto, este cambio se realiza por medio del paleado, tratando de homogenizar la muestra y colocándola de manera cónica. Este proceso se repite tres veces.
3. Se aplanan la parte superior por medio de la cara posterior de la pala y después se divide el material en cuatro fracciones iguales, eliminando dos partes opuestas, los dos cuartos sobrantes nos servirá para realizar las

pruebas correspondientes. Si se desea reducir el tamaño de la muestra se repite el procedimiento anterior señalado.



*Ilustración 14 Cuarteo Manual (Vaca Arciga, 2017)*

- Especificaciones.

Las muestras de campo de agregado fino que se encuentran superficialmente secas se deben reducir en tamaño por el método “A”. Las muestras de campo que se reduzcan por el método “B” deben encontrarse húmedas superficialmente de no ser así se deben de humedecer y después deben ser mezcladas.

*3.1.2.2 Humedad Actual*

La humedad actual se determinó según la norma (NMX-C-166-ONNCCE., 2006). El objetivo es determinar el porcentaje de humedad que contiene una arena en el momento en que se va a utilizar, donde el medio ambiente es el factor de afectación en ella. Se realizaron 3 ensayos de los cuales se obtuvo un promedio.

**Procedimiento:**

Esta prueba consistió en tomar una muestra representativa de 300 gramos registrando este valor como la masa húmeda actual (Mh), posteriormente, esta muestra se coloca bajo fuego sobre la parrilla eléctrica para hacer el secado total del material. Para saber si el material está completamente seco, se coloca el cristal sobre el material, considerándose este como seco cuando no haya restos de vapor. Cuando el material este de nuevo a temperatura ambiente se procede a pesarlo, registrando este valor como masa seca (Ms).

**Cálculo:**

$$\% \text{ de Humedad actual} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100 \quad [1]$$

Donde:

- Mh= masa saturada y superficialmente seca en gramos.

- Ms = masa seca del material en gramos, secada en charola sobre parrilla, ilustración 15.



*Ilustración 15 Secado de la arena en parrilla. (Vaca Arciga, 2017)*

### *3.1.2.3 Humedad superficial y humedad de absorción*

Este ensayo se realiza para determinar la cantidad máxima de absorción que contiene una arena expresada en porcentaje, consiste en, encontrar la pérdida de masa de la muestra de agregado pétreo una vez sometida a una fuente de calor hasta su masa seca.

La humedad de absorción se obtuvo siguiendo la especificación (NMX-C-165-ONNCCE., 2014) , mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de Humedad de absorción} = \frac{Mh - Ms}{Ms} * 100 \quad \text{..} \quad [2]$$

Donde:

- Mh= masa saturada y superficialmente seca en gramos.
- Ms = masa seca del material en gramos.

### **Procedimiento:**

1. Una muestra de 2 kg se pone a saturar durante 24 horas, como mínimo. Dicha muestra fue obtenida previamente del método de cuarteo.
2. Se realiza un secado superficial de la arena mediante el molde troncocónico, con la finalidad de eliminar el exceso de agua que la muestra llegue a contener. El molde se llena en tres capas distribuyendo 25 golpes dados con el pisón, dando 12 a la primera, 8 a la segunda y 5 a la tercera. Inmediatamente se retira el cono y si la arena trata de disgregarse quiere decir, que ya está seca superficialmente.

3. Después de que éste seca superficialmente, se pesa una muestra de 300 gramos, registrando este valor como peso superficialmente seco (Ph).
4. La muestra de 300 gramos se pone bajo fuego hasta que al colocar el cristal sobre el material no lo empañe, esto quiere decir, que se ha eliminado completamente el agua y ha llegado a su peso constante.
5. Después de dejar enfriar la muestra se pesa y se registra como peso seco del material (Ps).

Se realizaron 3 pruebas con las que se promediaron resultados.



*Ilustración 16 Secado superficial de la muestra mediante el molde troncocónico.  
(Vaca Arciga, 2017)*

#### *3.1.2.4 Determinación de la masa volumétrica seca y suelta de una arena (MVSS)*

Se le considera masa volumétrica de los agregados, a la masa del material por unidad de volumen, siendo el volumen ocupado por el material de un recipiente especificado (NMX-C-073-ONNCCE., 2004).

La finalidad de este ensayo es el de conocer la masa por unidad de volumen del agregado cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural.

La prueba se realizó según la norma (NMX-C-073-ONNCCE., 2004). El resultado se obtuvo del promedio de la realización de tres pruebas.

#### **Procedimiento**

1. Se vacía arena dentro de un recipiente de masa y volumen conocido, dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros y llenándolo completamente hasta colmarlo formando un cono.
2. Se enrasa el recipiente con la varilla y se procede a pesarlo.
3. La masa obtenida se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena.



*Ilustración 17 Realización de la prueba de MVSS (Báez Ángel, 2018)*

El cálculo de la MVSS se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$M.V.S.S. = \frac{M}{V} \quad [3]$$

Donde:

- M.V.S.S.= Masa volumétrica seca y suelta (gramos/cm<sup>3</sup>).
- M= Masa de la arena (gramos).
- V= Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>).

#### *3.1.2.5 Determinación de la masa volumétrica seca y varillada de una arena (MVSV)*

Para conocer la masa volumétrica seca y varilla de una arena es necesario obtener la masa por unidad de volumen de la muestra, cuando esta tiene un cierto grado de compactación (varillado).

Este ensayo se realizó en base a la norma (NMX-C-073-ONNCCE., 2004).

#### **Procedimiento**

1. Se vacía arena dentro de un recipiente de masa y volumen conocido, dejándose caer a una altura medida a partir de la arista superior del recipiente de aproximadamente 5 centímetros y llenándolo en tres capas dando a cada capa de arena 25 golpes con la varilla de bala distribuyéndolos en forma de caracol en toda la superficie y cuidar que la varilla no penetre la capa anterior al dar los golpes.
2. Se enrasa el recipiente con la varilla y se procede a pesarlo.
3. La masa obtenida se le resta el peso del recipiente para obtener la masa de la arena.



*Ilustración 18 Realización de la prueba de MVSV (Báez Ángel, 2018)*

El cálculo de la MVSS se realizó mediante la siguiente fórmula:

$$M.V.S.V. = \frac{M}{V} \quad [4]$$

Donde:

- M.V.S.V.= Masa volumétrica seca y varillada (gramos/cm<sup>3</sup>).
- M= Masa de la arena (gramos).
- V= Volumen del recipiente (cm<sup>3</sup>).

#### *3.1.2.6 Análisis granulométrico en arena*

Equipo:

- Un juego de mallas con abertura rectangular o circular del N° 4, 8, 16,30, 50, 100 y charola con su respectiva tapa.
- Una balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Charolas, espátulas y parrillas eléctricas.
- Cepillos de cerdas y alambre.
- Hojas de papel.

**Procedimiento.**

1. Se realiza el ensaye de cuarteo hasta obtener una muestra representativa de arena de aproximadamente 600 gramos.
2. Se seca la muestra hasta peso constante, a una temperatura de 110°C±5°C.
3. Una vez el material se encuentre seco y frío, se pesan 300 gramos tomándolo como la muestra a utilizar en la prueba.

4. Se procede a ordenar las mallas de orden decreciente (N° 4, 8, 16,30, 50, 100 y charola), vaciando la muestra de 300 gramos y se tapa.



*Ilustración 20 Vaciado de la muestra representativa de arena dentro de las mallas. (VACA ARCIGA, 2017)*

5. Al juego de tapas se le realiza un agitado durante un tiempo de 10 minutos como mínimo, el agitado puede ser manual o mecánicamente por medio de equipo Raf-Tap.



*Ilustración 19 Material retenido de las diferentes mallas una vez pesadas. (Vaca Arciga, 2017)*

6. Una vez transcurrido este tiempo, se procede a pesar el material retenido en cada una de las mallas con una aproximación al décimo de gramo, anotando los datos en el registro. Para las mallas 4, 8, 16 y 30 se utilizará un cepillo de alambre para su limpieza, mientras que para las mallas 50, 100 y 200 se limpiarán con un cepillo de cuerdas.

Dentro del informe del análisis granulométrico debe considerar una tabla con la que se registren las masas retenidas en cada malla. Incluyendo como resultado:

- El porcentaje total del material que pasa cada malla.
- El porcentaje del material retenido acumulado en cada malla,
- El porcentaje del material retenido entre dos cribas consecutivas

A continuación, se presenta una tabla ejemplo para el informe a realizar.

*Tabla 6 Ejemplo para reportar granulometría*

1	2	3	4	5
MALLA	Masa retenida	% Retenido	% Acumulativo	% Que pasa
4				
8				
16				
30				
50				
100				
200				
CHAROLA				
SUMA				

Cálculos a realizar:

1. Teniendo como referencia, la numeración de las columnas de la tabla 6, se anotan las masas retenidas en las respectivas mallas en la columna (2).
2. El retenido de la columna (3) se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ retenido} = \frac{\text{masa retenida}}{\text{suma masa retenida}} * 100 \quad [5]$$

3. El % acumulativo se calcula a partir de los datos de la columna (3) como sigue:

$$\% \text{ acumulativo} = \% \text{ retenido malla} + \% \text{ acumulativo malla anterior} \quad [6]$$

4. El % que pasa se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ que pasa la malla} = 100 - \% \text{ acumulativo de malla} \quad [7]$$

Se calculan los porcentajes basándose en la masa total de la muestra incluyendo el del material que pasó la criba 0.075 mm (malla No. 200).

5. Módulo de finura:

$$M.F. = \frac{\text{suma del \% acumulativo de todas las mallas sin incluir la charola}}{100} \quad [8]$$

## Recomendaciones y especificaciones del cálculo:

Consignar los porcentajes en números enteros excepto para el porcentaje que pasa la criba 0.075 mm (malla No. 200) que debe informarse hasta 0.1 del porcentaje (NMX-C-077-ONNCCE., 1997), (NMX-C-251-ONNCCE., 1997).

Para fines de calidad se recomienda que el Módulo de finura esté entre 2.5 y 3.0. De acuerdo a la norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE, 2014) puede estar entre 2.3 y 3.2.

En la tabla 7, (ASTM C266 - 15, 2015), menciona las siguientes especificaciones granulométricas.

El porciento referido de dos mallas sucesivas no debe ser mayor a 45%.

La ilustración 21 presenta los límites granulométricos para agregado fino para mezclas de concreto y mortero.

Tabla 7 Especificaciones granulométricas (ASTM C33 / C33M - 16, 2016).

MALLA	% QUE PASA
3/8	100
4	95-100
8	80-100
16	50-85
30	25-60
50	10-30
100	2-10

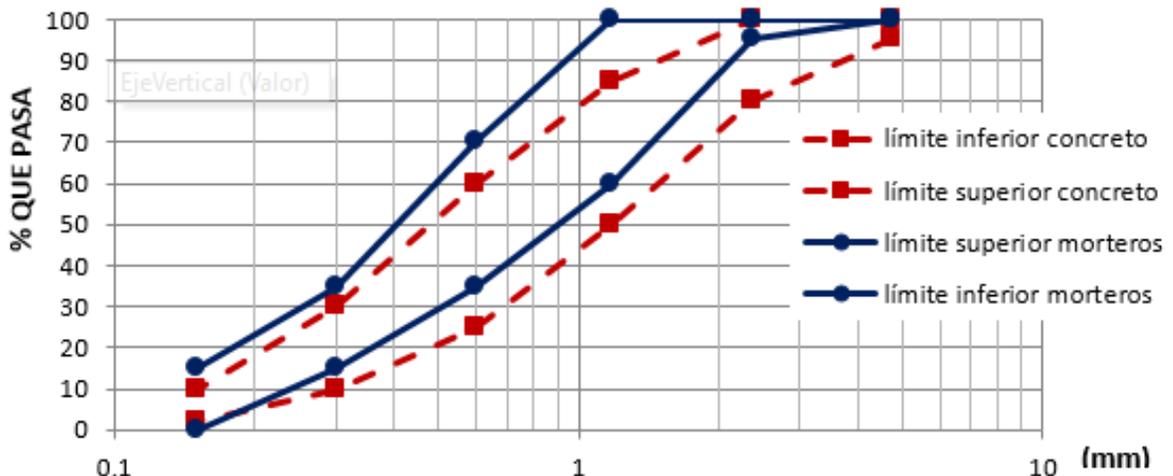


Ilustración 21 Límites granulométricos para agregado fino (Mezclas de concreto y mortero).

### 3.1.2.7 Colorimetría en arenas

Es de suma importancia el conocer el contenido de materia orgánica, en forma comparativa, utilizando una solución de color normal.

Equipo

- Frasco de biberón incoloro de 250 a 350 cm<sup>3</sup> con marcas a cada 25 cm<sup>3</sup>.
- Charolas, parrillas de secado, espátulas, balanzas, vasos de precipitado.
- Material para la solución y tabla colorimétrica.
- Solución de sosa cáustica, 30 gramos por litro de solución normal en agua destilada.

**Procedimiento.**

1. Se toma una muestra representativa de arena de 500 gramos aproximadamente.
2. Se seca hasta peso constante a una temperatura no mayor a 110 °C.
3. Se coloca la arena seca y fría en el frasco de biberón hasta 133 cm<sup>3</sup> adicionándole solución de sosa cáustica hasta la marca de 206 cm<sup>3</sup>.
4. Se tapa el frasco de biberón y se agita fuertemente durante dos minutos como mínimo, posteriormente, se dejará reposar 24 horas.
5. Al término de este periodo de tiempo se comparará el color del líquido del frasco con la tabla colorimétrica.

Si el rango de la tabla colorimétrica va de 0-5, donde el valor de 0 significa que no hay materia orgánica existente y el número 5 sería donde existe un exceso de materia orgánica.



*Ilustración 22 Prueba de colorimetría. (VACA ARCIGA, 2017)*

### 3.1.2.8 Sedimentación en arenas

Este análisis es para determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable o no en la elaboración de especímenes.

Equipo:

- Un frasco graduado con tres marcas, la primera a los 414 ml, la segunda a los 444 y la tercera a los 828 ml.
- Una muestra de arena seca de 2 kilogramos aproximadamente.
- Un litro de agua de preferencia destilada.

### Procedimiento:

1. Se coloca arena seca dentro del frasco hasta la marca de 414 ml, enseguida se coloca agua hasta la marca de 828 ml.
2. Se tapa el frasco y se procede a agitarlo hasta que todo el material fino quede en suspensión en el agua durante dos minutos.
3. Se deja reposar el frasco durante 24 horas para determinar el nivel del material fino, observando en este tiempo si el material fino rebasa o no el nivel de 444 ml.



*Ilustración 23 Prueba de sedimentación. (Báez Ángel, 2017)*

### Reporte

- Si el nivel del material fino rebasa la marca de 444 ml se reporta el material con exceso de finos.
- Si el material fino no rebasa la marca de 444 ml, se reportará que el contenido de material fino es aceptable.

#### *3.1.2.9 Material que pasa por la malla N°200 en arena*

Determinar la cantidad de materia fina que contiene una arena, cribándola por la malla N°200.

### Equipo

- Malla N°200
- Malla N°16.
- Charola de dimensiones adecuadas para contener el material con agua.
- Una balanza con aproximación al décimo de gramo.
- Espátula y parrilla eléctrica.
- Un cristal.

## Procedimiento

1. Se toma una muestra representativa de 600 gramos de arena, se seca a una temperatura no mayor de 110°C.
2. La muestra seca y fría se coloca en la balanza y se pesa al décimo de gramo (Mi).
3. Se coloca el material en un recipiente y se le agrega agua hasta saturar.
4. Se agita enérgicamente la muestra con agua y se vierte inmediatamente sobre el juego de mallas (la N° 16 arriba y la N° 200 abajo).
5. Una vez puesto el material en el juego de mallas se le sigue agregando agua y agitando hasta que el agua salga completamente clara.
6. Se regresa el material retenido en las mallas por medio del lavado.
7. Se seca el material completamente, se deja enfriar y se pesa (Mf).

El cálculo para conocer el porcentaje de material que pasa se realizó de la siguiente manera:

$$A = \frac{Mi - Mf}{Mi} * 100 \quad [9]$$

### Dónde:

- A = porcentaje de material que pasa la malla N°200.
- Mi = masa seca inicial, g.
- Mf = masa seca después de lavar (final), g.

### Recomendaciones y especificaciones

Cuando la arena se emplea en la elaboración de concreto hidráulico y esta contiene exceso de partículas finas que pasan la malla N°200, la cantidad de cemento necesario aumenta considerablemente, existiendo la posibilidad de que aparezcan grietas en las estructuras de concreto. Cuando la arena se encuentra fuera de las especificaciones, si económicamente es posible se recomienda lavarla o adoptar una solución que permita quitarle el material fino o desecharla totalmente.

El material fino de los agregados que pasa por la criba 0.075 mm (malla No. 200) debe cumplir con las condiciones establecidas en la tabla 8. La determinación se realiza de acuerdo con el método de ensayo que indica la norma. (NMX-C-111-ONNCCE, 2014)

Tabla 8 Condiciones establecidas para el material que pasa por la malla N°200

Concepto	Material Máximo permisible en Masa de la muestra total en %.	
	NMX-111-ONNCCE-2014	ASTM-C-33-03
En concreto sujeto a abrasión	5.00 <sup>[1]</sup>	3.00 <sup>[1]</sup>
En concretos presforzados	8.00 <sup>[1]</sup>	-
En otros concretos	15.00	5 <sup>[1]</sup>

<sup>[1]</sup> En caso de agregados triturados, sí el material que pasa por la criba 0,075 mm (malla No. 200) es el resultado de la pulverización de rocas exentas de arcilla y/o pizarras, este límite puede incrementarse a 6 % y 10 %, respectivamente.

<sup>[1]</sup> En caso de agregados triturados, sí el material que pasa por la criba 0,075 mm (malla No. 200) es el resultado de la pulverización de rocas exentas de arcilla y/o pizarras, este límite puede incrementarse a 5 % y 7 %, respectivamente.

### Especificaciones y recomendaciones.

Las especificaciones de la ASTM dan un porcentaje admisible de terrones de arcilla en la arena del 0.6 % y un máximo permisible del 1.2 %. En caso de que la arena está contaminada en más del 1 % se hará un estudio económico tendiente a ver si es factible cambiar el material o proceder a lavar la arena contaminada para eliminar la arcilla. (ASTM-C142/C142M., 2010).



Ilustración 24 Prueba de terrones de arcilla. (Báez Ángel, 2017)

#### 3.1.2.10 Densidad de la arena.

La densidad relativa es la propiedad de los agregados utilizada para calcular el volumen que ocupan los agregados una vez que forman parte de la mezcla de concreto.

El objetivo es determinar el volumen obstáculo de las partículas de arena, es decir, el volumen efectivo excluyendo los vacíos que se forman entre las partículas de arena cuando se acomodan una sobre la otra.

**Procedimiento:**

Utilizando el frasco de Chapman

1. Se pone a saturar la muestra en una charola durante 24 horas, al término de este tiempo se seca superficialmente utilizando el procedimiento descrito en la prueba de humedad de absorción con el molde tronco cónico.
2. De la muestra saturada y superficialmente seca tomar una porción y pesar 300 gramos.
3. Llenar el frasco de Chapman con agua hasta la marca de 200 ml.
4. Depositar los 300 gramos en el frasco, cuidando de evitar que, en su descenso dentro de las paredes de cristal, se pegue a éstas.
5. Extraer el aire atrapado rodando el frasco en una superficie plana, o en forma manual.
6. Cuando se observe que ya no suben burbujas de aire a través de los bulbos, se completa el agua hasta la marca de calibración (450 ml.)

El cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$Densidad = \frac{M_{ss}}{F_a + M_{ss} - (F_a + a)} \quad [10]$$

**Dónde:**

- $M_{ss}$ = Masa superficialmente seca (gramos).
- $F_a$ = Frasco con agua hasta el nivel de aforo, g.
- $F_a+a$ = Frasco con agua y arena hasta el nivel de aforo, g.



*Ilustración 25 Determinación de la densidad de la arena por medio del frasco de Chapman (Báez Ángel, 2017)*

### 3.1.2.11 *Equivalente de arenas.*

Determinar las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene, empleando un procedimiento que amplifica el volumen de los materiales finos plásticos. Este es un procedimiento rápido para conocer la calidad de los materiales que se emplean como: sub base, base, carpeta asfáltica y arena para concreto.

#### Equipo

- Probetas de lucita o acrílico graduadas en decimos de pulgada.
- Tapón de hule. Tubo irrigador.
- Un tramo de manguera
- Un apisonador metálico de  $1000 \pm 5$  gramos.
- Cápsulas de  $85 \pm 5$  mi (metálicas).
- Embudo. Cronómetro.
- Dos frascos de 3.875 litros.
- Malla N° 4.
- Papel filtro N° 12
- Solución de reserva.
- Solución de trabajo.

#### **Preparación de la solución de reserva.**

En un frasco se disuelven 454 gramos de cloruro de calcio en 1.89 litros de agua destilada, se deja enfriar la solución y se hace pasar a través del papel filtro, se le agregan 47 gramos de formaldehído en solución volumétrica al 40 % y 2050 gramos de glicerina USP (normalizada), mezclando el total. Finalmente, se le agrega agua destilada hasta completar los 3.785 litros y agitando toda la solución para uniformizarla.

