



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

Fachadas Arquitectónicas Hidrofílicas.

Mortero con agregados minerales (zeolita, diatomita y perlita) para
Aislamiento Térmico

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
DOCTORA EN ARQUITECTURA

PRESENTA:

Eunise Sarai Flores Lozano (Mtra. en Arq.)

TUTORA PRINCIPAL

Dra. Isabel Rocío López de Juambelz

Facultad de Arquitectura

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

Dr. Daniel Velázquez Vázquez

Facultad de Estudios Superiores Aragón

Dr. Juan Hernández Ávila

Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo

Ciudad de México, noviembre 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN ARQUITECTURA

Fachadas Arquitectónicas Hidrofilicas.

Mortero con agregados minerales (zeolita, diatomita y perlita) para
Aislamiento Térmico

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
DOCTORA EN ARQUITECTURA

PRESENTA:

Eunise Sarai Flores Lozano (Mtra. en Arq.)

TUTORA PRINCIPAL

Dra. Isabel Rocío López de Juambelz

Facultad de Arquitectura

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:

Dr. Daniel Velázquez Vázquez

Dr. Juan Hernández Ávila

Dra. Gemma Luz Sylvia Verduzco Chirino

Dr. Emiliano Moreno Pérez

Ciudad de México, noviembre 2021

*Dedico este trabajo mis padres, hermanos, tíos y amigos,
Sin su apoyo incondicional, nada de esto habría sido posible.
Pero sobre todo se lo dedico a aquellos que ya no se encuentran presentes,
pero que siempre estarán en mi corazón.*

*Mamá, te agradezco todos los consejos que me das. Eres mi ejemplo de mujer fuerte.
Papá, gracias a ti conocí una profesión tan bonita. Nunca olvidare lo que me has enseñado.
Francisco, gracias por tu amor incondicional y tu paciencia.
Sergio, gracias por siempre escucharme y más aún, porque siempre parece saber que decir.
Ana Karen, gracias por toda la alegría que siempre me das cuando estamos juntas.
Josué, eres mi otro hermano. Gracias por nunca abandonarme.
Rebeca... gracias por tu amistad sincera y espero que sepas que nunca te libraras de mí.
Grecia y Jill, gracias por ser mis amigas incondicionales. No se imaginan cuanto las amo.
Tío, tía, aún a la distancia, ustedes siempre están en mi corazón y en mi mente.
Mis querido sobrinos, ojalá que esto les demuestre que no hay imposibles.*

Dra. Rocío, le agradezco mucho que me aceptara como su alumna. Nunca podré terminar de agradecerle por todo lo que he aprendido a su lado.

Dr. Daniel, gracias por su apoyo constante.

Dr. Juan, gracias por todas sus enseñanzas. Es todo un ejemplo a seguir.

Dr. Emiliano, muchas gracias por toda la ayuda que me brindo para desarrollar este trabajo.

Dra. Gemma, le agradezco sinceramente su apoyo.

Geólogo Juan, mil gracias por su paciencia al enseñarme cosas que jamás imagine.

Agradezco también

A la Universidad Nacional Autónoma de México por recibirme con los brazos abiertos.

Al laboratorio de conservación del patrimonio natural y cultural de la UNAM, así como a todos sus miembros, fue fantástico trabajar con todos ustedes.

A la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, por el todo el apoyo académico recibido.

Al CONACYT, porque sin su patrocinio, nada de esto habría sido posible.

ÍNDICE

Introducción	I
Justificación	II
Planteamiento del problema	V
Preguntas de Investigación	VII
Hipótesis principal	VIII
Objetivos	IX
Resumen	X
Capítulo I	1
El Efecto Isla de Calor: un problema creciente en las grandes ciudades del mundo	1
1.1 Definición del fenómeno de isla de calor urbana (UHI)	1
1.1.1. Causas del Fenómeno de Isla de Calor.....	3
1.1.2. Consecuencias de la Isla Urbana de Calor	5
1.1.3. Estrategias para disminuir el efecto de la Isla de Calor Urbana	6
1.2. El fenómeno de Isla de Calor Urbana en la Ciudad de México	7
1.2.1. Los materiales más empleados dentro de las construcciones de la urbe	8
Capítulo II	10
Estado del arte en las pastas cementantes	10
2.1. Usos y características	10
2.2. El comportamiento térmico de las pastas cementantes	11
2.3. Casos análogos de modificación de pastas cementantes alrededor del mundo	14
2.3.1. Mezcla de cal y cemento con características térmicas y acústicas mejoradas	14
2.3.2. Pasta auto regeneradora – en prueba	15
2.3.3. Pasta fosforescente – en prueba.....	16
2.4. Propuesta del proyecto	17
Capítulo III	18
Primera parte experimental	18
3.1. Diseño del experimento	18
3.1.1. Proporción de la mezcla control	18
3.1.2. Materiales	19
3.1.2.1 Arena	19
3.1.2.2 Cementante	20
3.1.2.3. Agua	21
3.1.2.4. Fibra de vidrio (refuerzo).....	21
3.1.3. Experimentos previos y caracterización de los materiales de la mezcla control	22
3.1.4. Establecimiento de la resistencia a compresión esperada	22

3.2. Diseño del experimento con la adición de puzolanas naturales	23
3.2.1. Constantes	24
3.2.2. Variables independientes.....	24
3.2.2.1. Selección de puzolanas naturales para el experimento	24
3.2.2.1.1.- Diatomita.....	27
3.2.2.1.2.- Perlita	31
3.2.2.1.3.- Zeolita: clinoptilolita	35
3.2.2.1. Porcentaje de sustitución del volumen del agregado fino por puzolana natural	45
3.2.3. Variables dependientes.....	45
3.3. Diseño de las unidades experimentales y del experimento	46
Capítulo IV.....	48
Segunda parte experimental.....	48
4.1. Experimentos previos para mezcla control	48
4.1.1. Cementante	48
4.1.2. Fibra de vidrio	48
4.1.3. Aserrín	49
4.2. Caracterización de las puzolanas naturales utilizadas en las unidades experimentales.....	50
4.2.1. Color.....	50
4.2.2. Granulometría.....	50
4.2.3. Microscopio Estereoscópico	51
4.2.4. pH	51
4.2.5. Fluorescencia de Rayos X	51
4.2.6. Porcentaje de porosidad	51
4.2.7. Porcentaje de humedad.....	52
4.3. Pruebas del experimento.....	53
4.3.1. Prueba de plato caliente aislada	53
4.3.2. Ensayo de compresión	54
4.4. Interpretación de los resultados	57
4.5. Caracterización de la mezcla de mortero seleccionada	58
4.5.1. El comportamiento del material con respecto a la humedad.....	58
Capítulo V	62
Resultados: análisis y discusión.....	62
5.1. Resultados para materiales de la mezcla control.....	62
5.1.1. Cementante	62
5.1.2. Agregado fino.....	62
5.1.3. Fibra de vidrio	63
5.1.4. Aserrín	63

5.2. Caracterización de las puzolanas naturales usadas en las unidades experimentales.....	65
5.2.1. Color.....	65
5.2.2 Granulometría.....	65
5.2.3. Microscopio Estereoscópico	66
5.2.4. pH	67
5.2.5. Fluorescencia de Rayos X	67
5.2.6. Porcentaje de porosidad	68
5.3. Resultados de las pruebas a las probetas puzolánicas	68
5.3.1. Prueba de placa caliente aislada	68
5.3.2. Ensayo de compresión	70
5.4. Selección de la mezcla e impacto de los resultados en el uso del material	73
5.5. Caracterización de la mezcla con mejor rendimiento	74
5.5.1. Comportamiento en fraguado y peso final.....	75
5.5.2. Pruebas de absorción de humedad.....	76
5.5.3. Intemperismo	77
5.5.4. Evaluación de la humedad interna	83
5.6. Discusión y análisis de resultados.....	85
Conclusiones y recomendaciones	92
Anexos:	94
Glosario:.....	120
Bibliografía:	124

