



**UNIVERSIDAD MICHOCANA DE SAN NICOLÁS
DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

Tesis profesional

**“EVALUACIÓN POR DURABILIDAD EN MATRICES DE MORTERO BASE
CEMENTO PÓRTLAND CON SUSTITUCIÓN DE RESIDUOS GEOTÉRMICOS”**

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

Presenta:

VÍCTOR MANUEL BÁEZ ÁNGEL

Asesor:

DRA. ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

Co-asesores:

M. I. SANDRA DEL CARMEN ARGUELLO HERNÁNDEZ

M.I. CIPRIANO BERNABÉ REYES

ING. ISAÍAS TRUJILLO CALDERÓN



Morelia Michoacán, diciembre de 2018

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	IV
ÍNDICE DE TABLAS	VII
DEDICATORIAS.....	VIII
AGRADECIMIENTOS.....	IX
I. RESUMEN.....	X
II. ABSTRACT.....	XI
III. JUSTIFICACIÓN.....	XII
IV. HIPÓTESIS	XIII
V. OBJETIVO GENERAL.....	XIII
VI. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	XIII
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. METODOLOGÍA	1
3. ESTADO DEL ARTE.....	4
3.1 Antecedentes	4
3.2 Geotermia en el país	5
3.3 Reseña histórica morteros	6
3.4 Adiciones y sustituciones de materiales residuales en morteros convencionales.....	8
4. MARCO TEÓRICO.....	8
4.1 Cemento.....	8
4.1.1 Proceso de fabricación del cemento Pórtland.....	9
4.1.2 Clasificación del cemento.....	11
4.1.3 Propiedades del cemento.....	12
4.1.4 Cemento usado en la Investigación	14
4.2 Agregados	16
4.2.1 Origen de los agregados	16
4.2.2 Clasificación de los agregados.....	17
4.2.3 Propiedades de los agregados.....	18
4.2.4 Agregados utilizados en la investigación	21
4.3 Agua.....	21
4.3.1 Especificaciones del agua en la construcción.....	21
4.3.2 El agua utilizada en la investigación	22
4.4 Puzolanas	23
4.4.1 Origen de las puzolanas.....	23
4.4.2 Definición.....	23

4.4.3	Clasificación de las puzolanas	23
4.4.4	Actividad Puzolanica	25
4.5	Morteros.....	26
4.5.1	Definición.....	26
4.5.2	Tipos de Morteros	26
4.6	Materiales en estudio como adición y sustitución al mortero	27
4.6.1	Sílice.....	28
4.6.2	Sílice utilizada en la investigación.....	29
4.7	Aditivos.....	32
4.7.1	Tipos y usos	32
4.7.2	Aditivo utilizado en la investigación.....	33
5.	FASE EXPERIMENTAL.....	33
5.1	Caracterización de los materiales	33
5.1.1	Análisis del agregado	33
5.1.2	Análisis del agua	51
5.1.3	Aditivo.....	51
5.2	Pruebas realizadas al mortero fresco	53
5.2.1	Fluidez.....	53
5.2.2	pH.....	55
5.2.3	Temperatura.....	56
5.3	Elaboracion de especimenes.....	57
5.3.1	Elaboración de cubos.....	57
5.3.2	Elaboración de prismas.....	59
5.3.3	Elaboración de cilindros.....	60
5.3.4	Elaboración de briquetas.....	61
5.3.5	Curado de los especimenes.....	61
5.4	Pruebas realizadas al mortero endurecido.....	62
5.4.1	Pruebas no destructivas.....	63
5.4.2	Pruebas destructivas.....	70
5.4.3	Pruebas por durabilidad	77
6.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	87
6.1	Caracterización del agregado fino.....	87
6.2	Pruebas realizadas al mortero fresco	89
6.2.1	Fluidez.....	89
6.3	Pruebas realizadas al mortero endurecido.....	89
6.3.1	Pruebas no destructivas.....	89
6.3.2	Pruebas destructivas.....	97
6.3.3	Pruebas por durabilidad	100
7.	CONCLUSIONES.....	108
8.	RECOMENDACIONES	109
	BIBLIOGRAFÍA	110

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<i>Ilustración 1 Esquema metodológico del proyecto (Víctor M. Báez Ángel)</i>	3
<i>Ilustración 2 Principales productores de energía geotérmica. (International Geothermal Association 2010).</i>	5
<i>Ilustración 3 Esquema del proceso de producción del cemento (Cámara Nacional del Cemento, 2016).</i>	10
<i>Ilustración 4 Cemento gris CPC 30R RS utilizado en la investigación (VELÁZQUEZ ROBLERO, 2017).</i>	15
<i>Ilustración 5 Clasificación de los materiales puzolanicos (Karen Jennifer Beltrán Taípe, 2017)</i>	24
<i>Ilustración 6 Sílice geotérmica. (Báez Ángel, 2017)</i>	29
<i>Ilustración 7 Planta Geotérmica Cerro Prieto (Mejía, 2015)</i>	30
<i>Ilustración 8 Planta geotérmica Los Azufres (CFE)</i>	30
<i>Ilustración 9 Secado de la sílice al sol. (Báez Ángel, 2017)</i>	31
<i>Ilustración 10 Trituración de Sílice en la Máquina de desgaste de Los Ángeles. (Báez Ángel, 2017)</i>	31
<i>Ilustración 11 Aditivo utilizado en la investigación. (Báez Ángel, 2017)</i>	33
<i>Ilustración 12 Ubicación del banco la Unión, Morelia, Mich. (Báez Ángel, 2017)</i>	34
<i>Ilustración 13 Inventario de Bancos de Materiales, 2015. SCT.</i>	34
<i>Ilustración 14 Cuarteo por cuarteador mecánico. (VACA ARCIGA, 2017)</i>	35
<i>Ilustración 15 Cuarteo Manual (Báez Ángel, 2017)</i>	36
<i>Ilustración 16 Secado de la arena en parrilla. (Báez Ángel, 2017)</i>	37
<i>Ilustración 17 Secado superficial de la muestra mediante el molde troncocónico. (Báez Ángel, 2017)</i>	38
<i>Ilustración 18 Realización de la prueba de MVSS (VACA ARCIGA, 2017)</i>	39
<i>Ilustración 19 Realización de la prueba de MVSV (VACA ARCIGA, 2017)</i>	40
<i>Ilustración 20 Vaciado de la muestra representativa de arena dentro de las mallas. (VACA ARCIGA, 2017)</i>	41
<i>Ilustración 21 Material retenido de las diferentes mallas una vez pesadas. (Báez Ángel, 2017)</i>	41
<i>Ilustración 22 Límites granulométricos para agregado fino (Mezclas de concreto y mortero).</i>	44
<i>Ilustración 23 Prueba de colorimetría. (VACA ARCIGA, 2017)</i>	45
<i>Ilustración 24 Prueba de sedimentación. (Báez Ángel, 2017)</i>	45
<i>Ilustración 25 Prueba de terrones de arcilla. (Báez Ángel, 2017)</i>	48
<i>Ilustración 26 Determinación de la densidad de la arena por media del frasco de Chapman (Báez Ángel, 2017)</i>	49
<i>Ilustración 27 Llenado de capsula (Fotografía L. Colín).</i>	51
<i>Ilustración 28 Aditivo preparado utilizado en las mezclas (Báez Ángel, 2017).</i>	52
<i>Ilustración 29 Llenado del molde de bronce en dos capas. (Báez Ángel, 2017)</i>	54
<i>Ilustración 30 Compactación de la pasta. (VACA ARCIGA, 2017)</i>	54
<i>Ilustración 31 Enrasado con una espátula el exceso de mortero. (VELÁZQUEZ ROBLERO, 2017)</i>	54
<i>Ilustración 32 Expansión de la mezcla de forma manual haciendo girar la leva. (VACA ARCIGA, 2017)</i>	54
<i>Ilustración 33 Toma de mediciones para determinar la fluidez (Báez Ángel, 2017)</i>	54
<i>Ilustración 34 Papel indicador puesto en contacto con el mortero (VACA ARCIGA, 2017)</i>	55
<i>Ilustración 35 Papel indicador de pH (Báez Ángel, 2017).</i>	56
<i>Ilustración 36 Medición de temperatura. (VACA ARCIGA, 2017)</i>	56
<i>Ilustración 37 Elaboración de los especímenes. (Báez Ángel, 2017)</i>	57
<i>Ilustración 38 Repartición de golpes durante el llenado de los cubos</i>	58
<i>Ilustración 39 Moldes, llenado y colado de especímenes cúbicos (Báez Ángel, 2017)</i>	59
<i>Ilustración 40 Moldes y colado de prismas (Báez Ángel, 2017).</i>	60
<i>Ilustración 41 Elaboración de cilindros. (Santillán Barragán, 2017)</i>	60

<i>Ilustración 42 Elaboración de briquetas. (Báez Ángel, 2017)</i>	61
<i>Ilustración 43 Curado de los especímenes por sumersión. (Santillán Barragán, 2017)</i>	62
<i>Ilustración 44 Prueba de densidad. (VACA ARCIGA, 2017)</i>	65
<i>Ilustración 45 Prueba de Gravedad Específica. (Báez Ángel, 2017)</i>	66
<i>Ilustración 46 Prueba de resistividad eléctrica en especímenes. (Báez Ángel, 2017)</i>	68
<i>Ilustración 47 Prueba Velocidad de Pulso Ultrasónico (Báez Ángel, 2017)</i>	69
<i>Ilustración 48 Prueba de compresión simple en cubos. (Báez Ángel, 2017)</i>	71
<i>Ilustración 49 Especímenes sometidos a flexión. (Báez Ángel, 2017)</i>	73
<i>Ilustración 50 Representación gráfica de la prueba a flexión en un punto de carga.</i>	74
<i>Ilustración 51 Prueba de tensión indirecta en cilindros. (Báez Ángel, 2017)</i>	75
<i>Ilustración 52 Prueba de tensión directa en briquetas. (Báez Ángel, 2017)</i>	76
<i>Ilustración 53 Pruebas realizadas durante los ciclos de congelamiento y deshielo (Báez Ángel, 2017)</i>	78
<i>Ilustración 54 Toma de temperatura de los especímenes tras ser sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo (Báez Ángel, 2017)</i>	78
<i>Ilustración 55 Prueba de flexión a especímenes sometidos a congelamiento y deshielo (Báez Ángel, 2017)</i>	79
<i>Ilustración 56 Registro de la masa inicial (Wo). (Báez Ángel, 2017)</i>	80
<i>Ilustración 57 Colocación de los especímenes sobre la esponja húmeda. (Báez Ángel, 2017)</i>	80
<i>Ilustración 58 Registro de masa durante la prueba de absorción capilar. (Báez Ángel, 2017)</i>	81
<i>Ilustración 59 Exposición de los especímenes al ambiente (Báez Ángel, 2017)</i>	83
<i>Ilustración 60 Aplicación de fenolftaleína sobre el espécimen. (Báez Ángel, 2017)</i>	83
<i>Ilustración 61 Medición de la profundidad de carbonatación. (Báez Ángel, 2017)</i>	84
<i>Ilustración 62 Preparación de la solución de sulfato de sodio. (Báez Ángel, 2017)</i>	85
<i>Ilustración 63 Secado de los especímenes. (Báez Ángel, 2017)</i>	85
<i>Ilustración 64 Especímenes inmersos en solución de sulfato de sodio. (Báez Ángel, 2017)</i>	86
<i>Ilustración 65 Obtención de masa seca después de ser expuestos a solución de sulfato de sodio. (Báez Ángel, 2017)</i>	86
<i>Ilustración 66 Ensayo a compresión después de que el espécimen fue expuesto a solución de sulfato de sodio. (Báez Ángel, 2017)</i>	87
<i>Ilustración 67 Distribución granulométrica de arena de Joyitas y límites inferior y superior (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).</i>	88
<i>Ilustración 68 Resultados de la prueba de densidad a los 90 días.</i>	90
<i>Ilustración 69 Resultados de la prueba de densidad a los 180 días.</i>	90
<i>Ilustración 70 Resultados de gravedad específica a la edad de 90 días.</i>	91
<i>Ilustración 71 Resultados de gravedad específica a la edad de 180 días.</i>	91
<i>Ilustración 72 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a los 90 y 180 días.</i>	92
<i>Ilustración 73 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a los 90 durante el ensayo de congelamiento y deshielo.</i>	92
<i>Ilustración 74 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a los 90 durante el ensayo de congelamiento y deshielo.</i>	93
<i>Ilustración 75 Resistividad eléctrica a los 90 días ante ataque por sulfatos.</i>	94
<i>Ilustración 76 Resistividad eléctrica a los 180 días ante ataque por sulfatos.</i>	94
<i>Ilustración 77 Resultados de Velocidad de pulso ultrasónico a 90 y 180 días.</i>	95
<i>Ilustración 78 Resultados de Velocidad de pulso ultrasónico a 90 días en prueba de congelamiento y deshielo.</i>	95
<i>Ilustración 79 Resultados de Velocidad de pulso ultrasónico a 180 días en prueba de congelamiento y deshielo.</i>	96
<i>Ilustración 80 Resultados Velocidad de pulso ultrasónico a 90 días ante ataque por sulfatos.</i>	96
<i>Ilustración 81 Resultados Velocidad de pulso ultrasónico a 180 días ante ataque por sulfatos.</i>	97
<i>Ilustración 82 Resultados del ensayo a compresión simple.</i>	98
<i>Ilustración 83 Resultados del ensayo a flexión.</i>	98

<i>Ilustración 84 Resultados del ensayo a tensión indirecta.</i>	99
<i>Ilustración 85 Resultados del ensayo a tensión directa.</i>	100
<i>Ilustración 86 Resultados a 90 días de la prueba de frecuencia de resonancia durante el ensayo de congelamiento y deshielo.</i>	100
<i>Ilustración 87 Resultados a 180 días de la prueba de frecuencia de resonancia durante el ensayo de congelamiento y deshielo.</i>	101
<i>Ilustración 88 Resultados de flexión a 90 días en prueba de congelamiento y deshielo.</i>	101
<i>Ilustración 89 Resultados de flexión a 180 días en prueba de congelamiento y deshielo.</i>	102
<i>Ilustración 90 Resultados de resistencia a la penetración del agua.</i>	102
<i>Ilustración 91 Resultados, coeficiente de absorción capilar.</i>	103
<i>Ilustración 92 Resultados, porosidad efectiva.</i>	104
<i>Ilustración 93 Resultados, sorción capilar.</i>	104
<i>Ilustración 94 Resultados, carbonatación 90 días.</i>	105
<i>Ilustración 95 Resultados, carbonatación 320 días.</i>	106
<i>Ilustración 96 Resultados de pérdida de masa a 90 días.</i>	106
<i>Ilustración 97 Resultados de pérdida de masa a 180 días.</i>	107

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Geotermia en el país.....</i>	<i>5</i>
<i>Tabla 2 Componentes de Cemento.</i>	<i>10</i>
<i>Tabla 3. Clasificación del cemento de acuerdo con la norma anterior y la vigente (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 4. Clasificación de los cementos con la norma actual (NMX-C-414-ONNCCE, 2014).....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 5. Componentes químicos del cemento (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)...</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 6 Valores característicos y límites máximos tolerables de sales e impurezas, (NMX-C-122-ONNCCE, 2014).....</i>	<i>22</i>
<i>Tabla 7 Propiedades requeridas por especificación para cada tipo de mortero, (ASTM-C270, 2014)</i>	<i>27</i>
<i>Tabla 8 Tabla ejemplo para realizar el informe de granulometría.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 9 Especificaciones granulometrías por Bureau Of Reclamation A.S.T.M.</i>	<i>43</i>
<i>Tabla 10 Condiciones establecidas para el material que pasa por la malla N° 200.....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 11 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000).....</i>	<i>68</i>
<i>Tabla 12 Criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000).....</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 13 Tabla de registro para resistencia compresión simple</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 14 Resultados de la caracterización de la arena</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 15 Resultados de la prueba de fluidez para cada adición</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 16 Índice de actividad puzolánica a los 90 días.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabla 17 Constantes de carbonatación.</i>	<i>105</i>

DEDICATORIAS

A mi abuelita Esther.

Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus pláticas, sus anécdotas, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, por su amor, pero más que nada, por siempre creer en mí.

A mis padres.

A mi madre Emma Ángel González, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y nunca dejarme solo en los momentos difíciles. Mamá gracias por darme un futuro, mi profesión hoy te la debo a ti.

A mi padre Javier Báez Chávez, por todo ese esfuerzo y sacrificio que pusiste para que el día de hoy yo pueda estar aquí, por todo ese cansancio que sufres diario en secreto, por el hombre fuerte, honesto y de valores que me inspiraste a ser. Papá gracias por jamás rendirte o sentirte cansado, gracias por hacerme un hombre de bien, nunca te fallare.

A mis tíos.

Beatriz y Julio, ángeles que dios mando cuando más los necesitaba, gracias por ser un pilar fundamental en todo lo que soy, por recibirme con los brazos abiertos, por escucharme, por creer y confiar en mí, por su incondicional apoyo.

A mis hermanos.

Pedro, Javier, Patricia y José Antonio por estar conmigo y apoyarme siempre, por ser mi motor y mis ganas de seguir cada vez más adelante. Como hermanos hemos compartido muchas cosas, agradezco que hoy los cinco podamos compartir este momento.

A mi familia.

En especial a mi tía Lurdes, a mi tío Fernando, a mi sobrino Jonathan, a todos y cada uno de ustedes por siempre creer en mí, por nunca dejarme solo.

Todo este trabajo está dedicado a ustedes, ¡mi familia!

AGRADECIMIENTOS

A dios, por haberme permitido llegar hasta este punto, haberme dado salud, paciencia y fortaleza para lograr mis objetivos.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por permitir formarme como profesionista. A la Facultad de Ingeniería Civil, por ver sido mi segundo hogar durante cinco años. A todo el personal del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, en especial al departamento de Resistencia de Materiales, y al de Corrosión por brindarme las instalaciones, materiales, equipo y apoyo necesario para desarrollar la presente investigación.

A mi asesora, la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, por la oportunidad que me dio al formar parte del laboratorio de materiales, por sus enseñanzas, por motivarme desde aquella primera hora, de aquel primer día de clases como universitario, por todo su apoyo.

A la maestra Sandra, le agradezco todos sus consejos, su gran paciencia al explicarme, por motivarme a conocer el grandioso mundo de los artículos y las investigaciones, por su tiempo, por todo ¡Mil Gracias!

A Berna, quien se ha convertido en un gran amigo, gracias por ser un gran ser humano y un gran ejemplo a seguir. Gracias por siempre hacerte un tiempo y resolver mis más de mil dudas, por tus consejos, por tu apoyo académico, por todo.

A Isaías, por siempre tener tiempo para resolver mis dudas, por apoyarme y guiarme durante el desarrollo de la tesis, en el concurso de concretos, en la impartición de prácticas, por todos sus consejos, por compartir sus experiencias, gracias por regalarme parte de tu tiempo.

A Maybe, Laura e Ingrid, quienes me mostraron su apoyo desde el inicio, por sus consejos y palabras de aliento, por ser un apoyo incondicional, por su amistad. A mis amigos del laboratorio: Luis Colin, Job, Noel, por siempre tener tiempo para explicarme y compartir su experiencia sobre las pruebas, gracias por todo su apoyo. A los chavos del verano Delfín 2017, del verano Nicolita 2017 y de servicio, por ser de gran apoyo para esta investigación, en especial a Hugo, Wendy, Dania, Esme, Less, Armando, Deivy, y Goretti.

A mis amigos de la licenciatura: José A. Hurtado, Sandra Hilario, Micaela Raso, Francisco X. Arroyo, Marvin Castañeda, Diana K. Domínguez, Ulises Franco, Emmanuel Salinas, Juan J. Cueto, Andrea C. Melchor, Oscar F. Peralta y a muchos más, gracias a todos por tantos años de amistad, por las experiencias que he vivido con y junto a cada uno de ustedes. Conocerlos ha sido un gran placer, ustedes saben lo mucho que los he llegado a estimar y cuanto les agradezco todo lo que me han apoyado.

A mis grandes amigos: Luis G. Saucedo, Brenda Castolo, Pedro I. González, Hedmi J. Cervantes, Maribel Ortiz, Judith Pedraza y Zuleyma Velázquez. A ustedes que se han ganado un lugar en mi corazón.

Agradezco a todos aquellos que me han ayudado a lograr mis metas, ¡Gracias!

I. RESUMEN

La contaminación ambiental no es problema nuevo, tampoco un problema regional; se trata de un problema global asociado al crecimiento de la población y a la urbanización del planeta. La construcción civil es uno de los dos sectores de la economía que afecta considerablemente el medio ambiente, tanto por el consumo de recursos naturales y por la producción de residuos.

Se propone utilizar sílice geotérmica (un residuo derivado del proceso de generación de electricidad por medios de energía geotérmica) como una alternativa para disminuir el consumo de Cemento Pórtland (CP) en la elaboración de morteros, con el objetivo de disminuir las emisiones de CO₂ generadas por la producción de cemento y mejorar las propiedades físico-mecánicas y de durabilidad de estos morteros.

Se evaluaron las propiedades de durabilidad y físico-mecánicas de tres morteros base CP diseñadas en Laboratorio con la Norma ASTM-C-109, una mezcla control y dos con sustituciones parciales del 5% de la masa del cemento por sílice; una con sílice proveniente de la planta geotérmica de Cerro Prieto ubicada en Baja California, México y la segunda con sílice proveniente de la planta geotérmica los Azufres ubicada en Michoacán, México. El agregado pétreo se caracterizó con la Norma NMX-C-111-ONNCCE-2004. Las muestras se diseñaron con una relación agua/cementante de 0.65 y una fluidez 110±5%.