#### **Preparación de la solución de trabajo.**

En un frasco de 3.875 litros se colocan  $85 \pm 5$  cm<sup>3</sup> de la solución de reserva completando con agua destilada hasta el nivel de 3.785 litros.

#### **Procedimiento**

Se toma una muestra de material de aproximadamente 500 gramos que pasa la malla N° 4, procurando que no se pierdan finos.

1. Se llena la cápsula y se golpea para acomodar el material y se enrasa.
2. Se vierte solución de trabajo en las probetas hasta una altura de  $4 \pm 0.1$  de pulgada y se coloca la muestra en la probeta previamente preparada usando un embudo para evitar pérdidas de material. Déjese reposar  $10 \pm 1$  minuto procurando no mover la probeta en este lapso de tiempo.

3. A continuación se coloca el tapón de hule a la probeta inclinándola para que afloje el material del fondo y agítese con una carrera de 20 centímetros (8 pulgadas) hasta completar 90 ciclos en 30 segundos.

4. Se introduce el tubo irrigador, se pica el material y con el mismo se baja el material que quedó en las paredes de la probeta, se llena con solución de trabajo hasta la marca de 15 y se deja reposar 20 minutos al término de este tiempo en la escala de la probeta se lee el nivel superior de la arcilla en suspensión la cual se denominará lectura de arcilla.

5. Se introduce el apisonador lentamente en la probeta ajustando hasta que el apisonador se apoye en la arena, el nivel donde se apoya en la arena se denominará lectura de arena.



*Ilustración 26 Llenado de capsula (Fotografía L. Colín).*

Procedimiento para calcular el equivalente de arena:

$$E. de arena = \frac{Lectura de arena}{Lectura de arcilla} * 100 \quad [11]$$

La prueba se realizará por triplicado y se hará un promedio de los resultados.

#### **Causa de error.**

- Que el agitado se haga en forma inapropiada.
- Que se muevan las probetas cuando se encuentran en reposo.
- Que al introducir el apisonador en la probeta se baje a velocidad excesiva.

#### 3.1.3 Análisis del agua

El agua utilizada en el presente trabajo es proveniente de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Dicha agua se empleó tal cual como llega al Laboratorio, esto para realizar las mezclas lo más apegado posible a lo que se utiliza en la obra, en condiciones reales. Generalmente se utiliza el agua potable, es decir, que sea líquida, transparente, inodora, incolora e insípida (NMX-C-122-ONNCCE., 2004).

## 3.2 Pruebas realizadas al mortero fresco

### 3.2.1 Fluidez

El objetivo es determinar el contenido de agua necesaria para que el mortero sea manejable, plástico y dúctil.

Esta prueba puede variar dependiendo de la persona que lo realice y de la temperatura ambiente, incluso los resultados pueden ser variados de un día para otro por diversas circunstancias, así como puede variar en el mismo día (Temperatura, agua etc.).

#### **Procedimiento:**

1. Lubricación de la mesa. El eje vertical se mantiene limpio y se lubrica con aceite SAE-10. No debe haber aceite entre las caras de apoyo de la saliente del eje y el soporte. El aceite sobre la cara de la leva disminuye el desgaste y facilita la uniformidad del funcionamiento, se recomienda levantar la mesa y dejarla caer doce veces.
2. El molde para colar el espécimen para el ensaye es de bronce o latón con diámetro de la boca superior de 70 mm, las superficies definidas por la base y el borde superior serán perpendiculares entre sí y al eje del cono vertical.
3. El calibrador se usa para medir el diámetro del mortero después de que haya extendido, tiene una exactitud tal que la distancia entre las quijadas debe ser de 102 mm cuando el indicador se encuentre en cero.
4. Se debe de humedecer la parte superior de la mesa, se limpia del material arenoso, y se elimina el exceso de agua con una franela húmeda todo para poder realizar el ensaye, se centra el molde en la mesa, después se ajusta y se llena, en dos capas que en total den el volumen del molde (*Ilustración 28*), se compacta cada una de las capas con 20 golpes (*Ilustración 29*), las cuales se distribuyen en la sección transversal, teniendo cuidado de no penetrar la capa subyacente, al finalizar se enrasa con una llana el exceso de mortero (*Ilustración 30*) y se retira, limpiando el área de la mesa que se encuentra al molde. El molde se remueve con un tirón firme hacia arriba. La mesa se eleva y se deja caer 1.3 cm, 25 veces durante 15 segundos, haciendo girar la eleva a una velocidad uniforme (*Ilustración 31*), el diámetro del mortero extendido es el promedio de cuatro medidas distribuidas simétricamente, leídas y redondeadas al 0.5 cm (*Ilustración 32*).



*Ilustración 27 Llenado del molde de bronce en dos capas. (Báez Ángel, 2017)*



*Ilustración 28 Compactación de la pasta. (VACA ARCIGA, 2017)*



*Ilustración 29 Enrasado con una espátula el exceso de mortero. (VELÁZQUEZ ROBLERO, 2017)*



*Ilustración 30 Expansión de la mezcla de forma manual haciendo girar la leva. (VACA ARCIGA, 2017)*



*Ilustración 31 Toma de mediciones para determinar la fluidez (Vaca Arciga, 2017)*

## Cálculos.

Se registra como el porcentaje en que se incrementa el diámetro del mortero extendido con respecto al diámetro original de la base del mortero moldeado, o sea:

$$\text{Fluidez (\%)} = \frac{\text{Diámetro extendido} - 25 \text{ cm}}{25 \text{ cm}} * 100 \quad [12]$$

Referencia.

(NMX-C-061-ONNCCE, 2015).

### 3.2.2 pH.

El ensayo para la obtención del “potencial de Hidrógeno” (pH) en el mortero en estado fresco, se realizó con ayuda de tiras indicadoras de la marca CIVEQ, fabricada por la empresa Científica Vela Quin S.A. de C.V.

El objetivo de colocar las tiras de papel en la mezcla fresca, es saber si es alcalina, siendo este una característica más de la mezcla en estudio.

### Procedimiento:

1. Se colocó una tira del papel indicador sobre el mortero fresco, haciendo que el lado que contiene los indicadores toque perfectamente al mortero.



Ilustración 32 Papel indicador puesto en contacto con el mortero (Báez Ángel, 2018)

2. Se dejó el papel durante un tiempo de aproximadamente un minuto, con el propósito de que la tira indicadora nos arrojará valor más exacto del pH.

3. Al retirar la tira de papel del mortero, se comparó el color obtenido con los valores que vienen en la tabla del producto (haciendo coincidir los 4 colores de la tabla de referencia) y se obtuvo un valor del pH para cada mezcla puesta en estudio.



Ilustración 33 Papel indicador de pH (Vaca Arciga, 2017).

### 3.2.3 Temperatura

Según la normativa mexicana (NMX-C-159-ONNCCE., 2004) la temperatura de una mezcla en estado fresco debe aproximarse a la temperatura ambiente que se encuentra a la hora de realizar dicha mezcla. Para la obtención de datos precisos de las temperaturas en cada una de las mezclas en estudio se realizaron lecturas por medio de un termómetro de mercurio, el cual arroja un valor de temperatura sin afectar la mezcla después de elaborarla.



Ilustración 34 Medición de temperatura. (VACA ARCIGA, 2017)

### 3.3 Elaboración de especímenes

Observamos en la ilustración 35 que, conforme la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), los moldes para la elaboración de los especímenes deben cumplir ciertas características, entre ellas están que los moldes deben ser de acero, hierro fundido o de cualquier otro material que no sea absorbente y que no sea reactivo con el cemento Portland, dichos moldes deben tener las dimensiones que la misma norma nos cita y deben mantenerlas bajo condiciones severas de trabajo, deben ser no permeables durante su empleo y si es necesario se les puede agregar algún material de sello por la parte externa, tales como grasa, plastilina o parafina. Deben tener los elementos necesarios para la fijación correcta a la base. Si el molde es de uso repetitivo, se le puede agregar algún desmoldante que facilite la extracción del espécimen del molde.



*Ilustración 35 Elaboración de los especímenes. (Báez Ángel, 2017)*

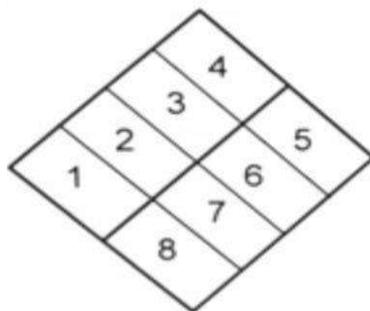
#### 3.3.1 Elaboración de cubos

Para la elaboración de los cubos de mortero en sus diferentes sustituciones, se utilizaron moldes de acero inoxidable y bronce que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma correspondiente para la fabricación de cubos.

Los moldes que se utilizaron son de un material de acero inoxidable y bronce con dimensiones estándar de 5 cm de arista, fijados a la placa de base con soldadura y unidas las cuatro caras del cubo con una bisagra ubicada en una de las aristas del cubo y realizando el cerramiento con un clavo o tachuela para no permitir la salida de la mezcla al realizar el colado del mortero.

### Procedimiento:

1. Se limpian los moldes con una estopa para tener una superficie libre de polvo.
2. Los moldes se recubrieron con un desmoldante, se utilizó aceite para transmisión mezclado con diésel para que la mezcla fuera la apropiada para al momento de desmoldar fuera sencillo y sin que las aristas sufrieran daños.
3. El llenado se realizó en cuatro capas de igual espesor aproximadamente (ASTM-C-109 M, I., 2002), en cada capa de mortero y antes del llenado de la subsecuente, se le dieron 8 golpes en la superficie, los golpes se dieron en diferente sentido a cada capa, lo cual se muestra en la Ilustración 38, el pisón es de forma rectangular en su base, de aproximadamente 2.5cm x 1.25cm, después del llenado de la última capa, se tenía el cuidado de dejar un sobrante de mezcla en la superficie, esto para posteriormente enrazar el cubo utilizando una espátula o similar.



*Ilustración 36 Repartición de golpes durante el llenado de los cubos*

4. Una vez fabricado el número de cubos correspondientes a las edades de prueba especificadas y con la sustitución correspondiente, se dejan fraguar en sus moldes, al transcurso de 24 horas aproximadamente, los cubos se desmoldan.
5. En la superficie de cada cubo, con ayuda de un marcador indeleble se escribió su correspondiente nomenclatura (la nomenclatura que se le puso a todos los especímenes como son: cubos, cilindros, prismas y briquetas, fue la misma), la nomenclatura consistió en la fecha de elaboración del cubo, la sustitución, el porcentaje de la sustitución de la mezcla con la que se elaboró y el material de dicha sustitución.
6. Una vez realizado lo anterior, se procedió a curar los cubos de mortero (el curado para todos los especímenes como son: cubos, cilindros, prismas y briquetas fue el mismo) el curado que se dio a los especímenes fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba (ASTM-C-515, 2003).



*Ilustración 37 Moldes, llenado y colado de especímenes cúbicos (Báez Ángel, 2017)*

### 3.3.2 Elaboración de prismas

Los moldes prismáticos para las pruebas de flexión deben ser rectangulares a menos de que se especifiquen de otra forma y de las dimensiones que estipule el método de prueba, además deben cumplir con las características mencionadas en la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), la cual señala que las dimensiones interiores deben ser lisas y libres de imperfecciones, los lados y el fondo deben formar ángulos rectos entre sí. La máxima variación que se permite en cualquiera de las dimensiones de su sección transversal nominal es de  $\pm 3$  mm en moldes de 150 mm o más de profundidad, y de  $\pm 1.5$  mm en moldes de menor profundidad. Los moldes no deben variar de la longitud especificada en  $\pm 1.5$  mm, excepto para los especímenes por flexión.

Para la fabricación de los prismas de dimensiones 4cm x 4cm x 16cm, se utilizaron moldes de acero inoxidable.

El llenado de los prismas se realizó en dos capas de igual espesor aproximadamente (2cm), cada capa se compactó con 12 golpes, utilizando un pisón de las mismas características que el utilizado en la compactación de los cubos.

Transcurridas 24 horas de su elaboración, se procedió a desmoldar los especímenes y se etiquetaron de la misma forma descrita en la elaboración de cubos para iniciar el proceso de curado por inmersión.



*Ilustración 38 Moldes y colado de prismas (Báez Ángel, 2017).*

### 3.3.3 Elaboración de cilindros.

Los moldes cilíndricos verticales, deben cumplir con las características mencionadas en la norma (NMX-C-159-ONNCCE, 2004), la cual señala que deben ser de lámina gruesa o cualquier material no absorbente, el plano definido por el borde del cilindro debe ser perpendicular a su eje; las dimensiones no deben variar en más de 1% de su diámetro y 1% de su altura de acuerdo a las dimensiones especificadas, respetando la relación 1:2 (diámetro: altura), deben estar provistos de una base maquinada metálica con planos lisos y con elementos para sujetarlas firmemente al molde con su plano perpendicular al eje del molde.

Se deben de llenar en 3 capas de igual espesor, en cada capa se varilla con una pequeña varilla que cumpla con lo establecido en la norma, aparte de esa varilla se le adicionan algunos golpes con el mazo hasta que las burbujas de aire atrapadas desaparezcan por completo.



*Ilustración 39 Elaboración de cilindros. (Santillán Barragán, 2017)*

### 3.3.4 Elaboración de briquetas

Para la elaboración de briquetas se utilizaron moldes de bronce y se siguió el mismo procedimiento que para los demás especímenes, es decir, se limpiaron los moldes,

se engrasaron para evitar que el material se adhiriera a las paredes y se procedió a llenarlos.

La elaboración de briquetas no tiene una reglamentación por norma. Para su elaboración se procedió conforme el manual del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana (Martínez Molina, Navarro Sánchez, & Espinoza Mandujano, 2011), el cual consiste en llenar los moldes con mezcla y comprimirla con el dedo índice para después de eso, engrasar con una espátula y retirar el molde para continuar con la elaboración de las briquetas, esto debido a que el molde solo tiene capacidad para tres especímenes.

Como los moldes no tienen una base en la cual quede la mezcla, las briquetas se colocaron sobre una superficie de vidrio, la cual, estaba previamente engrasada para evitar que la mezcla se adhiriera a ésta.



*Ilustración 40 Elaboración de briquetas. (Báez Ángel, 2017)*

### 3.3.5 Curado de los especímenes

Las normas (NMX-C-148-ONNCCE, 2010), (ASTM-C-515, 2003), definen el almacenaje inicial corresponde básicamente al lugar donde fueron elaborados los especímenes, para lo cual, una vez realizado el acabado a la superficie, se debe cubrir el mortero con algún elemento que no absorba agua, con el fin de no permitir la pérdida de agua en el espécimen fresco.

La remoción de los moldes debe efectuarse en no menos de 20 horas, ni después de 48, luego de elaborado el elemento, procediendo al almacenaje en un medio que permita el adecuado curado del mortero, en este caso la temperatura de curado debe ser  $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$  desde el momento del desmolde hasta el día en que se le realizaran las pruebas correspondientes.

El agua que es adecuada para mezcla también lo es para curado. Sin embargo, el hierro y la materia orgánica pueden ocasionar manchas, especialmente si el agua fluye lentamente sobre el concreto y se evapora con rapidez. En algunos casos la decoloración es insignificante y cualquier agua adecuada para mezcla, incluso de

calidad ligeramente menor. Sin embargo, es esencial que esté libre de sustancias que ataquen al concreto, por ejemplo, el CO<sub>2</sub> libre (Neville & Brooks, 2010).

Para constatar que todos los especímenes lograran la temperatura marcada en la normativa para su curado, todos los especímenes fueron sumergidos en agua en recipientes limpios de 19 litros y tinas, teniendo un monitoreo constante del tirante de agua y de la temperatura para cumplir con las especificaciones de la norma hasta el día de la prueba.



*Ilustración 41 Curado de los especímenes por sumersión. (Santillán Barragán, 2017)*

### 3.4 Pruebas realizadas al mortero endurecido

Se elaboraron y caracterizaron las propiedades físicas y mecánicas de tres mezclas de mortero, dos con sustituciones parciales de CP por sílice: la primera con sílice de la planta geotérmica Los Azufres (Az), ubicada en Michoacán, y la segunda con sílice de la planta geotérmica de Cerro Prieto (CP), ubicada en Baja California, y una mezcla control sin sustituciones (Testigo). Se les realizaron pruebas físico-mecánicas y por durabilidad a edades tardías, como lo son a: 90 y 180 días.

Para conocer el comportamiento de las mezclas de mortero en estado endurecido se emplearon las siguientes metodologías:

#### 1. Pruebas Físico-Mecánicas

- **Pruebas no destructivas:** se realizan pruebas donde no se altere la composición física ni química de los especímenes, las cuales arrojan resultados de cada mortero en estudio.

- **Pruebas Destructivas:** su principal objetivo es el evaluar la resistencia mecánica que ayuden a tener resultados característicos del mortero endurecido.

## 2. Por durabilidad

El ACI define la durabilidad del concreto de CP, como la habilidad para resistir la acción del intemperismo, el ataque químico, abrasión, y cualquier otro proceso o condición de servicio de las estructuras, que produzcan deterioro del concreto.

### 3.4.1 Pruebas no destructivas

Son pruebas de inspección que se utilizan para la detección y evaluación de las características que puedan existir tanto en la superficie como en el interior de la matriz cementante. A estas pruebas se les llama pruebas no destructivas porque al aplicarlas, los especímenes no se destruyen ni se ven afectadas sus propiedades físicas, químicas, mecánicas y/o características dimensionales.

Los resultados que arrojan estas pruebas son de gran ayuda para conocer de forma aproximada la calidad de la mezcla de mortero, así como para determinar la ausencia o presencia de condiciones o discontinuidades que puedan tener un efecto en la utilidad del objeto, el cual pueda ser dañino. Las pruebas no destructivas también pueden realizarse para medir otras características de prueba del objeto como tamaño, dimensión, configuración, estructura, incluyendo contenido de aleación, dureza, tamaño de grano, etc. (Charles, 2001).

Las pruebas no destructivas que se realizaron en la presente investigación fueron densidad, gravedad específica, resistividad eléctrica (RE) y velocidad de pulso ultrasónico (VPU).

#### 3.4.1.1 Densidad

Para el cálculo del volumen efectivo excluyendo los vacíos que en nuestro espécimen se lleguen a encontrar se realiza la prueba de densidad, la cual consiste en probar especímenes cúbicos por edad y por tipo de mezcla. La metodología empleada para realizar dicho ensayo fue guiada con ayuda del manual de “Análisis de Materiales” (Martínez Molina, Navarro Sánchez, & Espinoza Mandujano, 2011), la cual se describe a continuación.

#### **Procedimiento:**

1. Se extrajeron de los recipientes de curado los 5 especímenes, enumerando cada uno de ellos para su identificación. Se secaron de manera superficial los especímenes con una franela para posteriormente pesarlos en la báscula, registrando el valor de cada espécimen como la masa de la muestra (M).
2. Se colocó el picnómetro sobre una superficie plana, se llenó de agua el picnómetro pasando el nivel de salida y se dejó durante un tiempo de 10

minutos aproximadamente para que el nivel se estabilizara y así no desalojara agua a la probeta graduada antes de la prueba.

3. Se colocó al mismo tiempo de ingresar el cubo una probeta graduada para medir el agua desalojada durante un tiempo de 10 minutos aproximadamente, con la intención de que se establezca el nivel de agua en el picnómetro dejando de escurrir agua dentro de la probeta.
4. Pasados los 10 minutos se midió en la probeta la lectura del volumen de agua desalojado, registrando su valor como el volumen del espécimen (V).
5. Terminado el proceso de la prueba y con los datos arrojados por el ensayo se procedió a aplicar la siguiente fórmula para conocer la densidad de la mezcla en estudio, la cual se establece de la siguiente manera:

$$D = \frac{M}{V} \quad [13]$$

**Donde:**

- D = densidad del espécimen, en g/cm<sup>3</sup>.
- M = masa superficialmente seca del espécimen, en g.
- V = volumen del espécimen (volumen desalojado), en ml (equivalente a cm<sup>3</sup>).



*Ilustración 42 Prueba de densidad. (VACA ARCIGA, 2017)*

*3.4.1.2 Gravedad específica*

La definición de gravedad específica es la relación entre la densidad de una sustancia y la de la otra, para sólidos y líquidos la relación se hace con base al agua. El peso específico estará relacionado con la gravedad y el campo electromagnético en las distancias atómicas.

El ensayo para conocer la gravedad específica en los morteros puestos en estudio se realizó a 5 especímenes cúbicos y a 5 especímenes cilíndricos, esto con ayuda del manual de “Análisis de Materiales” (Martínez Molina, Navarro Sánchez, & Espinoza Mandujano, 2011) y de la normativa mexicana correspondiente (NMX-C-263-ONNCCE, 2010).