Índice de Figuras

Figura 1.- Gasto anual por aires acondicionados a nivel nacional. Imagen elaborada con base en la información de la Comisión Federal de Electricidad y la Secretaría de Energía (SENER).....	II
Figura 2.- Esquema del experimento factorial aplicado en este trabajo. Imagen de realización propia. ..	IV
Figura 3.- Diferencias Térmicas que muestran el comportamiento de la isla urbana. Imagen obtenida con fines didácticos de la página www.epa.gov/heat-islands	1
Figura 4.- Representación esquemática de los componentes principales de la atmósfera urbana. Imagen obtenida con fines didácticos de la página: castorluxerias.blogspot.mx	2
Figura 5.- Isotermas dentro de un ambiente urbano. Imagen obtenida con fines didácticos de la Tesis de la Lic. en Ciencias de la tierra Pérez Miguel Mariana.....	3
Figura 6.- Generación del efecto invernadero. Imagen obtenida con fines didácticos de la página www.temasambientales.com	4
Figura 7.- Distribución de la radiación solar en zonas rurales y dentro de un “cañón urbano”. Imagen obtenida con fines didácticos de la página http://cimss.ssec.wisc.edu/climatechange/Espanol	5
Figura 8.- Porcentaje de hogares por tipo de materiales de construcción de la vivienda que habitan según tamaño de localidad. Figura obtenida con fines didácticos de la información proporcionada por el INEGI en el 2016 dentro de su informe “Encuesta Nacional de los Hogares (ENH) 2015”.	9
Figura 9.- Esquema de transmisión de calor al interior de una construcción. Figura obtenida con fines didácticos de la página http://www.euskadi.eus/web	14
Figura 10.- Fotografía del concreto que se auto repara. Imagen obtenida con fines didácticos de la página http://cnnespanol.cnn.com	16
Figura 11.- Primer edificio elaborado utilizando el concreto auto reparador. Imagen obtenida con fines didácticos de la página http://elcomercio.pe/tecnologia/inventos/	16
Figura 12.- Imagen de un camino elaborado con el concreto fosforescente. Imagen obtenida con fines didácticos de la página http://www.excelsior.com.mx/nacional/2016/05/15/1092726	16
Figura 13.- Ficha técnica del cemento Blanco de Cemex CPO-30 B. Figura tomada con fines didácticos de la página de oficial de la empresa Cemex.com	20
Figura 14.- Ficha técnica del cemento Portland de Cemex CPO-30 RS. Figura tomada con fines didácticos de la página de oficial de la empresa Cemex.com	20
Figura 15.- Curva de Abraham donde se muestra la relación de la resistencia a compresión de un concreto con respecto a la relación agua – cemento. Imagen extraída con fines educativos de la página bestsupportunderground.com	23
Figura 16.- Fotografía de algas diatomeas. Imagen tomada con fines educativos de la página www.Cienciatoday.com	29
Figura 17.- Origen de los yacimientos de perlita. Imagen obtenida con fines didácticos del estudio de Mercado, bloque no. 3 del Fideicomiso de Fomento minero.	31
Figura 18.- Estratigrafía de un depósito de perlita. Imagen obtenida con fines didácticos del estudio de Mercado, bloque no. 3 del Fideicomiso de Fomento minero.	32
Figura 19.- Uso de la perlita como aislamiento térmico. Diagrama tomado con fines didácticos del estudio de Mercado, bloque no. 3 del Fideicomiso de Fomento minero.....	34
Figura 20.- Unidad Estructural tetraédrica integrada por un átomo de silicio en el centro y cuatro de oxígeno que constituyen el “ion orto silicato”. Imagen obtenida con fines didácticos del libro “zeolita, una piedra que hierve” de los autores Bosh, P. y Schifter I.	36
Figura 21 .- Ejemplo del proceso de formación de la estructura de una zeolita. Imagen obtenida con fines didácticos de la tesis doctoral de José María Gómez Martín titulada: “síntesis, caracterización y aplicaciones catalíticas de zeolitas básicas” de la pág. 19.....	37
Figura 22.- Grafica de la cantidad de yacimientos localizados por el tipo de zeolita a nivel nacional. Figura de elaboración propia.	38
Figura 23.- Formación de zeolitas en la naturaleza. Imagen obtenida con fines educativos del libro “zeolita, una piedra que hierve” de los autores: Bosch P. y Schifter I.....	38

Figura 24.- Fotografía de Langmuir. Imagen obtenida con fines didácticos de la página de la facultad de química, UNAM.....	41
Figura 25.- Estructura de la clinoptilolita. Imagen obtenida con fines didácticos del artículo llamado “Caracterización de la clinoptilolita natural y la modificada con Ca” (Montes Luna, y otros, 2015).	41
Figura 26.- Fotografía de la fachada de la catedral de la Ciudad de Oaxaca. Imagen obtenida con fines didácticos del trabajo “zeolita-una roca útil” de Vitali Pretranovskii y Miguel Ángel Hernández	43
Figura 27.- Esquema del experimento factorial aplicado en este trabajo. Imagen de realización propia. 47	47
Figura 28.- Diseño de la primera etapa de experimentación. Esquema de elaboración propia.	47
Figura 29.- Muestras elaboradas para la comparación del tiempo de vida de los dos tipos de cemento. Fotografías de elaboración propia.	49
Figura 30.- Representación del funcionamiento del aparato de placa caliente. Figura extraída con fines educativos de la página www.thermal-engineering.org	54
Figura 31.- Aparato con el que se realizó la prueba de placa caliente aislada en el instituto de materiales de la UNAM. Fotografía de realización propia.....	54
Figura 32.- Elaboración del ensayo de compresión de cilindros de concreto en el laboratorio 4 de FES Aragón. Fotografía de elaboración propia.	56
Figura 33.- Muestras descansando en el desecador durante el procedimiento para alcanzar su peso constante. Fotografía de elaboración propia.....	59
Figura 34.- Prueba de absorción máxima inicial. Fotografía de elaboración propia.	59
Figura 35.- Preparación de las muestras para prueba de absorción total a 24 horas. Fotografía de elaboración propia.	60
Figura 36.- Exposición de las piezas a la intemperie para determinar su humedad interna. Fotografía de elaboración propia.	60
Figura 37.- Cámara de intemperismo UV, modelo LU-0819 QUV/Spray en la que se realizó la prueba. Fotografía de elaboración propia.	62
Figura 38.- Gráfico comparativo entre la conducción térmica y la resistencia a la compresión de las muestras de concreto con aserrín. Gráfico de elaboración propia.	64
Figura 39.- Fotografías de diatomita tomadas con el microscopio estereoscópico con una lente de 4X. Imágenes de elaboración propia.	66
Figura 40.- Fotografías de perlita tomadas con el microscopio estereoscópico con una lente de 4X. Imágenes de elaboración propia.	66
Figura 41.- Fotografías de perlita tomadas con el microscopio estereoscópico con una lente de 4X. Imágenes de elaboración propia.	66
Figura 42.- Gráficos de comparativa de los resultados de la prueba de placa caliente aislada de las seis muestras de mortero estudiadas con respecto a la mezcla control. La primera grafica es del tipo de barras para Figuras de elaboración propia.....	69
Figura 43.- Comparativa de los resultados de las muestras estudiadas en el ensayo de compresión a 7, 14 y 28 días. Figura de elaboración propia.	71
Figura 44.- Comparativa de la resistencia a compresión a 28 días de los morteros estudiados. Figura de elaboración propia.	72
Figura 45.- Comparativa entre los pesos diarios de las muestras de 10 x 10 x 2 cm de la mezcla control y la MZ50. Figura de elaboración propia.....	75
Figura 46.- Fotografías de comparación del desgaste de las muestras de ambas mezclas. Figura de elaboración propia.	83
Figura 47.- Promedio del comportamiento de la humedad interna de las muestras de las mezclas comparadas al primer mes de edad. Figura de elaboración propia.....	84
Figura 48.- Grafica que muestra el cálculo del coeficiente de determinación lineal al primer mes de edad de las muestras estudiadas. Figura de elaboración propia.	84
Figura 49.- Promedio del comportamiento de la humedad interna de las muestras de las mezclas comparadas al cuarto mes de edad. Figura de elaboración propia.....	85