Se elaboraron muestras cúbicas, prismáticas, cilíndricas y en forma de briqueta, las cuales se evaluaron mediante pruebas de durabilidad a las edades de 90 y 180 días.

De acuerdo a los resultados se observa que estas sustituciones podrían ser un reemplazo que disminuya la cantidad de CP utilizado en la elaboración de morteros, proporcionando durabilidad y desempeño mecánico superior que los morteros convencionales. Además de que México es una fuente potencial en la generación de este subproducto (sílice) y su uso como material cementante en la industria de la construcción a escala nacional provocaría un gran impacto ecológico positivo.

(Palabras Clave: Durabilidad, sílice, mortero, sustitución.)

II. ABSTRACT.

Environmental pollution is not a new problem, nor is it a regional problem; It is a global problem associated with the growth of the population and the urbanization of the planet. Civil construction is one of the two sectors of the economy that significantly affects the environment, both by the consumption of natural resources and by the production of waste.

It is proposed to use geothermal silica (a residue derived from the process of generating electricity by means of geothermal energy) as an alternative to reduce the consumption of Pórtland cement (PC) in the production of mortars, with the aim of reducing the CO₂ emissions generated for the production of cement and improve the physical-mechanical properties and durability of these mortars.

The durability and physical-mechanical properties of three PC based mortars designed in Laboratory with ASTM-C-109 Standard were evaluated, one control mixture and two with partial substitutions of 5% of the mass of the cement by silica; one with silica from the geothermal plant of Cerro Prieto located in Baja California, Mexico and the second with silica from the Los Azufres geothermal plant located in Michoacán, Mexico. The stone aggregate was characterized with the Standard NMX-C-111-ONNCCE-2004. The samples were designed with a water/cement ratio of 0.65 and a flowability of $110\pm 5\%$.

Cubic, prismatic, cylindrical and briquette samples were prepared, which were evaluated by durability tests at the ages of 90 and 180 days.

According to the results it is observed that these substitutions could be a replacement that decreases the amount of CP used in the manufacture of mortars, providing durability and superior mechanical performance than conventional mortars. Besides that Mexico is a potential source in the generation of this by-product (silica) and its use as a cementing material in the construction industry on a national scale would cause a great positive ecological impact.

(Keywords: Durability, silica, mortar, substitution.)

III. JUSTIFICACIÓN.

La energía geotérmica es una de las pocas fuentes de energía renovables capaz de producir electricidad de manera constante las 24 horas del día. El potencial de generación de energía geotérmica a nivel mundial es de entre 70 GW y 80 GW. Sin embargo, solo el 15 % de las reservas geotérmicas conocidas en todo el mundo se explota para la producción eléctrica, lo que genera solo 13 GW. México tiene actualmente una potencia neta instalada de 720 MW en Cerro Prieto, 193 MW en Los Azufres, 30 MW en Los Humeros y 10 MW en Tres Vírgenes, convirtiéndose así en el cuarto líder mundial como productor de energía geotérmica.

Las condiciones climáticas y las características fisicoquímicas del fluido geotérmico dan lugar 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. A medida que la salmuera asciende y disminuye su temperatura por separación del vapor, la concentración de sílice sobrepasa la solubilidad, de tal manera que a temperaturas cercanas a los 100°C debido a la alta sobresaturación se separa la sílice. Consecuentemente, la sílice se deposita formando incrustaciones sobre las tuberías transportadoras de salmuera y vapor.

El control de incrustación se ha convertido en una actividad de alta prioridad en los programas de operación y mantenimiento de los campos geotérmicos. Los problemas de incrustación impactan la eficiencia de operación, generan pérdidas económicas que disminuyen la oportunidad de negocio, y, por ende, la recuperación del capital invertido en esta industria.

A nivel mundial la producción de CP ha alcanzado cifras preocupantes en el tema de contaminación, debido a que es el material de construcción más usado del planeta. Para el año 2016, la producción de CP generó 522 millones de toneladas de CO₂ a la atmósfera, de acuerdo con cifras del Sistema GNR (Getting Numbers Right) publicado por la Iniciativa de Sustentabilidad del Cemento.

Debido al gran impacto ambiental negativo que genera la industria de la producción del cemento, surge la necesidad de buscar materiales alternos que reduzcan la demanda de los recursos naturales, la contaminación, el consumo de energía en su fabricación y el costo final del producto, todo esto sin menoscabo de sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad.

Como alternativa al consumo de CP y considerando que México es una fuente potencial de este subproducto al ser el cuarto líder mundial como productor de energía geotérmica, se propuso utilizar la sílice geotérmica, producto de deshecho de esta industria como material sustituto puzolánico cementante en morteros.

IV. HIPÓTESIS

Actualmente los materiales eco-amigables son indispensables en la construcción para evitar el deterioro del medio ambiente y la salud de las personas. Al elegir trabajar con un geomaterial como la sílice geotérmica se busca que esté en combinación con el hidróxido de calcio del cemento genere un nuevo componente llamado silicato de calcio, el cual presente ser una sustitución que iguale o mejore las propiedades de durabilidad, físicas y mecánicas de un mortero convencional.

V. OBJETIVO GENERAL

Determinar si el uso de residuos industriales geotérmicos es óptimo para la elaboración de morteros base cemento Pórtland sin modificar sus propiedades (físicas, mecánicas y durables) y aplicaciones en la industria de la construcción. Utilizándolo como sustituto parcial de cemento y promoviendo su utilidad en esta industria.

VI. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Diseñar, elaborar y evaluar una mezcla de mortero con sustituciones parciales de sílice en base a la masa del CP, con la finalidad de mejorar sus propiedades físico-mecánicas y durables.

Que el material resultado de un proceso geotérmico sea una alternativa que ayude a disminuir el consumo de recursos naturales, aprovechando los residuos geotérmicos en la industria de la construcción.

Disminuir la cantidad de dióxido de carbono emitido al medio ambiente por la producción de CP.

Que la sustitución de sílice proveniente de las incrustaciones en las plantas geotérmicas presente ser un remplazo que iguale o mejore el desempeño físico-mecánico y durable de los morteros convencionales base CP.

1. INTRODUCCIÓN

El cemento portland es uno de los materiales más empleados en la industria de la construcción, debido fundamentalmente, a las excelentes propiedades mecánicas que presenta en estado endurecido. En México para el año 2016 la producción nacional de cemento Portland alcanzó la cifra de 40.6 millones de toneladas, correspondientes a 324 kg/habitante (CANACEM, 2016), cifra que se incrementa como consecuencia del crecimiento poblacional y con ello el desarrollo económico y social. Sin embargo, la producción del CP es una de las prácticas más contaminantes en el proceso de obtención del clínker, donde la producción de una tonelada de cemento libera cerca de una tonelada de CO₂ y gases de NO₂ y SO₂, asociados a la descarbonatación de la caliza en el horno de clinkerización, así como a la quema de combustibles fósiles.

Hablando específicamente de la industria de la construcción, nos damos cuenta que existen varios factores que causan el deterioro del medio ambiente, uno de ellos es que para fabricar materiales, se emplea una gran demanda de recursos naturales, además de que para su producción, como efecto secundario, se genera grandes emisiones de CO₂ hacia la atmósfera, aunado a todo esto y no menos importante, es el gran consumo de energía para su fabricación.

Es por eso que la industria cementera, apoyada por grupos de investigación a nivel mundial, deben busca soluciones para la conservación y protección del medio ambiente, ya sea mejorando sus procesos de producción o mediante el desarrollo de materiales alternativos para disminuir el consumo de CP mejorando así la calidad de los productos.

Esta investigación está enfocada al tema de los residuos geotérmicos (sílice) utilizados como materiales alternativos en la industria de la construcción. Se presenta la evaluación realizada a mezclas de mortero con sustituciones parciales del 5% de la masa del cemento por sílice geotérmica. La primera mezcla diseñada con sílice proveniente de la planta geotérmica de Cerro Prieto ubicada en Baja California, México y la segunda con sílice proveniente de la planta geotérmica los Azufres ubicada en Michoacán, México.

2. METODOLOGÍA

La metodología empleada para el desarrollo de esta investigación, que se ilustra con el esquema de la Ilustración 1, consta de nueve fases:

1. **Planteamiento de la problemática:** En esta primera fase se determinó que el alto consumo de CP a nivel mundial, presentaba ser un problema ambiental de gran impacto, generando grandes cantidades de CO₂ para su fabricación. Se plantea el uso de sílice como sustituto parcial del cemento, como una posible solución.
2. **Hipótesis:** En esta esta segunda fase se plantea la idea y el comportamiento esperado durante y al finalizar la investigación.
3. **Revisión bibliográfica:** Se divide en la revisión del estado del arte de la investigación de morteros con sustituciones o adiciones de materiales residuales y el marco teórico-normativo que fundamenta su comportamiento en términos de durabilidad.
4. **Complemento teórico:** Con base en el estudio del marco teórico y el marco normativo sobre matrices de mortero, se concluyó que se requería complementar la teoría normativa para los diferentes métodos de ensayos a realizar. De manera que en esta fase se desarrolló la consulta en investigaciones realizadas a matrices de mortero y concreto para tener una idea más clara y específica de los ensayos a realizar.
5. **Programación:** Una vez que la explicación teórica del fenómeno fue suficiente, se programan las actividades a realizar como el diseño experimental, la fecha para elaboración de especímenes y las fechas de los ensayos a realizar.
6. **Fase experimental:** con base en todo lo anterior, en esta fase se presenta el diseño del experimento, la preparación de los materiales seleccionados para su ejecución, la elaboración de especímenes, los métodos de prueba y normas empleados.
7. **Obtención de Resultados:** En esta fase se presentan los resultados obtenidos en las pruebas experimentales.
8. **Análisis de resultados:** En esta fase se discute el significado de los resultados en términos de sus propiedades físico-mecánicas y de durabilidad.
9. **Conclusiones y recomendaciones:** Por último, en esta fase se presentan las conclusiones que pueden obtenerse de la investigación, así como las recomendaciones que pueden sugerirse para el futuro desarrollo del tema.

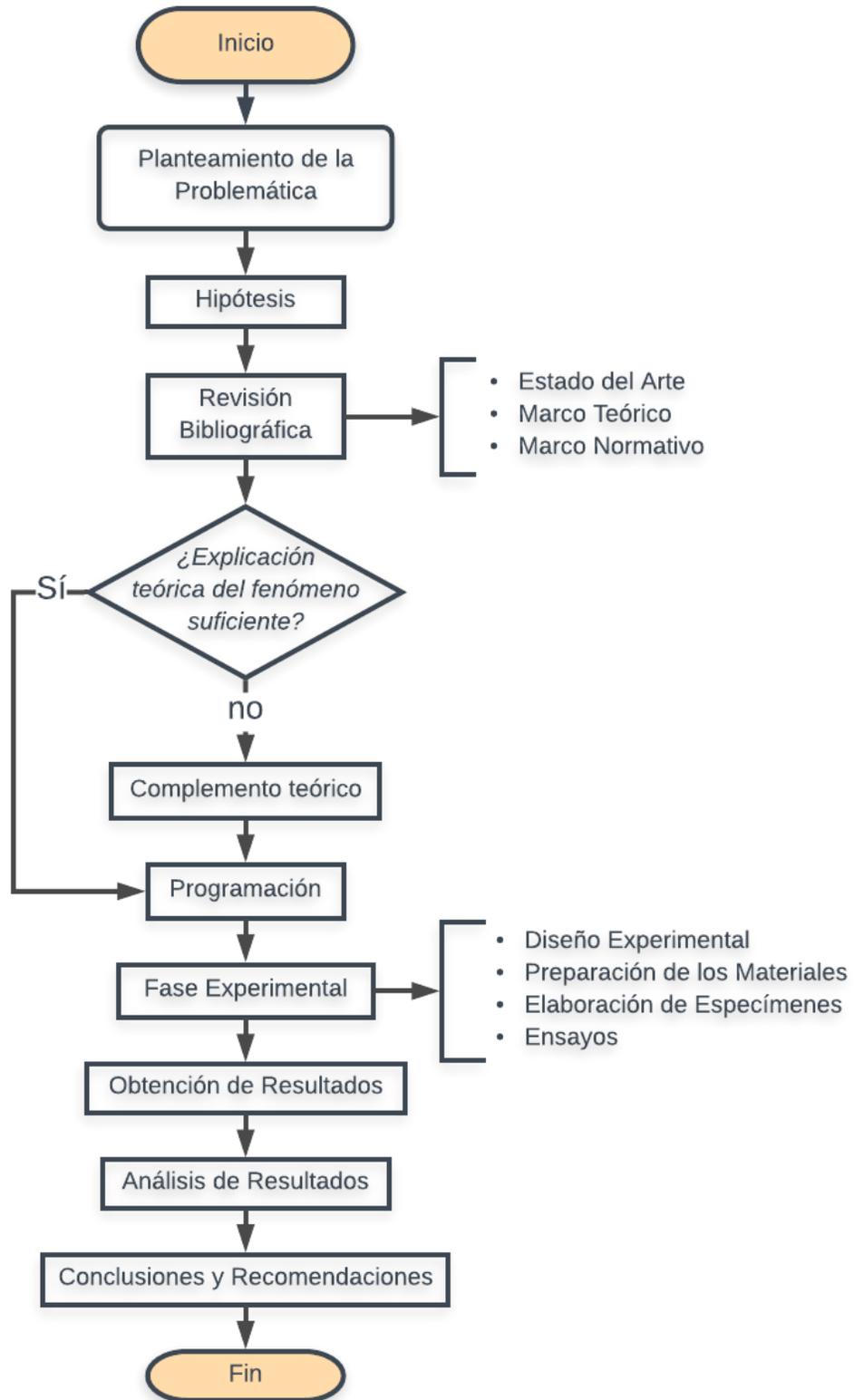


Ilustración 1 Esquema metodológico del proyecto (Víctor M. Báez Ángel)

3. ESTADO DEL ARTE

Antes de pasar a la relación de las actividades realizadas durante la presente investigación, se presentan a continuación los resultados del estudio de las referencias bibliográficas consultadas que otorgan una visión resumida del estado del arte de la situación del material en estudio y de sustituciones y adiciones de residuos industriales a matrices de mortero.

3.1 Antecedentes

En los campos geotérmicos podemos encontrar dos tipos de incrustaciones formadas a altas temperaturas sobre las superficies de los equipos, combinadas con gruesas capas de productos de corrosión o depósitos minerales insolubles en agua. La incrustación es un problema común en aguas geotérmicas altamente concentradas, especialmente en salmueras calientes. A medida que la temperatura del fluido disminuye en su trayecto por los sistemas de distribución la incrustación se convierte en un problema más serio. La incrustación depende de las características fisicoquímicas de los fluidos geotérmicos y la composición de la salmuera: temperatura, salinidad, pH, densidad, gases disueltos, saturación, cinética y termodinámica del proceso de precipitación, y régimen de flujo.

La sílice es la principal incrustación en los campos geotérmicos y se presenta como especie disuelta en todos los líquidos dominantes de los recursos geotérmicos. Los fluidos geotérmicos ascendentes disuelven SiO_2 (sílice amorfa) de las formaciones rocosas y alcanzan la saturación con respecto al cuarzo en sistemas acuosos a altas temperaturas.

Una planta de energía geotérmica en California, EUA, ha desarrollado un método de extracción de sílice comercializable, proveyendo de un recurso adicional con ganancias para la industria geotermoeléctrica.

El 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. Una remoción temprana del SiO_2 presente en los fluidos geotérmicos puede evitar problemas de incrustación permitiendo una producción adicional de vapor.

3.2 Geotermia en el país

En México, la Comisión Federal de Electricidad (CFE), a través de su Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG), ha venido operando a la fecha cuatro campos geotérmicos de tipo hidrotermal con una capacidad instalada total de alrededor de 931 Megawatts eléctricos (2016), suficientes para satisfacer la demanda de electricidad de unos dos millones de hogares mexicanos promedio. Por otra parte, el Grupo Dragón, una empresa privada mexicana tiene en operación el campo denominado Domo San Pedro, en el estado de Nayarit, con una capacidad de 10 MWe. Para aprovechar estos recursos se tienen alrededor de 230 pozos de producción que alcanzan entre 1500 y 3500 m de profundidad.

Tabla 1. Geotermia en el país

Campos del país	Capacidad instalada
Cerro Prieto, Baja California	570 MWe
Los Azufres, Michoacán	248 MWe
Los Humeros, Puebla	94 MWe
Las Tres Vírgenes, Baja California Sur	10 MWe
Domo San Pedro. Nayarit	10 MWe



Ilustración 2 Principales productores de energía geotérmica. (International Geothermal Association 2010).

Países por orden de capacidad geotermoeléctrica instalada:

1. Estados Unidos
2. Filipinas
3. Indonesia
4. México
5. Italia
6. Nueva Zelanda

Hay dos proyectos geotermoeléctricos privados que se desarrollan en México, con base en permisos de autoabastecimiento y de pequeña producción expedidos todavía bajo el marco regulatorio previo a la reforma energética. Se trata de los proyectos: del Domo San Pedro y del Volcán Ceboruco, ambos en el estado de Nayarit.

1) 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 25MW para el 2016

2) 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)

Sin embargo, el potencial geotermoeléctrico del país con recursos de tipo hidrotermal 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)

De acuerdo a lo anterior se puede ver que México es una fuente en desarrollo en temas de energía geotérmica y potencialmente una fuente generadora de sílice geotérmica.

3.3 Reseña historica morteros

El origen de los morteros está íntimamente ligado al de los conglomerantes, que forman parte importante de su composición. La cal como ligante y el mortero de cal se mencionan ya en la Biblia (Deuteronomio 5-27,2), El descubrimiento de las

propiedades ligantes de la cal es tema de especulación. 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 contruidos 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.

También los egipcios emplearon morteros de yeso y de cal en sus construcciones monumentales. Los egipcios fueron los primeros en utilizar el yeso para el mampostado de los bloques de la pirámide de Keops (hacia 2600 a. J.C.) (Furlan, 1975).

Puede afirmarse que el empleo de la cal como ligante tiene su origen en el período neolítico y que el uso del mortero de cal propiamente dicho corresponde a los griegos y romanos (Furlan, 1975; Malinowski, 1991). Los constructores griegos y romanos descubrieron que ciertos materiales volcánicos (cenizas), mezclados con caliza y arena producían un mortero de gran fuerza, capaz de resistir la acción del agua, dulce o salada. 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.

Hasta el siglo XVIII sólo se utilizan los morteros de cal, yesos y materiales puzolánicos (tierra de diatomeas etc.). Hacia 1750-1800 se investigan mezclas calcinadas de arcilla y caliza.

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. 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 Pórtland dándole este nombre por motivos comerciales, en razón de su color y dureza que recuerdan a las piedras de Pórtland, materia que obtuvieron de la calcinación a alta temperatura de una Caliza Arcillosa.

Desde finales del siglo XIX se perfecciona el proceso de fabricación que posteriormente desencadenó la fabricación de los actuales cementos Pórtland, material íntimamente ligado a la producción de los morteros de hoy.

3.4 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.

Los alumnos, ahora ingenieros, de la UMSNH (Universidad Michoacán 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), 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 Santillán Barragán en 2017.

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 le dé un uso a estos materiales residuales.

4. MARCO TEÓRICO

Para poner en contexto la metodología empleada en la investigación que aquí se presenta, a continuación, se realiza una síntesis del marco teórico con el cual se estableció el modelo a seguir para el diseño, elaboración y evaluación de las mezclas de mortero. Así, en primer lugar, se presentan conceptos generales de los materiales empleados en la investigación; en segundo lugar, se presentan las características físicas, químicas y mecánicas que poseen estos materiales. En tercer lugar, se describe la propuesta desarrollada por el autor del presente trabajo, a partir de la teoría existente, para utilizar la sílice geotérmica como sustitución de cemento Pórtland al mortero.

4.1 Cemento

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 (mortero) es el material formado por un cementante hidráulico finamente pulverizado que puede contener uno o más de los materiales siguientes: Clínter Pórtland, piedra caliza, arcilla, puzolana, escoria granulada de alto horno, ceniza volante y yeso; que al 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).

4.1.1 Proceso de fabricación del cemento Pórtland

El cemento Pórtland se produce por la pulverización del Clínter, 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 Clínter para la fabricación del producto final. Los materiales utilizados en la fabricación del cemento Pórtland 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 Pórtland (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 transforma químicamente las materias primas mediante la calcinación para obtener el Clínter de cemento.
4. Se mezcla el Clínter con el yeso para convertirlos en cemento Pórtland y se almacena para después envasarlo.

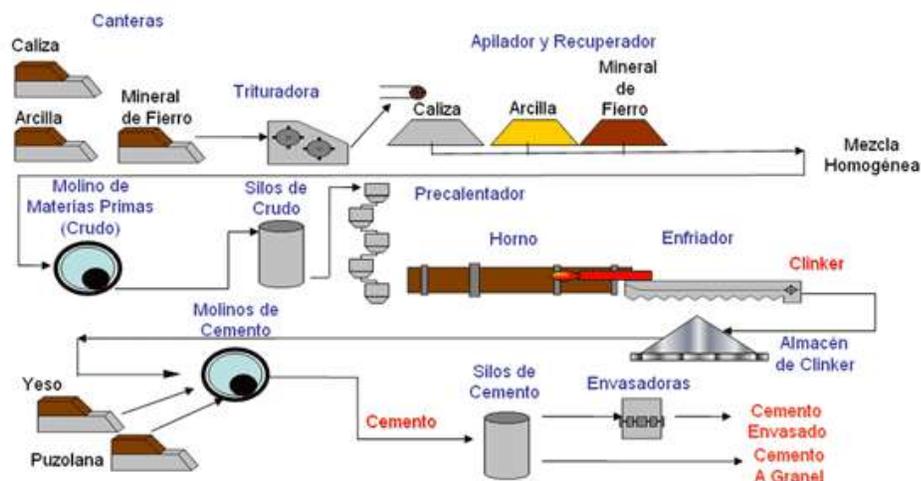


Ilustración 3 Esquema del proceso de producción del cemento (*Cámara Nacional del Cemento, 2016*).