**Procedimiento:**

1. Se extrajeron de los recipientes de almacenamiento los 5 especímenes de donde permanecían en proceso de curado, enumerando cada uno de ellos para su identificación.
2. Se secaron las muestras superficialmente con una franela y se determinó con ayuda de la báscula su masa superficial seca ( $M_{ss}$  = Masa superficialmente seca).
3. Se adaptó la canastilla a la balanza, sumergiéndola dentro del bote con agua, procurando que al momento de colocar el espécimen el nivel de agua este aproximadamente una pulgada por encima de este.
4. Se colocó la muestra dentro de la canastilla sumergida (Ilustración 43), registrando esta masa del espécimen como su masa sumergida más la canastilla ( $M_s + M_c$ ). Por consiguiente, se realizó el cálculo para conocer la masa sumergida del espécimen ( $M_a$  = Masa sumergida) como:

$$M_a = (M_s + M_c) - M_c \quad [14]$$

**Donde:**

- ( $M_s + M_c$ ) = Masa sumergida más la canastilla (g).
  - $M_c$  = Masa de la canastilla sumergida (g).
5. Posteriormente las muestras se ingresaron al horno a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas para su secado.
  6. Pasado el tiempo de secado, se sacaron del horno las muestras y se dejaron enfriar a temperatura ambiente, para después determinar su masa seca con ayuda de la balanza; registrando este valor como masa seca del espécimen ( $M_s$ =Masa seca).

Para conocer los valores de gravedad específica para cada una de las mezclas y edades de prueba se aplicó la siguiente fórmula:

$$G. E. = \frac{M_s}{M_{ss} - M_a}$$



*Ilustración 43 Prueba de Gravedad Específica. (Báez Ángel, 2017)*

#### *3.4.1.3 Resistividad Eléctrica*

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad. Su unidad de medida es el ohm-cm u ohm-m, depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del mortero y en menor grado, de la hidratación de la pasta y de la presencia de sales disueltas en la fase acuosa en función de variables tales como: el tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, la porosidad de la estructura, entre otras.

La resistividad eléctrica fue la primera prueba no destructiva realizada a los especímenes cúbicos y prismáticos, los especímenes se extraían de la pila de curado y se cubrían con una franela húmeda para evitar la pérdida de humedad. Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo Resistómetro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos (ASTM-G57, 2012) (Ilustración 44).

#### **Procedimiento:**

1. Se determinan las dimensiones de la muestra:
  - Cubos: lado 1, lado2 y espesor.
  - Prismas: base (lado1), espesor (lado2) y longitud.
  - Cilindros: diámetro, longitud.
2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson.
4. Se colocan las caras laterales del espécimen a realizarle la prueba entre dos placas de cobre y entre estas esponjas húmedas.

5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el espécimen a una corriente dada, (I) y voltaje (E).

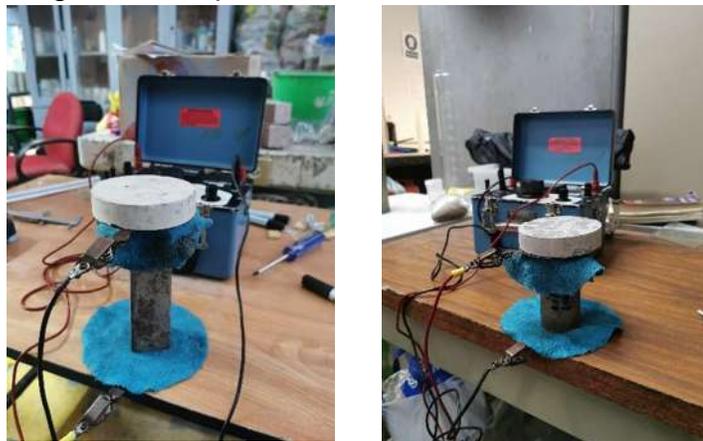
La resistencia eléctrica (R) se calcula como  $E/I$  y se expresa en Ohm.

Para el cálculo de resistividad se utilizó la siguiente fórmula (NMX-C-514-ONNCCE, 2016)

$$\rho = R_e \left( \frac{A}{L} \right) \quad [15]$$

**Donde:**

- $\rho$  = Resistividad eléctrica en  $K\Omega\text{-cm}$  (ohm-m)
- $R_e$  = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en  $\Omega$  o  $K\Omega$
- $A$  = Área transversal del espécimen en  $\text{cm}^2$
- $L$  = Longitud del espécimen en cm



*Ilustración 44 Prueba de resistividad eléctrica en especímenes. Carreón Eduardo, 2020)*

*Tabla 9 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (NMX-C-514-ONNCCE, 2016)*

<b>RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (<math>K\Omega\text{-CM}</math>)</b>	<b>RIESGO DE CORROSIÓN</b>
<b>&lt; 10</b>	Alto riesgo
<b>10 A 50</b>	Riesgo moderado
<b>50 A 100</b>	Bajo riesgo
<b>&gt;100-200</b>	Muy bajo riesgo

#### *3.4.1.4 Velocidad de Pulso Ultrasónico (VPU)*

Esta prueba no destructiva tiene como principales objetivos los siguientes:

- Verificar la homogeneidad (uniformidad y calidad relativa) en este caso del mortero.
- Detectar las fallas internas (presencia de vacíos) introducidas durante la fabricación, la profundidad de las fisuras y otras imperfecciones.
- Monitorear las variaciones de las propiedades del mortero a lo largo del tiempo, debido a la agresividad del medio.

La velocidad de pulso ultrasónico se considera como la relación que existe entre la distancia de viaje a través del mortero de una onda ultrasónica y el tiempo que tarda en recorrerla. Un impulso eléctrico generado por una unidad central se transmite a un emisor que excita un bloque de cristales. El emisor a través del bloque emite un pulso ultrasónico que viaja a través del mortero hasta que es detectado por el receptor. Aquí el pulso ultrasónico se convierte en un impulso eléctrico, el cual se registra en un osciloscopio. El tiempo entre la descarga inicial y la recepción del pulso se mide electrónicamente. La longitud de la trayectoria entre los transmisores, dividido entre el tiempo de viaje, da la velocidad promedio de la propagación de la onda (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000).

Para poder comenzar con las pruebas se obtuvieron las masas y dimensiones de los especímenes.

La normativa (ASTM-C-597, 2009), rige la prueba de velocidad de pulso ultrasónico (VPU). El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos, con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a 1 999.9 $\mu$ s; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1 $\mu$ s; salida del transmisor hasta 1500V; funciona con baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM. El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie de prueba y para tal fin se emplea un gel. Durante la realización de la prueba se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas.



*Ilustración 45 Prueba Velocidad de Pulso Ultrasónico (Carreón Eduardo, 2020)*

De acuerdo con (NMX-C-275-ONNCCE, 2016), se establecen los criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico y así determinar la calidad del mortero de acuerdo a los resultados obtenidos en la investigación (Tabla 10).

*Tabla 10 Criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico (NMX-C-275-ONNCCE, 2016).*

<b>Velocidad de propagación</b>	<b>Calidad del mortero</b>
< 1,780 m/s	Muchos vacíos o agrietamiento alto
1,780 a 2,350 m/s	Algunos vacíos o agrietamiento medio
>2,350 m/s	Pocos vacíos o agrietamiento bajo o nulo

*Tabla 11 Criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico (RED DURAR , 2000)*

<b>Velocidad de propagación</b>	<b>Calidad del mortero</b>
<2,000 m/s	Deficiente
2,001 a 3,000 m/s	Normal
3,001 m/s a 4,000 m/s	Alta
>4,000 m/s	Durable

### 3.4.2 Pruebas destructivas

Son aquellas en que las propiedades físicas del espécimen son alteradas y sufren cambio en la estructura de la matriz, sufren cambios irreversibles como producto de la prueba. Las probetas se usan una vez y se descartan.

Las pruebas destructivas que se le realizaron a las diferentes mezclas de mortero endurecido fueron: resistencia a la compresión simple, resistencia a flexión, resistencia a tensión directa e indirecta.

#### *3.4.2.1 Resistencia a la compresión*

Se utilizaron 5 especímenes cúbicos de 5 cm de arista por cada mezcla, es decir 15 cubos en total para las edades de 90 días y 15 cubos más a los 180 días.

La norma mexicana (NMX-C-403-ONNCCE., 1999), define a la resistencia a compresión como la capacidad de carga a compresión por unidad de área del concreto hidráulico, o mortero en el caso de esta investigación, cuya medida se da en ensayos de especímenes cúbicos elaborados, curados y probados en las condiciones estándar especificadas, generalmente expresada en  $\text{kgf/cm}^2$ .

Realizar la prueba para conocer la resistencia a compresión, es lo más común de todas las pruebas sobre concreto o mortero endurecido, esto porque es fácil de practicarse y porque muchas de las características deseables del concreto o mortero, aunque no todas, están relacionadas cualitativamente con su resistencia (Neville & Brooks, 2010)

#### **Procedimiento:**

1. Una vez que las muestras hayan cumplido la edad correspondiente, se sacan del lugar en donde han llevado el proceso de curado.
2. Se seca cada espécimen hasta que su superficie quede superficialmente seca.
3. Se miden las dimensiones de cada cubo para así calcular su área que servirá para el cálculo de esfuerzo (cabe mencionar que, a todos los especímenes, previo a realizar esta prueba, se les realizó todas las pruebas no destructivas, por lo que los cubos ya estaban marcados en la cara por la cual serían probados).
4. Se llevan las muestras a la prensa hidráulica, se coloca el cubo sobre la base y al centro de la platina con la finalidad de que la carga se distribuya sobre toda el área del cubo.
5. Se comienza a aplicar la carga a una velocidad constante, manteniéndola durante toda la prueba hasta la falla del cubo, registrando la carga de falla para posteriormente calcular el esfuerzo a compresión del espécimen.
6. La carga máxima que soporta el espécimen cúbico se sabe cuándo la carga registrada en la pantalla es la misma o empieza a bajar y el cubo presenta falla considerable en alguna de sus caras. La prueba se realiza a 5 especímenes para obtener un promedio y un mejor resultado.



*Ilustración 46 Prueba de compresión simple en cubos. (Carreón Eduardo, 2020)*

**Cálculos.**

$$R = \frac{W}{A} \quad [16]$$

**Donde:**

- R = Resistencia a la compresión, en kgf/cm<sup>2</sup>.
- W = Carga de ruptura de la muestra, en kgf.
- A = Área de la muestra, en cm<sup>2</sup>.

**Tabla de registro**

*Tabla 12 Tabla de registro para resistencia compresión simple*

No. de espécimen	Lado 1 cm	Lado 2 cm	Área cm <sup>2</sup>	Carga kg	Resistencia kgf/cm <sup>2</sup>

**Referencia.**

(NMX-C-083-ONNCCE, 2014).

*3.4.2.2 Resistencia a la flexión*

El ensayo para determinar la resistencia a la flexión del concreto hidráulico, se realiza mediante el uso de una viga libremente apoyada con carga en el centro del claro (NMX-C-303-ONNCCE., 2010), con dimensiones de 4x4x16 cm.

Para determinar la resistencia a la flexión, se debe tener en cuenta la definición del módulo de ruptura, siendo este definido por la normativa (NMX-C-303-ONNCCE., 2010) como “el valor obtenido mediante el procedimiento indirecto para determinar la resistencia a la tensión del concreto por el ensayo a la flexión de una viga”.

De acuerdo a lo establecido en la norma mexicana (NMX-C-191-ONNCCE, 2015) la longitud del espécimen debe ser la distancia entre apoyos más 50 mm como mínimo. La distancia entre apoyos debe ser de tres veces el peralte de la viga con una tolerancia de  $\pm 2\%$ . Esta distancia debe ser marcada en las paredes de la viga antes del ensaye. Las caras laterales deben estar en ángulo recto con las caras horizontales. Todas las caras deben ser lisas y libres de bordes, hendiduras, etc.

### Procedimiento:

1. Se midieron y marcaron los prismas a 2 cm de cada extremo, se marcó con una línea el centro del claro del prisma, donde se le aplicó la carga.
2. Se colocaron en los soportes adecuados para esta prueba y se colocan los apoyos se fijan con cinta para evitar que se muevan durante la prueba.
3. Se aplicó carga sin impacto y a una velocidad constante hasta que el espécimen falló.
4. Se registró la carga obtenida, se realizó la a 5 especímenes.



*Ilustración 47 Especímenes sometidos a flexión. (Carreón Eduardo, 2020)*

### Cálculos.

Si la fractura se presenta en el tercio medio del claro, el módulo de ruptura se calcula como sigue:

$$MR = \frac{PL}{bd^2} \quad [17]$$

### Donde:

- MR = Módulo de ruptura, en kPa ( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ ).
- P = Carga máxima aplicada, en N ( $\text{kgf}$ ).
- L = Distancia entre apoyos, en cm.
- b = Ancho promedio del espécimen, en cm.

- d = Peralte promedio del espécimen, en cm.

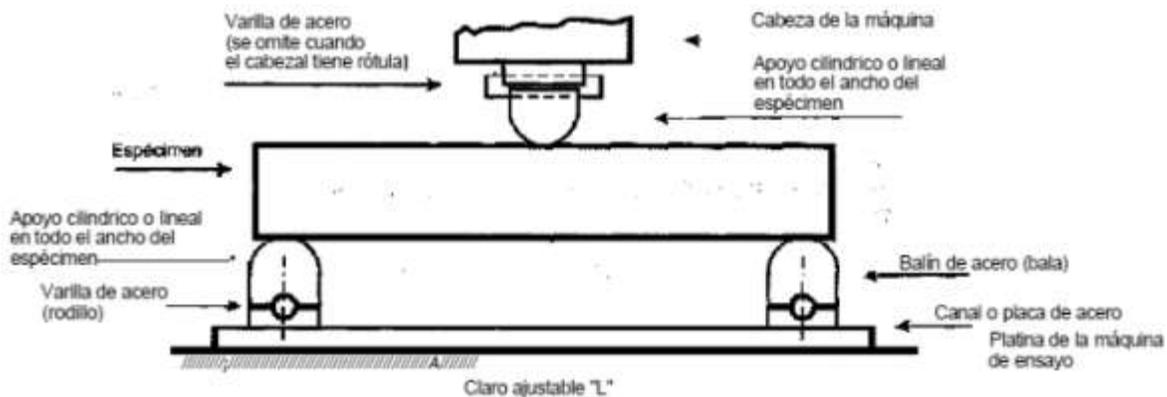
Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en liornas del 5 % del claro, el módulo de ruptura se calculará:

$$R = \frac{Pa}{bd^2} \quad [18]$$

**Donde:**

- R = Módulo de ruptura en kgf/cm<sup>2</sup>.
- P = Carga de ruptura en kgf.
- L = Claro en cm.
- b = Ancho promedio en cm.
- d = Peralte promedio en cm.
- A = Distancia entre la línea de falla y el apoyo más cercano.

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en más del 5 % del claro, los resultados deben de descartarse.



La presente figura es ilustrativa

*Ilustración 48 Representación gráfica de la prueba a flexión en un punto de carga.*

#### 3.4.2.3 Resistencia a la tensión indirecta

La prueba se realizó sobre cilindros de mortero de 5 cm de diámetro y 10 cm de longitud, aplicándole una carga en su eje longitudinal, realizando así una tensión indirecta en su estructura.

**Procedimiento:**

1. Marcado de los especímenes. En cada extremo de los especímenes se trazan líneas diametrales usando un dispositivo adecuado que, asegure estén en el mismo plano axial.

2. Se toman las dimensiones del diámetro y promedian las medidas, dos cerca de los extremos y una al centro siguiendo el plano de los diámetros marcados en los extremos. La longitud se obtiene promediando las dos medidas de las líneas que unen los extremos de cada línea que marca el diámetro en las dos caras del espécimen.
3. Se coloca una de las tiras de cuero a lo largo del centro de la placa de apoyo inferior. El espécimen se coloca sobre la tira de cuero y se acomoda de tal modo que las líneas marcadas en sus dos extremos sean verticales y queden concentradas sobre la tira se coloca longitudinalmente la segunda tira de cuero sobre el cilindro, concentrándola sobre las líneas marcadas sobre las líneas en los extremos del mismo. El conjunto debe de colocarse de tal manera que garantice las siguientes condiciones:
  - Que la prolongación del plano que contenga las dos líneas marcadas en los extremos del espécimen pase por el centro de la placa superior de apoyo.
  - Que la placa suplementaria, cuando se use, y el centro del espécimen esté directamente debajo del centro de la placa con apoyo esférico.
4. Aplicación de carga. La carga se aplica continuamente y sin impacto a una velocidad uniforme debe de anotarse la carga máxima aplicada que indique la máquina de ensaye en la falla, el tipo de falla y la apariencia del mortero.



*Ilustración 49 Prueba de tensión indirecta en cilindros. (Báez Ángel, 2017)*

### **Cálculos.**

La resistencia a la tensión indirecta del espécimen se calcula con:

$$T = \frac{2P}{dL\pi} \quad [19]$$

**Donde:**

- T = resistencia a tensión indirecta en kgf/cm<sup>2</sup>.

- $P$  = carga aplicada máxima en kgf.
- $L$  = longitud en cm.
- $d$  = diámetro en cm.

#### 3.4.2.4 Resistencia a la tensión directa

La tensión directa se obtuvo de especímenes de mortero en forma de “cacahuete” conocidas como briquetas, se utiliza la máquina de prueba para tensión directa en morteros tipo Michaelis, a la edad correspondiente por cada mezcla de estudio.

#### Procedimiento:

1. Se extraen de los recipientes de almacenamiento los 5 especímenes de donde permanecen en proceso de curado, de acuerdo a la edad de prueba y la mezcla en estudio correspondiente, enumerando cada uno de ellos para su identificación.
2. Se toman las medidas de la sección media ( $S_m$ ) de la briqueleta
3. Se lleva cada espécimen a la máquina de pruebas, sujetando la briqueleta con las mordazas de la máquina y nivelando esta con ayuda de una referencia que se encuentra en la parte superior del equipo.
4. Se aplica la carga lentamente por medio de las municiones, colocándolas en la tolva adecuada para ello, hasta la falla de la muestra.
5. Se retira la tolva de la máquina para realizar la medida de la masa, con ayuda de la báscula con aproximación al décimo de gramo. La masa de las municiones ( $M_m$ ) es considerada como la carga que soportó la sección media de la briqueleta.



*Ilustración 50 Prueba de tensión directa en briquetas. (Carreón Eduardo, 2020)*

#### Cálculos

$$R = \frac{Mm * 50}{S_m} \quad [20]$$

**Donde:**

- R = resistencia a la tensión en kgf/cm<sup>2</sup>.
- Mm = Masa de las municiones o carga de ruptura en kg.
- S<sub>m</sub> = Sección media de la briqueta en cm<sup>2</sup>.
- 50 = constante de la máquina en kgf/kg.

3.4.3 Pruebas por durabilidad

La durabilidad estudiada es la capacidad que tienen los concretos hidráulicos de CP de conservar inalteradas sus condiciones físicas y químicas durante su vida útil cuando se ven sometidas a la degradación de su composición por diferentes efectos de meteorización, ataques químicos, y cambios climáticos.

Es indispensable que el concreto o mortero resista, sin deteriorarse con el tiempo, las condiciones para las cuales se ha proyectado. La falta de durabilidad puede deberse al medio al que está expuesto el mortero, o a causas internas del mismo. Las causas externas pueden ser físicas, químicas o mecánicas; originadas por condiciones atmosféricas, temperaturas extremas, abrasión, acción electrolítica, ataques por líquidos y gases de origen natural o industrial. El grado de deterioro producido por estos agentes dependerá principalmente de la calidad del mortero, aunque en condiciones extremas cualquier mortero mal protegido se daña. Las causas internas son: la reacción álcali-agregado, cambios de volumen debidos a diferencias entre las propiedades térmicas del agregado y de la pasta de cemento y sobre todo de la permeabilidad del mortero, este factor determina en gran medida la vulnerabilidad del mortero ante agentes externos y por ello un mortero durable debe ser relativamente impermeable (Rivera, 2016).

3.4.3.1 Absorción capilar

Esta prueba se considera como la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los espacios capilares cuando el concreto se encuentra en estado líquido y en contacto con el agua. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua, y por tanto a los agentes agresivos que se encuentran en el ambiente.

El ensayo se llevó a cabo, siguiendo el procedimiento descrito por la norma (NMX-C-504-ONNCCE-2015, 2015).