Figura 50.- Grafica que muestra el cálculo del coeficiente de determinación lineal al cuarto mes de edad de las muestras estudiadas. Figura de elaboración propia.	85
Figura 51.- Esquema del funcionamiento general del mortero Z50. Figura de elaboración propia.	91
Figura 52.- Imagen del Yacimiento de Zeolita en Santiago de Anaya, visto desde la carretera. Fotografía de elaboración propia.	94
Figura 53.- Imágenes de la ubicación y a detalle de los lugares de donde se tomó el primer muestreo. Fotografías de elaboración propia.	95
Figura 54.- Imágenes de la ubicación y a detalle de los lugares de donde se tomó el segundo en el yacimiento de Santiago de Anaya. Fotografías de realización propia.	96
Figura 55.- Proceso de tamizado y pesado de las muestras. Fotografía de elaboración propia.....	97
Figura 56.- Proceso de molido de muestras. Fotografía de elaboración propia.	98
Figura 57.- Proceso para la prueba de fluorescencia de Rayos X. Fotografías de elaboración propia.....	98
Figura 58.- Proceso de preparación de muestra para la prueba del microscopio de barrido. Fotografías de elaboración propia.	99
Figura 59.- Proceso de utilización del microscopio de barrido, ejecutado por un técnico especialista. Fotografías de elaboración propia.	99
Figura 60.- Difractogramas de la zeolita utilizada en el trabajo, la cual fue calcinada a diferentes temperaturas. S/C=sin calcinar, I=Ilita, Z=zeolita, S=Sanidina, C=Cristobalita y Q=Cuarzo. Imagen de tomada con fines educativos del artículo “Determinación de la estabilidad térmica de zeolitas procedentes de los estados de Guerrero y Veracruz”	103

Índice de Tablas

Tabla 1.- Tipos de mortero. Tabla tomada con fines didácticos del libro CMT características de los materiales, parte 2, capítulo 4 de la Secretaría de Caminos y Transporte.	11
Tabla 2.- Capacidades térmicas del concreto y sus componentes. Desarrollada con fines didácticos en base a la información proporcionada por la página web: www.miliarium.com	13
Tabla 3.- Principales proporciones de mortero empleadas comercialmente y sus usos. Tabla extraída con fines didácticos de elconstructorcivil.com	19
Tabla 4.- Composición y resistencia del mortero con proporción cemento- arena 1:3 de acuerdo con la norma NMX-C-486-ONNCCE-2014, N-CMT-2-01-004/02 de la SCT, la ASTM C-270 y ASTM C-780. Tabla de elaboración propia.	19
Tabla 5.- Tipos, características y usos de los diferentes tipos de fibra de vidrio. Tabla elaborada con base en la información del Máster en Ciencia y Tecnología de los materiales de Villamudria Rivera Sandra.	22
Tabla 6.- Coeficientes de conductividad térmica de materiales constructivos y puzolanas naturales. Información tomada con fines didácticos del trabajo fin de Master para Arquitecta técnica de la Lic. Lorrio Domene, Laura, 2011	27
Tabla 7.- Usos de la diatomita a nivel mundial. Tabla tomada con fines educativos de la tesis de licenciatura que para ingeniero Minero Metalúrgico de Borgel Espinoza Iván.....	28
Tabla 8.- Composición química de la diatomita natural, calcinada y calcinada con fundente del lugar analizado. Tabla tomada con fines educativos de la tesis de licenciatura que para ingeniero Minero Metalúrgico de Borgel Espinoza Iván.	30
Tabla 9.- Tamaño promedio de poro en cada una de las presentaciones de la diatomita del lugar estudiado. Tabla tomada con fines educativos de la tesis de licenciatura que para ingeniero Minero Metalúrgico de Borgel Espinoza Iván.	30
Tabla 10.- Usos industriales propuestos para la diatomita del ejido de Loma Larga, Hidalgo. Tabla tomada con fines educativos de la tesis de licenciatura que para ingeniero Minero Metalúrgico de Borgel Espinoza Iván.	30
Tabla 11.-Composición química de la perlita de “El banco” de San Agustín Metzquititlan, en el estado de Hidalgo. Tabla tomada con fines didácticos del reporte de resultados de las pruebas de inflado y densidad de mineral de perlita, realizada para la empresa “Pastas cerámicas especializadas S.P.R.” por la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo.....	34
Tabla 12.- Diferencia de densidad entre la perlita cruda y la expandida. Tabla tomada con fines didácticos del reporte de resultados de las pruebas de inflado y densidad de mineral de perlita, realizada para la empresa “Pastas cerámicas especializadas S.P.R.” por la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo...	35
Tabla 13.-Porcentaje de perlita expandida retenida en diferentes tamaños de mallas. Tabla tomada con fines didácticos del reporte de resultados de las pruebas de inflado y densidad de mineral de perlita, realizada para la empresa “Pastas cerámicas especializadas S.P.R.” por la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo.	35
Tabla 14.-Tabla de resultados obtenidos de la perlita expandida con respecto a la “cruda” u original del material obtenido de “El banco” de San Agustín Metzquititlan, en el estado de Hidalgo. Tabla tomada con fines didácticos del reporte de resultados de las pruebas de inflado y densidad de mineral de perlita, realizada para la empresa “Pastas cerámicas especializadas S.P.R.” por la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo.	35
Tabla 15.- Productos típicos de reemplazo por alteración hidrotermal. Figura obtenida con fines didácticos del documento titulado “alteración” y publicado por la universidad de chile, pág.3.....	39
Tabla 16.- Tabla de clasificación de tamaños de poro de zeolitas naturales mexicanas. Tabla de elaboración propia.	42
Tabla 17.- Tabla de composición de muestras prueba para cámara de intemperismo UV. Tabla de elaboración propia.	48
Tabla 18.- Composición de las mezclas con aserrín. Tabla de elaboración propia.	50