Todos estos compuestos reaccionan dando como resultado nuevas especies químicas que son los principales componentes del cemento, tabla 2.

Tabla 2 Componentes de Cemento.

Componente	Fórmula	Fórmula Abreviada
Silicato Dicálcico (belita)	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₂ S
Silicato Tricálcico (alita)	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C ₃ S
Aluminato Tricálcico (celita)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C ₃ A
Ferrialuminato tetracálcico o Aluminoferrito tetracálcico (felita)	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ o Fe_2O_3	C ₄ AF

El silicato tricálcico (C₃S, alita) es la fase más abundante, y que le confiere las propiedades características al CP, con una hidratación rápida, resistencias iniciales altas y finales buenas, calor de hidratación moderadamente alto y responsable de las mayores resistencias mecánicas del cemento. El silicato dicálcico (C₂S, belita) es de hidratación lenta, resistencias iniciales bajas y finales buenas, y calor de hidratación bajo. Aluminato tricálcico (C₃A), 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 (C₄AF), 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 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.

4.1.2 Clasificación del cemento

Anteriormente los cementos se clasificaban de acuerdo a las normas mexicanas NMX-C-001, NMX-C-002 y NMX-C-175, como se muestra en la tabla 3, la normativa actual es la que se indica en la tabla 4, por diversas circunstancias de calidad la normativa cambio para una mejor resistencia en el concreto. Esta nomenclatura solo se utiliza en México, la nomenclatura a nivel mundial sigue utilizando los números romanos de ASTM C-150.

Tabla 3. Clasificación del cemento de acuerdo con la norma anterior y la vigente (*NMX-C-414-ONNCCE, 2014*)

NMX-C-414-ONNCCE (Vigente)	NMX-C-001 (Cancelada) NORMA ASTM C-150
CPO 30, CPO 30R, CPC 30 Y CPC 30R	Tipo I (Pórtland normal)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH y RS	Tipo II (Pórtland moderada resistencia a los sulfatos)
CPO 40, CPO 40R Y CPC 40R	Tipo III (Pórtland fraguado rápido, alta resistencia inicial)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BCH	Tipo IV (Pórtland bajo calor de hidratación)
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial RS	Tipo V (Pórtland alta resistencia a los sulfatos)
CPO ó CPC que cumpla con la característica especial B	Blanco
Cualquier cemento que cumpla con la característica especial BRA	Especial, bajo álcali; todos los tipos

Tabla 4. Clasificación de los cementos con la norma actual (*NMX-C-414-ONNCCE, 2014*)

Tipo	Denominación	Clase Resistente	Características Especiales
CPO	Cemento Pórtland Ordinario	20	RS (Resistente a los Sulfatos)
CPP	Cemento Pórtland Puzolánico	30	BRA (Baja Reactividad Álcali Agregado)
CPEG	Cemento Pórtland con Escoria Granulada de Alto Horno	30 R (R= Resistencia rápida)	BCH Bajo calor de Hidratación

CPC	Cemento Pórtland Compuesto	40	B (Blanco)
CPS	Cemento Pórtland con Humo de Sílice	40 R	-
CEG	Cemento con Escoria Granulada de Alto Horno	-	-

4.1.3 Propiedades del cemento

El estudio de las propiedades del cemento Pórtland, permite conocer algunos aspectos de su bondad como material cementante. Estas propiedades son de carácter químico, físico y mecánico; dependen del estado en el cual se encuentren.

Propiedades físicas

El cemento es un material aglomerante y como todo material, éste cuenta, con propiedades físicas de las cuales las más importantes son: densidad, finura, consistencia normal, tiempos de fraguado y expansión. Estas proporcionan criterios de evaluación del cemento y del concreto, las cuales dependen del tipo de cemento que se utiliza.

- **Densidad:** Es la relación entre la masa de una cantidad dada y el volumen absoluto de esa masa. Su valor varía muy poco, y en un cemento Pórtland normal, suele estar muy cercano a 3.15 g/cm³. En el caso de cementos adicionados, es menor porque el contenido de Clinker por tonelada de cemento es inferior dando valores del orden de 2.9 gr/cm³, dependiendo del porcentaje de adiciones. La densidad no indica directamente la calidad del cemento pero analizándola en conjunto con otras propiedades, puede determinar si el cemento tiene adiciones.
- **Finura:** El proceso de molienda de Clinker y yeso determina la finura del cemento, que es el tamaño de las partículas de cemento. Está íntimamente ligada con la velocidad de hidratación, desarrollo de calor, retracción y aumento de la resistencia. Un cemento de alta finura, endurece con mayor velocidad (mayor rapidez de hidratación) y tiene un desarrollo rápido de resistencia (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).
- **Consistencia normal:** Se refiere a la movilidad relativa de la mezcla fresca de pasta o mortero de cemento. Cuando los cementos tienen adiciones, los requerimientos de agua son mayores que en los cementos normales. El contenido de agua se expresa en masa del cemento seco y suele variar entre 23 y 33% (Instituto del Concreto, 1997).

- **Tiempos de fraguado:**

- **Fraguado inicial:** tiempo que transcurre desde que la pasta plástica que se forma cuando el cemento se mezcla con agua va perdiendo su fluidez, hasta llegar a un momento en que ya no tiene toda su viscosidad y se eleva su temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra parcialmente hidratado.
- **Fraguado final:** tiempo que transcurre hasta que la pasta de cemento deja de ser deformable con cargas relativamente pequeñas, se vuelve rígida y llega a la máxima temperatura, lo cual indica que el cemento se encuentra aún más hidratado y la pasta ya está dura.
- **Fraguado falso:** fenómeno que ocurre cuando la pasta de cemento adquiere una rigidez prematura y anormal, dentro de los primeros minutos después de mezclar el cemento y el agua. Internamente ocurre que una gran cantidad de sulfatos se deshidrata y de esta manera se forma el yeso (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).
- **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 (periclasa) y la expansión máxima (ASTM-C-151-00, 2014).

Propiedades químicas

En el proceso de producción del cemento se produce una transformación de las materias primas a productos con mejores características, por medio de reacciones en estado sólido. Razón por la cual, la química del cemento frecuentemente emplea un modelo basado en abreviaturas para las fórmulas químicas de los óxidos más frecuentes. Los cuatro compuestos principales del cemento se forman a partir de óxidos, como se muestra en la tabla 5.

Tabla 5. Componentes químicos del cemento (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004)

Nombre	Composición	Abreviatura
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Aluminoferrito Tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	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 Pórtland se transforma en un agente de enlace, se genera por los procesos químicos responsables de la formación de compuestos durante la hidratación, los cuales originan propiedades mecánicas útiles en aplicaciones estructurales.
- **Calor de hidratación:** durante el proceso de hidratación, se efectúan reacciones químicas exotérmicas, es decir reacciones que liberan calor, haciendo que los concretos al fraguar y endurecer aumenten de temperatura. Este incremento es importante en estructuras de concreto, ya que cuando ha ocurrido el fraguado y se inicia el descenso de la temperatura, se origina contracción del material, que puede conducir a la formación de grietas y fisuras. El calor de hidratación se define como la cantidad de calor en calorías por gramo de cemento deshidratado, después de una hidratación completa a una temperatura dada. Depende de la composición del cemento y es aproximadamente igual a la suma de los calores de hidratación de los compuestos individuales. El C3A y el C3S son los compuestos particularmente responsables del elevado desarrollo de calor (Instituto del Concreto, 1997).

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) (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).
- **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).

4.1.4 Cemento usado en la Investigación

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



Ilustración 4 Cemento gris CPC 30R RS utilizado en la investigación (VELÁZQUEZ ROBLERO, 2017).

El Cemento Pórtland 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).

4.2 Agregados

Los agregados finos y gruesos constituyen entre el 60 y el 75% de una mezcla de concreto. Debido a que los agregados ocupan un porcentaje tan alto del volumen de una mezcla de concreto y pueden afectar de gran manera las propiedades del concreto en estado fresco como endurecido, es importante que los agregados sean muestreados y ensayados adecuadamente para garantizar que sean idóneos para usarse en la mezcla diseñada (Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A,C, 2015).

Los agregados no sólo pueden limitar la resistencia del concreto, pues sus propiedades pueden afectar en gran medida la durabilidad y el rendimiento estructural del concreto.

En un principio, al agregado se le consideró como material inerte, no costoso, disperso en la pasta de cemento para producir un gran volumen de concreto. En realidad, el agregado no es inerte, pues sus propiedades físicas, térmicas y en ocasiones, químicas, pueden influir en el desempeño del concreto, por ejemplo, mejorando su durabilidad y estabilidad de volumen sobre los de la pasta de cemento (Neville & Brooks, 2010).

4.2.1 Origen de los agregados

Los agregados naturales para concreto por lo general con una mezcla de rocas y minerales. El mineral es una sustancia sólida natural con una estructura interna ordenada y una composición química que varía dentro de los límites estrechos. Las rocas se clasifican según su origen en ígneas, sedimentarias o metamórficas, generalmente se componen con varios minerales. El intemperismo y la erosión de las rocas producen partículas de piedra, grava, arena, limo y arcilla (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

- **Rocas Ígneas.** Constituyen la mayor parte de la porción sólida de la tierra, de ellas se derivan los otros grupos de rocas y la mayor parte de los agregados del concreto en América. Estas se forman por el enfriamiento y solidificación del magma y tienen una estructura masiva, totalmente cristalina

o vítrea o una combinación entre ellas, dependiendo de la velocidad a la que se enfriaron durante su formación. Dependiendo del porcentaje de sílice que contienen se clasifican en: ácidas, intermedias y básicas. Según el lugar de formación se clasifican en: intrusivas y extrusivas o volcánicas. Las primeras se forman a gran profundidad y las segundas en la superficie. (Instituto del Concreto, 1997)

- **Rocas Sedimentarias.** Las rocas ígneas o rocas metamórficas son sometidas a los agentes de la intemperie como el sol, la lluvia y el viento. Estos agentes descomponen, fragmentan, transportan y depositan las partículas de roca, muy por debajo del lecho marino donde se cementan entre sí por algún material cementante. Los materiales de cementación pueden ser carbonosos, silíceos o arcillosos encontrados en la naturaleza. Al mismo tiempo, el depósito y el material cementante son sometidos a presión estática del agua y se convierten en la capa compacta de roca sedimentaria. La deposición, cementación y consolidación toman lugar capa por capa debajo del lecho marino.
- **Rocas Metamórficas.** Tanto las rocas ígneas como las rocas sedimentarias pueden ser sometidas a altas temperaturas y presiones que causan metamorfismo produciendo un cambio en la estructura y textura de las rocas. Si bien es preciso reconocer que los agregados de una buena roca madre producen un concreto de calidad, puede ser erróneo concluir que un buen concreto no se pueda hacer de los agregados con propiedades ligeramente inferiores, a las sugeridas en reglamentos, obtenidos a partir de rocas madre no tan buenas. Estos agregados, que no son tan buenos, pueden ser utilizados para elaborar concreto satisfactorio debido al hecho de que una capa de pasta de cemento en los agregados, logra mejoras respecto a las características de durabilidad y resistencia. La selección de los agregados debe hacerse con prudencia teniendo en cuenta el factor económico (Neville & Brooks, 2010).

4.2.2 Clasificación de los agregados

De acuerdo a la (N-CMT-2-02-002-02, 2002) los agregados se clasifican en:

- **Agregado Fino:** Es arena mineral natural seleccionada u obtenida mediante trituración y cribado, con partículas de tamaño comprendido entre setenta y cinco (75) micrómetros (malla No 200) y cuatro como 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 (3/4”) y setenta y cinco (75) milímetros (3”), pudiendo contener fragmentos de roca y arena, dentro de las proporciones establecidas en la (N-CMT-2-02-002-02, 2002).

- **Fragmento de roca:** Son los agregados con tamaño mayor de setenta y cinco (75) milímetros (3”), y una masa máxima de treinta kilogramos (30), 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.

4.2.3 Propiedades de los agregados

Para lograr las mejores propiedades mecánicas, el mortero debe contar con un esqueleto pétreo empacado lo más densamente posible, y con la cantidad de pasta de cemento necesaria para llenar los huecos o poros que este deje.

Los agregados son un componente dinámico dentro de la mezcla, aunque la variación en sus características puede ocurrir también durante los procesos de explotación, manejo y transporte. Y puesto que forman la mayor parte del volumen del material, se consideran componentes críticos en el mortero y tienen un efecto significativo en el comportamiento de las estructuras (Neville & Brooks, 2010).

Los agregados finos consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula que van desde 5 mm hasta mayores de 60 μm (Neville & Brooks, 2010).

Algunas otras propiedades físicas del agregado son: la forma y textura de las partículas, la porosidad, la absorción, la densidad, la adherencia, la resistencia y de suma importancia la granulometría del agregado así como el módulo de finura.

Propiedades físicas

Las propiedades físicas que más impactan en el comportamiento mecánico de las mezclas de concreto son: granulometría, porosidad, masa unitaria, forma y textura de las partículas.

- **Granulometría.** Es la distribución del tamaño de las partículas de un agregado, que se determina a través del análisis de los tamices (cedazos, cribas).
Hay muchas razones para que se especifiquen los límites granulométricos y el tamaño máximo nominal de los agregados, pues afectan las proporciones relativas de los agregados, como la demanda de agua y de cemento, trabajabilidad, economía, porosidad, contracción y durabilidad del concreto. Las arenas muy finas son normalmente antieconómicas, mientras que las arenas y gravas gruesas pueden producir mezclas sin trabajabilidad (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).
- **Porosidad.** Cuanto más poroso es, menos resistencia mecánica tiene, por lo tanto, cuanto menor sea la absorción, es más compacto y de mejor calidad. Se requieren agregados que cumplan con esta propiedad física y así garantizar una buena resistencia mecánica.
- **Masa unitaria.** La relación entre la masa del material que cabe en un determinado recipiente y el volumen de éste, da una cifra llamada masa unitaria. La masa unitaria compacta es otro buen índice para conocer la calidad del agregado, puesto que cuanto mejor sea la granulometría mayor es el valor numérico de la masa.
- **Densidad suelta.** Es la masa o el peso del agregado necesario para llenar un recipiente con un volumen unitario especificado. El volumen unitario es el ocupado por los agregados y los vacíos que se generan entre las partículas de los agregados (NMX-C-073-ONNCCE, 2014).
- **Forma y Textura.** Influye en las propiedades del concreto fresco más que en las del concreto endurecido. Las partículas con textura áspera, angulares o alargadas requieren más cantidad de agua para producir concreto trabajable que los agregados lisos, redondeados y compactos. Además requieren más cemento para mantener la misma relación agua-cemento. Las formas perjudiciales son las muy alargadas y/o escamosas ya que tendrán una influencia objetable en la trabajabilidad, los porcentajes de cemento, la resistencia y la durabilidad.

Propiedades Químicas

Lo más importante en las propiedades químicas es revisar que los agregados no presenten sustancias y componentes geológicos agresivos que puedan afectar la

reacción entre la masa del concreto y así afectar su comportamiento mecánico en estado endurecido.

- **Reacción álcali-agregado:** 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.

La reacción más común se produce entre los óxidos de sílice (SiO_2) en sus formas inestables y los óxidos alcalinos de la pasta de cemento (Na_2O y K_2O). 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.

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 le 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).

4.2.4 Agregados utilizados en la 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 en el estado de Michoacán.

4.3 Agua.

Prácticamente cualquier agua natural que sea potable y no presente fuerte sabor u olor se la puede usar para la elaboración de concreto. Sin embargo también se pueden emplear en concreto algunas aguas que no se consideran potables. Se puede utilizar satisfactoriamente el agua para la preparación del concreto con menos de 2000 partes por millón (ppm) de sólidos disueltos. El agua que contiene más de 2000 ppm de sólidos disueltos se debe analizar para verificar su efecto sobre la resistencia y el tiempo de fraguado.

El exceso de impurezas en el agua de mezcla no sólo puede afectar el tiempo de fraguado y la resistencia del concreto, sino también puede causar eflorescencia, 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.

4.3.1 Especificaciones del agua en la construcción

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 6. 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.

Tabla 6 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 sulfuresistentes límites en p.p.m.
Sólidos en suspensión		
En aguas naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En aguas recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Cloruros como el CL (a)		
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 ₄ ⁼ (a)	3000	3500
Magnesio como Mg ⁺⁺ (a)	100	150
Carbonatos como CO ₃	600	600
Dióxido de carbonato disuelto, como CO ₂	5	3
Álcalis totales como Na ⁺	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
(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. (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. (c) Cuando se use cloruro de calcio CaCl ₂ como aditivo acelerante, la cantidad de éste debe tomarse en cuenta para no exceder el límite de cloruros de la tabla.		

4.3.2 El agua utilizada en la 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 la realidad.

4.4 Puzolanas

4.4.1 Origen de las puzolanas

Los griegos, 400 A.C. fueron los primeros que emplearon puzolanas en morteros de cal. Más tarde, los romanos no sólo usaron piezas de cerámica, ladrillos y tejas pulverizadas para formar las primeras puzolanas artificiales, sino también descubrieron que algunos suelos volcánicos mezclados con cal eran excelentes para producir morteros hidráulicos (un mortero hidráulico fragua y endurece bajo el agua, siendo más duradero que un mortero corriente de cal). Tales suelos fueron encontrados en los alrededores de la población de Pozzuoli, cerca de Nápoles, y de aquí el nombre de puzolana.

4.4.2 Definición

Las puzolanas son materiales naturales o artificiales que contienen sílice reactiva y/o aluminio, que tienen poca o ninguna 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.

4.4.3 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. En la ilustración 5, puede verse una clasificación de dichos materiales.

4.4.3.1 Puzolanas Naturales

A este 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. Las puzolanas naturales son productos silíceos, este nombre se debe al alto contenido en silicio y aluminio.

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 puzolanidad.

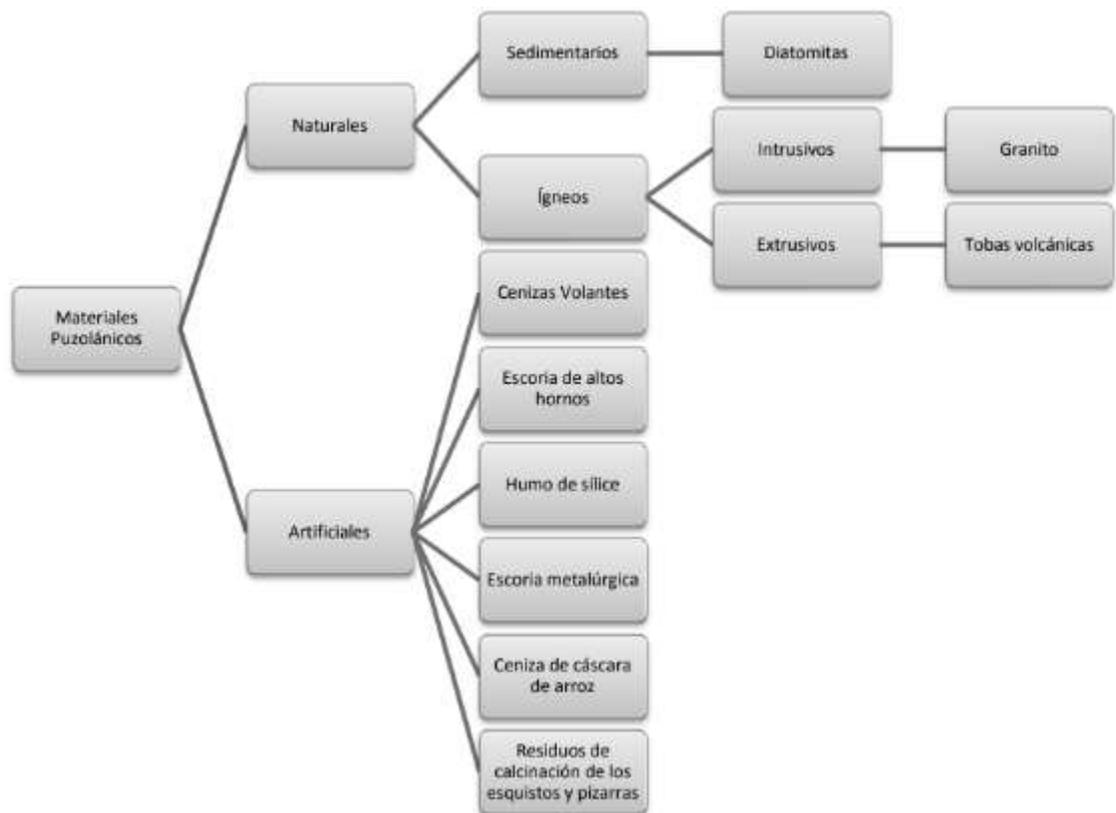


Ilustración 5 Clasificación de los materiales puzolánicos (Karen Jennifer Beltrán Taipei, 2017)

4.4.3.2 Puzolanas artificiales

Las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos industriales y agrícolas, generalmente como subproductos y materiales tratados térmicamente. Por ende se presenta un problema de almacenamiento produciendo un importante impacto medioambiental. De aquí el interés en que se utilicen como materia prima en otras industrias incrementando su consumo, lo que aporta las siguientes ventajas adicionales:

- Alargan la vida de los recursos naturales.
- Rentabilización del residuo, mejorando el balance económico de la empresa generadora.

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.

4.4.4 Actividad Puzolanica

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 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 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.