**Procedimiento:**

1. El ensayo se realiza en especímenes cúbicos de espesor aproximado de 50mm. Los especímenes se pre-acondicionan mediante un secado a 60°C por 48 horas o hasta masa constante.
2. Pasados los 3 días, se colocaron los especímenes dentro de un recipiente hermético sellado durante un tiempo de 15 días, dejando un espacio de aproximadamente 5 cm. entre cada cubo de mortero, para permitir el flujo libre de aire alrededor de estos, asegurando evitar el contacto con las paredes del recipiente.
3. Se extrajeron los especímenes de prueba del recipiente de almacenamiento y se registró su masa antes de sellar las superficies laterales.
4. Con ayuda del vernier, se midió el largo y ancho de cada cubo en la superficie que se expuso al agua y se calculó el área de cada espécimen.
5. Se colocaron las esponjas en la parte inferior de los recipientes que contendrían los especímenes de prueba y se llenaron con agua del grifo para que el nivel del agua fuera de  $3 \pm 1$  mm por encima de la parte superior de cada esponja. Dicho nivel de agua, se mantuvo durante todo el ensaye.
6. Se selló la superficie lateral de cada espécimen utilizando el material de sellado (parafina y brea) sometido a la fuente de calor (parrilla eléctrica) para aplicarlo en forma líquida con la brocha. Posteriormente se dejan enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente.
7. Se tomó cada cubo ya sellado en su superficie lateral y se selló el extremo que no se expondría al agua, con una bolsa de plástico detenida con una liga.
8. Se midió la masa de cada cubo sellado y se registró como la masa inicial ( $m_0$ ).
9. Se inició la medida del tiempo, con ayuda del cronómetro, e inmediatamente se colocó la superficie de ensayo de cada espécimen sobre la esponja, anotando la fecha y hora del contacto inicial con agua.
10. Se determinó la masa que iba adquiriendo cada cubo de mortero en los intervalos de tiempo de 60 s, 5 min, 10 min, 20 min, 30 min, 60 min, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 5 horas, 6 horas, 24 horas, 48 horas, 72 horas, 96 horas, 120 horas, 144 horas, 168 horas y 192 horas después del primer contacto con el agua; retirado el espécimen del contenedor, secando con la franela hasta alcanzar una condición de superficialmente seco, invirtiendo el cubo de modo que la superficie húmeda no entrará en contacto con el platillo de la balanza, registrando cada masa como  $m_t$  y reinstalando inmediatamente cada espécimen en el recipiente.

El recipiente se mantuvo cerrado mientras no se extraía ningún cubo para evitar la evaporación del agua y por consiguiente la disminución del tirante de agua.

11. Una vez que se obtuvieron todas las masas, de cada cubo de mortero por mezcla en estudio, se procedió a realizar el cálculo para la obtención de la sorción capilar y del índice de absorción.



### Cálculo:

*Ilustración 51 Colocación de los especímenes sobre la esponja húmeda. (Carreón Eduardo, 2020)*

La norma NMX-C-504-ONNCCE-2015 indica realizar el cálculo del índice de absorción, en mm, definido como “el cambio en la masa dividida entre el producto del área transversal del espécimen por la densidad del agua (0.001 g/mm<sup>3</sup>)”, como a continuación se presenta:

$$I = \frac{m_t - m_0}{a \times d}$$

Donde:

I = índice de absorción, en mm

m<sub>t</sub> = masa, en el tiempo t, en g

m<sub>0</sub> = masa, en el tiempo 0, en g

a = zona expuesta de la muestra, en mm<sup>2</sup>

d = densidad del agua en g/mm<sup>3</sup>

Posteriormente se deben encontrar la tasa inicial y la tasa secundaria de absorción de agua del espécimen (mm/s<sup>1/2</sup>), definida como “la pendiente del análisis de regresión lineal del índice de absorción contra la raíz cuadrada del tiempo (s<sup>1/2</sup>) mediante el método de mínimos cuadrados aplicado a cada espécimen”.

#### 3.4.3.2 Carbonatación

La carbonatación es la pérdida de alcalinidad del concreto, este fenómeno actualmente afecta a muchas estructuras del país; se lleva a cabo cuando el dióxido de carbono CO<sub>2</sub> reacciona con la humedad dentro de los poros del

concreto y convierte el hidróxido de calcio  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  con un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio  $\text{CaCO}_3$  que tiene un pH menos alcalino, con valores de 9 o menos.

El contenido de humedad relativa del ambiente es un factor importante para que exista carbonatación, pero con mayor rapidez en el intervalo de 50%–70% aproximadamente ya que a bajas humedades no hay suficiente agua en los poros del concreto para que se disuelva el dióxido de carbono y en humedades altas los poros se bloquean, evitando su ingreso (Montani, 2000)

La prueba fue realizada a 3 muestras prismáticas de 4cm x 4cm x 16cm de cada mezcla. Los especímenes se dejaron a la intemperie a partir de los 28 días de su elaboración, hasta la fecha de la prueba (90 y 180 días).

### **Procedimiento:**

1. Las muestras se marcan en la cara sur ya que es la dirección de los vientos dominantes en la ciudad de Morelia, y por lo tanto la dirección más favorable para sufrir carbonatación. Ilustración 59
2. Las muestras deben de cortarse para tener una sección longitudinal en la dirección sur - norte. En el caso de la investigación el corte se llevó a cabo a la mitad del espécimen.
3. Después de que se realiza el corte longitudinal se limpia inmediatamente la cara interna de todo el material que queda suelto o polvo.



*Ilustración 52 Exposición de los especímenes al ambiente (Báez Ángel, 2017)*

4. Se le aplica con un atomizador de manera uniforme a cada una de las caras del corte la solución de fenolftaleína, el tiempo que deberá transcurrir después de realizado el corte no deberá ser mayor de 15 min.
- 5.



*Ilustración 53 Muestras con fenolftaleína aplicada a los especímenes. (Carreón Eduardo, 2020)*

- Después de realizado el corte se debe de tomar la profundidad de la carbonatación midiendo está en cada lado del corte, obteniendo un valor promedio de la profundidad de carbonatación de cada lado para cada espécimen. La profundidad de carbonatación es la longitud que no se pigmenta. Ilustración 61

**Cálculo:**

El cálculo de la constante de carbonatación se hace de acuerdo la ecuación.

$$K_{CO2} = \frac{X_{CO2}}{\sqrt{t}}, \quad [25]$$

**Donde:**

- $K_{CO2}$ = Constante de carbonatación en mm/ (año)<sup>0.5</sup>.
- $X_{CO2}$ = Profundidad de carbonatación en mm.
- t = Tiempo de exposición en años.

Con esta información también podemos calcular la vida útil de nuestro mortero de la siguiente manera:

**Cálculo:**

El cálculo de la constante de carbonatación se hace de acuerdo la ecuación.

$$t_{pred} = \left( \frac{e_c}{K_{CO2}} \right)^2 \quad [25]$$

**Donde:**

- $K_{CO2}$ = Constante de carbonatación en mm/ (año)<sup>0.5</sup>.

- $e_c$  = Recubrimiento del acero de refuerzo, en mm, con aproximación a una décima.
- $t_{pred}$  = Tiempo estimado en el que el frente de carbonatación llegue al refuerzo en años.

### Referencias:

NMX-C-515-ONNCCE-2016

3.5 Pruebas realizadas al aditivo

3.1.3 Aditivo

El aditivo que se utilizó para esta investigación es un producto comercial en polvo llamado Crisotan® R-5, elaborado por la empresa Christianson S.A. de C.V. El Crisotan® R-5 es un aditivo que provoca que la mezcla de concreto fluya más fácilmente que una mezcla convencional, a este efecto se le conoce como plastificación. El Crisotan® R-5 es un agente dispersante que promueve la separación o defloculación de las partículas de cemento, venciendo las fuerzas cohesivas que las atraen unas a otras.

El procedimiento empleado para la incorporación del aditivo plastificante a la mezcla de mortero fue el siguiente;

### Procedimiento:

1. Se pesó la cantidad requerida de porcentaje de aditivo Crisotan® R-5 en polvo, en gramos, para cada mezcla.
2. Se llenó de agua la probeta con la cantidad referida por el proporcionamiento de cada una de las mezclas a realizar.
3. Se incorporó a la probeta la cantidad de aditivo y con ayuda del agitador se mezcló hasta diluir el polvo en el agua, obteniendo un color café-oscuro.
4. Se dejó reposar el Crisotan® R-5, ya diluido en el agua, durante un tiempo de 30 minutos. Pasado este tiempo se incorporó a la mezcla de mortero para así realizar el colado de los especímenes.



*Ilustración 54 Aditivo preparado utilizado en las mezclas (Báez Ángel, 2017)*

## Especificaciones:

El porcentaje requerido para cada mezcla se definió antes de cualquier prueba, mediante iteraciones de “Prueba y error” hasta llegar a obtener una fluidez de  $110 \pm 5$ , sin utilizar cantidades mayores a las que especifica la ficha técnica.

Se llegó a la conclusión de que el aditivo reacciona de diferente manera dependiendo del tiempo que esté en contacto con el agua, por ello, en todas las mezclas, el aditivo se dejó reposar durante un mismo tiempo de 30 minutos.

## 4. Presentación y análisis de resultados

Después de haber realizado todo el desarrollo experimental presentado desde el principio de la investigación, se realizaron las pruebas de la fase experimental y a continuación se presentan los resultados y su análisis.

La comparación de resultados se realizó principalmente contra los valores obtenidos en la mezcla testigo, teniendo en cuenta también, el comportamiento entre ambas mezclas con sustituciones.

Para tener un informe más detallado de los datos de las pruebas realizadas a la edad de 1250 días, se pueden consultar en el Apéndice A.

### 4.1 Caracterización del agregado fino.

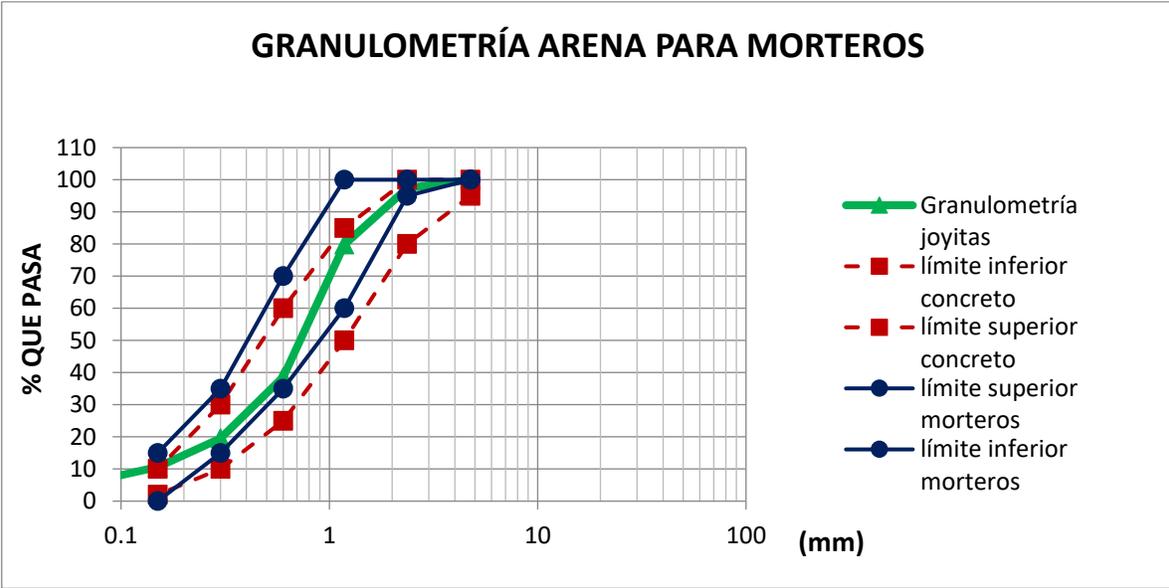
En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de la arena mediante las diferentes pruebas de laboratorio.

*Tabla 13 Resultados de la caracterización de la arena*

<b>Prueba</b>	<b>Arena de Joyitas</b>
<i>Humedad Actual (NMX-C-166-ONNCCE, 2006)</i>	5 %
<i>Humedad de Absorción (NMX-C-165-ONNCCE, 2004)</i>	3 %
<i>M.V.S.S. (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)</i>	1.52 (gr/cm <sup>3</sup> )
<i>M.V.S.V. (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)</i>	1.57 (gr/cm <sup>3</sup> )
<i>Sedimentos</i>	<i>Aceptable (&lt;30ml)</i>
<i>Colorimetría (NMX-C-088-ONNCCE, 1997)</i>	<i>Escala 3 (aceptable)</i>
<i>Contenido de material fino (pasa malla ASTM No 200) (NMX-C-084-ONNCCE, 2006) (5% Max)</i>	11.10%
<i>Contenido de Terrones de arcilla (NMX-C-071-ONNCCE, 2004)</i>	0.65%

Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) (2.15 Aceptable) (NMX - C - 165 - ONNCCE - 2014)	2.44
Módulo de Finura (<2.3-3.1>) (NMX-C-111-ONNCCE, 2014)	2.54 (mediana)
Gravedad Específica	2.33

La distribución granulométrica se presenta en la Ilustración 55 junto con los límites superior e inferior establecido por la norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).



*Ilustración 55 Distribución granulométrica de arena de Joyitas y límites inferior y superior (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).*

Como se puede observar en la Ilustración 55 la arena en estudio cumple con los límites de granulometría para mortero de acuerdo a lo establecido por la norma (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).

## 4.2 Pruebas realizadas al mortero fresco

### 4.2.1 Fluidiez

*Tabla 14 Resultados de la prueba de fluidez para cada adición*

MEZCLA	Cemento (g)	AZ (g)	CP (g)	Arena (g)	Agua (ml)	Relación A/C	Aditivo (%)	Fluidez (%)
Testigo	150	0	0	412.5	97.5	0.65	0.5	95
AZ -5%	142.5	7.5	0	412.5	97.5	0.65	0.6	97
CP -5%	142.5	0	7.5	412.5	97.5	0.65	0.6	96

En la Tabla 14 se registran los valores del diseño de la mezcla de acuerdo al parámetro de fluidez. Debido a que el agregado fino contiene exceso de finos, la cantidad de agua utilizada fue alta y por tanto la relación a/c es alta en comparación con otras investigaciones. Ambas mezclas se diseñaron con la misma relación a/c y se amplió el rango de fluidez de  $110\pm 5\%$ .

La sustitución del 5% de sílice en las mezclas de mortero presentó un comportamiento no homogéneo, por lo cual fu complicado calcular la fluidez necesaria. Durante la prueba de fluidez las mezclas presentaban poca trabajabilidad por esta razón se optó por usar un aditivo fluidificante que nos aportara la trabajabilidad necesaria para así poder colar los especímenes.

## 4.3 Pruebas realizadas al mortero endurecido

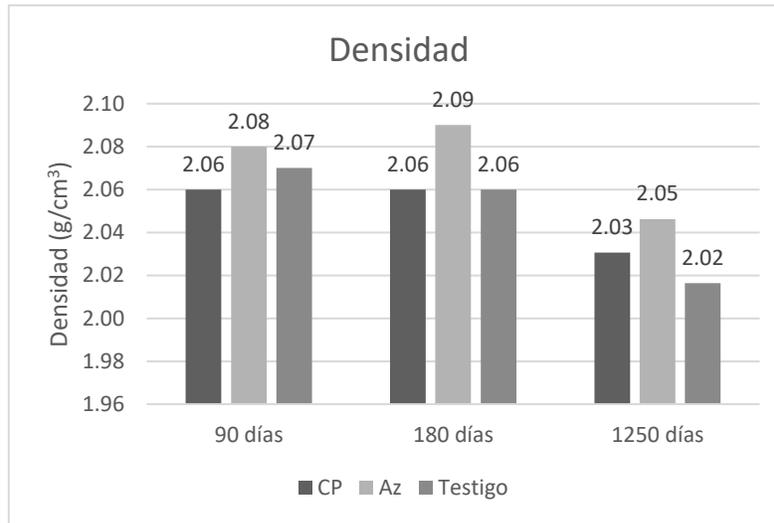
Las pruebas realizadas a lo largo de esta investigación se realizaron bajo las normativas NMX y ASTM, bajo las condiciones del laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas". Cada resultado de las pruebas realizadas se obtuvo del promedio de 5 especímenes probados por mezcla para cada edad.

### 4.3.1 Pruebas no destructivas

#### 4.3.1.1 Densidad

La densidad del mortero está directamente relacionada con la de los materiales componentes (arenas, adiciones, etc.), así como con su contenido en aire. También es determinante la granulometría y volumen que éstos ocupen en su dosificación. Además, incide en la densidad la relación agua/cemento del mortero. A medida que aumenta dicha relación más poroso es el mortero. La densidad de un mortero de CP convencional de buena calidad es de  $2.1 \text{ g/cm}^3$  aproximadamente.

En la ilustración 56, se puede observar que, las mezclas en todas las edades de prueba tienden a tener el mismo comportamiento. A los 90 días, todas las mezclas presentaron valores abajo de los 2.1 g/cm<sup>3</sup>, sin embargo, a los 180 días, presentaron una mejora aparente, pero finalmente tuvieron una caída en sus valores a 1250 días, siendo siempre consistentes de manera relativa en sus valores. La mezcla que presenta mejores valores, es aquella que sustituimos con la sílice de Los Azufres.



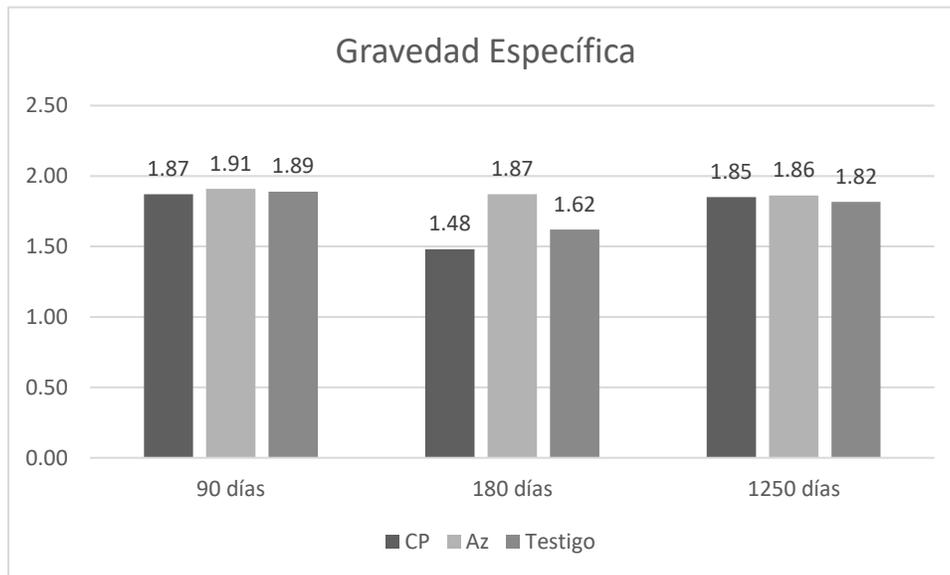
*Ilustración 56 Resultados de la prueba de densidad a 90, 180 y 1250 días*

#### 4.3.1.2 Gravedad específica – Densidad relativa

La comparación realizada a las mezclas de mortero sobre densidad relativa (gravedad específica) en relación a la densidad del agua nos presenta los siguientes resultados.

Se puede apreciar en la ilustración 57 que, el comportamiento en las tres edades es similar, solo que, a la edad de 1,250 días las mezclas disminuyen los valores de densidad relativa en comparación con la edad de 90 días. Los resultados de densidad relativa se dan en unidades adimensionales.

Como podemos observar, en las tres edades el mejor comportamiento lo presenta la mezcla con la sílice de los Azufres, por lo cual podemos afirmar que la sustitución de sílice proveniente de Michoacán, ayuda a que la matriz del mortero adquiera una mayor densidad, aunque sea marginalmente.

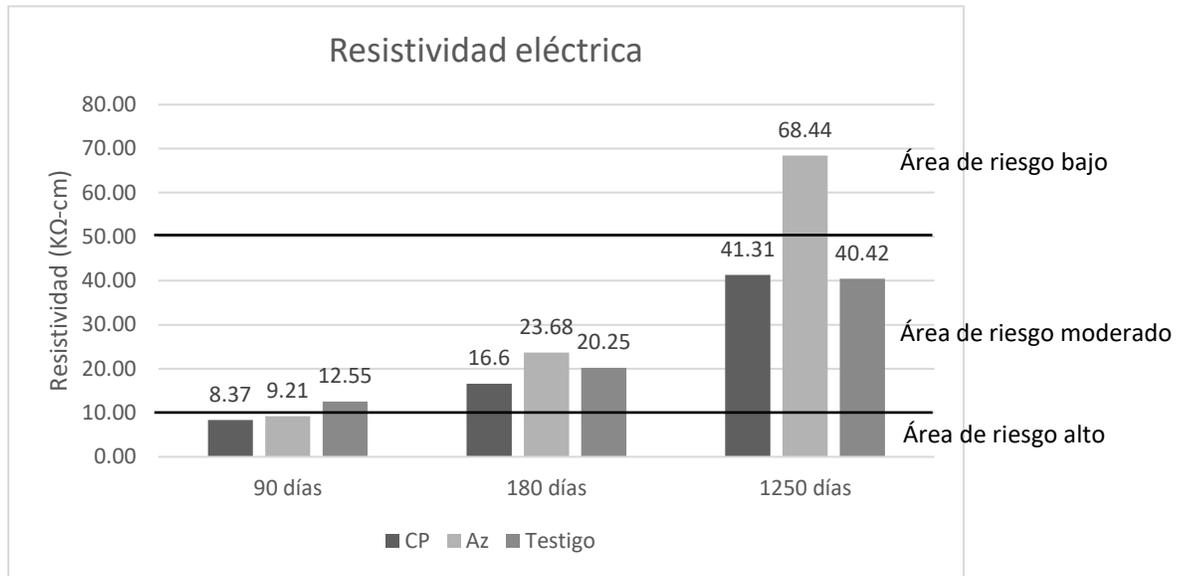


*Ilustración 57 Resultados de la prueba de gravedad específica a las edades de 90, 180 y 1250 días*

#### *6.3.1.3 Resistividad eléctrica*

Los resultados de los ensayos realizados sobre resistividad eléctrica se pueden apreciar en la ilustración 58. Para poder interpretar los resultados obtenidos partiremos de los criterios manejados por la (NMX-C-514-ONNCCE, 2016), la cual establece que entre mayor sea el valor de resistividad eléctrica, mejor será el comportamiento del mortero. Una resistividad eléctrica alta nos indica que la porosidad del material es baja, al igual que hay poca interconexión entre esos poros, lo cual es bueno ya que el mortero será resistente a afectaciones por agentes externos, como la corrosión.