Tabla 19.- Diámetro de la varilla y número de penetraciones empleados para moldear especímenes de prueba. Tabla extraída con fines educativos del documento elaborado por el IMCYC titulado “el concreto en la obra: problemas, causas y soluciones” en la pág. 71	55
Tabla 20.- Resistencias esperadas y usos para los morteros con proporción cemento-arena 1:3. Tabla de elaborada con base en la información de las normas: NMX-C-486-ONNCCE-2014, N-CMT-2-01-004/02, ASTM C-270 y ASTM C-780.....	57
Tabla 21.- Resultados de la caracterización con tamices de la arena de rio usada en la mezcla control. Tabla de elaboración propia.	63
Tabla 22.- Tabla de resultados obtenidos en las muestras con variaron del porcentaje de fibra de vidrio. Tabla de elaboración propia.	63
Tabla 23.- Resultados obtenidos de las muestras elaboradas con agregado de aserrín. Tabla de elaboración propia.	64
Tabla 24.- Códigos de color de las puzolanas naturales utilizadas. Tabla de elaboración propia.	65
Tabla 25.- Resultados de curva granulométrica de los agregados minerales a emplear. Tabla de elaboración propia.	65
Tabla 26.- pH de los agregados minerales a utilizar en las muestras. Tabla de elaboración propia.	67
Tabla 27.- Tabla de composición química de los agregados minerales examinados. Tabla de elaboración propia.....	67
Tabla 28.- Porcentaje de porosidad en los agregados minerales analizados. Tabla de elaboración propia.	68
Tabla 29.- Porcentaje de humedad de los agregados minerales a emplear. Tabla de elaboración propia.	68
Tabla 30.- Resultados obtenidos de la prueba de plato frio y porcentaje de disminución del coeficiente de conducción térmica. Tabla de elaboración propia.	68
Tabla 31.- Resultados de los ensayos de compresión de los especímenes hechos para las seis mezclas analizadas, a diferentes tiempos. Tabla de realización propia.....	70
Tabla 32.- Resultados de los ensayos de compresión de los especímenes hechos para las seis mezclas estudiadas, a 28 días. Tabla de realización propia.....	72
Tabla 33.- Calculo de Resistencia Térmica (R) a distintos espesores de los morteros estudiados. Tabla de realización propia.	74
Tabla 34.- Diferencia de pesos de las muestras una vez que se secaron. Tabla de realización propia.	76
Tabla 35.- Resultados de la prueba de absorción máxima inicial. Tabla de realización propia.	82
Tabla 36.- Resultados de la prueba de absorción total a 24 horas. Tabla de realización propia.	82
Tabla 37.- Clave y ubicación de las muestras para la caracterización del banco de Santiago de Anaya. Tabla de elaboración propia.	96
Tabla 38.- Composiciones Químicas de zeolitas, utilizadas como base para la comparativa de los resultados de las muestras. Tablas obtenidas con fines educativos del Trabajo Fin de Máster para Arquitectura Técnica de la Lic. Lorrio Domene, Laura y de la tesis de Maestría en Ciencias de los Materiales del M. García Ramírez Marcelino	100
Tabla 39.- Resultados del tipo de suelo obtenido por el tamizado. Tabla de elaboración propia.	100
Tabla 40.- Resumen de los resultados obtenidos de la comparación de la caracterización de las muestras tomadas del yacimiento de Santiago de Anaya, con respecto a las composiciones de zeolitas tomadas como base para el análisis. Tabla de elaboración propia.....	101
Tabla 41.- Resultados de la caracterización de las muestras por Fluorescencia de Rayos X. Tabla de elaboración propia.	102

Introducción

En la actualidad, debido a su tamaño, las ciudades se han convertido en sistemas complejos en los cuales, sus problemáticas tienen su origen en toda clase de factores, sobre todo en aquellos que la población suele considerar como insignificantes.

Por ello, los profesionales de la Arquitectura, ya no pueden seguir insistiendo en tratar de resolver los problemas de las edificaciones como si se trataran de elementos aislados en el espacio, si no que deben asumir que forman parte del sistema artificial que creamos para ellos: La ciudad. Por tanto, los problemas de la urbe, repercuten en todas las construcciones y los problemas de cada construcción, repercuten en la urbe.

Solo si se entiende esto, se comenzarán a generar verdaderas soluciones que, a largo plazo, puedan disminuir los problemas actuales de la metrópoli.

Por esto, a futuro también se deben tratar de generar nuevos proyectos, materiales e investigaciones enfocadas a disminuir el impacto ecológico generado por las ciudades; Una opción de lograrlo, es buscar métodos para recrear dentro de las metrópolis, aquellos procesos naturales que son interrumpidos por su presencia y funcionamiento.

Es por ello, que en este trabajo se buscó desarrollar un mortero hidrofílico, el cual se espera que, no solo sirva para mejorar el confort interno de las edificaciones en las que sea aplicado, sino que también a la larga, contribuya a la disminución del problema de isla de calor presente en las ciudades.

El desarrollo de este material, surgió como respuesta, no solo al fenómeno de isla de calor, sino también para tratar de controlar el crecimiento constante que existe de los gastos eléctricos generados por los sistemas de enfriamiento artificial en las edificaciones.

Justificación

La Agencia Internacional de Energía (AIE) indica que para el año 2050 la demanda de aires acondicionados se triplicará a nivel mundial (Mentado, 2019), debido al crecimiento de las ciudades que provocan el fenómeno de Islas de Calor que afectan el confort interno de las edificaciones. En nuestro país, en el marco del taller “Eficiencia Energética en Equipos de Aire Acondicionado”, se mencionó que los equipos de aire acondicionado ocupan el segundo lugar de consumo de electricidad, sólo por debajo de la iluminación y genera gastos eléctricos que se incrementan cada año (Figura 1), lo que repercute en daños ecológicos y económicos.

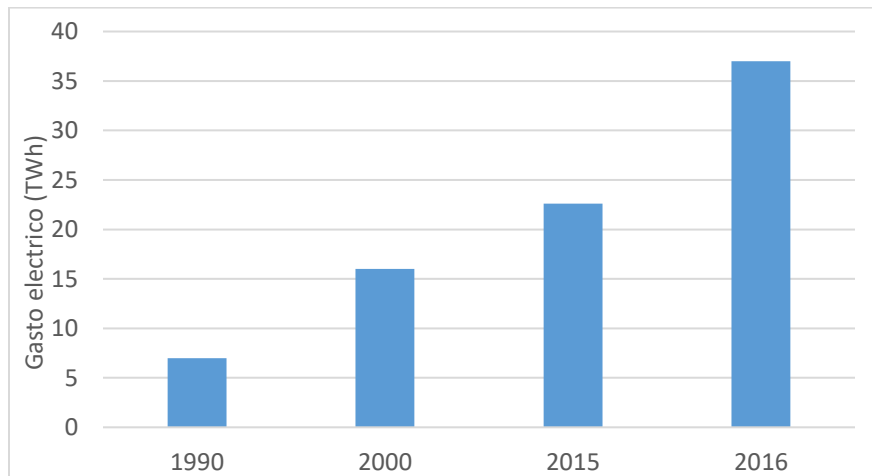


Figura 1.- Gasto anual por aires acondicionados a nivel nacional. Imagen elaborada con base en la información de la Comisión Federal de Electricidad y la Secretaría de Energía (SENER).

El incremento de energía eléctrica en las grandes ciudades se debe al gasto para mantener el confort interno de las edificaciones, sobre todo en la época cálida, que se suma al fenómeno de isla de calor (Ballinas Oseguera, 2011).

En la naturaleza, algunos de los principales factores reguladores de la temperatura son las áreas verdes, el suelo y los cuerpos de agua. Las plantas absorben la luz solar y la utilizan para generar azúcar a través de la fotosíntesis, evitando que esta energía se convierta en calor (Raffo Benegas, 2014); otro proceso de control térmico mediante la vegetación es el proceso de evapotranspiración, donde la energía es utilizada en el cambio

físico del agua, del estado líquido a vapor. El suelo, también es un elemento que participa en el control térmico, ya que es permeable, absorbe la humedad y la libera por la evaporación, donde también existe gasto de energía (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006). Por último, los cuerpos de agua, también participan en la disminución de la temperatura ya que el proceso de evaporación, utiliza la energía del ambiente enfriando el entorno (Martínez Arroyo, 2007).

Sin embargo, en las ciudades donde la presencia de áreas verdes, permeables y los cuerpos de agua, es mínima (Barrandas Miranda, 2013), se reducen todos estos procesos y son sustituidos por la reflexión, refracción y absorción de energía solar de los materiales empleados en las construcciones, tales como el concreto, mortero y vidrio; lo que desemboca en el aumento de la temperatura ambiental de las urbes (Carrasco, Palme, & Gálvez, Sky new factor and head island effect in Valparaizo, 2016).