4.5 Morteros

Los albañiles de la antigua Roma denominaban *mortarius*, mortero, al recipiente en el cual amasaban y transportaban la mezcla de pasta de cal y arena. Con el paso del tiempo, este nombre fue adoptado para designar a la propia mezcla, que se ha utilizado para la construcción de cimentaciones, muros, pavimentos y revestimientos hasta la aparición del cemento Pórtland (Pérez, 2012).

4.5.1 Definición

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

4.5.2 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 entres 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 (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 7).

Tabla 7 Propiedades requeridas por especificación para cada tipo de mortero, (ASTM-C270, 2014)

Mortero	Tipo	Esfuerzo a compresión promedio a 28 días, mínimo, psi (MPa)	Retención de agua, mínimo, %	Contenido de aire, máximo, %, b
Cemento-Cal	M	2500 (17.2)	75	12
	S	1800 (12.4)	75	12
	N	750 (5.2)	75	14c
	O	350 (2.4)	75	14c
Mortero Cemento	M	2500 (17.2)	75	12
	S	1800 (12.4)	75	12
	N	750 (5.2)	75	14c
	O	350 (2.4)	75	14c
De cemento para albañilería	M	2500 (17.2)	75	18
	S	1800 (12.4)	75	18
	N	750 (5.2)	75	20d
	O	350 (2.4)	75	20d

ESPECIFICACIONES:

Todas las especificaciones de la tabla deben ser obtenidas en laboratorio

b) El contenido de aire de morteros de CPC-cal sin inclusión de aire es generalmente menor que 8%.

c) Cuando es incorporado acero de refuerzo en morteros de cemento-cal o mortero cemento, el contenido máximo de aire debe ser de 12%.

d) Cuando es incorporado acero de refuerzo en morteros de cemento para albañilería, el contenido máximo de aire debe ser de 18%.

4.6 Materiales en estudio como adición y sustitución al mortero

El uso de adiciones y sustituciones minerales en la producción del cemento Pórtland implica una disminución de la erosión y la deforestación del suelo, una reducción

del uso de recursos naturales (materias primas y combustibles). 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 muchos años se realizan esfuerzos para encontrar adiciones 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)

Se busca adiciones al mortero para mejorar sus propiedades mecánicas, las adiciones son con materiales puzolánicos, con el fin de evitar una mayor contaminación en la producción del cemento Pórtland ordinario y así generar que el costo económico baje considerablemente además de reutilizar un producto de la incrustación en las plantas geotérmicas.

4.6.1 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 (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 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.

4.6.2 Sílice utilizada en la 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 (SiO_2) y sulfuro de hierro (FeS) de color negro, y es una capa densa muy adherente y dura la cual afecta la capacidad de producción de los pozos geotérmicos.

Esta investigación presenta una nueva alternativa para obtener mortero de alto desempeño sumando sílice geotérmica como puzolana. La sílice utilizada 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 6 Sílice geotérmica. (Báez Ángel, 2017)

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.



Ilustración 7 Planta Geotérmica Cerro Prieto (Mejía, 2015)

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 intermediarios (granito-riolitas, dioritas, andesitas, etc.) sobre la superficie.



Ilustración 8 Planta geotérmica Los Azufres (CFE)

El porcentaje utilizado como sustitución al cemento fue de 5%. 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:

- **Secado de la Sílice geotérmica:**

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 9), el segundo se llevó a cabo en hornos a temperatura de 60°C por un período de 48 horas.



Ilustración 9 Secado de la sílice al sol. (Báez Ángel, 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 10). Esta decisión se tomó después de haber realizado un cribado 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 de que al molerlo aumentamos el área de reacción de las partículas ASTM (C618-15).



Ilustración 10 Trituración de Sílice en la Máquina de desgaste de Los Ángeles. (Báez Ángel, 2017)

4.7 Aditivos

Los aditivos son aquellos ingredientes del concreto que, además del cemento Pórtland, 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 que nunca deben ser considerados un sustituto de un buen diseño de mezcla, de mano de obra o del uso de buenos materiales (IMCYC, 2016).

4.7.1 Tipos y usos

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.

- Mantenimiento 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).

4.7.2 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 11 Aditivo utilizado en la investigación. (Báez Ángel, 2017)

5. FASE EXPERIMENTAL

En esta fase, se describe el diseño del experimento, los materiales seleccionados para ensayar, la metodología seguida y la normativa que reguló los ensayos realizados.

5.1 Caracterización de los materiales

5.1.1 Análisis del agregado

El agregado utilizado fue agregado fino (arena) fue obtenido del banco de materiales “Joyitas” ubicado en el kilómetro 14+500 de la carretera Morelia-Jiquilpan entrada a

San Bernabé en el estado de Michoacán (ilustración 12). 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 y económicamente hablando el material es aceptable.

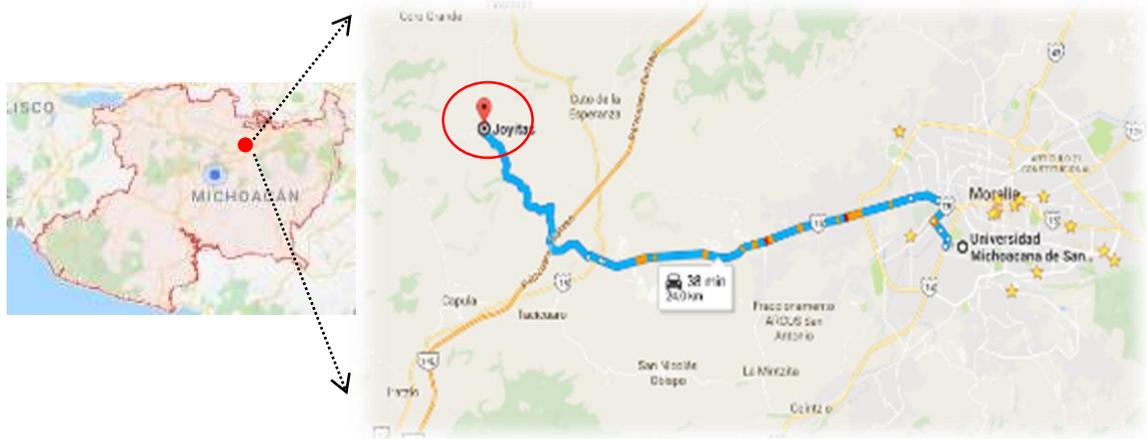


Ilustración 12 Ubicación del banco la Unión, Morelia, Mich. (Báez Ángel, 2017)

CENTRO SCT MICHOACAN

UNIDAD GENERAL DE SERVICIOS TECNICOS

MICHIC

INVENTARIO DE BANCOS DE MATERIALES 2016

CARRETERA: MORELIA - JIQUILAPAN

BCE. NUM.	NOMBRE	KILOMETRO	DESVIACION	FECHA ESTUDIO	FECHA DE ACT.	TIPO PROP.	TIPO MATERIAL	TRATA. NIENTO	VOLUMEN X 1000m ³	ESPESOR DESPALME (m)	USOS PROB.	USO EXPL.	RESTRICC. ECOLOG.	ASPEC. ECONOM.
0002	JOYITAS	214+500	1-03/2011	19/03/11	NOV-14	PART	TR-70MTP	TRC	21000	100	1-2-5-10	NR	NO EXISTEN	ACEP

Ilustración 13 Inventario de Bancos de Materiales, 2015. SCT.

Para conocer las propiedades y características de este agregado se le efectuaron diferentes pruebas que a continuación son descritas.

5.1.1.1 Cuarteo de la arena

El cuarteo se determinó según la norma NMX-C-170 (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 esta se distribuya en todo lo extenso del divisor para así lograr que en cada conducto se distribuya la misma cantidad de material.



Ilustración 14 Cuarteo por cuarteador mecánico. (VACA ARCIGA, 2017)

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 aplana 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 15 Cuarteo Manual (Báez Ángel, 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.

5.1.1.2 Humedad actual

La humedad actual se determinó según la norma NMX – C – 166 (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.

El procedimiento para 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:

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

Dónde:

- Mh= masa saturada y superficialmente seca en gramos.
- Ms = masa seca del material en gramos, secada en charola sobre parrilla, ilustración 16.



Ilustración 16 Secado de la arena en parrilla. (Báez Ángel, 2017)

5.1.1.3 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 (NMX-C-165-ONNCCE., 2014) , mediante la siguiente fórmula:

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

Dónde:

- 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 17 Secado superficial de la muestra mediante el molde troncocónico.
(Báez Ángel, 2017)*

5.1.1.4 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. 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.



Ilustración 18 Realización de la prueba de MVSS (VACA ARCIGA, 2017)

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.

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

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

Dónde:

- M.V.S.S.= Masa volumétrica seca y suelta (gramos/cm³).
- M= Masa de la arena (gramos).
- V= Volumen del recipiente (cm³).

5.1.1.5 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 (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 19 Realización de la prueba de MVSV (VACA ARCIGA, 2017)

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

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

Dónde:

- M.V.S.V.= Masa volumétrica seca y varillada (gramos/cm³).
- M= Masa de la arena (gramos).
- V= Volumen del recipiente (cm³).

5.1.1.6 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 $110^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$.
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 21 Material retenido de las diferentes mallas una vez pesadas. (Báez Ángel, 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 8 Tabla ejemplo para realizar el informe de 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 8, 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 9 Bureau Of Reclamation A.S.T.M. menciona las siguientes especificaciones granulométricas.

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

La ilustración 22 presenta los límites granulométricos para agregado fino para mezclas de concreto y mortero.

Tabla 9 Especificaciones granulométricas por Bureau Of Reclamation A.S.T.M.

MALLA	% QUE PASA
3/8	100
4	95-100
8	80-100
16	50-85
30	25-60
50	11232
100	43375

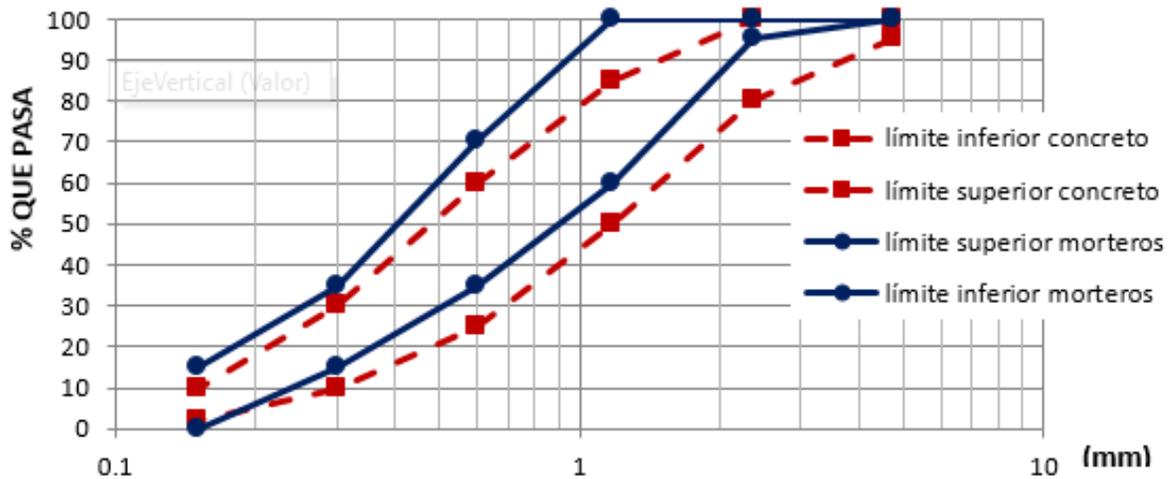


Ilustración 22 Límites granulométricos para agregado fino (Mezclas de concreto y mortero).

5.1.1.7 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 cm³ con marcas a cada 25 cm³.
- 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 cm³ adicionándole solución de sosa cáustica hasta la marca de 206 cm³.
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 23 Prueba de colorimetría. (VACA ARCIGA, 2017)

5.1.1.8 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.



Ilustración 24 Prueba de sedimentación. (Báez Ángel, 2017)

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.

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.

5.1.1.9 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 10. La determinación se realiza de acuerdo con el método de ensayo que indica la norma. (NMX-C-111-ONNCCE, 2014)

Tabla 10 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 ^[1]	3.00 ^[*]
En concretos presforzados	8.00 ^[1]	-
En otros concretos	15.00	5 ^[*]

^[1] 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.

^[*] 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 25 Prueba de terrones de arcilla. (Báez Ángel, 2017)

5.1.1.10 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:

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

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

5.1.1.11 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 pizón metálico de 1000 ± 5 gramos.
- Cápsulas de 85 ± 5 ml (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 $85 \pm 5 \text{ cm}^3$ 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 ± 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 ± 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 pizón lentamente en la probeta ajustando hasta que el pizón se apoye en la arena, el nivel donde se apoya en la arena se denominará lectura de arena.



Ilustración 27 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 pizón en la probeta se baje a velocidad excesiva.

5.1.2 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).

5.1.3 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 28 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 ± 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.

5.2 Pruebas realizadas al mortero fresco

5.2.1 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 si 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 29), se compacta cada una de las capas con 20 golpes (Ilustración 30), 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 31) 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 leva a una velocidad uniforme (Ilustración 32), el diámetro del mortero extendido es el promedio de cuatro medidas distribuidas simétricamente, leídas y redondeadas al 0.5 cm (Ilustración 33).



Ilustración 29 Llenado del molde de bronce en dos capas. (Báez Ángel, 2017)



Ilustración 30 Compactación de la pasta. (VACA ARCIGA, 2017)



Ilustración 31 Enrasado con una espátula el exceso de mortero. (VELÁZQUEZ ROBLERO, 2017)



Ilustración 32 Expansión de la mezcla de forma manual haciendo girar la leva. (VACA ARCIGA, 2017)



Ilustración 33 Toma de mediciones para determinar la fluidez (Báez Ángel, 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).

5.2.2 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 34 Papel indicador puesto en contacto con el mortero (VACA ARCIGA, 2017)

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 35 Papel indicador de pH (Báez Ángel, 2017).

5.2.3 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 36 Medición de temperatura. (VACA ARCIGA, 2017)

5.3 Elaboración de especímenes

Según 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 37 Elaboración de los especímenes. (Báez Ángel, 2017)

5.3.1 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.

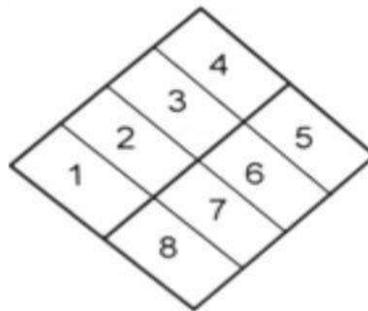


Ilustración 38 Repartición de golpes durante el llenado de los cubos

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 39 Moldes, llenado y colado de especímenes cúbicos (Báez Ángel, 2017)

5.3.2 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 ± 3 mm en moldes de 150 mm o más de profundidad, y de ± 1.5 mm en moldes de menor profundidad. Los moldes no deben variar de la longitud especificada en ± 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.

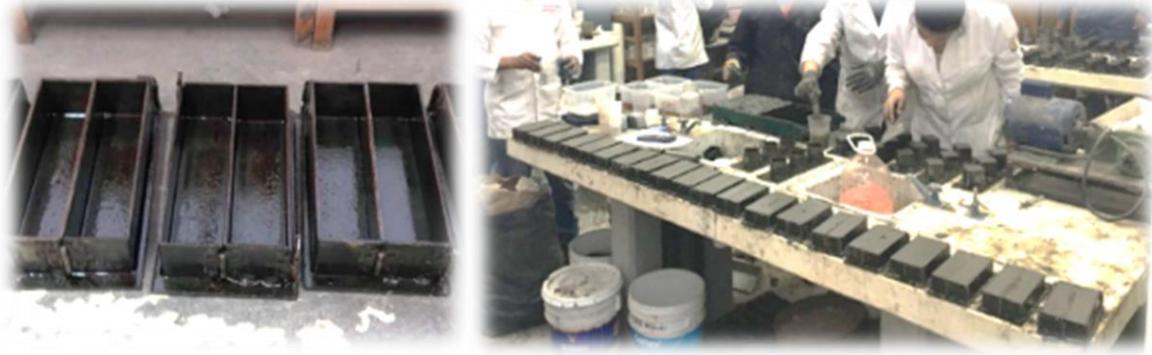


Ilustración 40 Moldes y colado de prismas (Báez Ángel, 2017).

5.3.3 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 41 Elaboración de cilindros. (Santillán Barragán, 2017)

5.3.4 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 adhiera 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 adhiera a esta.



Ilustración 42 Elaboración de briquetas. (Báez Ángel, 2017)

5.3.5 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_2 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.

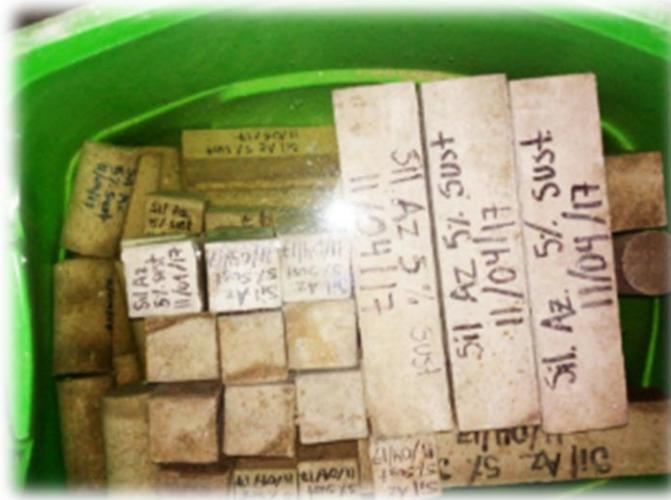


Ilustración 43 Curado de los especímenes por sumersión. (Santillán Barragán, 2017)

5.4 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 (Sil Az), ubicada en Michoacán, y la segunda con sílice de la planta geotérmica de Cerro Prieto (Sil 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 destruir el espécimen con la intención de conocer parámetros principalmente de resistencia mecánica que ayuden a tener resultados característicos del mortero endurecido.

2. Por durabilidad

El ACI define la durabilidad del concreto de cemento Pórtland 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.

5.4.1 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).

5.4.1.1 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:

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

En donde:

- D = densidad del espécimen, en g/cm³.
- M = masa superficialmente seca del espécimen, en g.
- V = volumen del espécimen (volumen desalojado), en ml (equivalente a cm³).



Ilustración 44 Prueba de densidad. (VACA ARCIGA, 2017)

5.4.1.2 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 45), 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 45 Prueba de Gravedad Específica. (Báez Ángel, 2017)

5.4.1.3 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 46).

Procedimiento:

1. Se determinaron 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 (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000).

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

Dónde:

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

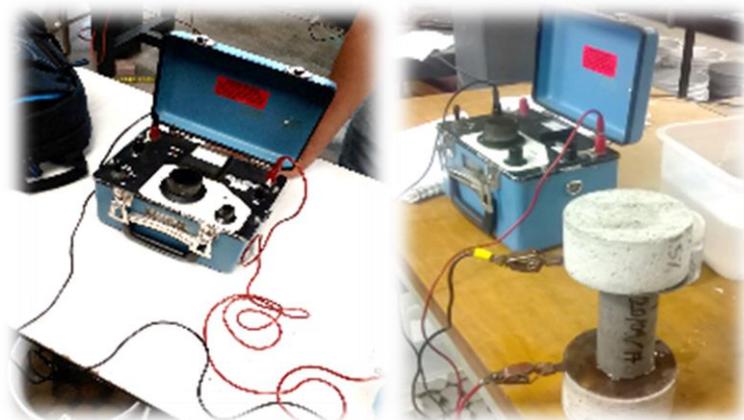


Ilustración 46 Prueba de resistividad eléctrica en especímenes. (Báez Ángel, 2017)

Especificaciones

Tabla 11 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000)

RESISTIVIDAD ELÉCTRICA (KΩ-CM)	RIESGO DE CORROSIÓN
< 10	Alto riesgo
10 A 200	Riesgo moderado
> 200	Poco riesgo

5.4.1.4 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 μ s; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1 μ 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 47 Prueba Velocidad de Pulso Ultrasónico (Báez Ángel, 2017)

De acuerdo con (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000), se establece 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 12).

Tabla 12 Criterios de evaluación de velocidad de pulso ultrasónico (RED DURAR (Durabilidad de la armadura), 2000).

Velocidad de propagación	Calidad del mortero
< 2000 m/s	Deficiente
2001 a 3000 m/s	Normal
3001 a 4000 m/s	Alta
> 4000 m/s	Durable

5.4.2 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.

5.4.2.1 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 kg/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 48 Prueba de compresión simple en cubos. (Báez Ángel, 2017)

Cálculos.

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

Donde:

- R = Resistencia a la compresión, en kgf/cm².
- W = Carga de ruptura de la muestra, en kg.
- A = Área de la muestra, en cm².

Tabla de registro

Tabla 13 Tabla de registro para resistencia compresión simple

No. de espécimen	Lado 1 cm	Lado 2 cm	Área cm ²	Carga kg	Resistencia Kgf/cm ²

Referencia.

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

5.4.2.2 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 midió y marcó 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 falle.
4. Se registra la carga obtenida, se realizó la a 5 especímenes.



Ilustración 49 Especímenes sometidos a flexión. (Báez Ángel, 2017)

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 (kgf/cm²).
- P = Carga máxima aplicada, en N (kgf).
- L = Distancia entre apoyos, en cm.
- b = Ancho promedio del espécimen, en cm.
- d = Peralte promedio del espécimen, en cm.