En la ilustración podemos observar que, a los 90 días las mezclas de sílice no logran superar a la mezcla control y de acuerdo a la Norma Mexicana presentaban alto riesgo a corrosión. Conforme va pasando el tiempo, se ve un aumento en los valores, para la edad de 1250 días, la mezcla de Los Azufres, presenta un aumento del 69% respecto a la mezcla control, sin embargo, saliendo del área de riesgo moderado y siendo la única mezcla en el área de riesgo bajo, dificultando el transporte de agentes agresivos al acero de refuerzo, según los criterios de evaluación de la NMX-C-514-ONNCCE-2016.

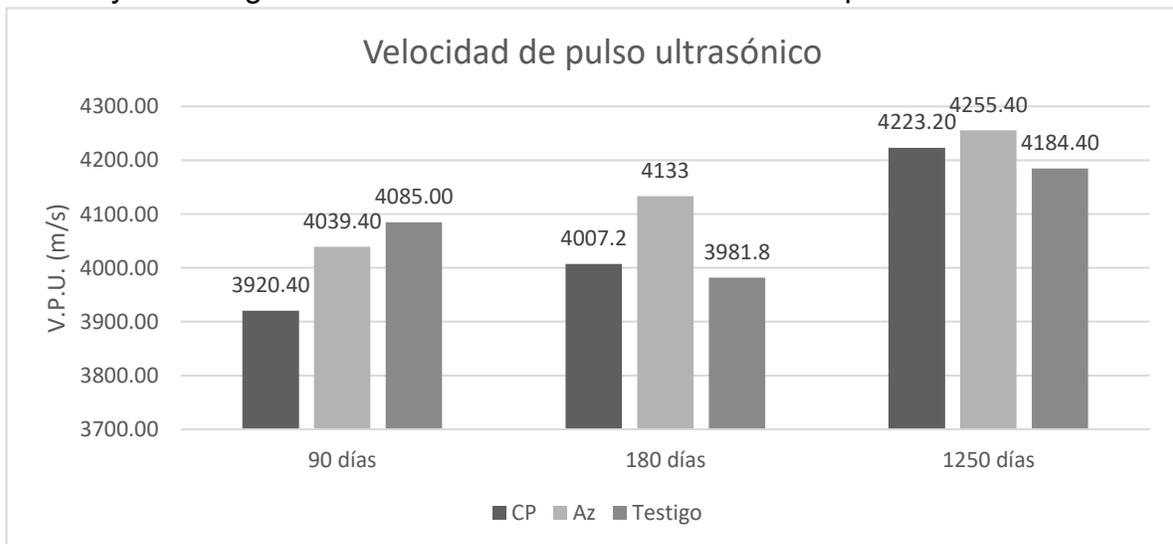


*Ilustración 58 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a los 90, 180 y 1250 días*

#### 4.3.1.4 Velocidad de Pulso Ultrasónico

En la ilustración 59, se presentan los valores obtenidos en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico durante dos edades. A los 90 días, la sílice de Cerro Prieto es la sustitución que presenta mejores resultados, superiores a los de la mezcla Testigo y de la mezcla con sílice de los Azufres. La mezcla CP supera a la mezcla Testigo en 4.20% y la mezcla Az en un 3.04%.

A los 1,250 días las mezclas con sustitución nuevamente superan a la mezcla testigo. La mezcla Az sigue mostrando valores 1.70% por encima de la mezcla control y todas siguen considerándose como muestras con pocos vacíos.



*Ilustración 59 Resultados de Velocidad de pulso ultrasónico a 90, 180 y 1250 días*

#### 4.3.2 Pruebas destructivas

##### 4.3.2.1 Índice de actividad puzolánica

La evaluación del índice de actividad puzolánica se realizó conforme a la norma (NMX-C-414-ONNCCE, 2014). En el artículo “Adición de geomateriales para evaluar el desempeño físico-mecánico en cerámicos base c. Portland” (Vaca Arciga, 2017) se observó que las mezclas preparadas con sílice, a los 28 días no presentan mejorar la actividad puzolánica respecto a la mezcla testigo. Esta prueba se evaluó mediante la resistencia a compresión simple.

Tabla 15 Índice de actividad puzolánica a los 28 días

Mezcla	Esfuerzo (MPa)	Índice de actividad puzolánica %
Testigo	32.05	----
Az	25.65	80.03
CP	23.64	73.75

Para la mezcla Az, el porcentaje de índice de actividad puzolánica se encuentra por encima de 75%, límite inferior establecido en la norma ASTM C618 (C618-15). Por lo tanto, el material en estudio presenta ser adecuado para realizar el reemplazo de CP en los morteros. La mezcla de CP no presenta resultados favorables.

##### 4.3.2.2 Resistencia a compresión simple

Uno de los ensayos que nos proporciona más información sobre las características mecánicas del mortero es el de compresión simple, ya que este ensayo nos establece parámetros generales sobre las propiedades y calidad del mortero. La prueba a compresión simple para el caso de morteros es la única que esta normada para especímenes cúbicos de 5 cm de arista.

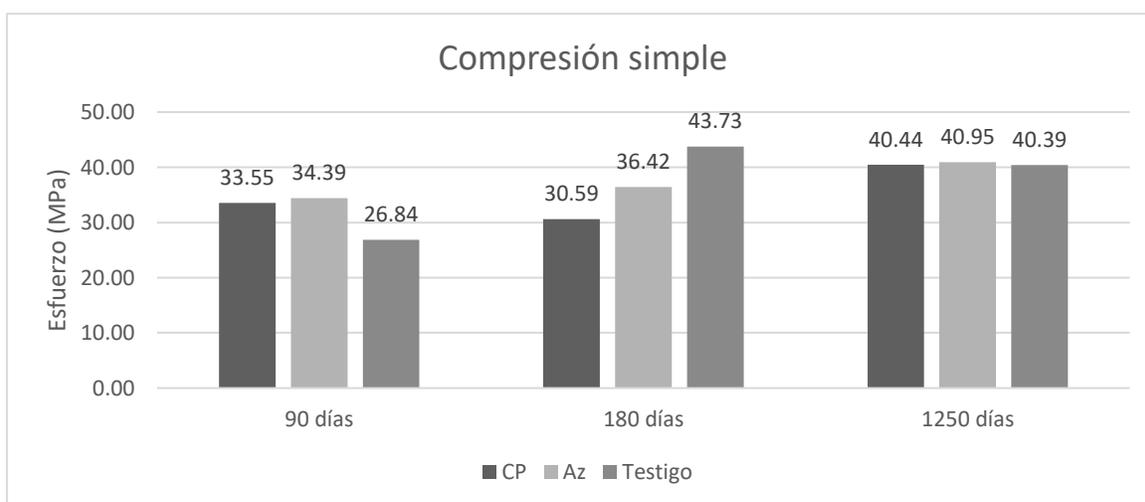


Ilustración 60 Resultados del ensayo a compresión simple a 90, 180 y 1250 días

A los 90 días, las muestras con sustituciones, presentan un mejor desempeño que las mezclas convencionales, esta situación se conserva también a la edad tardía de 1250 días, sin embargo, con una aproximación más estrecha entre todas, siendo para este caso, la mezcla de Los Azufres, la que mejores resultados presenta, superando en un 1.38% la mezcla control.

#### 4.3.2.3 Resistencia a flexión

La capacidad de flexo-tracción, expresada por medio del módulo de ruptura se obtuvo de acuerdo al valor medio de los resultados obtenidos. Se puede observar (Ilustración 61) que las mezclas con sustitución de sílice a los 90 días no logran una resistencia superior a la muestra control, esta situación se continúa presentando después de los 1250 días, en los que se ve una mejoría en el desempeño de todos los especímenes, sin embargo, se sigue presentando una pequeña mejoría del 0.4% por parte de la mezcla Testigo sobre la mezcla de Cierro Prieto.

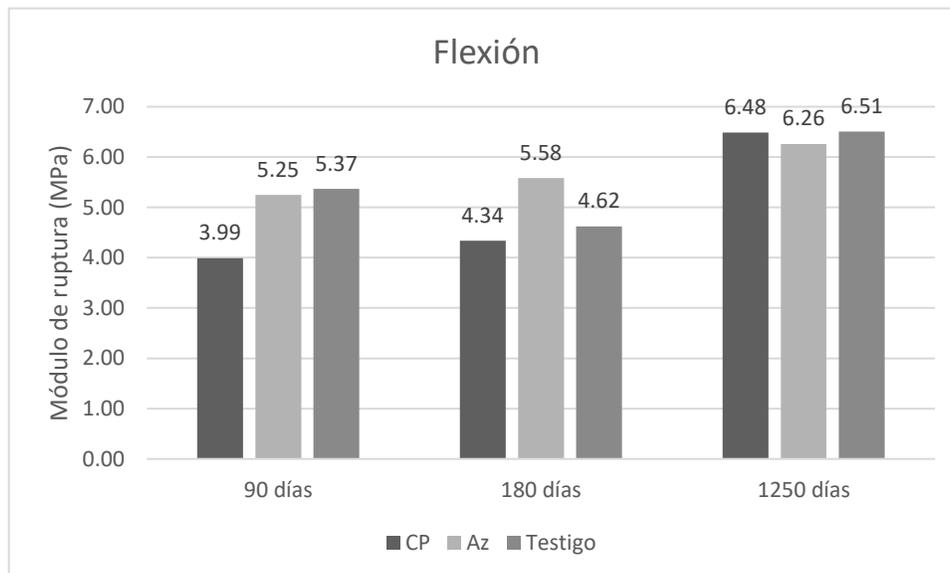
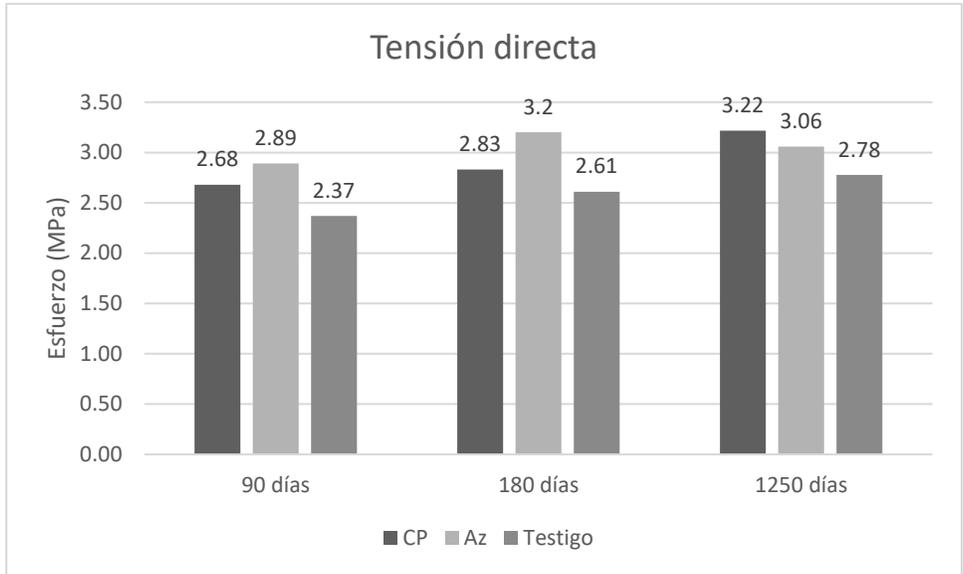


Ilustración 61 Resultados del ensayo a flexión a 90, 180 y 1250 días

#### 4.3.2.5 Resistencia a tensión directa

En la actualidad para llevar a cabo un diseño estructural se asume que el mortero trabaja a compresión o a flexión, ya que éste resiste bajas cargas a tensión. Por lo cual es importante conocer el desempeño de las sustituciones de sílice ante este ensayo.

Como se aprecia en la ilustración 62, las sustituciones con sílice, a todas las edades, logran superar a la muestra control. Los mejores resultados a 1250 días, los presenta la mezcla con sílice de Cierro Prieto, superando en 16% a nuestra mezcla Testigo.

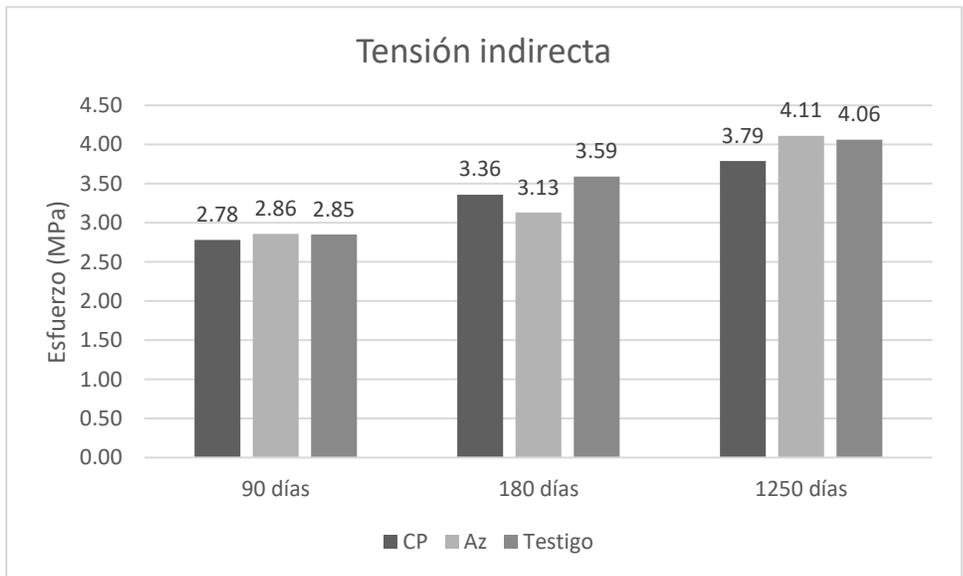


*Ilustración 62 Resultados del ensayo a tensión directa a 90, 180 y 1250 días*

#### 4.3.2.6 Resistencia a tensión indirecta

En la ilustración 63, se aprecian los resultados obtenidos en la prueba realizado a los especímenes cilíndricos.

Se mantiene una tendencia en el aumento constante de la resistencia en todas las edades, sin embargo, para la última edad, se aprecia un desempeño ligeramente mayor del 5%, sobre el espécimen Testigo, por parte de la muestra con la sustitución de sílice de Los Azufres.



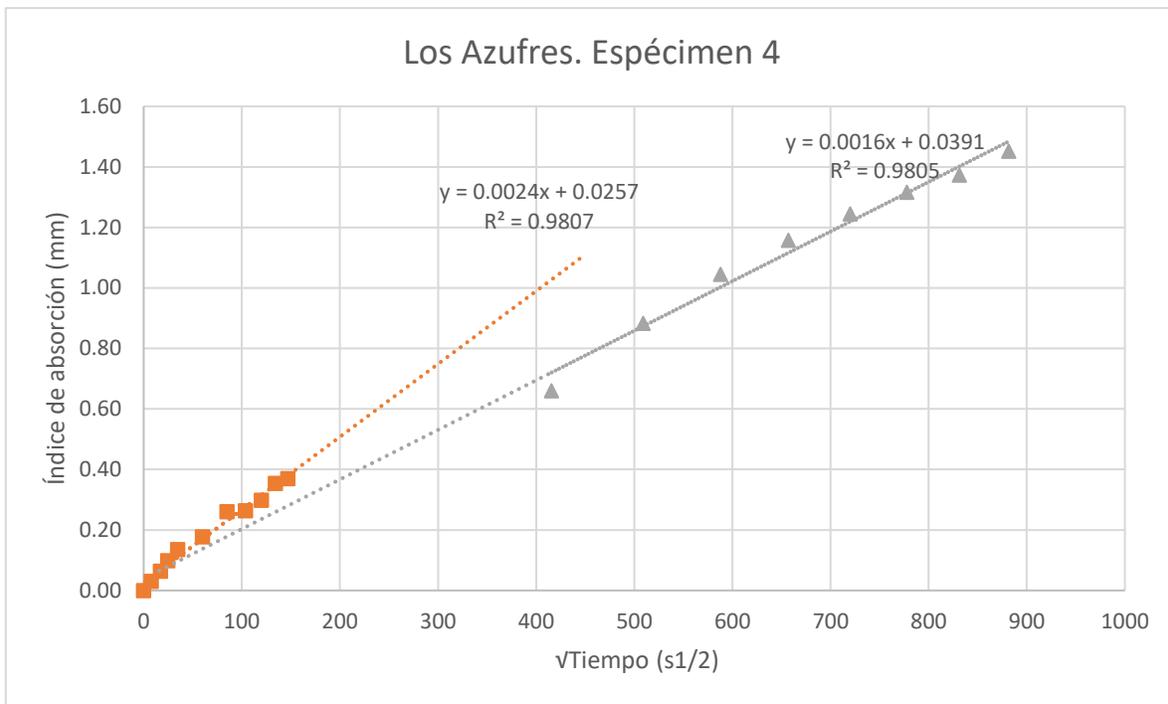
*Ilustración 63 Resultados del ensayo a tensión indirecta a 90, 180 y 1250 días*

### 4.3.3 Pruebas por durabilidad

#### 4.3.3.1 Absorción capilar

Al colocar los especímenes de mortero seco en contacto con agua se produce un gradiente de presión entre el exterior y el interior y se induce una absorción capilar que conduce el líquido desde las partes más húmedas hacia las más secas.

En esta gráfica se muestran los resultados referentes a un espécimen de la mezcla con sustitución de Los Azufres, la norma nos dice que debemos tomar solo resultados con una regresión mínima de 0.98, tal como es este caso. Para esta muestra tenemos un valor de tasa inicial  $0.0024 \text{ mm/s}^{1/2}$  y una tasa secundaria de  $0.0016 \text{ mm/s}^{1/2}$ . A continuación, se muestran los promedios de las tasas iniciales y secundarias de cada una de las mezclas. Se realizó el mismo cálculo para cada uno de los 15 especímenes y se realizó un promedio por mezcla.



*Ilustración 64 Análisis de regresión lineal, a partir de graficar el Índice de absorción vs  $\sqrt{t}$  para el espécimen 4 de la mezcla Az.*

*Tabla 16 Resultados de la prueba de porosidad efectiva a 1250 días*

Mezcla	Tasa inicial ( $\text{mm/s}^{1/2}$ )	Tasa secundaria ( $\text{mm/s}^{1/2}$ )
CP	0.00275	0.00265
Az	0.00165	0.00115
Testigo	0.0039	0.00196

#### 4.3.3.2 Carbonatación

A la edad de 90 días la mezcla de sílice de Los Azufres muestra valores que nos indican una elevada resistencia a la carbonatación, mientras que la mezcla testigo y la mezcla de sílice de Cerro Prieto presentan valores indicativos de moderada resistencia (Ilustración 65). A los 1250 días las tres mezclas presentan valores de elevada resistencia a la carbonatación, para este caso, la mezcla Testigo es la que presenta menores afectaciones a la carbonatación, siguiéndola la mezcla de Cerro Prieto y finalmente la mezcla de Los Azufres con un valor de 2.97 que, sigue estando dentro del rango a elevada resistencia. (Ilustración 67).

Cabe resaltar para esta prueba, la disminución del valor de la constante K para las edades tardías, ya que, en la proyección inicial, se esperaba un valor mayor a los 1250 días, sin embargo, los valores son incluso menores, para todas las mezclas en comparación con los resultados a 320 días. Para el caso del Testigo, hay una diferencia del 122%, en las muestras de Los Azufres es del 16% y del 47% para la sustitución de Cerro Prieto.