El mortero y el concreto tienden a absorber la radiación solar y convertirla en reservas caloríficas que liberan durante las horas nocturnas¹, disminuyendo también el enfriamiento nocturno de las ciudades (Pérez Arrau & Peña, 2016); además, son malos aislantes térmicos porque tienen un elevado coeficiente de conductividad térmica y no sólo incrementan la temperatura de la ciudad, si no también permiten su paso hacia el interior de las edificaciones, por lo que se recurre al uso de aire acondicionado que genera el confort interno.

Con el aumento en el tamaño de las urbes, estos problemas se incrementan, ya que el concreto y mortero, son el material fundamental de las construcciones (INEGI, 2015).

La evaporación es un proceso que regula la temperatura, por esta razón, se propone generar un material de acabado para las fachadas arquitectónicas capaz de almacenar humedad y liberarla a través de vapor, lo que genera enfriamiento en el ambiente y

¹ Esto ocurre por equilibrio térmico, proceso por el cual las pastas cementantes durante el día tenderán a absorber y almacenar calor en busca de igualar su temperatura con el ambiente que lo rodea. Asimismo, estos materiales liberarán sus reservas caloríficas en las horas nocturnas, calentando el ambiente a su alrededor.

aislamiento térmico en las edificaciones. Las características de estas fachadas propuestas sería su comportamiento hidrofílico, término que la RAE define como material o sustancia que absorbe el agua con facilidad.

Un mortero con capacidades especiales se realiza modificando la proporción de la mezcla, integrando aditivos químicos o materiales que generen las características deseadas en el producto final (IMCYC, 2011). En este sentido, las puzolanas naturales² son materiales altamente porosos, asequibles y ecológicos, con capacidades cementantes, aislantes y capaces de retener humedad (López & Castro, 2010), (Valdez Tamez , Fajardo San Miguel, Hermosillo Mendoza, & Flores Vivian, 2008), (Stulz & Mukerji, 1993).

Se seleccionaron la diatomita, perlita y zeolita porque poseen características especiales que ayudaran en la generación del mortero hidrofílico desde tres acercamientos diferentes: la primera tiene una alta porosidad y gran capacidad para absorber líquidos (Borgel Espinoza, 2007). La perlita, aunque no absorbe mucha humedad, tiene la capacidad de retener el agua en su superficie (Martínez, y otros, 2006); por último, las zeolitas tienen la tendencia de adsorber humedad del medio ambiente y liberarla al ser calentadas (Bosch, 2003).

La proporción cemento-arena 1:3 es utilizada para generar morteros de acabados, por lo que se utiliza como base para la creación del mortero hidrofílico. El agregado puzolánico sustituye parcialmente la arena en un experimento factorial (Figura 2).



Figura 2.- Esquema del experimento factorial aplicado en este trabajo. Imagen de realización propia.

² Material de origen biológico o mineral que contienen sílice y/o aluminio. No son cementosas en sí, pero cuando son molidos finamente, la mezcla fraguará y endurecerá a temperaturas normales en presencia del cemento (Stulz & Mukerji, 1993).

Planteamiento del problema

El mortero es un material que adquiere sus capacidades físicas y estructurales con base en los materiales y proporción con los que es creado, por tanto, una opción para crear un mortero hidrofílico, es agregar a su mezcla uno o más materiales que cuenten con esta clase de características. Sin embargo, ya que se espera que el mortero no pierda sus capacidades estructurales, se debe cuidar que los materiales seleccionados para ser empleados como agregados, no demeriten la resistencia del producto final.

Existen muchos materiales que podrían ser considerados como opciones para generar un mortero hidrofílico, tales como los aditivos químicos, materiales industrializados, puzolanas o incluso materiales orgánicos. Por ello, se investigó a cada uno antes de determinar cuál se utilizaría.

La gran mayoría de los aditivos químicos y los materiales industrializados, tales como poliestireno expandido, se requieren procesos complejos para su producción, lo que conlleva la generación de fuertes impactos ambientales (Asociación Nacional de Fabricantes de Aditivos para Hormigon y Mortero, 2005). Por este motivo, se decidió no emplearlos en este trabajo.

En cuanto a los materiales orgánicos, tales como la madera y sus subproductos, por su origen natural, son difíciles de estandarizar y reproducir en masa como para ser utilizados como agregado único dentro del mortero hidrofílico que se fabricara. Sin embargo, no se descarta el emplearlos como material de apoyo dentro de la mezcla, ya que existen precedentes de esta clase de trabajos (Garces Riffo, 2004); sin embargo, sería necesario crear algunas mezclas experimentales para determinar si la presencia de estos materiales, producen las características hidrofílicas o de aislamiento térmico, que se esperan generar en el mortero que se va a producir.

Por último, las puzolanas cuentan con características hidrofílicas y aislantes innatas, además de que no requieren un tratamiento costoso antes de ser usados como materiales de construcción, lo que las convierte en materiales asequibles y económicamente rentables (Salazar J., 2018), (García Barcala, 2017). Por ello, finalmente se decidió integrarlas como el elemento principal en la fabricación del mortero hidrofílico.

Existen dos tipos de puzolanas, las artificiales y las naturales. Las primeras son generalmente subproductos creados como resultado de procesos industriales y agrícolas; siendo las más importantes la arcilla cocida, cenizas de combustible pulverizado, ceniza de cáscara de arroz y escoria de altos hornos granulada y molida (Stulz & Mukerji, 1993). Sin embargo, estos materiales no son tan fáciles de conseguir y poseen menos resistencia que las puzolanas naturales (Rahhal, et al., 2005) (López & Castro, 2010), motivo que, sumado al hecho de que en nuestro país existen numerosos yacimientos de puzolanas naturales (Centro de Investigación Regional del Pacífico Sur, 2004), causó que finalmente se decidiera utilizar a estas últimas como parte del desarrollo del mortero a generar.

Tras estudiar los diferentes tipos de puzolanas naturales, se eligió a la diatomita, perlita y zeolita para integrarlas dentro de este trabajo: la primera es de origen orgánico y es un material que se distingue por su porosidad de 75.75%, además de tener una densidad de 7.0 g/cm^3 y un tamaño de poro $1.5 \mu\text{m}$ (Borgel Espinoza, 2007). La perlita es un material de origen volcánico que adquiere capacidades aislantes al pasar por un proceso de inflado por calor. Su porosidad es del 51%, su densidad 0.4655 kg/m^3 y su tamaño de grano de 1.5 a 1.8 mm (Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 2003); por último, las zeolitas son un grupo de minerales que pertenecen a los aluminosilicatos micro porosos, con una densidad de 2.13 g/cm^3 (López Romero, y otros, 2010) y 3 tamaños de micro poro de 7.2×4.4 , 5.5×4.0 y $4.7 \times 4.1 \text{ \AA}$, respectivamente (Andrada, y otros, 2012).

Siendo, uno de los objetivos principales de este trabajo, determinar cuál de estas tres puzolanas seleccionadas le confiere mayores capacidades hidrofílicas al mortero sin demeritar su resistencia.