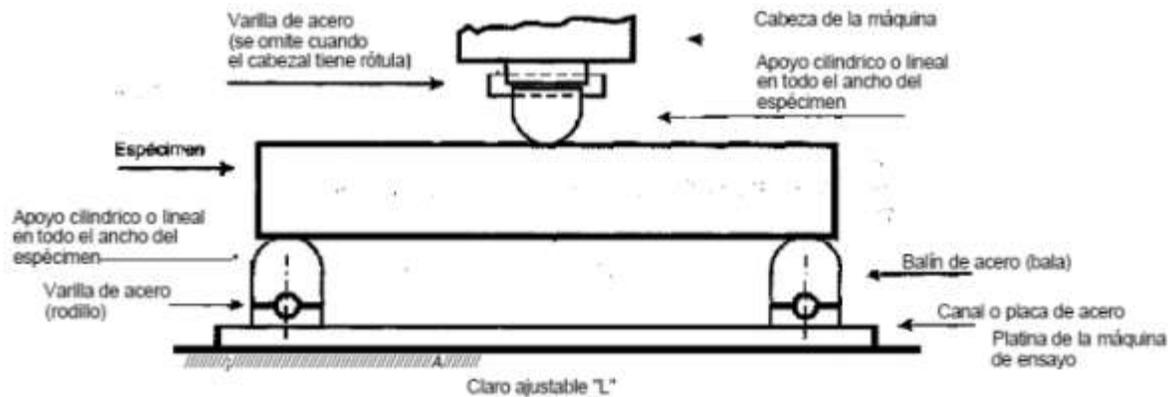
Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en liornas del 5 % del claro, el módulo de ruptura se calculará:

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

Dónde:

- R = Módulo de ruptura en kg/cm^2 .
- P = Carga de ruptura en kg .
- 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 50 Representación gráfica de la prueba a flexión en un punto de carga.

5.4.2.3 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 promediando 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 colocó 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 pasen 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 51 Prueba de tensión indirecta en cilindros. (Báez Ángel, 2017)

Cálculos.

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

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

Dónde:

- T = resistencia a tensión indirecta en kg/cm².
- P = carga aplicada máxima en kg.
- L = longitud en cm.
- d = diámetro en cm.

5.4.2.4 Resistencia a la tensión directa

La tensión directa se obtuvo de especímenes de mortero en forma de “cacahuates” 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 extrajeron de los recipientes de almacenamiento los 5 especímenes de donde permanecían 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 tomaron las medidas de la sección media (S_m) de la briqueleta
3. Se llevó 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 aplicó la carga lentamente por medio de las municiones, colocándolas en la tolva adecuada para ello, hasta la falla de la muestra.
5. Se retiró 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 52 Prueba de tensión directa en briquetas. (Báez Ángel, 2017)

Cálculos

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

Dónde:

- R = resistencia a la tensión en kgf/cm^2 .
- Mm = Masa de las municiones o carga de ruptura en Kg.
- Sm = Sección media de la briqueta en cm^2 .
- 50 = constante de la máquina.

5.4.3 Pruebas por durabilidad

La durabilidad es la capacidad que tienen los concretos de cemento portland 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 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).

5.4.3.1 Efecto a ciclos de congelamiento y deshielo

Los efectos adversos producidos por congelamiento y deshielo son unos de los problemas principales de la durabilidad. El deterioro puede ser producido por la dilatación del agua de la pasta, la dilatación de algunas partículas del agregado o la combinación de ambas (Rivera, 2016).

Constituyen una condición de servicio durante la vida útil del mortero, por la repetición de ciclos de congelamiento y posterior deshielo, estando saturado el mortero. En ambos casos, la causa básica del deterioro puede asociarse con la expansión de volumen que sufre el agua al congelarse, pero los mecanismos de prevención del deterioro y las consecuencias del daño son diferentes.

Procedimiento:

1. Dos días antes se prepara el refrigerador industrial que se utilizara para la prueba, se monitorea la tempera para que cumpla a -18°C
2. Se sacan los especímenes de curado, se enumeran, se pesan, se toman sus medidas y se registran en la bitácora, además se les hacen las pruebas de resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, frecuencia y resonancia.



Ilustración 53 Pruebas realizadas durante los ciclos de congelamiento y deshielo (Báez Ángel, 2017)

3. Se introducen en un recipiente los tres especímenes y se llena con agua hasta tener un tirante de 2 cm por encima del espécimen.
4. Se introduce el recipiente al refrigerador durante 4 horas, transcurrido este tiempo se sacan los especímenes del refrigerador y se toma su temperatura, se tomaran de nuevo sus medidas, se obtiene su masa, se les realiza resistividad eléctrica, velocidad de pulso ultrasónico, frecuencia y resonancia y estos valores se registran como el ciclo uno.



Ilustración 54 Toma de temperatura de los especímenes tras ser sometidos a ciclos de congelamiento y deshielo (Báez Ángel, 2017).

5. Después de realizarle las pruebas se vuelven a introducir en el recipiente y toma su temperatura, se introducen en el refrigerador nuevamente durante 4 horas.
6. Se sigue el mismo procedimiento durante 15 ciclos.
7. Si en algunos de los ciclos los recipientes tienen mucho hielo hay que retirarlo y llenarlo de agua.
8. Después de los 15 ciclos sometidos a congelamiento y deshielo se procede a hacerle la prueba de flexión para conocer el efecto en cuanto a su resistencia. Ilustración 55.



Ilustración 55 Prueba de flexión a especímenes sometidos a congelamiento y deshielo (Báez Ángel, 2017)

5.4.3.2 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.

Este método describe la cinética de la absorción del agua en el concreto por medio de tres coeficientes: (ϵ_e) porosidad efectiva; (k) absorción capilar; y (m) resistencia a la penetración del agua; el valor de m esta únicamente en función de la estructura del poro, pero no de la porosidad total, estos tres coeficientes nos dan el valor de la absorción capilar.

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. Posteriormente se dejan enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente.
3. Se determinan las dimensiones del espécimen.

4. Se coloca resina o parafina en las caras laterales del espécimen para garantizar que el agua solo se absorba por la cara inferior.
5. Se registra su masa inicial, W_0 .



Ilustración 56 Registro de la masa inicial (W_0). (Báez Ángel, 2017)

6. El espécimen se coloca sobre una esponja húmeda en el interior de un recipiente de fondo plano, con un tirante de agua de 3 a 5 mm por encima de la parte inferior del espécimen.



Ilustración 57 Colocación de los especímenes sobre la esponja húmeda. (Báez Ángel, 2017)

7. El recipiente se deberá mantener cerrado durante la prueba para evitar la evaporación del agua y por consiguiente la disminución del tirante de agua.
8. Se registra la masa del espécimen a intervalos de tiempo de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4, 6, 24, 48...horas, hasta lograr masa constante.



Ilustración 58 Registro de masa durante la prueba de absorción capilar. (Báez Ángel, 2017)

Cálculo:

Los coeficientes se calculan con base en las siguientes ecuaciones

Coeficiente de la resistencia a la penetración del agua (**m**).

$$m = \frac{t}{z^2}, \quad \left(\frac{s}{m^2} \right) \quad [21]$$

Donde:

- z = representa la profundidad de penetración del agua en el tiempo “t”.

Coeficiente de absorción capilar (**k**):

$$k = \frac{(W_t - W_0)/A}{\sqrt{t}}, \quad \left(\frac{kg}{m^2 s^{\frac{1}{2}}} \right) \quad [22]$$

$$\varepsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000}, \quad (\%) \quad [23]$$

Donde:

- Wo = Masa inicial de la probeta (Kg o g).
- Wt = Masa final de la probeta (Kg o g).

- $A = \text{Área expuesta de la probeta (m o cm)}$.

K es evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico $(W_t - W_o)/A$ como función respecto de la raíz del tiempo $t^{1/2}$.

El coeficiente m puede ser determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior, es decir cuando $z=H$

Con la anterior información se obtiene la Sorción Capilar (S):

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}}, \quad \left(\frac{mm}{h^{1/2}} \text{ ó } \frac{m}{s^{1/2}} \right) \quad [24]$$

5.4.3.3 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_2 reacciona con la humedad dentro de los poros del concreto y convierte el hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ con un pH de 12 a 13, a carbonato de calcio $CaCO_3$ 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 59 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.



Ilustración 60 Aplicación de fenolftaleína sobre el espécimen. (Báez Ángel, 2017)

5. Después de realizado el corte se debe de tomar la profundidad de la carbonatación midiendo esta 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.

$$K_{CO_2} = \frac{X_{CO_2}}{\sqrt{t}}, \quad [25]$$

Donde:

- K_{CO_2} = Constante de carbonatación en mm/ (año)^{0.5}.
- X_{CO_2} = Profundidad de carbonatación en mm.
- t = Tiempo de exposición en años.



Ilustración 61 Medición de la profundidad de carbonatación. (Báez Ángel, 2017)

5.4.3.4 Ataque por acción de Sulfatos

Las sales en estado sólido no atacan al mortero, pero cuando se encuentran en solución puede reaccionar con la pasta del mortero endurecido. Algunas arcillas contienen, por ejemplo álcalis y sulfatos de calcio y de magnesio, y las aguas freáticas con este tipo de arcilla son una solución de sulfatos. Por lo tanto puede haber un ataque a la matriz de cemento, al reaccionar el sulfato con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y con el C_3A . El mortero atacado por sulfatos tiene un aspecto blanquecino y característico. El daño suele iniciarse en los bordes y los ángulos, va seguido por agrietamientos y descascaramientos progresivos que reducen el mortero a un estado frágil o incluso blando (Rivera, 2016).

Procedimiento:

1. Como primer paso debe realizarse una solución de sulfato de sodio (Na_2SO_4) con una concentración de 350 g de sulfato por cada litro de agua destilada. La cantidad debe ser suficiente para llevar a cabo 5 ciclos de humedecimiento y secado de los especímenes. En la experimentación se preparan 20 litros de solución. El proceso de preparación de la solución consiste en disolver el sulfato en el agua a una temperatura no mayor a 40°C y mezclar dicha solución por un tiempo mínimo de 1 hora. Se debe evitar que quede polvo al final del proceso o material contaminante en el recipiente del mismo.



Ilustración 62 Preparación de la solución de sulfato de sodio. (Báez Ángel, 2017)

2. Los especímenes deberán de secarse hasta masa constante antes de iniciar la prueba. Para esto se utilizaron cubos de 5x5 cm, los cuales fueron secados a una temperatura de 50°C hasta masa constante.



Ilustración 63 Secado de los especímenes. (Báez Ángel, 2017)

3. Se pesan los especímenes para obtener la masa seca o masa inicial de cada uno y se prepara un recipiente capaz de contener todas las muestras para cada mezcla, durante el tiempo de prueba procurando mantener un tirante de solución de no menos de 2 cm por encima de la superficie de los especímenes, estos deberán ir apoyados sobre una rejilla que evite su reposo directo sobre el fondo del recipiente y asegure el contacto con la solución en todas sus caras, por lo que deben estar separados 2 cm entre sí.

4. Los especímenes deberán de permanecer en la solución saturada de sodio durante un tiempo no menor de 16 horas ni mayor de 18 horas y manteniéndose a una temperatura en promedio de 21 °C.



Ilustración 64 Especímenes inmersos en solución de sulfato de sodio. (Báez Ángel, 2017)

5. Concluidas las 16 horas se sacan y se dejan escurrir durante 15 minutos para después hacerle pruebas físico-mecánicas a 3 cubos, las cuales incluyen: Resistividad Eléctrica, Velocidad de Pulso Ultrasónico, Gravedad específica, Densidad y compresión.
6. Después colocarlos en un horno previamente calentado a una temperatura constante de 50°C hasta conseguir masa constante nuevamente.
7. Pasado el tiempo de secado se sacan las muestras del horno y se dejan enfriar a temperatura ambiente para después obtener masa seca.



Ilustración 65 Obtención de masa seca después de ser expuestos a solución de sulfato de sodio. (Báez Ángel, 2017)

8. Se ensayan las muestras a compresión y se comparan con los resultados de aquellas muestras que no se hayan sometido a los ciclos de humedecimiento y secado. Cada uno de los pasos del 3 al 6 se repite hasta completar 5 ciclos de prueba.



Ilustración 66 Ensayo a compresión después de que el espécimen fue expuesto a solución de sulfato de sodio. (Báez Ángel, 2017)

Debe tenerse el debido cuidado de no mezclar los recipientes en los que se contengan las muestras probadas, estas deben sumergirse siempre en su correspondiente recipiente y nunca en otro, aunque contenga solución preparada bajo las mismas condiciones.

6. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con base en la metodología propuesta y en todo el desarrollo experimental presentado en los anteriores capítulos, se realizaron las pruebas de la fase experimental, cuyos resultados se presentan y analizan a continuación.

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.

6.1 Caracterización del agregado fino.

En la Tabla 18 se muestran los resultados obtenidos de la caracterización de la arena mediante las diferentes pruebas de laboratorio.

Tabla 14 Resultados de la caracterización de la arena

Prueba	Arena de Joyitas
<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 ³)

M.V.S.V. (NMX-C-073-ONNCCE, 2004)	1.57 (gr/cm ³)
Sedimentos	Aceptable (<30ml)
Colorimetría (NMX-C-088-ONNCCE, 1997)	Escala 3 (aceptable)
Contenido de material fino (pasa malla ASTM No 200) (NMX-C-084-ONNCCE, 2006) (5% Max)	11.10%
Contenido de Terrones de arcilla (NMX-C-071-ONNCCE, 2004)	0.65%
Densidad (g/cm ³) (2.15 Aceptable)	2.44
Módulo de Finura (<2.3-3.1>)	2.54 (mediana)
Gravedad Específica	2.33

La distribución granulométrica se presenta en la Ilustración 67 junto con los límites superior e inferior establecido por la norma mexicana (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).

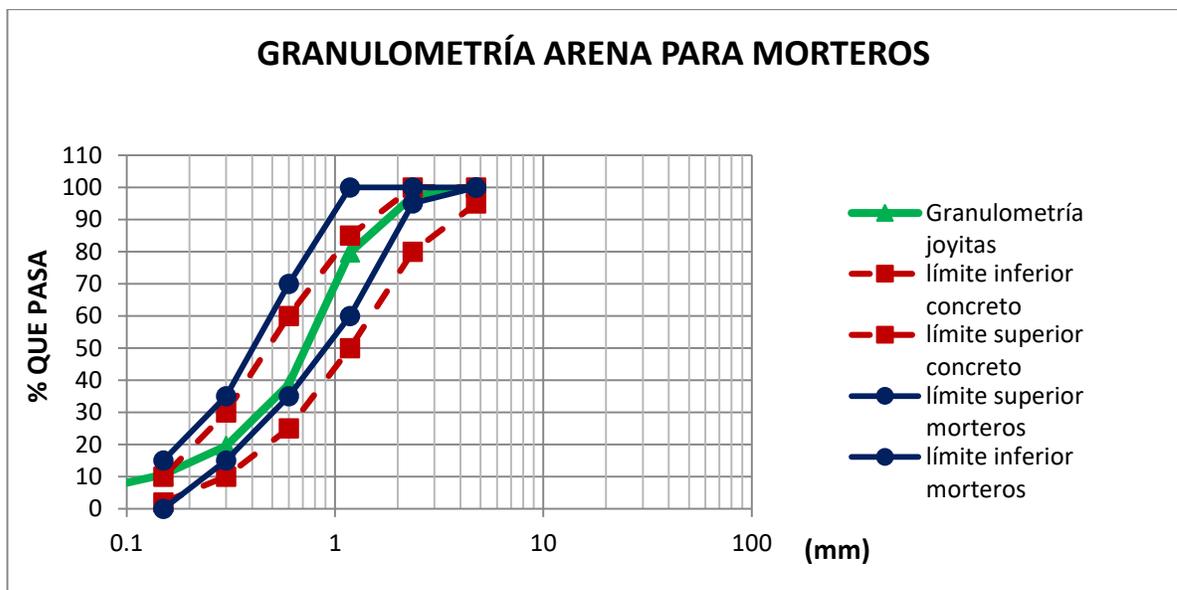


Ilustración 67 Distribución granulométrica de arena de Joyitas y límites inferior y superior (NMX-C-111-ONNCCE, 2004).

Como se puede observar en la Ilustración 50 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).

6.2 Pruebas realizadas al mortero fresco

6.2.1 Fluides

Tabla 15 Resultados de la prueba de fluides para cada adición

MEZCLA	Cemento (g)	AZ (g)	CP (g)	Arena (g)	Agua (ml)	Relación A/C	Aditivo (%)	Fluides (%)
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 15 se registran los valores del diseño de la mezcla de acuerdo al parámetro de fluides. 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 fluides de $110\pm 5\%$.

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

6.3 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.

6.3.1 Pruebas no destructivas

6.3.1.1 Densidad

La densidad del mortero está directamente relacionada con la de los materiales componen (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 cemento convencional de buena calidad es de 2.1 g/cm^3 aproximadamente.

En las ilustraciones 68 y 69 se puede observar que las mezclas a ambas edades de prueba tienden a tener el mismo comportamiento. Todas las mezclas presentaron valores abajo de los 2.1 g/cm³, sin embargo los mejores resultados los presenta la mezcla de Sil AZ, la cual se ve que con el paso del tiempo va tendiendo a alcanzar la densidad de un mortero tradicional.

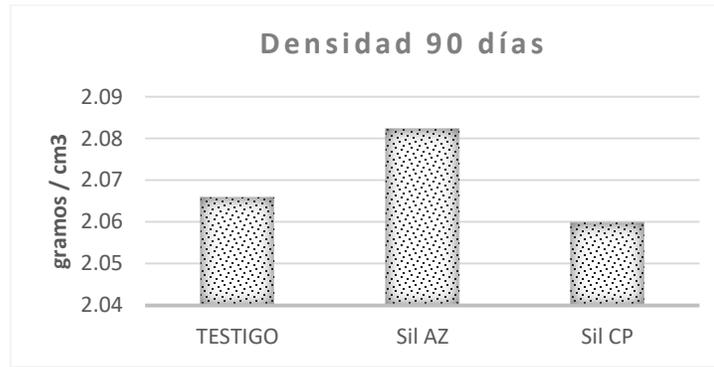


Ilustración 68 Resultados de la prueba de densidad a los 90 días.

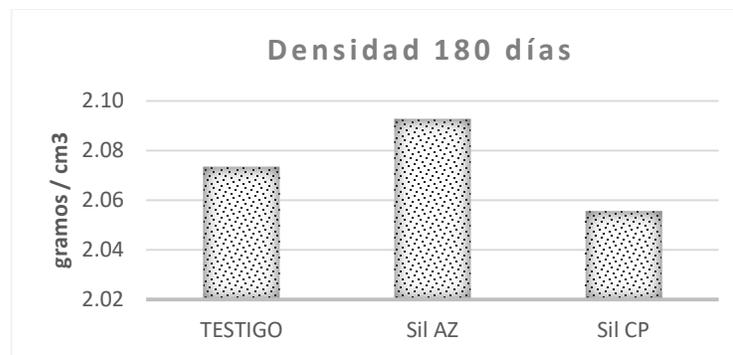


Ilustración 69 Resultados de la prueba de densidad a los 180 días.

6.3.1.2 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.

Como se observa en las ilustraciones 70 y 71 el comportamiento a ambas edades es similar, solo que a la edad de 180 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 a ambas edades el mejor comportamiento lo presenta la mezcla Sil Az, por lo cual podemos decir que la sustitución de sílice proveniente de Los Azufres Michoacán ayuda a que la matriz del mortero se densifique.

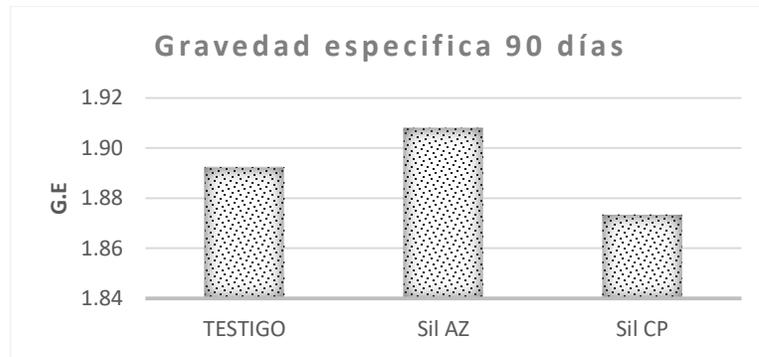


Ilustración 70 Resultados de gravedad específica a la edad de 90 días.

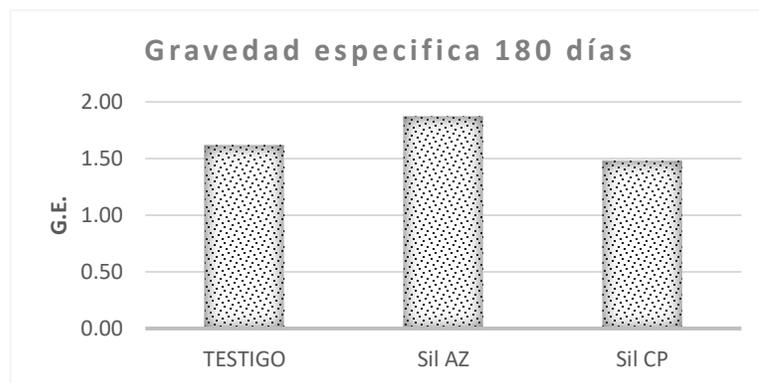


Ilustración 71 Resultados de gravedad específica a la edad de 180 días.

6.3.1.3 Resistividad eléctrica

Los resultados de los ensayos realizados sobre resistividad eléctrica se pueden apreciar en la ilustración 72. Para poder interpretar los resultados obtenidos partiremos de los criterios manejados por la (RED DURAR , 2000) 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, 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 noventa días las mezclas de sílice no logran superar a la mezcla control y de acuerdo a la Red Durar presentaban alto riesgo a corrosión. A los 180 días las tres mezclas aumentan sus valores presentando riesgo moderado a la corrosión. El mejor comportamiento lo presenta la mezcla Sil Az superando a la mezcla control en un 16.93%.