Tabla 17 Constantes de carbonatación

MEZCLA	$K_{CO_2}$ (mm/año <sup>0.5</sup> )		
	90 días	320 días	1250 días
TESTIGO	3.50	3.67	1.65
AZ	2.80	3.45	2.97
CP	3.25	3.97	2.70

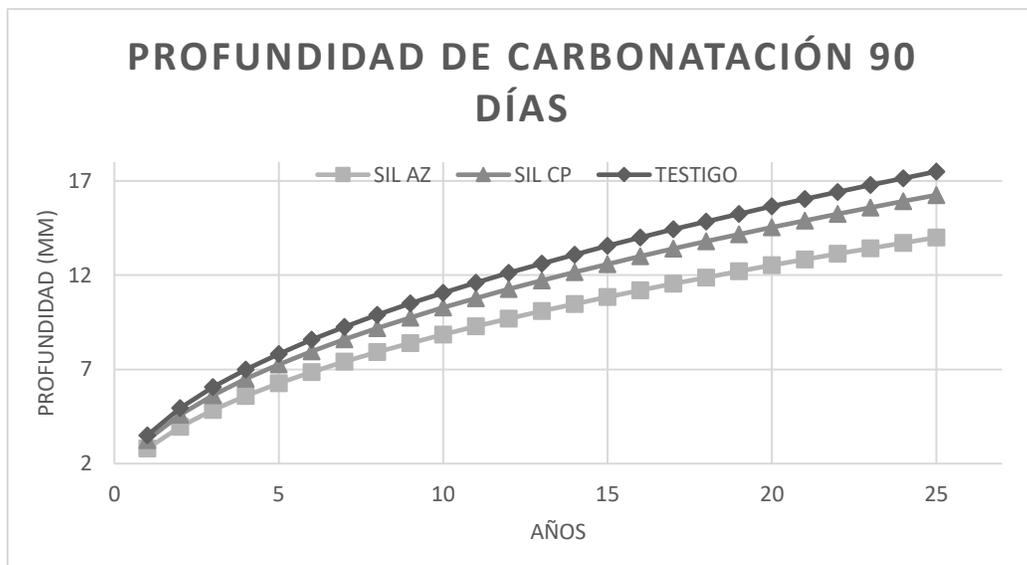
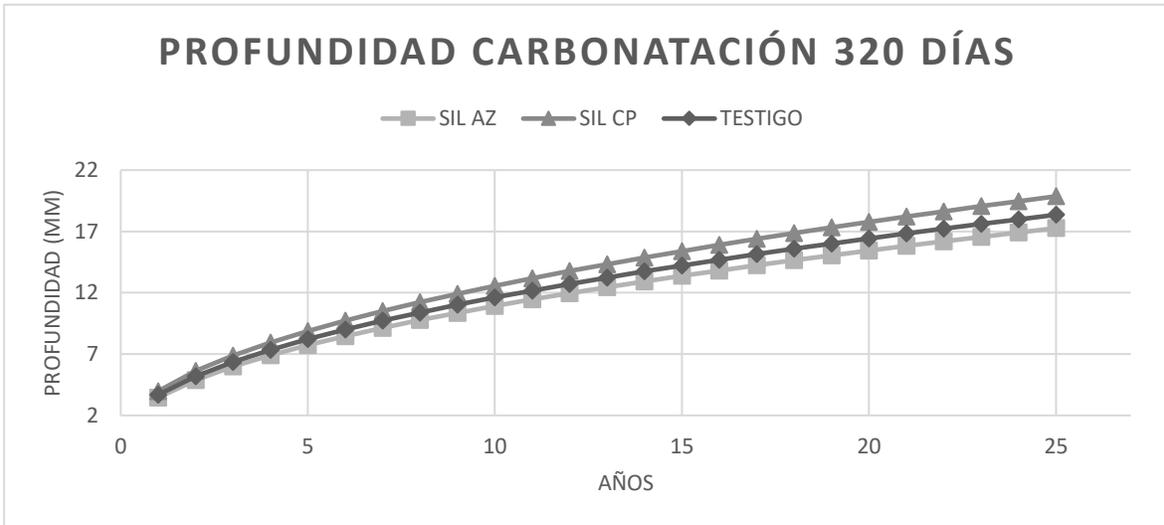
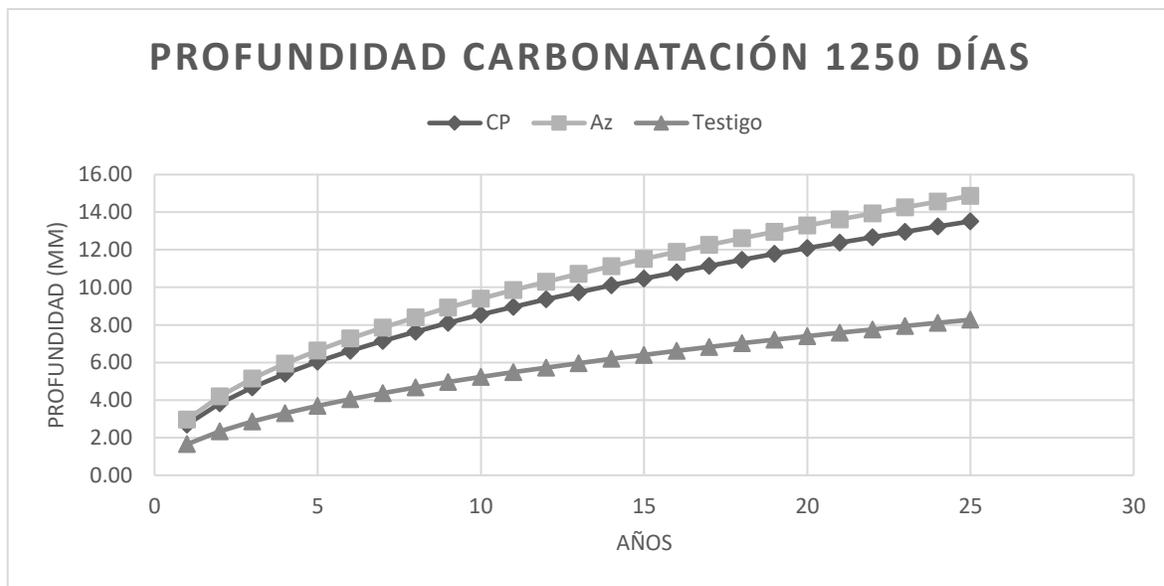


Ilustración 65 Resultados carbonatación 90 días y proyección a 25 años



*Ilustración 67 Resultados carbonatación 320 días y proyección a 25 años*



*Ilustración 66 Resultados carbonatación 1250 días y proyección a 25 años*

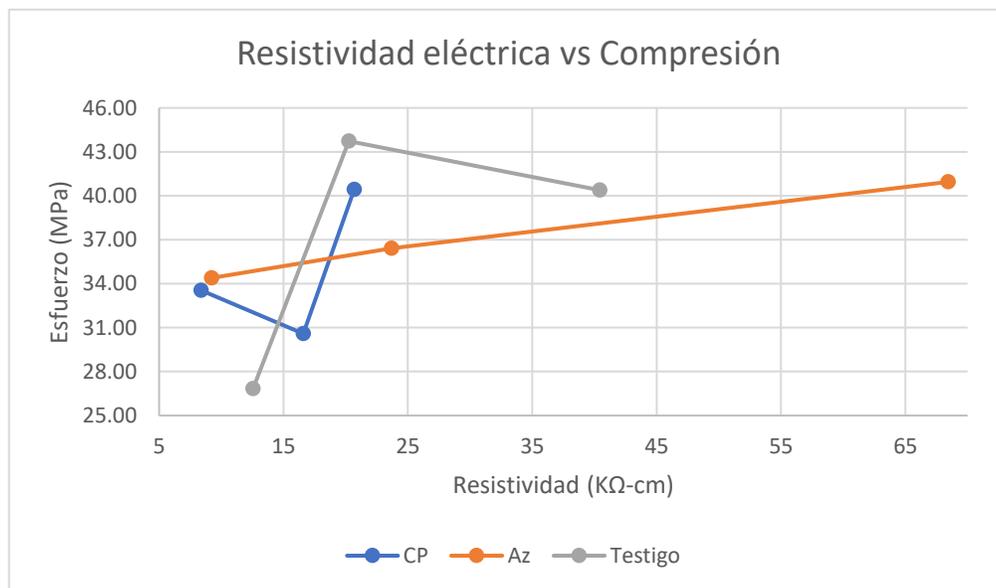
Teniendo la constante de carbonatación, podemos aplicarla para conocer la vida útil promedio en años de nuestros morteros en diferentes elementos estructurales.

*Tabla 18 Vida útil promedio de las mezclas por carbonatación*

Elemento	Recubrimiento mínimo (mm)	Vida útil en años		
		CP	AZ	Testigo
Zapatas	75	770.55	636.82	2053.94
Concreto en exteriores	50	342.47	283.03	912.86
Vigas y columnas	40	219.18	181.14	584.23
Losas	20	54.79	45.28	146.06

#### 4.3.4 Correlaciones

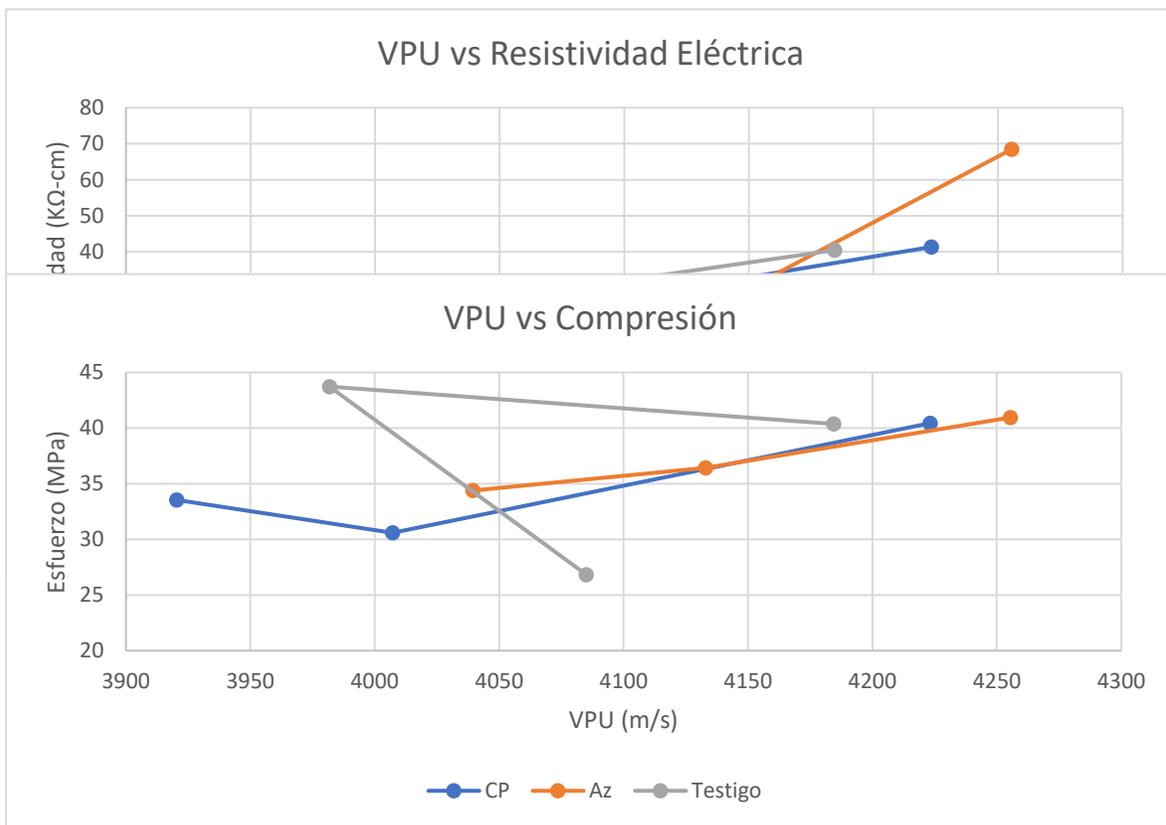
Para este caso, podemos ver, en la ilustración 68, cómo conforme un valor sube, el otro también lo hace. Es decir, conforme la resistividad aumenta, la carga que resiste el espécimen, también es mayor. Esto se podría explicar con la relación que existe entre la cantidad de vacíos dentro de nuestras muestras. A menor cantidad de vacíos, mejor resistividad y resistencia a la compresión.



*Ilustración 68 Correlación entre la resistividad eléctrica y la compresión simple a edades de 90, 180 y 1250 días*

Se observa en la ilustración 69 que, conforme la velocidad de pulso ultrasónico va aumentando, a la par lo hace el esfuerzo que resisten las muestras. Para el caso de la mezcla Testigo, se pudo haber tenido una variación en la saturación del espécimen o alguna otra alteración durante el procedimiento, generándonos una diferencia en los resultados.

Misma es la situación observada en la ilustración 70, donde ambos valores se relacionan en un aumento simultáneo. A mayor resistividad, mayor velocidad de pulso ultrasónico. Entendiendo por esto, la relación que existe entre la cantidad de poros, su conectividad y tortuosidad, dando mejores resultados cuando existe una menor cantidad de vacíos y poco conectados entre ellos.



*Ilustración 69 Correlación entre la velocidad de pulso ultrasónico (VPU) y la compresión simple*

## 5. Conclusiones

Ambas sustituciones con base cemento por sílice, comprueban ser un reemplazo eficiente para disminuir las cantidades de cemento portland en mezclas de mortero. Tanto la muestra con sílice de Los Azufres, como de Cierro Prieto, pudimos observar un desempeño incluso mejor a la mezcla de control o convencional, en las pruebas mecánicas (tensión directa, flexión y compresión) como algunas por durabilidad (velocidad de pulso ultrasónico, resistividad eléctrica y porosidad efectiva).

Las pruebas más significativas que tomamos para este análisis son las de resistividad eléctrica y compresión. En la primera prueba, la muestra de Los Azufres supera en un 69% a la Testigo y la de Cierro Prieto lo hace en un 2.2%. En la siguiente prueba siguen conservándose una mejoría por parte de las sustituciones, Los Azufres con una diferencia del 1.38% y Cierro Prieto con un 0.12% respecto a los resultados obtenidos de la mezcla Testigo.

A diferencia de edades tempranas, la mezcla que marcó una diferencia más marcada a su favor, fueron las muestras en las que se realizó la sustitución con sílice de Los Azufres, siendo, en la mayoría de los casos, la muestra con los mejores resultados en todas las pruebas, excepto en las pruebas de flexión, tensión directa y carbonatación, sin dejar de ser valores óptimos o sobresalientes ante los rangos establecidos por las normas.

Conforme a estos resultados, respecto al porcentaje con el que se realizaron las sustituciones, podemos considerarlo como el óptimo para realizar en este tipo de mezclas. Mejorando con esto, propiedades de carácter mecánico y de durabilidad.

Realizando este tipo de sustituciones, con materiales puzolánicos de origen geotérmico, logramos una solución integral a diversas problemáticas en las que se ve envuelta la industria de la construcción. México es un gran generador de este subproducto, el tener la oportunidad de poder aplicarlo en otras industrias, puede ser un beneficio al ambiente y al factor económico de las cementeras.

Algunos de los beneficios que se podrían ver de manera directa son: darle un segundo uso a algo considerado residuo (sílice geotérmica), reduciendo así la contaminación generada al simplemente desecharla. Se reduce la cantidad de cemento generado por la industria cementera, teniendo una menor cantidad de dióxido de carbono, causado por su proceso de fabricación y con una menor producción de cemento, una disminución en los costos de elaboración del producto.

Como recomendación para trabajos de posgrado, sería deseable realizar análisis microestructural como difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (MEB) para caracterizar con detalle el material estudiado y correlacionar los resultados contra los que se obtuvieron en este trabajo de investigación enfocado en el comportamiento físico mecánico ante sollicitaciones estáticas simples y combinadas.

## Bibliografía

- AASHTO-T-106. (2002). *Standar Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or [50 mm] Cube Specimens)*. EE.UU.
- ASTM C187 - 04. (2004). *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM C266 - 15. (2015). *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles*. West Conshohocken: ASTM International.
- ASTM C33 / C33M - 16. (2016). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. West Conshohocken: International ASTM.
- ASTM-C-109 M, I. (2002). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*. EE.UU.
- ASTM-C-109-M. (2002). *Standar Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in, or [50 mm] Cube Specimens)*. EE.UU.
- ASTM-C142/C142M. (2010). *tandard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates*. EE.UU.: ASTM.
- ASTM-C-151-00. (2014). *Método estandar de ensayo para expansión en autoclave del cemento portland*. EE.UU.: ASTM.
- ASTM-C270. (2014). *Standard Specification For Mortar for Unit Masonry*. ASTM International, 9-10.
- ASTM-C-348. (1997). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic - Cement Mortars*. EE.UU.
- ASTM-C-515. (2003). *Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*. EE.UU.
- ASTM-C-597. (2009). *Standard Test Method For Pulse Velocity Through Concrete*. Estados Unidos.
- ASTM-G57. (2012). *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method*. EE.UU.
- Báez Ángel, V. M. (2018). *EVALUACIÓN POR DURABILIDAD EN MATRICES DE MORTERO BASE CEMENTO PÓRTLAND CON SUSTITUCIÓN DE RESIDUOS GEOTÉRMICOS*. Morelia: UMSNH.
- BS-4027:1980. (2000). *Especificación de Cemento Resistente a los Sulfatos*. Inglaterra: British Standards Institution.

- C618-15, A. (n.d.). *Especificación normalizada para Ceniza Volante de Carbón y Puzolana Natural en Crudo o Calcinada para Uso en Concreto.*
- CANACEM. (2020). Reportes de fabricación. México: CANACEM.
- Castellano, C. B. (2013). *CEMENTOS MEZCLAS: INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS DE ESCORIA. En Concreto y Cemento . Investigación y Desarrollo (Vol. IV).*
- Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica. (2019). *Geotermia en México.* México: Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica.
- Charles, J. H. (2001). *Handbook of Nondestructive Evaluation.* Estados Unidos: McGrae-Hill.
- IMCYC. (2016). *Construcción y Tecnología.* México: IMCYC.
- Instituto del Concreto. (1997). *Manual Tecnología y Propiedades.* Colombia: Asociación Colombiana de productores de concreto.
- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C. (2015). *Pruebas de Agregados.* México: IMCyC.
- Karen Jennifer Beltrán Taipe, F. M. (2017). *ANÁLISIS COMPARATIVO DE CONCRETOS ADICIONADOS CON PUZOLANAS ARTIFICIALES DE CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ (CCA), FLY ASH Y PUZOLANA NATURAL.* AREQUIPA-PERÚ: Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
- Kosmatka, S. H., Kerkhoff, B., Panarese, W. C., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto.* Chicago, EE.UU: Portland Cement Association, PCA.
- Martínez Molina, W., Navarro Sánchez, L. M., & Espinoza Mandujano, A. (2011). Tiempos de fraguado utilizando las agujas de Gillmore. In *Análisis de Materiales.* Morelia, Michoacán, México: Facultad de Ingeniería Civil.
- Mendoza Anaya, D., Brito Benitez, E., & Arenas Alatorre, J. (2004). *La Ciencia de Materiales y su Impacto a la Arqueología.* México: Academia Mexicana de Ciencia de Materiales.
- Montani, R. (2000). *La carbonatación, enemigo olvidado del concreto.* Construcción y Tecnología.
- N-CMT-2-01-004-02. (2002). *CMT. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES - MATERIALES PARA ESTRUCTURAS - MATERIALES PARA MAMPOSTERIAS - MORTEROS.* México: IMT.
- Neville, A., & Brooks, J. (2010). *Concrete Technology.* England: ISBN 978-0-273-73219-8.

- NMX-C-021-ONNCCE. (2015). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-CEMENTO PARA ALBAÑILERÍA (MORTERO)-ESPECIFICACIONES Y MÉTODOS DE ENSAYO. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-057-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Agregados Para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-061-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Cemento Hidráulico-Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes Hidráulicos*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S.C.
- NMX-C-071-ONNCCE. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DELEZNABLES. México: ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-MASA VOLUMÉTRICA-MÉTODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.
- NMX-C-073-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Agregados - Masa Volumétrica - Método de Prueba*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-077-ONNCCE. (1997). *Industria de la construcción - Agregados para concreto - Análisis granulométrico - Método de prueba*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-083-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción-Determinación de la resistencia a compresión*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.
- NMX-C-084-ONNCCE. (2006). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS PARA CONCRETO-PARTICULAS MAS FINAS DE LA CRIBA 0,075 mm (No. 200) POR MEDIO DE LAVADO . México: ONNCCE.
- NMX-C-088-ONNCCE. (1997). Industria de la construcción-Agregados-Determinación de Impurezas Orgánicas en el Agregado Fino. México: ONNCCE.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Agregados Para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-111-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción-Agregados para concreto hidráulico-. Especificaciones y métodos de prueba*. CMDX: ONNCCE.

- NMX-C-122-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción -Agua para Concreto-Especificaciones*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación.
- NMX-C-122-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción -Agua para Concreto-Especificaciones*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-148-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción - Cementos y Concretos Hidráulicos - Gabinetes, Cuartos Húmedos y Tanques de Almacenamiento - Condiciones de Diseño y Operación*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-159-ONNCCE. (2004). *Industria de la Construcción - Concreto - Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2004). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN-AGREGADOS-DETERMINACIÓN DE LA MASA ESPECÍFICA Y ABSORCIÓN DE AGUA DEL AGREGADO FINO-METODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.
- NMX-C-165-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción - Agregados - Determinación de la densidad relativa y absorción de agua del agregado fino - Método de ensayo*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-166-ONNCCE. (2006). INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCION-AGREGADOS-CONTENIDO DE AGUA POR SECADO-METODO DE PRUEBA. México: ONNCCE.
- NMX-C-166-ONNCCE. (2006). *Industria de la Construcción - Agregados - Contenido de Agua por Secado - Método de Prueba*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-170-ONNCCE. (1997). *Industria de la Construcción - Agregados - Reducción de las Muestras de Agregados Obtenidas en el Campo, al Tamaño Requerido para las Pruebas*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-191-ONNCCE. (2015). *Industria de la Construcción - Concreto - Determinación de la Resistencia a la Flexión del Concreto Usando una Viga Simple con Carga en los Tercios del Claro*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación S.C.
- NMX-C-251-ONNCCE. (1997). *Industria de la construcción - Concreto - Terminología*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-263-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción*. CDMX: ONNCCE.