Preguntas de Investigación

1. **¿Cuál es la puzolana natural que confiere mayor capacidad hidrofílica al mortero?**
2. **¿Cuál es la proporción de materiales más adecuada para generar un mortero hidrofílico, sin perder la capacidad estructural?**
3. **¿Cuál es el impacto generado en el coeficiente de conducción térmica de los morteros por la integración de cada puzolana?**
4. **¿Cuáles son los efectos causados en la resistencia a compresión de los morteros por la integración de cada puzolana?**
5. **¿Qué concentración de puzolana disminuye la conducción térmica sin demérito de las capacidades estructurales del mortero?**
6. **¿Cómo se reflejan las capacidades hidrofílicas de las puzolanas seleccionadas, en el comportamiento final de los morteros creados con la integración de estos materiales en su mezcla?**

Hipótesis principal

El coeficiente de conductividad térmica es una característica de los materiales que nos indica la cantidad o flujo de calor que pasa a través de la unidad de una superficie (Lira-Cortés, González Rodríguez, & Méndez-Lango, 2008), pudiendo servir entonces como comparador para establecer el comportamiento térmico de los distintos materiales.

Si consideramos que las capacidades térmicas de la diatomita se deben a la estructura porosa que posee debido a estar conformada por esqueletos de algas diatomeas (Coordinación general de Minería, 2006) y que en la perlita sus propiedades térmicas se generan por el tratamiento de expansión por calor que recibe (Fideicomiso para el Fomento Minero, 1997), entonces en la zeolita, que es un mineral que además de poseer estructura poroso, también posee la capacidad de hidratación reversible (Bosch & Schifter, 1997), entonces, podemos suponer que un mortero creado usando a la zeolita como agregado fino en sustitución de un volumen similar de arena, tendrá un coeficiente de conductividad térmica menor a los generados utilizando de manera análoga diatomita o perlita.

Hipótesis secundarias:

- ❖ Los morteros puzolánicos, tendrán un comportamiento en el que, a mayor cantidad puzolana presente en su mezcla, menor será su coeficiente de conducción térmica (Lorrio Domene, 2011), pero también se reducirá su resistencia a la compresión (Borbón Almada, et al., 2018).
- ❖ Los morteros puzolánicos presentarán características hidrofílicas identificables medibles y similares a las que poseen los materiales con los que fueron elaborados (Andrada, y otros, 2012).

Objetivos

Objetivo general:

Generar una mezcla que reduzca la conductividad térmica del mortero cemento-arena, mediante puzolanas naturales (diatomita, perlita y zeolita), sin demerito de sus propiedades físicas y estructurales para el recubrimiento de fachadas.

Objetivos particulares:

1. Describir las características y funcionamiento de las tres puzolanas naturales de distinto origen.
2. Evaluar las características hidrofílicas de cada puzolana propuesta.
3. Relacionar las características hidrofílicas con la capacidad de reducción de conductividad térmica en un mortero.

Objetivos específicos:

1. Cuantificar las capacidades térmicas de los morteros elaborados con diferentes porcentajes de las tres puzolanas naturales.
2. Cuantificar la resistencia a la compresión de los morteros elaborados con diferentes porcentajes de las tres puzolanas naturales.
3. Comparar el comportamiento térmico y estructural de los morteros elaborados con las diferentes proporciones de cada puzolana natural.
4. Determinar la mezcla de mortero con mejor rendimiento.
5. Determinar el comportamiento hidrofílico de la mezcla seleccionada.

Resumen

A nivel mundial las preocupaciones medioambientales son algo en lo que se involucran cada vez más los profesionales de la Arquitectura. Es por ello que este trabajo se centró en la generación de un mortero hidrofílico que aumente el aislamiento térmico de las edificaciones y reduzca los problemas causados por la presencia del fenómeno de isla de calor en las grandes ciudades.

Para lograrlo, primero se definió el estado del arte existente a nivel mundial con respecto a la generación de morteros con características especiales y con base en esta información, se decidió emplear puzolanas naturales como el elemento principal para la creación del mortero hidrofílico.

Posteriormente se inició con el diseño experimento, para lo cual primeramente se definió la proporción, componentes y resistencias esperadas de la mezcla control, seleccionándolos con base al uso de acabado arquitectónico que se le pretende dar al mortero que se va a fabricar en esta investigación.

Luego, se determinaron las puzolanas que se utilizarían en este trabajo (diatomita, perlita y zeolita), así como los yacimientos de donde se obtendrían las muestras de material para la generación de las unidades experimentales; eligiendo en el caso de la diatomita y la perlita, dos yacimientos dentro del estado de Hidalgo previamente estudiados y caracterizados por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. En el caso de la zeolita, se utilizó uno ubicado en el ejido El Zapote, municipio de Huayacocotla, también caracterizado por la misma universidad.

Después, se procedió a caracterizar física y químicamente cada uno de las puzolanas seleccionadas, así como al resto de los materiales que se emplearían para elaborar las unidades experimentales; todo esto con el objetivo de establecer las constantes que se utilizarían dentro del experimento.

Una vez que se tuvieron todas las variables y constantes establecidas, se procedió a realizar el experimento, el cual fue del tipo factorial y para el que se crearon seis mezclas de mortero en los que se sustituyó el 25 y 50% del porcentaje del volumen del agregado fino de la mezcla por diatomita, perlita o zeolita; así como una mezcla control sin puzolanas.

Posteriormente, a los siete morteros se les realizaron pruebas de placa caliente aislada y ensayos de resistencia a la compresión a fin de establecer la relación presente entre los resultados de estas dos variables en las unidades experimentales y definir con base en esto, la proporción y puzolana que genera la relación térmico-estructural deseada, es decir, reducción del coeficiente de conducción térmico sin demeritar la resistencia a compresión.

De este modo, se seleccionó a la mezcla Z50 como aquella con la que se cumplía el objetivo principal de este trabajo.

Por último, al mortero Z50 se le realizó una segunda serie de mediciones para establecer a detalle su comportamiento con respecto a la humedad. Concluyendo de este modo, que los datos obtenidos permitieron comprobar que este material si tiene características hidrofílicas. Comprobando así lo teorizado en las hipótesis propuestas dentro esta investigación.

Capítulo I

El Efecto Isla de Calor: un problema creciente en las grandes ciudades del mundo

En la actualidad, las grandes ciudades del mundo crecen a un ritmo tal que se calcula que para el año 2050 el 70% de la población mundial vivirán en ellas (United Nations, 2010). Sin embargo, este crecimiento supone en sí mismo la generación de nuevas problemáticas en todos los rubros, de las que se deben ocupar profesionistas de todas las áreas.

En México, el Consejo Nacional de Población (CONAPO) espera que para el año 2030 la cantidad de habitantes a nivel nacional sea de aproximadamente 137, 481,336 millones de personas y que el 53% se encuentre asentado en 35 centros de población urbana con más de 500, 000 residentes cada uno (Consejo Nacional de Población, 2014). Por ello, es importante solucionar los problemas de las urbes, tales como el Fenomeno de Isla de Calor.

1.1 Definición del fenómeno de isla de calor urbana (UHI)

El fenómeno conocido como Isla de calor o UHI por sus siglas en inglés (Urban Heat Island), se refiere al aumento de la temperatura superficial y del aire que se produce al interior de las zonas urbanas, en comparación a las que existen en las áreas circundantes suburbanas o no urbanizadas (Alchapar, Correa, & Cantón, 2012) (Figura 3).

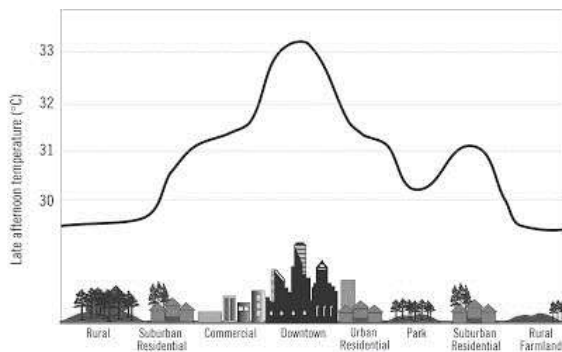


Figura 3.- Diferencias Térmicas que muestran el comportamiento de la isla urbana. Imagen obtenida con fines didácticos de la página www.epa.gov/heat-islands

El UHI se genera porque la urbanización modifica las propiedades físicas y químicas de la atmosfera, convirtiéndose entonces en un importante factor modificador del clima local y causando condiciones medioambientales concretas que caracterizan el comportamiento interno

de las ciudades (Tumini, 2010), y que pueden definirse como microclima urbano (Sarricolea Espinoza & Martín-Vide, 2014).