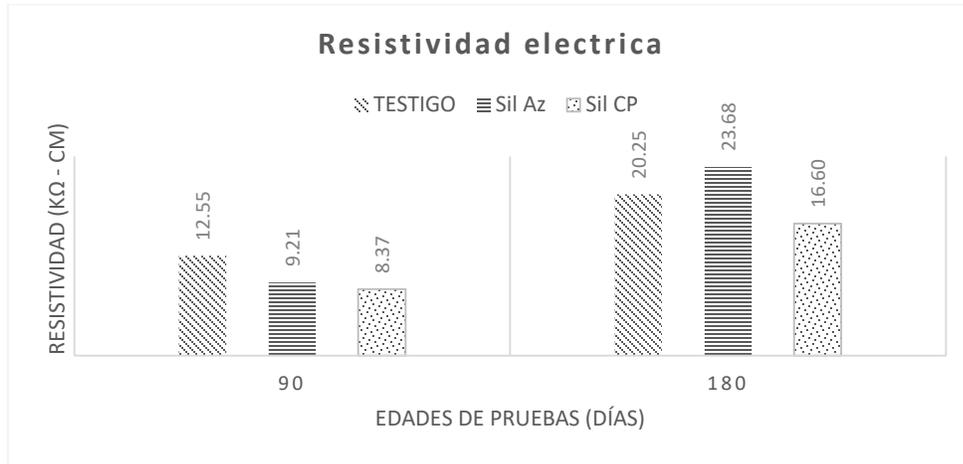


Ilustración 72 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a los 90 y 180 días.

- **Resistividad eléctrica en prueba de ciclos de congelamiento y deshielo**

A la edad de 90 días la resistividad eléctrica aumenta debido a que el agua se congela dentro de los poros y las muestras tienden a tener un comportamiento uniforme durante el transcurso de los ciclos. La calidad que presenta ante ciclos de congelamiento y deshielo es de riesgo moderado a la corrosión. La mezcla Sil Az es la que presenta mejores resultados. Ilustración 73.

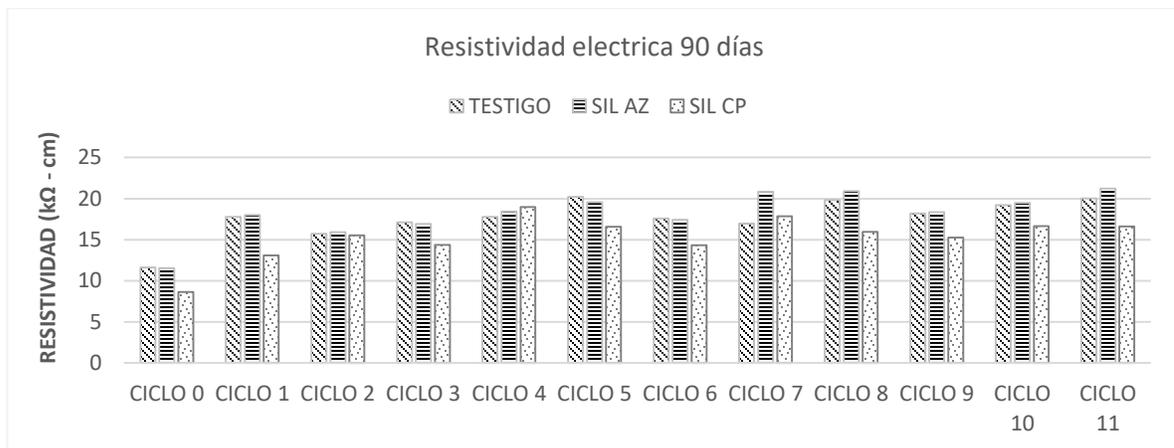


Ilustración 73 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a los 90 durante el ensayo de congelamiento y deshielo.

A la edad de 180 días la resistividad eléctrica aumenta respecto del ciclo cero debido a que el agua se congela dentro de los poros, pero ya en el último ciclo se observó que su resistividad disminuye, esto debido a que las mezclas comienzan a verse afectadas por los cambios de temperatura a los que son sometidas durante el ensayo.

La calidad que presenta a la edad de 180 días ante ciclos de congelamiento y deshielo es de riesgo moderado a la corrosión. Nuevamente la mezcla de sílice de los Azufres es la que presenta los mejores resultados de resistividad eléctrica durante esta prueba. Ilustración 74.

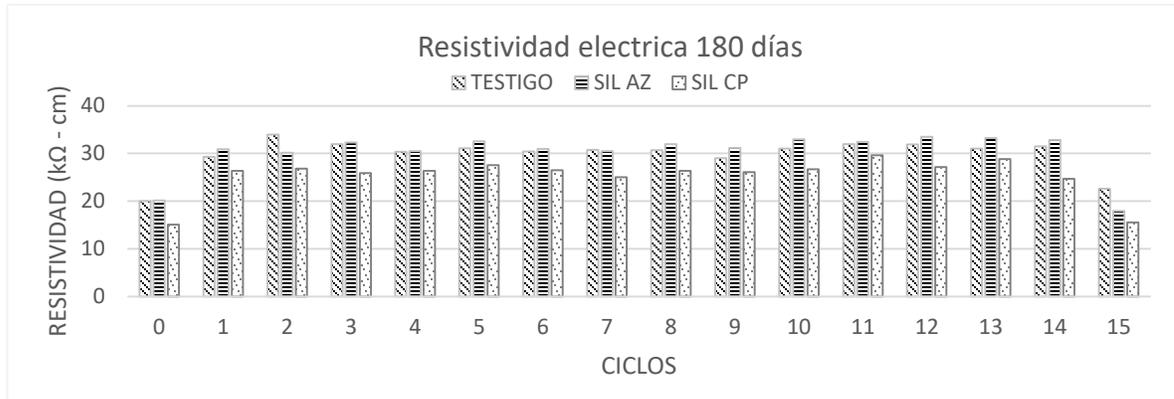


Ilustración 74 Resultados de la prueba de resistividad eléctrica a los 90 durante el ensayo de congelamiento y deshielo.

- **Resistividad eléctrica en ciclos de ataque por acción de sulfatos**

A los noventa días la media de los ciclos 1 a 5 de la mezcla testigo presenta una diferencia de 37.96% respecto al ciclo 0, que es el ciclo control, la mezcla Sil Az presenta una diferencia de 7.63% y la mezcla de Sil CP una diferencia de 12.47%. En la ilustración 75 se observa que los valores más altos de resistividad eléctrica y el comportamiento más estable ante ataque de sulfatos, de acuerdo a lo anterior, lo presenta la mezcla Sil Az. Por lo general las mezclas alcanzan los valores máximos durante el tercer ciclo, ya que a partir de este ciclo las sales comienzan a solidificarse dentro de la matriz.

A la edad de 180 días la diferencia de la media (ciclos 1 a 5) sobre el ciclo control (ciclo 0) presentan los siguientes resultados: testigo 38%, Sil Az 25.93% y Sil CP 18.41%, a esta edad la mezcla Sil CP presenta un comportamiento más estable, sin embargo los valores más altos los presenta la mezcla Sil Az. A esta edad las mezclas de acuerdo a la Red Durar presentan riesgo moderado a la corrosión. (Ilustración 76).

A ambas edades las sustituciones por sílice presentan valores presumibles y un mejor comportamiento que la mezcla testigo.

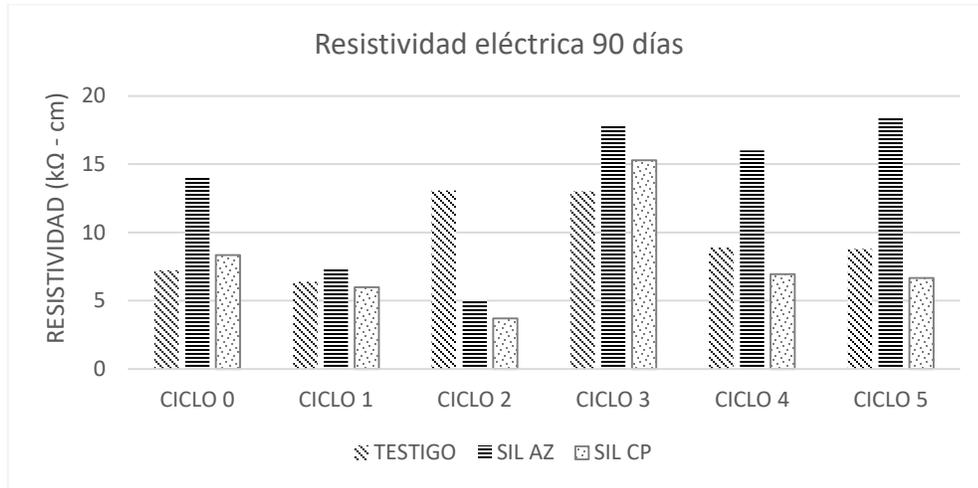


Ilustración 75 Resistividad eléctrica a los 90 días ante ataque por sulfatos.

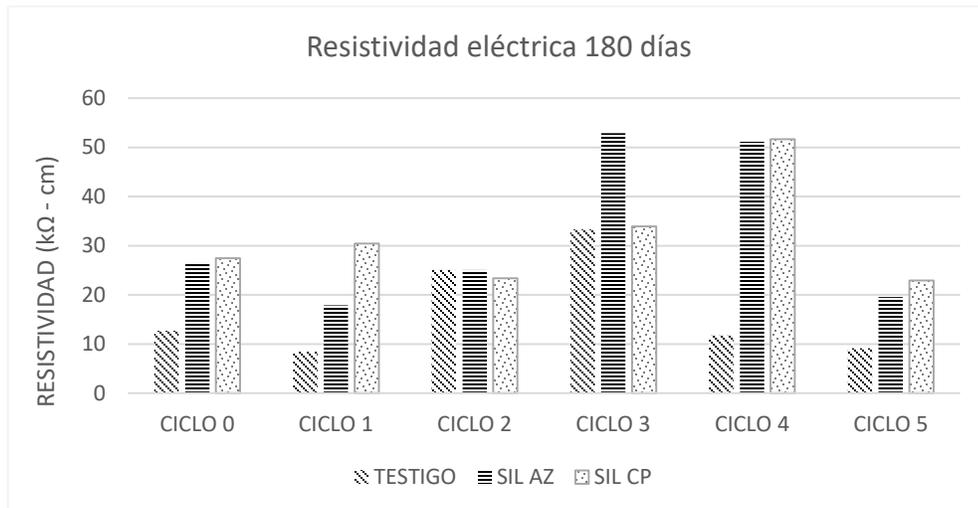


Ilustración 76 Resistividad eléctrica a los 180 días ante ataque por sulfatos.

6.3.1.4 Velocidad de Pulso Ultrasónico

En la Ilustración 77 se presentan los valores obtenidos en la prueba de velocidad de pulso ultrasónico durante dos edades. A los noventa 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 Sil CP supera a la mezcla testigo en 4.20% y la mezcla de Sil Az en un 3.04%.

A los 180 días las mezclas con sustitución nuevamente superan a la mezcla testigo. La mezcla de Sil Az supera a la control en un 3.8%, mientras que la mezcla Sil CP solo en un 0.64%

De acuerdo a los criterios de durabilidad de la Red DURAR la calidad de las mezclas con sustitución de sílice, a ambas edades, presentan una calidad DURABLE, mientras que la calidad de la mezcla control se mantiene en ALTA.

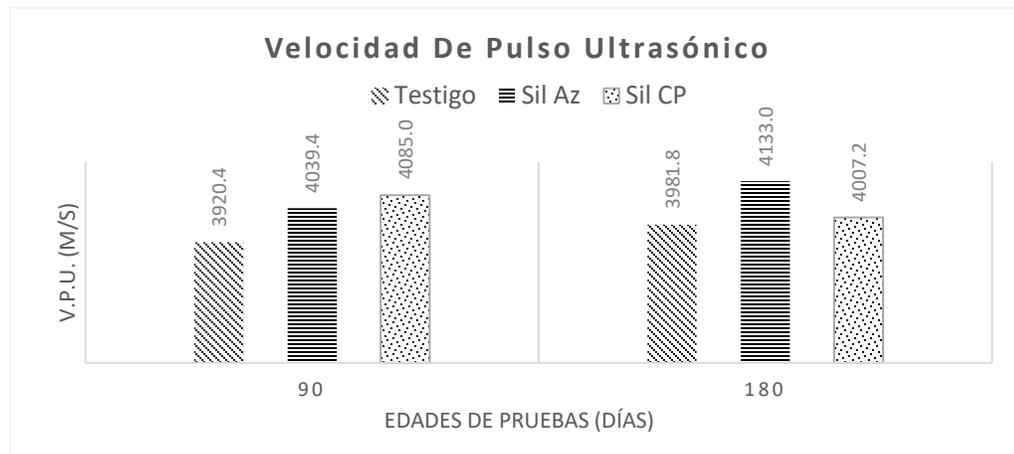


Ilustración 77 Resultados de Velocidad de pulso ultrasónico a 90 y 180 días.

- **Velocidad de pulso ultrasónico en prueba de ciclos de congelamiento y deshielo**

Los valores obtenidos a 90 días (Ilustración 78) muestran que de acuerdo a criterios de la RED DURAR la calidad de los morteros es ALTA para la mezcla de Sílice de Cerro Prieto, mientras que para las mezclas testigo y Sílice de los Azufres la calidad es Durable.

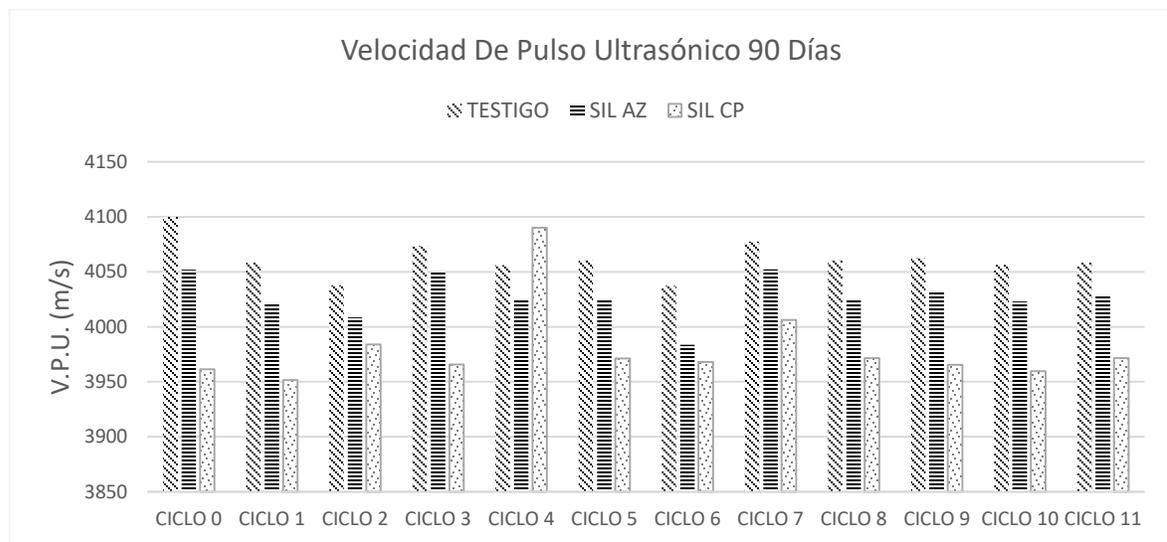


Ilustración 78 Resultados de Velocidad de pulso ultrasónico a 90 días en prueba de congelamiento y deshielo.

Como se observa en la ilustración 79 las mezclas a 180 días muestran que de acuerdo a criterios de la RED DURAR la calidad de los morteros es Durable. Se observó además que a ambas edades las sustituciones por sílice presentan un buen desempeño ante ataques de congelamiento y deshielo, al mantener un comportamiento más uniforme que la mezcla control.

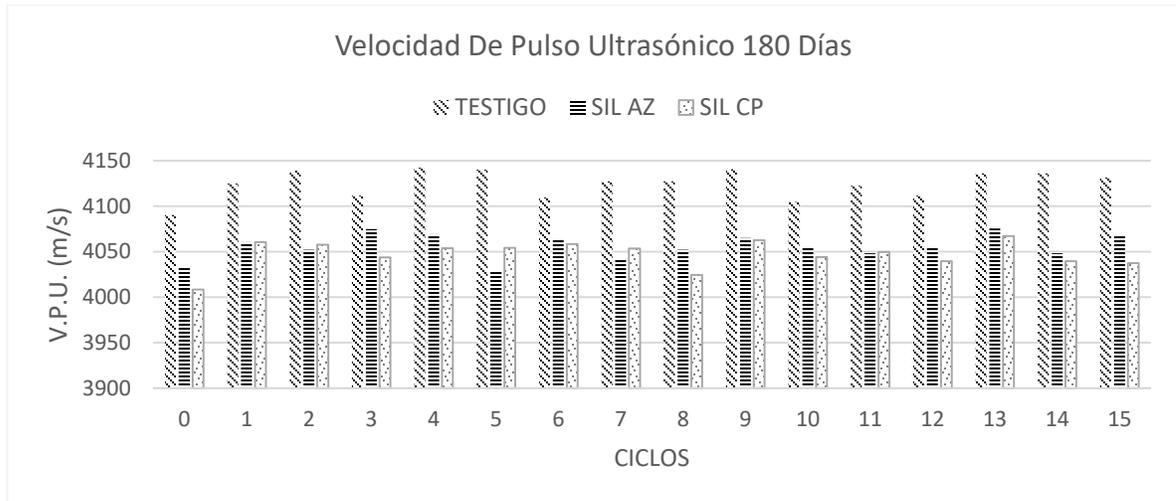


Ilustración 79 Resultados de Velocidad de pulso ultrasónico a 180 días en prueba de congelamiento y deshielo.

- **Velocidad de pulso ultrasónico ante ataque por acción de sulfatos**

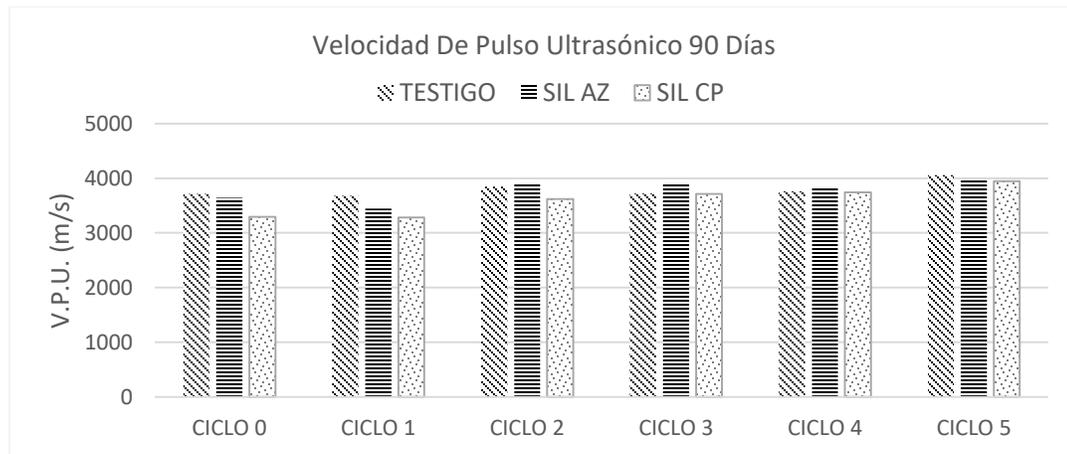


Ilustración 80 Resultados Velocidad de pulso ultrasónico a 90 días ante ataque por sulfatos.

La VPU durante el monitoreo de los ciclos presenta resultados muy estables a ambas edades, de acuerdo a criterios de la RED DURAR la calidad de los morteros es ALTA. Se observa además que las sustituciones presentan un muy buen comportamiento con referencia a la muestra control. Ilustración 80-81.

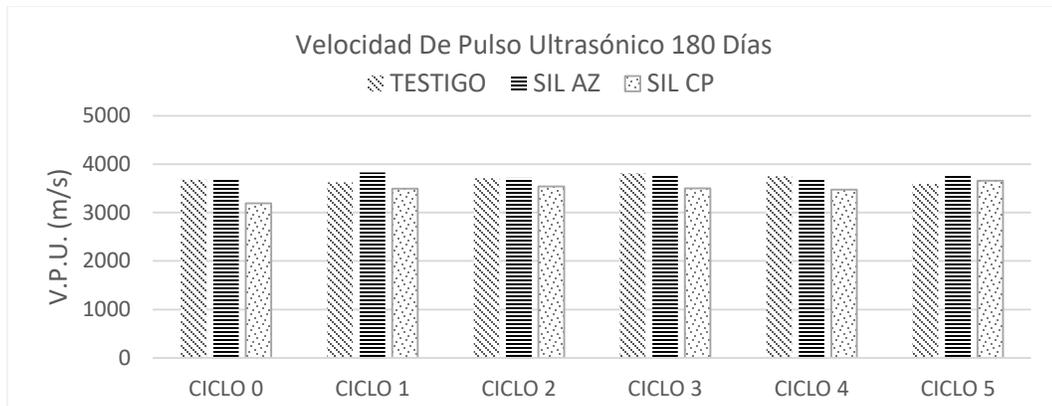


Ilustración 81 Resultados Velocidad de pulso ultrasónico a 180 días ante ataque por sulfatos.

6.3.2 Pruebas destructivas

6.3.2.1 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” (Báez Ángel, 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 16 Índice de actividad puzolánica a los 28 días

Mezcla	Esfuerzo (MPa)	Índice de actividad puzolánica %
TESTIGO	32.05	----
Sil AZ	25.65	80.03
Sil CP	23.64	73.75

Para la mezcla Sil 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 cemento en los morteros. La mezcla de Sil CP no presenta resultados favorables.