- NMX-C-275-ONNCCE. (2016). *Industria de la Construcción - Agregados Para Concreto Hidráulico - Especificaciones y Métodos de Prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- NMX-C-303-ONNCCE. (2010). *Industria de la Construcción-concreto hidráulico - determinación de la resistencia a la flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro*. CDMX: 2010.
- NMX-C-403-ONNCCE. (1999). *Industria de la construcción – concreto- hidráulico para uso estructural*. CDMX: ONNCCE.
- NMX-C-414-ONNCCE. (2014). *Industria de la construcción-cementos hidráulicos- Especificaciones y métodos de prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y certificación de la construcción y edificación, S.C.
- NMX-C-504-ONNCCE-2015. (2015). *Industria de la Construcción - Determinación de la Absorción Capilar en Concreto Hidráulico - Metodo de ensayo*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación.
- NMX-C-514-ONNCCE. (2016). *Industria de la construcción-cementos hidráulicos- Especificaciones y métodos de prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- RED DURAR . (2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. México: CYTED.
- RED DURAR (Durabilidad de la armadura). (2000). *Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión en Estructuras de Hormigón Armado*. México: CYTED.
- Rivera, G. (2016, Octubre 11). *Durabilidad del concreto*. Retrieved from Durabilidad del concreto: <ftp://ftp.unicauca.edu.co>
- Vaca Arciga, L. A. (2017). *ADICIÓN DE GEOMATERIALES PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO FÍSICO-MECÁNICO EN CERÁMICOS BASE C. PORTLAND*. Morelia: UMSNH.
- VELÁZQUEZ ROBLERO, A. A. (2017). *ACTIVIDAD PUZOLÁNICA DE CENIZA DE BAGAZO DE CAÑA DE INGENIOS DEL GOLFO Y EL PACÍFICO. CASOS DE ADICIONES Y SUSTITUCIONES*. Morelia: UMSNH.

## Apéndice A

Resultados de todas las pruebas realizadas a la edad de 1250 días.

### 1. Densidad

Cerro Prieto			
Espécimen	MH (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
6	279.6	135	2.07
7	289.8	146	1.98
8	275.7	131	2.10
9	275.6	139	1.98
10	267.3	133	2.01
<b>Promedio</b>			<b>2.03</b>

Los Azufres			
Espécimen	MH (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
6	278.5	142	1.96
7	278.6	135	2.06
8	274.7	124	2.22
9	277.5	140	1.98
10	271.2	135	2.01
<b>Promedio</b>			<b>2.05</b>

Testigo			
Espécimen	MH (g)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
6	259.5	130	2.00
7	273.9	130	2.11
8	261.1	129	2.02
9	260.7	132	1.98
10	263.3	133	1.98
<b>Promedio</b>			<b>2.02</b>

## 2. Gravedad específica

Cerro Prieto				
Espécimen	Masa seca (g)	Masa superf. seca (g)	Masa sumergida (g)	Gravedad específica
6	390.51	400.99	179.30	1.76
7	393.08	402.86	189.70	1.84
8	392.40	403.82	194.80	1.88
9	381.86	390.20	190.60	1.91
10	401.27	412.00	196.10	1.86
			<b>Promedio</b>	<b>1.85</b>

Los Azufres				
Espécimen	Masa seca (g)	Masa superf. seca (g)	Masa sumergida (g)	Gravedad específica
6	396.56	404.95	188.10	1.83
7	393.66	402.70	195.60	1.90
8	393.96	402.72	190.90	1.86
9	390.19	399.27	188.70	1.85
10	402.52	411.64	196.30	1.87
			<b>Promedio</b>	<b>1.86</b>

Testigo				
Espécimen	Masa seca (g)	Masa superf. seca (g)	Masa sumergida (g)	Gravedad específica
6	380.11	389.59	185.40	1.86
7	377.86	388.66	178.80	1.80
8	376.88	399.00	182.80	1.74
9	389.38	398.16	184.90	1.83
10	381.61	393.13	186.90	1.85
			<b>Promedio</b>	<b>1.82</b>

### 3. Resistividad eléctrica

Cerro Prieto								
Espécimen	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Promedio (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Longitud (cm)	Resistividad equipo (KΩ)	Resistividad (KΩ-cm)
1	5.00	5.03	5.03	5.02	19.79	10.01	18.00	35.59
2	5.08	5.03	5.14	5.08	20.29	10.02	21.00	42.53
3	5.00	5.03	5.04	5.02	19.82	10.04	16.00	31.58
4	4.99	4.99	5.05	5.01	19.71	10.03	29.00	57.00
5	5.04	5.04	5.04	5.04	19.95	10.01	20.00	39.86
<b>Promedio</b>								<b>41.31</b>

Los Azufres								
Espécimen	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Promedio (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Longitud (cm)	Resistividad equipo (ohm)	Resistividad (KΩ-cm)
1	5.04	5.04	5.10	5.06	20.11	10.03	35.00	70.17
2	5.03	5.04	5.01	5.03	19.84	10.01	32.00	63.44
3	5.04	5.00	5.00	5.01	19.74	10.02	38.00	74.86
4	5.01	5.03	5.01	5.02	19.77	10.01	37.00	73.06
5	5.07	5.09	5.10	5.09	20.32	10.05	30.00	60.66
<b>Promedio</b>								<b>68.44</b>

Testigo								
Espécimen	Diámetro 1 (cm)	Diámetro 2 (cm)	Diámetro 3 (cm)	Promedio (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Longitud (cm)	Resistividad equipo (ohm)	Resistividad (KΩ-cm)
1	5.04	5.04	5.10	5.06	20.11	10.03	35.00	70.17
2	5.03	5.04	5.01	5.03	19.84	10.01	32.00	63.44
3	5.04	5.00	5.00	5.01	19.74	10.02	38.00	74.86
4	5.01	5.03	5.01	5.02	19.77	10.01	37.00	73.06
5	5.07	5.09	5.10	5.09	20.32	10.05	30.00	60.66
<b>Promedio</b>								<b>68.44</b>

#### 4. Velocidad de pulso ultrasónico

Cerro Prieto	
Espécimen	VPU (m/s)
1	4202
2	4237
3	4273
4	4202
5	4202
<b>Promedio</b>	<b>4223</b>

Los Azufres	
Espécimen	VPU (m/s)
1	4310
2	4273
3	4273
4	4219
5	4202
<b>Promedio</b>	<b>4255</b>

Testigo	
Espécimen	VPU (m/s)
1	4184
2	4167
3	4237
4	4167
5	4167
<b>Promedio</b>	<b>4184</b>

## 5. Compresión

Cierro Prieto							
Espécimen	Base (cm)	Espesor (cm)	Longitud (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de ruptura (kg)	Resistencia a compresión (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a compresión (MPa)
6	5.22	5.19	5.29	27.39	11130.00	406.39	39.85
7	5.11	5.10	5.14	26.18	10260.00	391.90	38.43
8	5.18	5.14	5.17	26.66	10220.00	383.35	37.59
9	5.08	5.42	5.26	27.60	13150.00	476.49	46.73
10	5.10	5.12	5.17	26.32	10630.00	403.92	39.61
<b>Promedio</b>						412.41	40.44

Los Azufres							
Espécimen	Base (cm)	Espesor (cm)	Longitud (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de ruptura (kg)	Resistencia a compresión (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a compresión (MPa)
6	5.21	4.99	5.09	25.98	10720.00	412.69	40.47
7	5.26	5.17	5.04	26.59	10190.00	383.21	37.58
8	5.08	5.11	5.17	26.21	11780.00	449.37	44.07
9	5.07	5.14	5.23	26.49	10160.00	383.57	37.61
10	5.09	5.04	5.26	26.32	12080.00	459.02	45.01

Testigo							
Espécimen	Base (cm)	Espesor (cm)	Longitud (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Carga de ruptura (kg)	Resistencia a compresión (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a compresión (MPa)
6	5.22	5.08	5.03	26.11	10690.00	409.39	40.15
7	5.08	5.17	5.03	25.94	12810.00	493.79	48.42
8	5.20	5.27	5.00	26.59	10340.00	388.85	38.13
9	5.07	5.05	5.14	25.87	8550.00	330.45	32.41
10	5.13	5.18	5.01	26.08	11390.00	436.77	42.83

## 6. Flexión

Cerro Prieto						
Espécimen	Base (cm)	Espesor (cm)	Longitud (cm)	Carga máxima (kgf)	Módulo de ruptura (kgf/cm <sup>2</sup> )	Módulo de ruptura (MPa)
1	4.04	3.96	12.10	364.30	69.58	6.82
2	4.24	3.97	12.10	356.30	64.51	6.33
3	4.04	3.91	12.10	336.20	65.86	6.46
4	4.11	3.92	12.20	343.50	66.35	6.51
5	4.17	3.95	12.20	342.90	64.30	6.31
<b>Promedio</b>					66.12	6.48

Los Azufres						
Espécimen	Base (cm)	Espesor (cm)	Longitud (cm)	Carga máxima (kgf)	Módulo de ruptura (kgf/cm <sup>2</sup> )	Módulo de ruptura (MPa)
1	4.13	3.94	12.10	339.80	64.13	6.29
2	4.07	3.97	12.20	350.70	66.70	6.54
3	4.17	3.92	12.20	323.00	61.50	6.03
4	4.03	3.98	12.10	342.30	64.88	6.36
5	4.04	3.90	12.10	314.60	61.95	6.08
<b>Promedio</b>					63.83	6.26

Testigo						
Espécimen	Base (cm)	Espesor (cm)	Longitud (cm)	Carga máxima (kgf)	Módulo de ruptura (kgf/cm <sup>2</sup> )	Módulo de ruptura (MPa)
1	4.15	4.02	12.00	341.70	61.14	6.00
2	4.07	3.76	12.10	310.30	65.25	6.40
3	3.90	3.72	12.30	293.90	66.98	6.57
4	4.12	3.96	12.00	380.20	70.62	6.93
5	4.12	3.88	12.20	344.50	67.76	6.65
<b>Promedio</b>					66.35	6.51

7. Tensión directa

Cerro Prieto						
Espécimen	Ancho (cm)	Peralte (cm)	Sm (cm <sup>2</sup> )	Masa (kgf)	Resistencia (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (MPa)
1	2.71	2.51	6.80	4.24	31.17	3.06
2	2.75	2.67	7.34	3.88	26.43	2.59
3	2.71	2.66	7.21	5.66	39.24	3.85
4	2.78	2.59	7.20	4.92	34.15	3.35
5	2.74	2.68	7.34	4.85	33.01	3.24
<b>Promedio</b>					32.80	3.22

Los Azufres						
Espécimen	Ancho (cm)	Peralte (cm)	Sm (cm <sup>2</sup> )	Masa (kg)	Resistencia (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (MPa)
1	2.78	2.66	7.39	5.10	34.49	3.38
2	2.72	2.62	7.13	5.27	36.97	3.63
3	2.81	2.65	7.45	4.45	29.89	2.93
4	2.75	2.71	7.45	3.73	25.01	2.45
5	2.75	2.67	7.34	4.34	29.58	2.90
<b>Promedio</b>					31.19	3.06

Testigo						
Espécimen	Ancho (cm)	Peralte (cm)	Sm (cm <sup>2</sup> )	Masa (kgf)	Resistencia (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia (MPa)
1	2.89	2.50	7.23	3.96	27.37	2.68
2	2.83	2.46	6.96	4.24	30.44	2.99
3	2.88	2.46	7.08	4.53	31.95	3.13
4	3.03	2.39	7.24	3.74	25.83	2.53
5	2.83	2.47	6.99	3.63	25.97	2.55
<b>Promedio</b>					28.31	2.78

## 8. Tensión indirecta

Cerro Prieto					
Espécimen	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Carga de ruptura (kgf)	Resistencia a tensión indirecta (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a tensión indirecta (MPa)
6	5.03	10.01	2680.00	33.8854	3.3230
7	5.14	10.10	3220.00	39.4868	3.8723
8	5.04	10.02	3090.00	38.9529	3.8200
9	5.05	10.04	3010.00	37.7939	3.7063
10	5.04	10.04	3420.00	43.0271	4.2195
<b>Promedio</b>				38.63	3.79

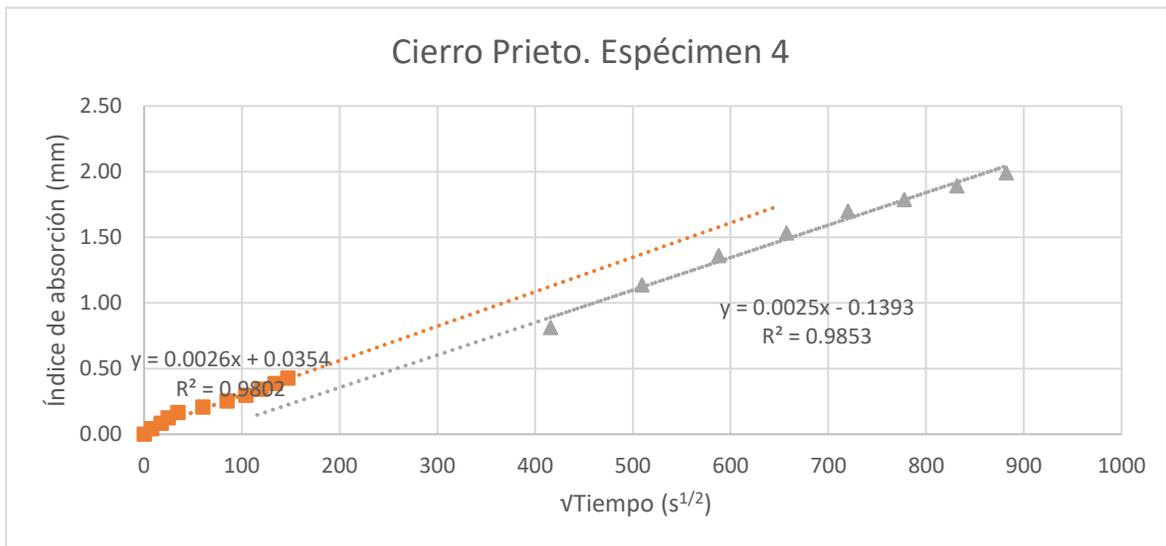
Los Azufres					
Espécimen	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Carga de ruptura (kgf)	Resistencia a tensión indirecta (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a tensión indirecta (MPa)
6	5.10	10.05	3320.00	41.2365	4.0439
7	5.01	10.06	2830.00	35.7463	3.5055
8	5.00	10.03	2880.00	36.5596	3.5853
9	5.01	10.01	3980.00	50.5233	4.9546
10	5.10	10.02	3660.00	45.5956	4.4714
<b>Promedio</b>				41.93	4.11

Testigo					
Espécimen	Diámetro (cm)	Longitud (cm)	Carga de ruptura (kgf)	Resistencia a tensión indirecta (kgf/cm <sup>2</sup> )	Resistencia a tensión indirecta (MPa)
6	4.97	10.02	2940.00	37.5840	3.6857
7	4.96	10.01	3250.00	41.6723	4.0866
8	5.04	10.03	3540.00	44.5812	4.3719
9	4.96	10.05	3430.00	43.8053	4.2958
10	5.12	10.08	3200.00	39.4730	3.8710
<b>Promedio</b>				41.42	4.06

## 9. Porosidad efectiva

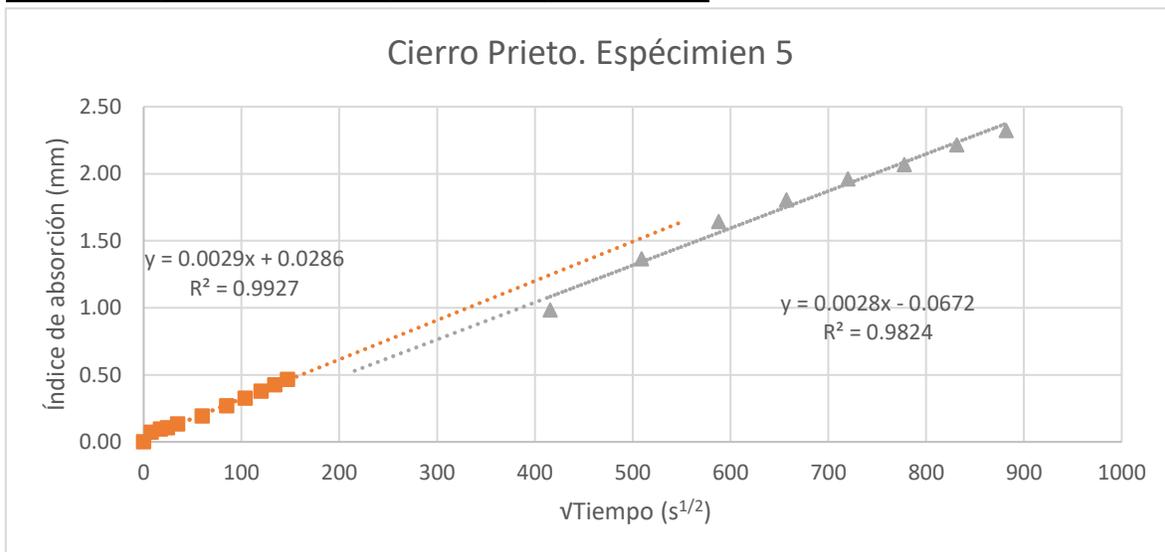
Cierro Prieto						
Espécimen	Base (cm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Masa inicial (g)	Densidad del agua (g)
4	50.80	54.20	52.60	2672.08	272.30000	0.00100

Tiempo (s)	$\sqrt{\text{Tiempo}} \text{ (s}^{1/2}\text{)}$	mt (g)	l (mm)
0.00	0.00000	272.30000	0.00000
60.00	7.74597	272.41000	0.04117
300.00	17.32051	272.52000	0.08233
600.00	24.49490	272.63000	0.12350
1200.00	34.64102	272.74000	0.16467
3600.00	60.00000	272.85000	0.20583
7200.00	84.85281	272.97000	0.25074
10800.00	103.92305	273.09000	0.29565
14400.00	120.00000	273.21000	0.34056
18000.00	134.16408	273.33000	0.38547
21600.00	146.96938	273.44000	0.42663
172800.00	415.69219	274.47000	0.81210
259200.00	509.11688	275.34000	1.13769
345600.00	587.87754	275.93000	1.35849
432000.00	657.26707	276.39000	1.53064
518400.00	720.00000	276.84000	1.69905
604800.00	777.68888	277.07000	1.78513
691200.00	831.38439	277.35000	1.88991
777600.00	881.81631	277.62000	1.99096



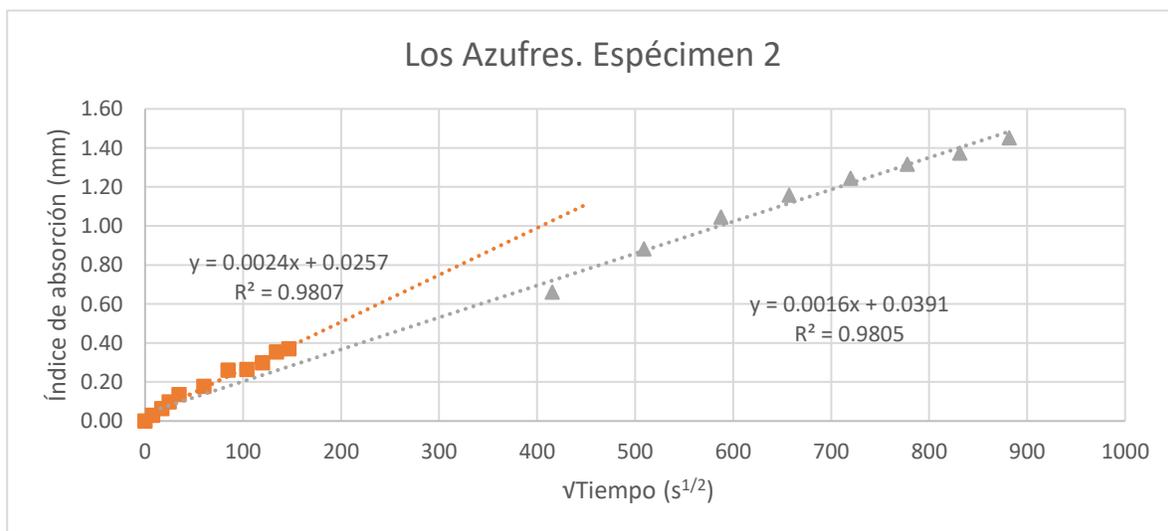
Cierro Prieto						
Espécimen	Base (cm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Masa inicial (g)	Densidad del agua (g)
5	51.00	51.20	51.70	2636.7	259.35000	0.00100