Por otro lado, el fenómeno de Isla de calor, además de su escala horizontal, también posee estructura vertical (Figura 4) y que se dividen en tres estratos (Voogt, 2008):

- **Urban Canopy Layer (Capa de dosel urbana) (UCL):** La capa de aire más cercana a la superficie y que se extiende hasta la altura media de las edificaciones.
- **Urban Boundary Layer (Capa de perímetro urbana) (UBL):** Se encuentra por encima de la capa de dosel y puede medir 1 kilómetro o más de espesor durante el día, para luego encogerse durante la noche.
- **Urban Plume (Pluma urbana) (UP):** Este es el nombre de la capa de aire caliente que se extiende más allá de la ciudad con ayuda del viento; esta cambia a menudo de forma, pasando de cúpula a una figura de pluma.

El análisis de las Isotermas³ es uno de los métodos más usados para determinar la presencia de islas de calor en un área geográfica; ya que, ante la presencia del fenómeno, tienden a formar círculos que se van cerrando alrededor del punto de temperatura más alto en el núcleo urbano (Figura 5). Creando así un con-

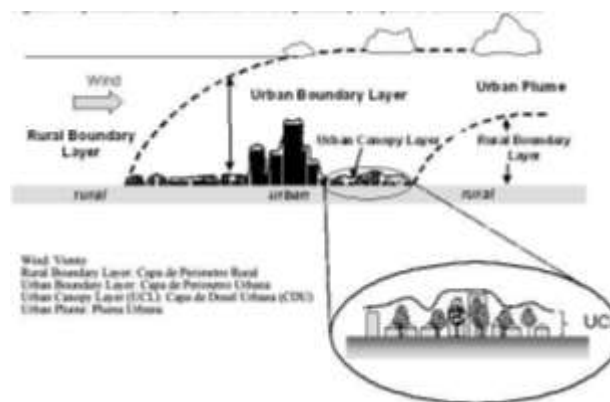


Figura 4.- Representación esquemática de los componentes principales de la atmósfera urbana. Imagen obtenida con fines didácticos de la página: castorluxerías.blogspot.mx

traste con la característica curva aplanada presente en las zonas circundantes o también llamadas “mar frío” (Pérez Arrau & Peña, 2016).

El patrón de isla formado por las isotermas, generalmente posee algunas depresiones debido a la presencia de puntos particularmente calientes⁴ (instalaciones industriales, estacionamientos, etc.) o puntos fríos (parques o cuerpos de agua) (Pérez Arrau & Peña, 2016).

³ Líneas que en los mapas meteorológicos unen los puntos de los lugares de la superficie terrestre que tienen la misma temperatura media anual. Información obtenida de la página web: www.wordreference.com/definicion/isoterma

⁴ También conocidos como islas de calor micro urbano (Pérez Arrau & Peña, 2016).

Los efectos del fenómeno de isla de calor se pueden percibir en todas las comunidades con 500 000 o más habitantes y una de sus consecuencias es el aumento del consumo energético de los edificios por el uso de aires acondicionado; incremento así las olas de calor presentes en las ciudades⁵ y las molestias que el aumento de las tempe-



Figura 5.- Isotermas dentro de un ambiente urbano. Imagen obtenida con fines didácticos de la Tesis de la Lic. en Ciencias de la tierra Pérez Miguel Mariana.

raturas causa en la vida diaria de sus habitantes (Carrasco, Palme, & Gálvez, 2016).

1.1.1. Causas del Fenómeno de Isla de Calor

Los factores que generan la isla de calor son complejos y se encuentran relacionados con el balance energético de los espacios urbanos, siendo los siguientes los principales:

- a) **Alta densidad de construcción:** Entre mayor sea, más grande será la masa de acumulación de calor en el área (Alchapar, Correa, & Cantón, 2012).
- b) **La sustitución de las áreas verdes por edificios y transformación de los cuerpos de agua:** Los suelos con vegetación utilizan una gran proporción de la radiación solar en el proceso de fotosíntesis y evapotranspiración, lo que contribuye a enfriar el aire en sus cercanías. Los árboles mitigan con su sombra la absorción de calor generada por el suelo.⁶
- c) **El calor generado por fuentes antropogénicas:** como el generado por los sistemas de aire acondicionado los edificios o por el uso de los coches (Tumini, 2010).
- d) **La contaminación atmosférica:** La emisión a la atmosfera de determinadas sustancias (siendo el ozono y las partículas de “polvo fino” las más preocupantes) que por sí mismas o por las resultantes de sus reacciones químicas, provocan efectos

⁵ Lo cual ha sido estudiado y establecido principalmente en ciudades europeas y de Estados Unidos pero que también se ha presentado en grandes ciudades de Latinoamérica, como la ciudad de México.

⁶ Cabe mencionar que el suelo natural tiene mayor inercia térmica que materiales tales como el concreto, lo que permite que aun cuando este se caliente durante el día, se enfríe sin problemas durante la noche.

perjudiciales para el medio ambiente y la salud (MAPAMA, Gobierno de España, 2015). Las principales fuentes de contaminación atmosférica están relacionadas con fuentes humanas (actividad industrial, transporte, etc.), aunque también pueden tener un origen natural (erupciones de volcanes, incendios forestales, etc.) (twenergy, 2014). Y a su vez, el aumento de la contaminación atmosférica genera un crecimiento del efecto invernadero que se presenta en las ciudades (Figura 6).



Figura 6.- Generación del efecto invernadero. Imagen obtenida con fines didácticos de la página www.temasambientales.com

- e) **El uso constante dentro de las construcciones de materiales con altos coeficientes de conducción térmica:** En las ciudades existen varios materiales que se utilizan con frecuencia, tales como el vidrio, el concreto y el mortero, sin embargo, son malos aislantes, acumulan calor y aumentan las temperaturas al interior de los edificios.
- f) **El fenómeno de cañón urbano:** Es la acumulación de calor que se genera en la capa de dosel urbano por la relación entre el ancho de las avenidas y la altura de los edificios⁷ (Carrasco, Palme, & Gálvez, 2016). Causa que solo una parte de la radiación solar alcance el suelo y que la mayoría incida en los tejados, generando:
- Disminución del albedo⁸ global de la calle (Akbari y Konopacki, 2005).
 - Reducción de las pérdidas significativas de la energía. Los edificios⁹ emiten radiaciones de onda larga tras recibir el calor del sol interceptado por otros edificios.

⁷ Se le nombra cañón urbano por la forma que de cañones que se crea entre los edificios.

⁸ Se define como el porcentaje de radiación que refleja una superficie en comparación al total que recibe.

⁹ Esto debido al comportamiento térmico de los materiales más empleados dentro de las construcciones, tales como el concreto, asfalto o el vidrio.

- La disminución de la ventilación y el enfriamiento nocturno, manteniendo alta la temperatura del aire durante la noche, especialmente en aquellos espacios exteriores conformados entre edificios de oficinas o comerciales (Figura 7) (Kikegawa, Ohashi y Kondo, 2007).