6.3.2.2 Resistencia a compresión simple

Uno de los ensayos que más nos proporciona información sobre las características del mortero es el de compresión simple, pues 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 5cm de arista.

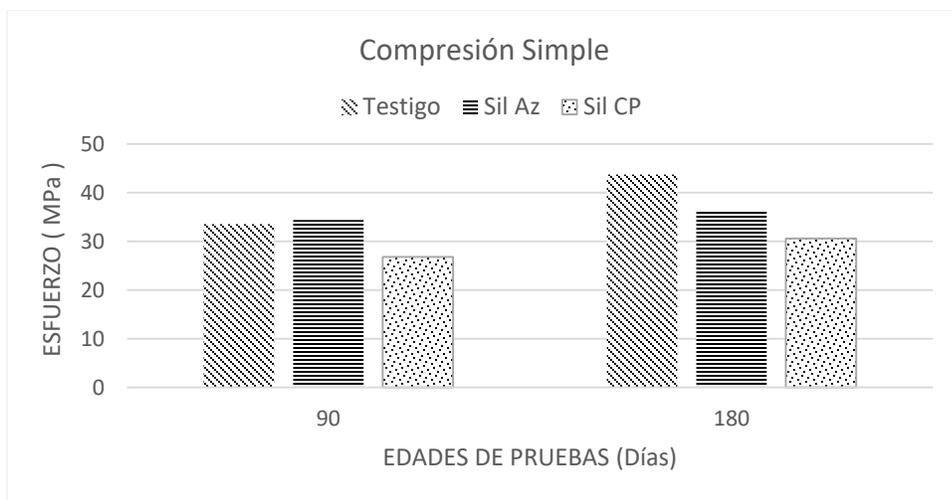


Ilustración 82 Resultados del ensayo a compresión simple.

A los 90 días la actividad puzolánica en la sustitución de sílice de los Azufres presentan un mejoramiento de 2.5% respecto a la muestra testigo (Ilustración 82). A los 180 días ambas sustituciones presentan resultados estables pero no logran superar a la mezcla control.

6.3.2.3 Resistencia a flexión

La capacidad de flexotracción, expresada por medio del módulo de ruptura se obtuvo de acuerdo al valor medio de los resultados obtenidos. Se puede observar (Ilustración 83) que las mezclas con sustitución de sílice a los noventa días no logran una resistencia superior a la muestra control, sin embargo a los 180 días las mezclas con sustituciones presentan un mejor desempeño. Para esta última edad la mezcla Sil Az presenta un mejoramiento de 20.77% sobre la muestra control.

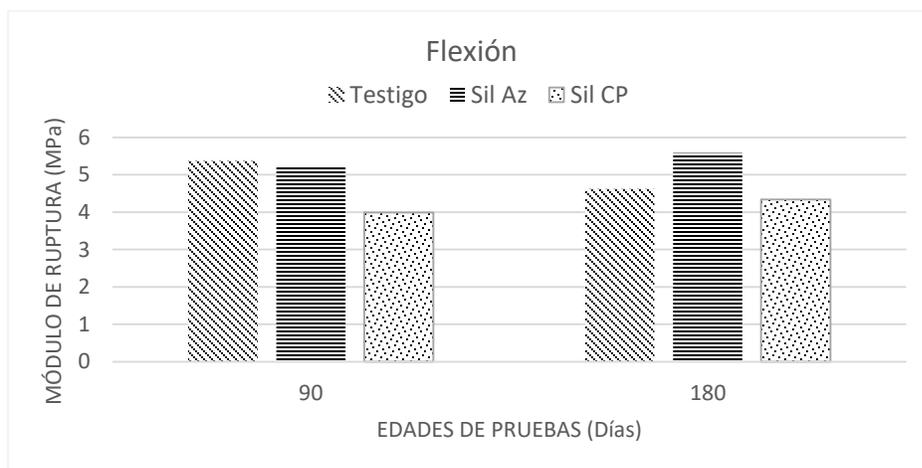


Ilustración 83 Resultados del ensayo a flexión.

6.3.2.4 Resistencia a tensión indirecta

En la ilustración 84 podemos ver los resultados obtenidos durante las pruebas de compresión diametral en cilindros (tensión indirecta).

A noventa días los resultados de las tres mezclas son muy similares. La muestra testigo obtiene una resistencia de 2.85 MPa (Mega Pascales), la mezcla Sil Az 2.86 MPa y la mezcla Sil CP 2.78 MPa.

A la edad de 180 días las mezclas aumentan sus valores y vuelven a presentar un comportamiento muy similar, sin embargo para esta edad es más apreciable el desempeño de la mezcla control. La mezcla control presenta valores de 3.59 MPa, la mezcla Sil Az 3.13 MPa y la mezcla Sil CP 3.36 MPa.

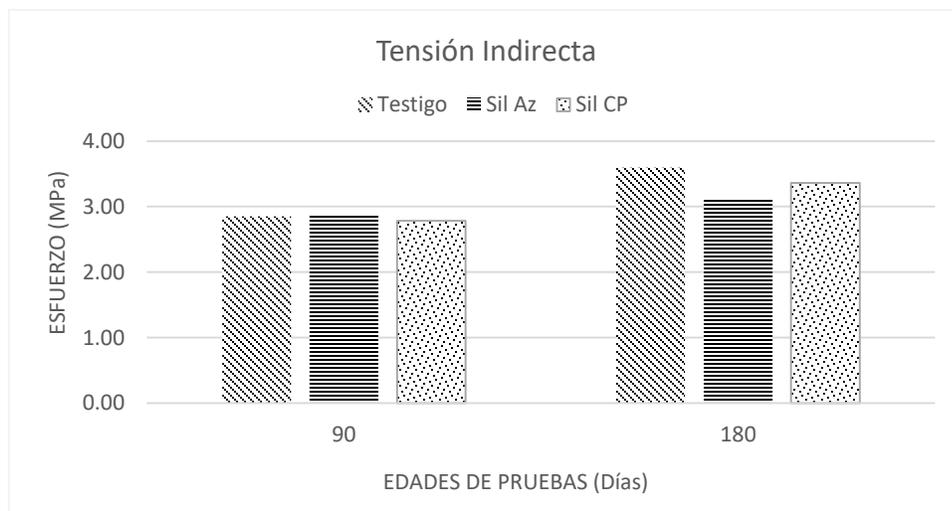


Ilustración 84 Resultados del ensayo a tensión indirecta.

6.3.2.5 Resistencia a tensión indirecta

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

Como se observa en la ilustración 85 las sustituciones por sílice, a ambas edades, logran superar a la muestra control presentando un buen comportamiento ante resistencia a tensión directa. Los mejores resultados los presenta la mezcla de sílice de los Azufres.

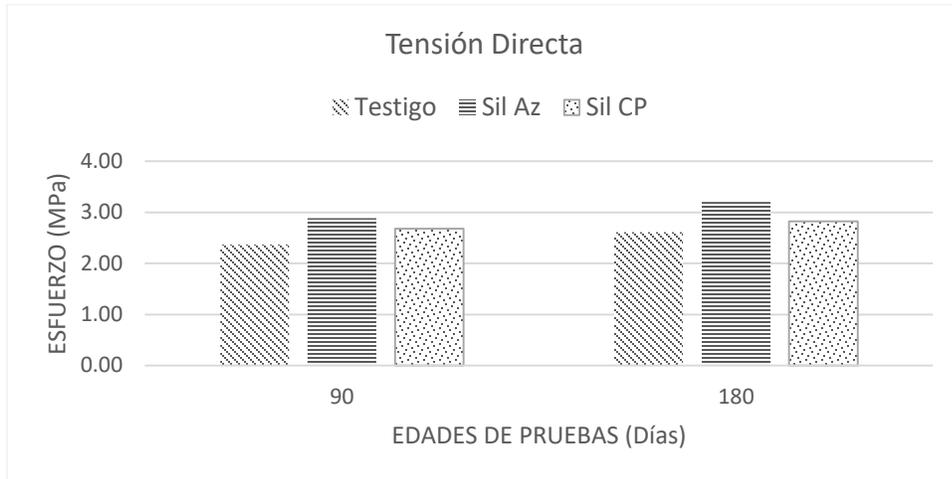


Ilustración 85 Resultados del ensayo a tensión directa.

6.3.3 Pruebas por durabilidad

6.3.3.1 Efecto a ciclos de congelamiento y deshielo

Los valores mostrados en la ilustración 86 presentan los resultados obtenidos en la prueba de frecuencia de resonancia, donde el comportamiento más uniforme lo presenta la mezcla Sil Az, al comportarse de una manera más uniforme, mientras que los valores picos desfavorables lo presenta la mezcla Sil CP.

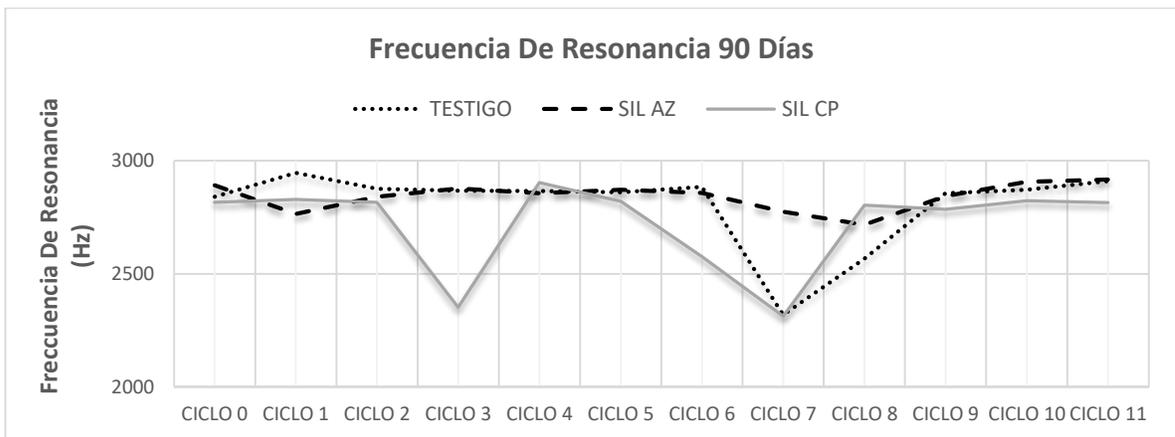


Ilustración 86 Resultados a 90 días de la prueba de frecuencia de resonancia durante el ensayo de congelamiento y deshielo.

A los 180 días el mejor comportamiento lo presentan la mezcla control y la mezcla de Sílice de Cerro Prieto, al tener un comportamiento más uniforme. Los valores pico, favorables y desfavorables, los presenta la mezcla de sílice de los Azufres. Ilustración 87.

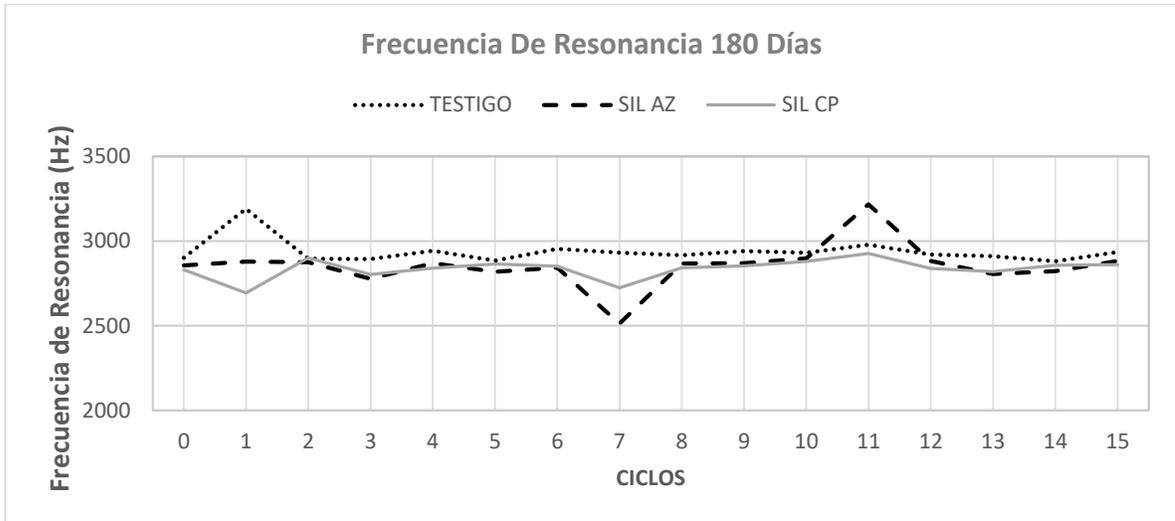


Ilustración 87 Resultados a 180 días de la prueba de frecuencia de resonancia durante el ensayo de congelamiento y deshielo.

- **Resistencia Flexión**

Las muestras sometidas a congelamiento y deshielo presentaron disminuir su resistencia a la flexión, esto debido a la solidificación del agua dentro de los poros de la matriz, provocando esfuerzos internos que modificaron su resistencia a flexión.

Durante ambas edades la media de los especímenes sometidos a la prueba de congelamiento y deshielo de la mezcla Sil CP no disminuye su resistencia a flexión, presentando valores de módulo de ruptura mayores que el espécimen control. Ilustración 88-89.

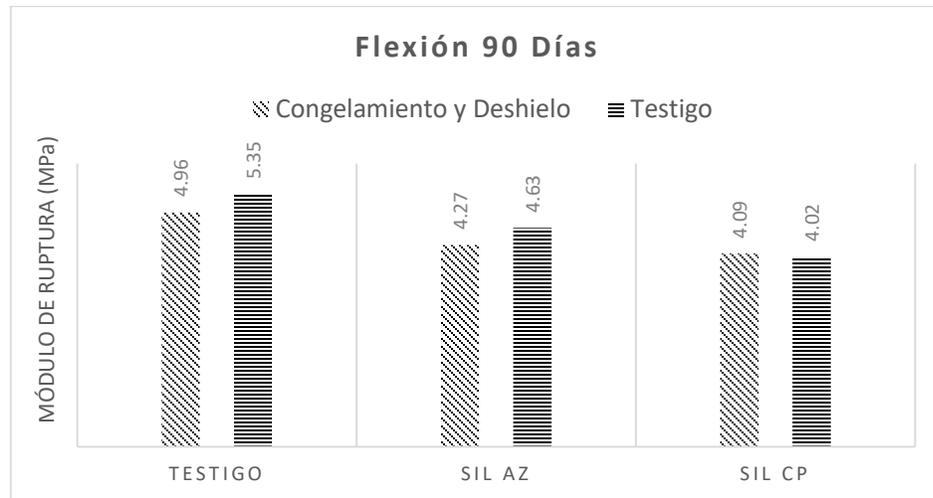


Ilustración 88 Resultados de flexión a 90 días en prueba de congelamiento y deshielo.

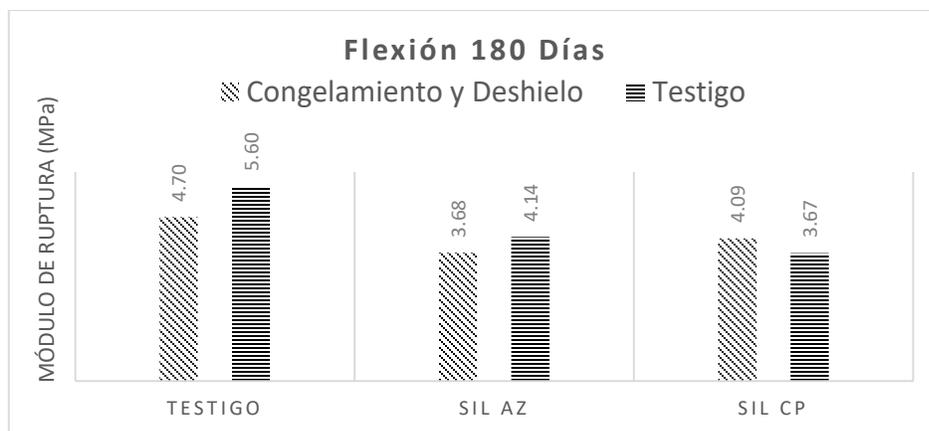


Ilustración 89 Resultados de flexión a 180 días en prueba de congelamiento y deshielo.

6.3.3.2 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. Este movimiento se ve influenciado por las características del líquido y por las características del sólido poroso.

- **Resistencia a la penetración del agua**

Durante ambas edades las mezclas tienen el mismo comportamiento, la resistencia a la penetración del agua es superior en la mezcla testigo, posteriormente la mezcla de sílice de los Azufres, y la mezcla que presenta una mayor vulnerabilidad es la de sílice de Cerro Prieto ya que tiene una menor resistencia. Ilustración 90.

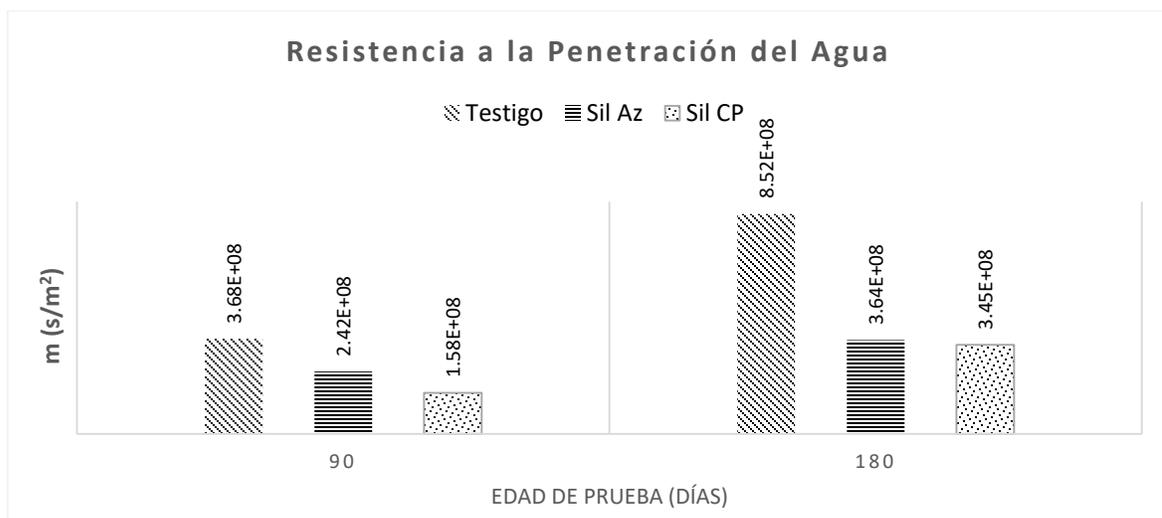


Ilustración 90 Resultados de resistencia a la penetración del agua.

- **Coeficiente de absorción capilar**

Los resultados muestran que la capacidad de absorción capilar de las mezclas en ambas edades toma valores entre 0.0020 y 0.0104 g/ (m² seg^{0.5}). Se puede observar que al igual que en la ilustración de resistencia a la penetración del agua, las mezclas tienen la misma tendencia a incrementar sus valores sin existir cambios que provoquen que una mezcla supere a otra. Los indicadores más bajos corresponden a la mezcla testigo, posteriormente la mezcla de sílice de los Azufres. La mezcla de sílice de Cerro Prieto parecería ser un material menos poroso o de poca conectividad entre los poros y asegura ser un buen recubrimiento. (Ilustración 91).

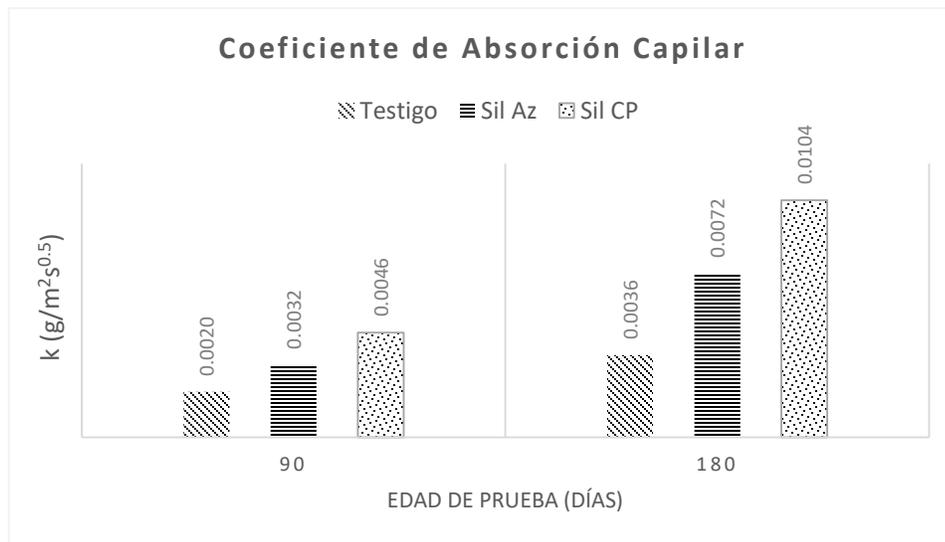


Ilustración 91 Resultados, coeficiente de absorción capilar.

- **Porosidad efectiva**

De acuerdo a la Red DURAR se especifica que valores menores del 10% indican un concreto de buena calidad y compacidad, valores comprendidos entre el 10 y el 15% es indicativo de un concreto de calidad moderada, y un concreto mayor del 15% indica un concreto de durabilidad inadecuada.

A los 90 días, en base a la Red DURAR, las muestras presentan valores de buena calidad y compacidad. Sin embargo a los 180 días la mezcla testigo y la mezcla con sílice de los Azufres presentan calidad moderada. En el caso de la mezcla de sílice de Cerro Prieto presenta ser de calidad inadecuada. Ilustración 92.