Tiempo (s)	√Tiempo (s <sup>1/2</sup> )	mt (g)	l (mm)
0.00	0.00000	259.35000	0.00000
60.00	7.74597	259.54000	0.07206
300.00	17.32051	259.60000	0.09482
600.00	24.49490	259.63000	0.10619
1200.00	34.64102	259.70000	0.13274
3600.00	60.00000	259.86000	0.19342
7200.00	84.85281	260.06000	0.26928
10800.00	103.92305	260.21000	0.32617
14400.00	120.00000	260.35000	0.37926
18000.00	134.16408	260.47000	0.42477
21600.00	146.96938	260.58000	0.46649
172800.00	415.69219	261.94000	0.98229
259200.00	509.11688	262.95000	1.36534
345600.00	587.87754	263.68000	1.64220
432000.00	657.26707	264.11000	1.80529
518400.00	720.00000	264.52000	1.96078
604800.00	777.68888	264.80000	2.06698
691200.00	831.38439	265.19000	2.21489
777600.00	881.81631	265.47000	2.32108



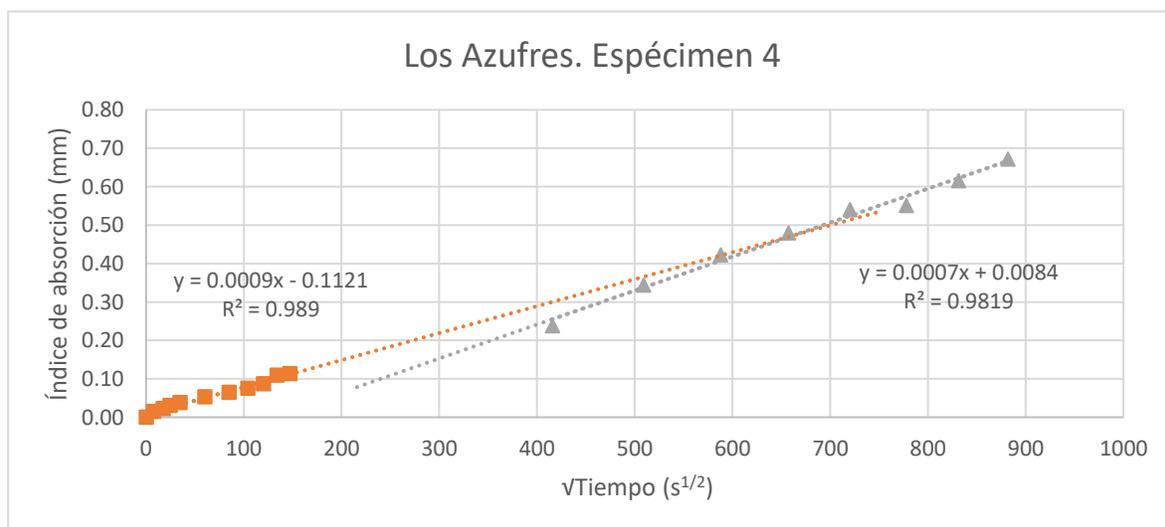
Los Azufres						
Espécimen	Base (cm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Masa inicial (g)	Densidad del agua (g)
2	52.60	51.70	50.40	2651.04	277.05000	0.00100

Tiempo (s)	$\sqrt{\text{Tiempo}}$ (s <sup>1/2</sup> )	mt (g)	l (mm)
0.00	0.00000	277.05000	0.00000
60.00	7.74597	277.13000	0.03018
300.00	17.32051	277.22000	0.06413
600.00	24.49490	277.31000	0.09807
1200.00	34.64102	277.41000	0.13580
3600.00	60.00000	277.52000	0.17729
7200.00	84.85281	277.74000	0.26028
10800.00	103.92305	277.75000	0.26405
14400.00	120.00000	277.84000	0.29800
18000.00	134.16408	277.99000	0.35458
21600.00	146.96938	278.03000	0.36967
172800.00	415.69219	278.80000	0.66012
259200.00	509.11688	279.39000	0.88267
345600.00	587.87754	279.82000	1.04487
432000.00	657.26707	280.12000	1.15804
518400.00	720.00000	280.35000	1.24479
604800.00	777.68888	280.54000	1.31646
691200.00	831.38439	280.69000	1.37305
777600.00	881.81631	280.90000	1.45226



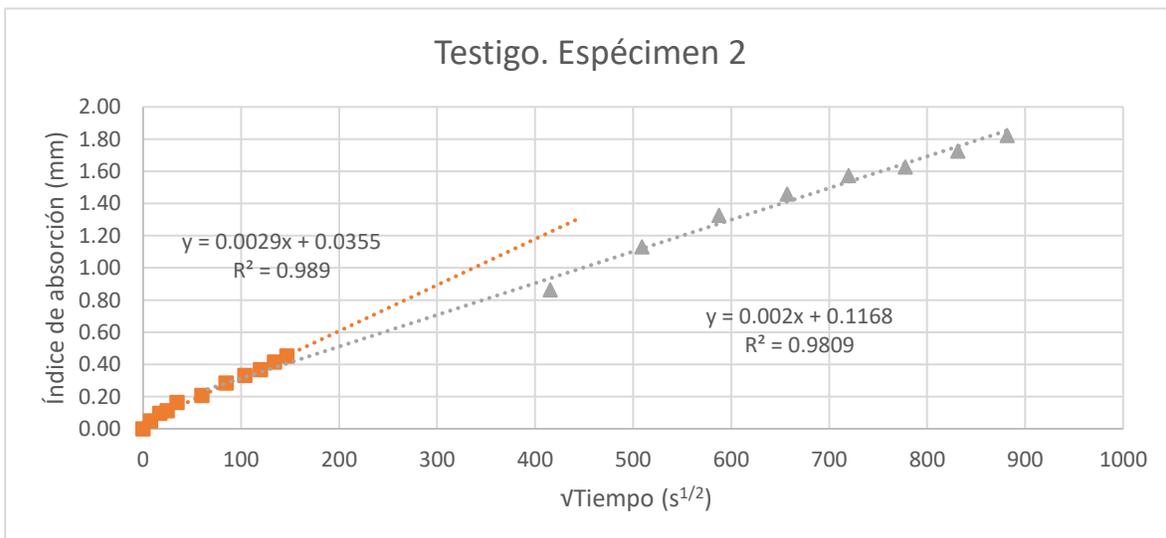
Los Azufres						
Espécimen	Base (cm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Masa inicial (g)	Densidad del agua (g)
4	50.70	51.40	52.30	2651.61	272.24000	0.00100

Tiempo (s)	$\sqrt{\text{Tiempo}}$ (s <sup>1/2</sup> )	mt (g)	l (mm)
0.00	0.00000	272.24000	0.00000
60.00	7.74597	272.28000	0.01509
300.00	17.32051	272.30000	0.02263
600.00	24.49490	272.32000	0.03017
1200.00	34.64102	272.34000	0.03771
3600.00	60.00000	272.38000	0.05280
7200.00	84.85281	272.41000	0.06411
10800.00	103.92305	272.44000	0.07543
14400.00	120.00000	272.47000	0.08674
18000.00	134.16408	272.53000	0.10937
21600.00	146.96938	272.54000	0.11314
172800.00	415.69219	272.87000	0.23759
259200.00	509.11688	273.15000	0.34319
345600.00	587.87754	273.36000	0.42238
432000.00	657.26707	273.51000	0.47895
518400.00	720.00000	273.67000	0.53929
604800.00	777.68888	273.70000	0.55061
691200.00	831.38439	273.87000	0.61472
777600.00	881.81631	274.02000	0.67129



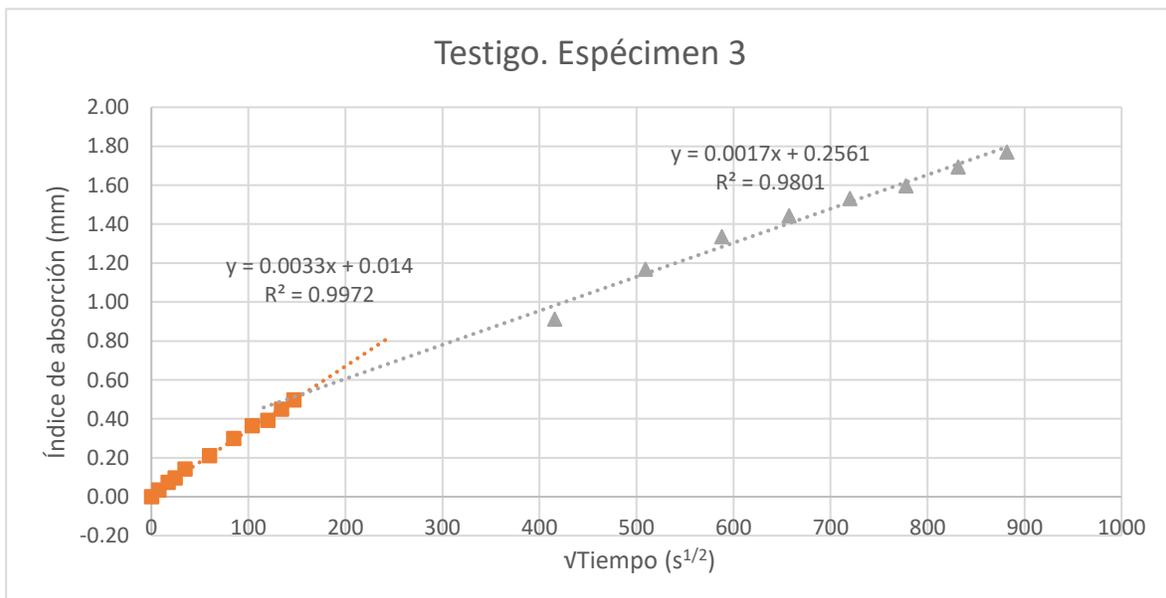
Testigo						
Espécimen	Base (cm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Masa inicial (g)	Densidad del agua (g)
2	50.80	51.70	50.30	2555.24	274.68000	0.00100

Tiempo (s)	$\sqrt{\text{Tiempo}}$ (s <sup>1/2</sup> )	mt (g)	l (mm)
0.00	0.00000	274.68000	0.00000
60.00	7.74597	274.81000	0.05088
300.00	17.32051	274.93000	0.09784
600.00	24.49490	274.97000	0.11349
1200.00	34.64102	275.10000	0.16437
3600.00	60.00000	275.21000	0.20742
7200.00	84.85281	275.41000	0.28569
10800.00	103.92305	275.53000	0.33265
14400.00	120.00000	275.62000	0.36787
18000.00	134.16408	275.74000	0.41483
21600.00	146.96938	275.84000	0.45397
172800.00	415.69219	276.89000	0.86489
259200.00	509.11688	277.57000	1.13101
345600.00	587.87754	278.07000	1.32669
432000.00	657.26707	278.41000	1.45975
518400.00	720.00000	278.70000	1.57324
604800.00	777.68888	278.84000	1.62803
691200.00	831.38439	279.09000	1.72587
777600.00	881.81631	279.34000	1.82370



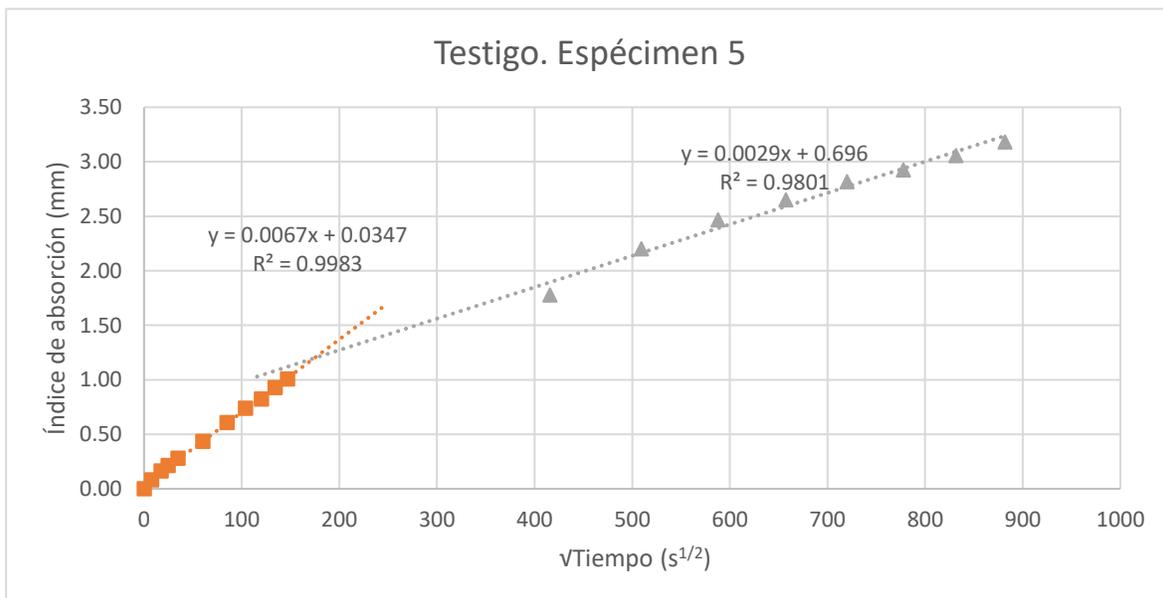
Testigo						
Espécimen	Base (cm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Masa inicial (g)	Densidad del agua (g)
3	52.00	52.70	50.00	2600	255.25000	0.00100

Tiempo (s)	√Tiempo (s <sup>1/2</sup> )	mt (g)	l (mm)
0.00	0.00000	255.25000	0.00000
60.00	7.74597	255.34000	0.03462
300.00	17.32051	255.44000	0.07308
600.00	24.49490	255.50000	0.09615
1200.00	34.64102	255.62000	0.14231
3600.00	60.00000	255.80000	0.21154
7200.00	84.85281	256.03000	0.30000
10800.00	103.92305	256.20000	0.36538
14400.00	120.00000	256.27000	0.39231
18000.00	134.16408	256.42000	0.45000
21600.00	146.96938	256.54000	0.49615
172800.00	415.69219	257.62000	0.91154
259200.00	509.11688	258.29000	1.16923
345600.00	587.87754	258.72000	1.33462
432000.00	657.26707	259.00000	1.44231
518400.00	720.00000	259.23000	1.53077
604800.00	777.68888	259.40000	1.59615
691200.00	831.38439	259.65000	1.69231
777600.00	881.81631	259.85000	1.76923



Testigo						
Espécimen	Base (cm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Masa inicial (g)	Densidad del agua (g)
5	51.30	51.80	50.10	2570.13	256.69000	0.00100

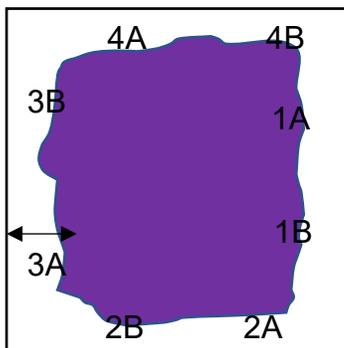
Tiempo (s)	√Tiempo (s <sup>1/2</sup> )	mt (g)	l (mm)
0.00	0.00000	256.69000	0.00000
60.00	7.74597	256.90000	0.08171
300.00	17.32051	257.11000	0.16342
600.00	24.49490	257.24000	0.21400
1200.00	34.64102	257.41000	0.28014
3600.00	60.00000	257.81000	0.43578
7200.00	84.85281	258.25000	0.60697
10800.00	103.92305	258.59000	0.73926
14400.00	120.00000	258.81000	0.82486
18000.00	134.16408	259.08000	0.92991
21600.00	146.96938	259.28000	1.00773
172800.00	415.69219	261.26000	1.77812
259200.00	509.11688	262.35000	2.20222
345600.00	587.87754	263.03000	2.46680
432000.00	657.26707	263.50000	2.64967
518400.00	720.00000	263.93000	2.81698
604800.00	777.68888	264.21000	2.92592
691200.00	831.38439	264.55000	3.05821
777600.00	881.81631	264.87000	3.18272



## 10. Carbonatación

Cerro Prieto		
Espécimen	Cara	X <sub>co<sub>2</sub></sub> (cm)
1	1A	0.60
	1B	0.70
	2A	0.20
	2B	0.30
	3A	1.20
	3B	1.30
	4A	0.20
	4B	0.20
2	1A	0.50
	1B	0.60
	2A	0.30
	2B	0.40
	3A	0.30
	3B	0.30
	4A	0.40
	4B	0.50
	<b>Promedio</b>	0.50
	<b>KCO<sub>2</sub>=</b>	2.701851217

Tiempo de exposición (años)	Raiz del tiempo (años <sup>0.5</sup> )	K <sub>co<sub>2</sub></sub>	Profundidad teórica (mm)
1.00	1.00	2.70	2.70
2.00	1.41	2.70	3.82
3.00	1.73	2.70	4.68
4.00	2.00	2.70	5.40
5.00	2.24	2.70	6.04
6.00	2.45	2.70	6.62
7.00	2.65	2.70	7.15
8.00	2.83	2.70	7.64
9.00	3.00	2.70	8.11
10.00	3.16	2.70	8.54
11.00	3.32	2.70	8.96
12.00	3.46	2.70	9.36
13.00	3.61	2.70	9.74
14.00	3.74	2.70	10.11
15.00	3.87	2.70	10.46
16.00	4.00	2.70	10.81
17.00	4.12	2.70	11.14
18.00	4.24	2.70	11.46
19.00	4.36	2.70	11.78
20.00	4.47	2.70	12.08
21.00	4.58	2.70	12.38
22.00	4.69	2.70	12.67
23.00	4.80	2.70	12.96
24.00	4.90	2.70	13.24
25.00	5.00	2.70	13.51



Esquema de toma de medidas en un prisma

Los Azufres		
Espécimen	Cara	Xco <sub>2</sub> (cm)
1	1A	0.50
	1B	0.60
	2A	0.60
	2B	0.70
	3A	0.40
	3B	0.40
	4A	0.90
	4B	1.10
2	1A	0.30
	1B	0.40
	2A	0.50
	2B	0.50
	3A	0.60
	3B	0.50
	4A	0.40
	4B	0.40
	<b>Promedio</b>	0.55
	<b>KCO<sub>2</sub>=</b>	2.97203634

Tiempo de exposición (años)	Raiz del tiempo (años <sup>0.5</sup> )	Kco <sub>2</sub>	Profundidad teórica (mm)
1.00	1.00	2.97	2.97
2.00	1.41	2.97	4.20
3.00	1.73	2.97	5.15
4.00	2.00	2.97	5.94
5.00	2.24	2.97	6.65
6.00	2.45	2.97	7.28
7.00	2.65	2.97	7.86
8.00	2.83	2.97	8.41
9.00	3.00	2.97	8.92
10.00	3.16	2.97	9.40
11.00	3.32	2.97	9.86
12.00	3.46	2.97	10.30
13.00	3.61	2.97	10.72
14.00	3.74	2.97	11.12
15.00	3.87	2.97	11.51
16.00	4.00	2.97	11.89
17.00	4.12	2.97	12.25
18.00	4.24	2.97	12.61
19.00	4.36	2.97	12.95
20.00	4.47	2.97	13.29
21.00	4.58	2.97	13.62
22.00	4.69	2.97	13.94
23.00	4.80	2.97	14.25
24.00	4.90	2.97	14.56
25.00	5.00	2.97	14.86

Testigo		
Espécimen	Cara	Xco <sub>2</sub> (cm)
1	1A	0.40
	1B	0.40
	2A	0.40
	2B	0.30
	3A	0.20
	3B	0.30
	4A	0.10
	4B	0.20
2	1A	0.60
	1B	0.40
	2A	0.00
	2B	0.30
	3A	0.50
	3B	0.40
	4A	0.30
	4B	0.10
	<b>Promedio</b>	0.31
	<b>KCO<sub>2</sub>=</b>	1.65488387

Tiempo de exposición (años)	Raiz del tiempo (años <sup>0.5</sup> )	Kco <sub>2</sub>	Profundidad teórica (mm)
1.00	1.00	1.65	1.65
2.00	1.41	1.65	2.34
3.00	1.73	1.65	2.87
4.00	2.00	1.65	3.31
5.00	2.24	1.65	3.70
6.00	2.45	1.65	4.05
7.00	2.65	1.65	4.38
8.00	2.83	1.65	4.68
9.00	3.00	1.65	4.96
10.00	3.16	1.65	5.23
11.00	3.32	1.65	5.49
12.00	3.46	1.65	5.73
13.00	3.61	1.65	5.97
14.00	3.74	1.65	6.19
15.00	3.87	1.65	6.41
16.00	4.00	1.65	6.62
17.00	4.12	1.65	6.82
18.00	4.24	1.65	7.02
19.00	4.36	1.65	7.21
20.00	4.47	1.65	7.40
21.00	4.58	1.65	7.58
22.00	4.69	1.65	7.76
23.00	4.80	1.65	7.94
24.00	4.90	1.65	8.11
25.00	5.00	1.65	8.27