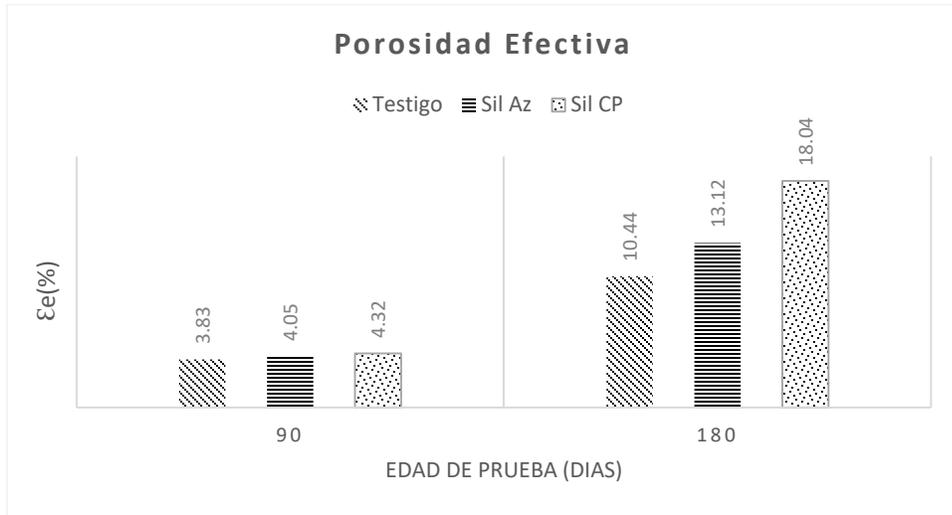


Ilustración 92 Resultados, porosidad efectiva.

- **Sorción Capilar**

En base a la Red DURAR se especifica que un valor de Sorción de 5×10^{-5} es apto para ser colocado en exposiciones severas y para condiciones menos severas se adoptan valores de 10^{-4} .

A los 90 días las mezclas presentan valores mayores a 5×10^{-5} que de acuerdo a la Red DURAR son valores aptos para que las mezclas sean colocadas en exposiciones severas. A esta edad los mejores resultados los presentan las mezclas con sustituciones de sílice. Sin embargo a los 180 días los mejores resultados los presenta la mezcla de sílice de los Azufres, posteriormente la mezcla de sílice de Cerro Prieto. En el caso de la mezcla testigo la Red DURAR recomienda sea colocada en condiciones menos severas. (Ilustración 93).

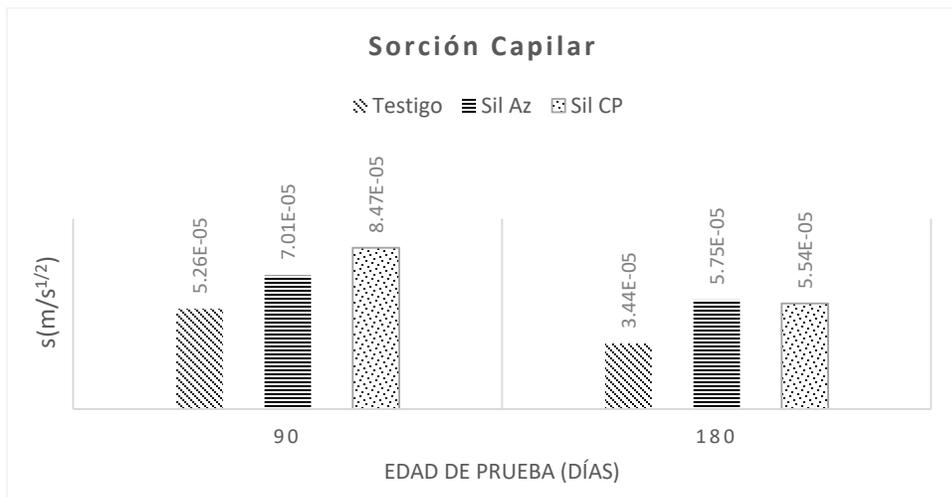


Ilustración 93 Resultados, sorción capilar.

6.3.3.3 Carbonatación

La Red DURAR establece valores de K_{CO_2} de 2 a 3 mm/año^{0.5} como indicativos de elevada resistencia a la carbonatación, mientras que valores mayores de 6 mm/año^{0.5} son indicadores de baja resistencia.

A la edad de 90 días la mezcla de sílice de los Azufres presenta valores indicativos de 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 94). A los 320 días las tres mezclas presentan valores de moderada resistencia a la carbonatación, sin embargo la sustitución de Sílice de los Azufres sigue presentando los mejores resultados. (Ilustración 95).

Tabla 17 Constantes de carbonatación.

MEZCLA	K_{CO_2} (mm/año ^{0.5})	
	90 días	320 días
TESTIGO	3.50	3.67
SIL AZ	2.80	3.45
SIL CP	3.25	3.97

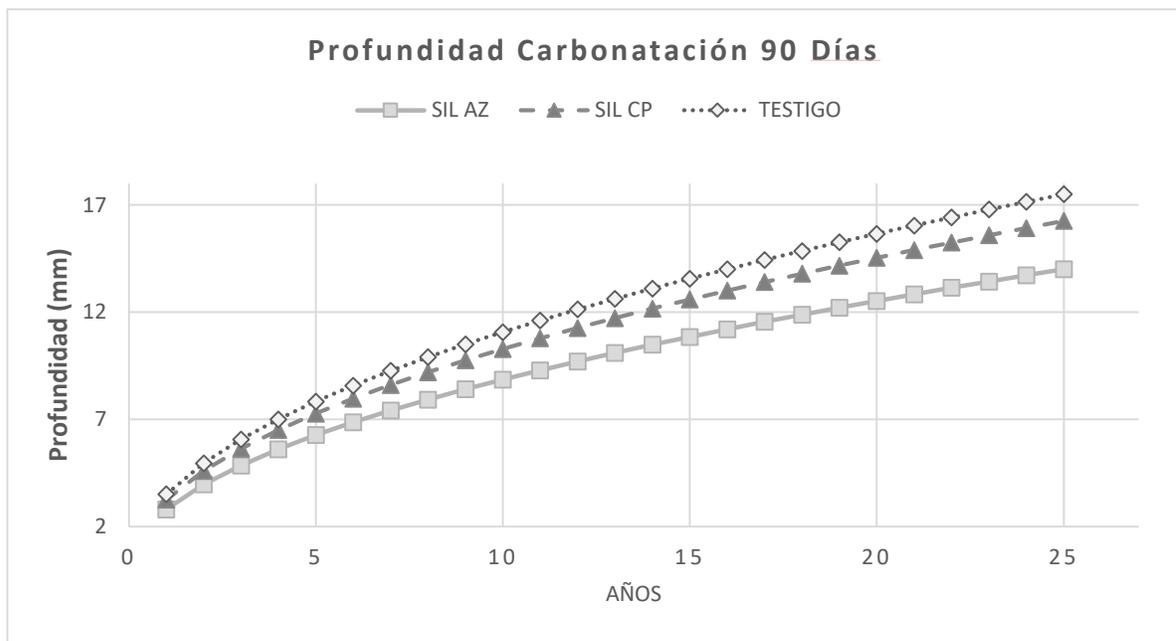


Ilustración 94 Resultados, carbonatación 90 días.

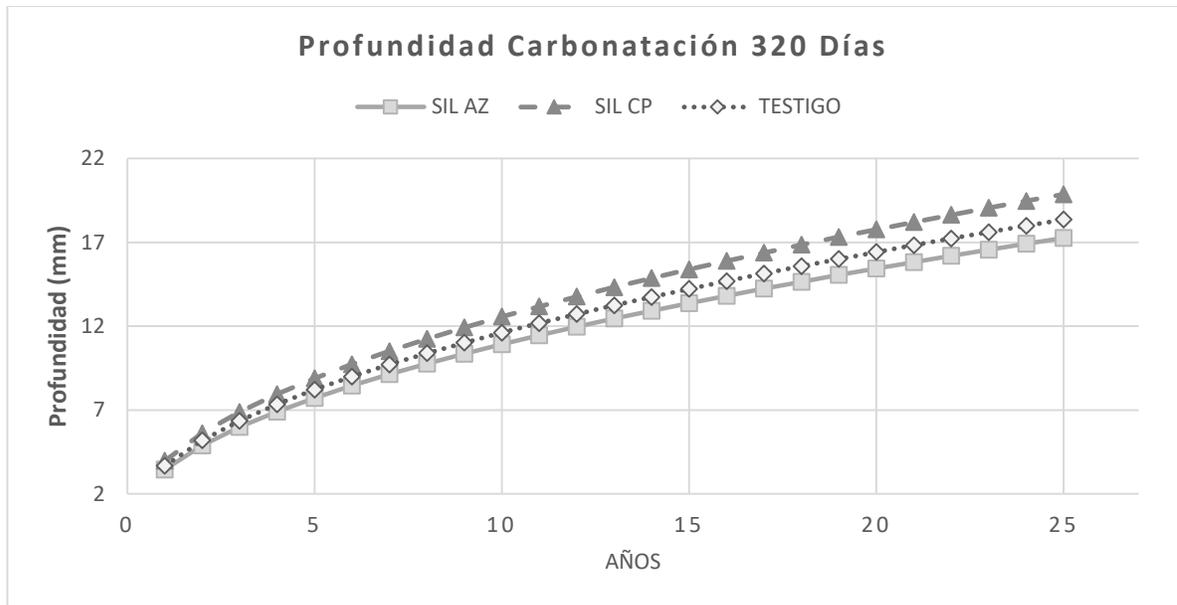


Ilustración 95 Resultados, carbonatación 320 días.

6.3.3.4 Ataque por acción de sulfatos

De acuerdo a los gráficos de ambas edades, el ciclo cero no presenta pérdida ni ganancia de masa, ya que durante este ciclo aún no se han expuesto las muestras a sulfato. A los 90 días se puede observar que existe una pérdida de masa, pero a partir del ciclo 2 las sales comienzan a solidificarse dentro de la matriz provocando que ocurra ganancia de masa en las sustituciones y pérdida de la misma para la muestra control (Ilustración 96). A la edad de 180 días las muestras presentan pérdida de masa, la cual a través de los ciclos aumenta (Ilustración 97).

La norma establece que la pérdida permisible de masa es del 5%, por lo cual se observa que a ambas edades las sustituciones presentan un buen comportamiento.

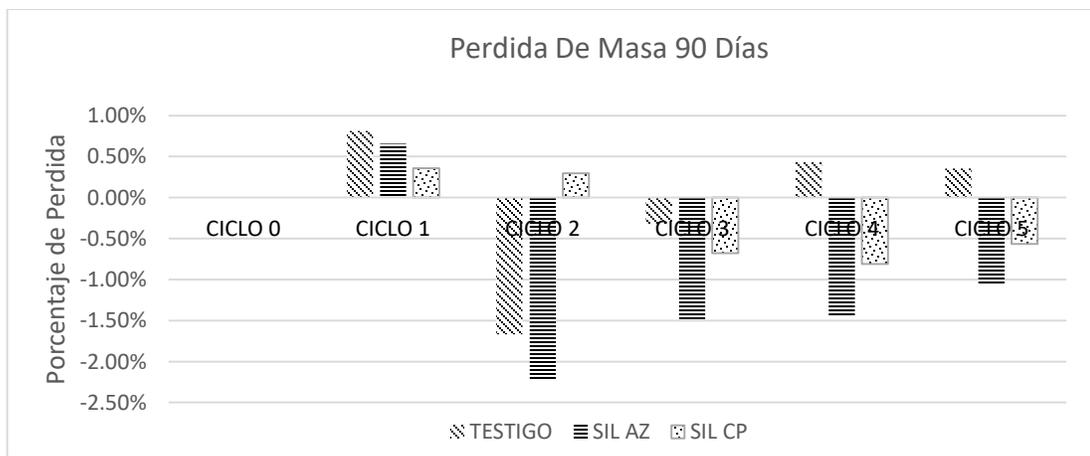


Ilustración 96 Resultados de pérdida de masa a 90 días.

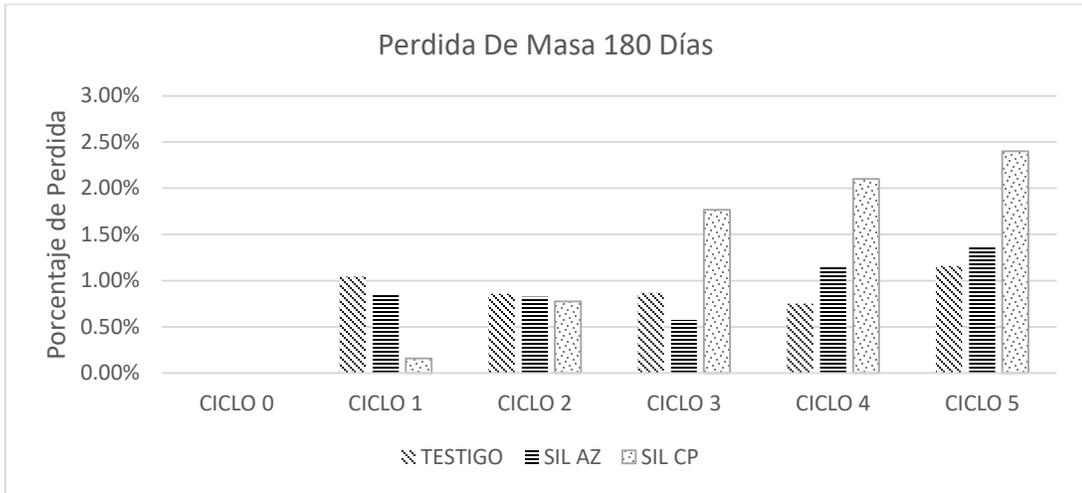


Ilustración 97 Resultados de pérdida de masa a 180 días.

7. CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos, para una sustitución del 5% de sílice, las dos mezclas de mortero con sustitución presentan los siguientes comportamientos:

La sustitución base CP por sílice (5%) proveniente de la planta geotérmica Los Azufres, en la elaboración de morteros realizados para esta investigación, registra un comportamiento uniforme ante pruebas de evaluación mecánica y durabilidad. Comprueba ser un reemplazo que disminuye la cantidad de CP en las mezclas densificando la matriz y proporcionando un comportamiento mecánico superior (flexión, tensión directa e indirecta). Además de que presenta mejor desempeño ante ensayos por durabilidad que los morteros convencionales a base de CP.

La sílice proveniente de Cerro Prieto, no presenta valores presumiblemente favorables a compresión y flexión, sin embargo mejora la calidad del mortero y aumenta la resistencia a la tensión directa.

De acuerdo a los resultados obtenidos con la sílice proveniente de la planta geotérmica de Los Azufres se estima que el porcentaje utilizado comprueba ser óptimo al mostrar un mejor desempeño mecánico y mejorar también sus características de durabilidad respecto a un mortero convencional.

Al elegir trabajar con un material puzolánica como la sílice proveniente de incrustaciones en las plantas geotérmicas, no sólo ayudamos a solucionar uno de los mayores problemas de esta industria, sino que a su vez también le estamos dando uso a un material proveniente de un proceso geotérmico. Por lo tanto, estamos colaborando con el medio ambiente en dos formas: reutilizando un geomaterial (del cual Michoacán y por supuesto México son una fuente potencial generadora de este subproducto) y disminuyendo la cantidad del uso de cemento portland en la construcción y por consecuencia las emisiones de CO₂ al ambiente.

8. RECOMENDACIONES

El porcentaje de sílice geotérmica utilizado como reemplazo de CP fue del 5%. Este porcentaje se determinó en base a la norma ASTM (C1240-15) donde se especifica que la sustitución máxima de humo de sílice sobre el peso del cementante es de máximo 10%. Cabe aclarar que la sílice utilizada no es humo de sílice, pero en referencia a esta norma se decidió utilizar 5% como porcentaje óptimo. Sin embargo se recomienda realizar sustituciones con diferentes porcentajes para analizar el desempeño mecánico y las propiedades de durabilidad que el mortero tendrá.

Ambas sustituciones presentan mejores resultados a partir de 180 días dado que las puzolanas comienzan a reaccionar. La velocidad de pulso ultrasónico y la resistividad eléctrica mejoran al pasar el tiempo, por lo cual se estima que al pasar los días las mezclas presentaran mejores resultados de durabilidad. Por lo anterior se sugiere continuar realizando pruebas a edades tardías.

En 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.
- Aguirre, A. R., & Mejía de Gutiérrez, R. (2013). Durability of reinforced concrete exposed to aggressive conditions. *Materiales de construcción*, 7-38.
- ALVAREZ PITA, J. D. (2016). *EVALUACIÓN DE LA DURABILIDAD DE MORTEROS CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CENIZA DE ELABORACIÓN DE LADRILLO*. Morelia: UMSNH.
- Antigua, E. (2016, Septiembre 02). *Enciclopedia Antigua*. Retrieved from <http://enciclopedia.escolar.com/EnciclopediaAntigua/clases-y-tipos-de-almidon/>
- 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-128. (2004). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. E.E.U.
- ASTM-C-142. (1997). *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates*.
- 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-C-187-04. (2004). *Standard Test Method for Normal Consistency of Hydraulic Cement*.
- ASTM-C-266. (2015). *Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles*.
- ASTM-C270. (2014). *Standard Specification For Mortar for Unit Masonry*. ASTM International, 9-10.
- ASTM-C-311. (2002). *Standard Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use in Portland-Cement Concrete*. Unit States: ASTM .
- ASTM-C-348. (1997). *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic - Cement Mortars*. EE.UU.
- ASTM-C-40. (2004). *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*.
- 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-C-70. (2003). *Standard Test Method for Surface Moisture in Fine Aggregate*.
- ASTM-G57. (2012). *Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four Electrode Method*. EE.UU.
- Báez Ángel, V. M. (2017). *ADICIÓN DE GEOMATERIALES PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO FÍSICO-MECÁNICO EN CERÁMICOS BASE C. PORTLAND*. Morelia: UMSNH.
- Bertani R . World geothermal power generation 2001-2005, G. B. (n.d.).
- BS-4027:1980. (2000). *Especificación de Cemento Resistente a los Sulfatos*. Inglaterra: British Standards Institution.
- C1240-15, A. (n.d.). *Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures*.
- C618-15, A. (n.d.). *Especificación normalizada para Ceniza Volante de Carbón y Puzolana Natural en Crudo o Calcinada para Uso en Concreto*.
- CANACEM. (2016). *CEMENTO: PRODUCCIÓN Y CONSUMO*. México: Camara Nacional Del Cemento.
- 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 Inovación en Energía Geotérmica, C. (2018). *Geotermia en México*. México: CeMIEGeo.
- CFE, C. (n.d.). Retrieved 2017
- Charles, J. H. (2001). *Handbook of Nondestructive Evaluation*. Estados Unidos: McGrae-Hill.
- Christianson, S.A. de C.V. (2014). *Crisota R-5*. México: Boletín Técnico.
- Correa, R. S. (1984). *Diseño de Mezclas de Mortero*. Colombia Bogotá: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- del Valle Moreno, A. d., Guzmán Torres, J. A., Alonso Guzmán, E. M., Martínez Molina, W., Torres Acosta, A. A., Terán Guillén, J., . . . Martínez Madrid, M. (2015). *Solicitaciones mecánicas y estáticas a concreto hidráulico simple elaborado con agregados pétreos redondeados y adiciones con fibras deshidratadas de cactus opuntia*. Querétaro.
- Gouygou, M., Lafhaj, Z., & Soltani, F. (2009). Assesment of porosity of mortar using ultrasonic Rayleigh waves. *NDT&E International*.
- 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.
- Jacobo, S. J. (2014). *Tesis de Licenciatura: Evaluación físico-mecánica de concreto hidráulico elaborado con pétreos andesíticos, adicionando metacaolín, nanosílice y almidón*. Morelia.
- Karen Jennifer Beltrán Taípe, 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.
- Mejía, M. (2015). *Vertigo Político*. Retrieved 2017
- 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.
- Navarro Sánchez, L. M., Martínez Molina, W., & Espinoza Mandujano, J. A. (2011). *Análisis de Materiales*. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Facultad de Ingeniería Civil.
- N-CMT-2-01-004-02. (2002). *CMT. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES - MATERIALES PARA ESTRUCTURAS - MATERIALES PARA MAMPOSTERIAS - MORTEROS*. México: IMT.
- N-CMT-2-02-002-02. (2002). *CMT. CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES - MATERIALES PARA ESTRUCTURAS - MATERIALES PARA CONCRETO HIDRÁULICO - CALIDAD DE AGREGADOS PÉTREOS PARA CONCRETO HIDRAULICO*. 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-ONCCE. (2015). *Industria de la Construcción-Cementantes Hidráulicos-Determinación de la Consistencia Normal*. 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. (2014). *Industria de la Construcción. Agregados. Masa Volumétrica. Método de prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.
- 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-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-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-165-ONNCCE. (2014). *Industria de la Construcción - Agregados - Determinación de la Masa Específica y Absorción de Agua del Agregado Fino - Método de Prueba*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificació de la Construcción y Edificación, S.C.
- 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*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C.

- 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-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.
- RED DURAR . (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>
- Santillán Barragán, I. S. (2017). *ADICIÓN DE GEOMATERIALES PARA INCREMENTAR EL DESEMPEÑO MECÁNICO EN CERÁMICOS BASE PORTLAND*. Morelia: UMSNH.
- VACA ARCIGA, L. A. (2017). *COMPÓSITOS CON MATRICES CERÁMICAS BASE CEMENTO PORTLAND CON GEOMATERIALES SUBSTITUIDOS POR RESIDUOS ORGÁNICOS*. 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.
- VELÁZQUEZ, L. C. (2016). *MATRICES CEMENTICIAS DENSIFICADAS CON ADICIONES ORGÁNICAS PARA PAVIMENTOS SEMI-RÍGIDOS EN TLALPUJAHUA, MÉXICO*. Morelia: UMSNH.