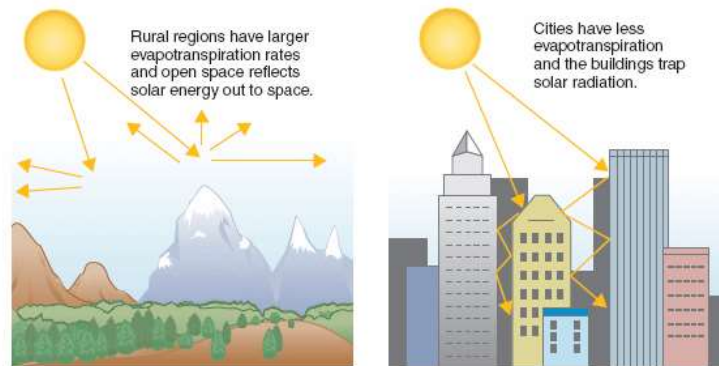


Figura 7.- Distribución de la radiación solar en zonas rurales y dentro de un “cañón urbano”. Imagen obtenida con fines didácticos de la página <http://cimss.ssec.wisc.edu/climatechange/Espanol>

Investigaciones previas (Carrasco, Palme, & Gálvez, 2016) han demostrado que al contrario del efecto generado en la parte baja de la ciudad por los cañones urbanos, en las partes altas y con pendiente existe un mayor enfriamiento durante la noche.

También se ha demostrado la relación entre el Factor de Altura Relativa (FHR) y el Factor de Cielo Visible (SVF): *“a menor cielo visible y exposición al viento, mayor acumulación de energía y temperaturas en las urbes”* (Carrasco, Palme, & Gálvez, 2016).

1.1.2. Consecuencias de la Isla Urbana de Calor

El aumento de la temperatura en las ciudades genera las siguientes consecuencias:

- Extender e intensificar las estaciones de verano y otoño, reduciendo también. el periodo de invierno (Sarricolea Espinoza & Martín-Vide, 2014).
- Debido al alto coeficiente de conductividad térmica de los materiales utilizados en las construcciones, tales como el concreto, el vidrio y el acero, existe mayor absorción y acumulación de energía solar (calor) en las construcciones ubicadas en las ciudades, en comparación con las situadas en áreas menos urbanizadas.

- Mayores gastos eléctricos en los meses cálidos por el uso de aires acondicionados para generar el confort interno de las edificaciones (Cañizares, 1998).
- Disminución del confort general de los usuarios.
- Creación de micro climas urbanos diferentes a los presentes de forma natural en las áreas en las que se ubican las ciudades, pudiendo afectar hasta el clima de la región.
- Generación de micro islas de calor en los puntos con mayor densidad urbana, contaminación ambiental o cañones urbanos (Carrasco, Palme, & Gálvez, 2016).
- Aumento del porcentaje de víctimas de insolación (Voogt, 2008).
- Registro de mayores ondas de calor y temperaturas récord al interior de las urbes.

1.1.3. Estrategias para disminuir el efecto de la Isla de Calor Urbana

Para de mitigar el fenómeno de Isla Urbana de Calor y sus consecuencias, a nivel mundial se han implementado maniobras de dos tipos:

- A. Reforestación y creación de áreas verdes:** Ya fue comprobado el efecto disipador de calor que produce la vegetación dentro de este fenómeno; por ello se está buscando reforestar y/o crear nuevas áreas verdes al nivel del suelo en las ciudades, así como incentivar la construcción de azoteas y muros verdes (PAOT, 2010).
- B. Incorporación de materiales reflectantes en calles y edificaciones:** El uso de estos elementos, reducen la absorción de energía de los materiales tradicionales¹⁰, sin embargo, un estudio realizado por el National Center of Excellence for Smart Innovations de la Universidad de Arizona, demostró que sus efectos con respecto a la reducción de la isla de calor, son menores a los esperados (Yang, Wang, & Kaloush, 2013).

¹⁰ Entendiéndose por esto a los materiales más empleados dentro de las edificaciones actualmente, tales como el concreto, asfalto o el vidrio.

1.2. El fenómeno de Isla de Calor Urbana en la Ciudad de México

A nivel nacional, la ciudad donde se percibe más el fenómeno de Isla de Calor y sus consecuencias, es la Ciudad de México. La capital del país es una de las metrópolis más grandes del mundo, extendiéndose sobre un área aproximada de 1,485 km², siendo su parte más baja una planicie lacustre y con una elevación promedio de 2,300 msnm (INAFED, 2014). Su clima predominante es el Templado subhúmedo (87%), seguido por el clima Seco y semiseco (7%) y el Templado húmedo (6 %) (INEGI, 2015).

Con respecto al fenómeno de Isla de Calor Urbana, dependiendo de las características meteorológicas¹¹ (Barrandas Miranda, 2013), en la ciudad de México se pueden medir diferencias térmicas de hasta 10° C entre la urbe y sus áreas circundantes. También se ha registrado que el centro Histórico es más cálido y menos húmedo que el sur de la ciudad (Barrandas Miranda , 2012). Generándose micro islas de calor en las colonias donde existe un porcentaje de vegetación equivalente al 10% o menos de su extensión.

Mediciones realizadas en el 2010 indican que la isla de calor de la metrópoli se distribuye en casi toda su área, pero que se sitúa mayormente entre las estaciones de ENEP-Acatlán, Villa de las Flores. San Agustín, Cerro de la Estrella y plateros (Ballinas Oseguera, 2011). Sin embargo, contrario al comportamiento tradicional de las islas de calor, en la Ciudad de México también se presentan incrementos de las temperaturas diurnas con intensidades de hasta 12 °C entre áreas como la ENEP-Acatlán y Chapingo (Ballinas Oseguera, 2011), lo que causa que la población experimente de seis a ocho horas de estrés caluroso, sobre todo en la época cálida.

Las causas de la Isla de Calor en la Ciudad de México tienen su origen en el desarrollo urbano que ha tenido la urbe a lo largo del tiempo. Su construcción se realizó en un terreno lacustre y de baja resistencia que originalmente contaba con muchos cuerpos de agua y gran riqueza ambiental, sin embargo, estos fueron mayormente drenados y/o destruidos.

¹¹ Está demostrado que un cielo despejado y poca presencia de vientos contribuyen a que acrecentar las temperaturas que se presentan dentro de una Isla de Calor Urbana.

De haberse conservado un mayor porcentaje de los cuerpos de agua preexistentes en el área, estos abrían ayudado a disminuir y regular la temperatura interna de la urbe.

A lo anterior se suma que la capital del país, ha tenido un gran aumento de la población desde hace décadas¹² y una densidad constructiva cada vez más fuerte (sobre todo en el centro de la ciudad), con la cual ya se ha urbanizado el 48% de su territorio disponible.

Por último, aunque el panorama actual de la Ciudad de México no es favorecedor, se puede hacer mucho para mejorarlo. Por ejemplo, en el caso del bajo índice de disipadores de calor presentes en la ciudad, podrían generarse nuevas áreas verdes; y en el caso de los materiales constructivos, crear nuevos materiales constructivos con menores coeficientes de conducción térmica que los utilizados actualmente.

1.2.1. Los materiales más empleados dentro de las construcciones de la urbe

Una de las causas del fenómeno de la Isla de calor, es el comportamiento térmico de los materiales utilizados en las construcciones, mismos que desde hace medio siglo, han tendido a estandarizarse, buscando crear mayores beneficios económicos a través del empleo de materiales con mayor resistencia y que permitan generar construcciones en el menor tiempo posible.

En todo el país se ha extendido el uso de materiales como el mortero y el concreto, dejando de lado la utilización de los materiales regionales. En la Encuesta Nacional de Hogares (ENH) del 2015 (Figura 8) se estableció que más del 98% de las viviendas existentes en poblaciones de más de 2500 habitantes, se fabricaron utilizando materiales resistentes.¹³

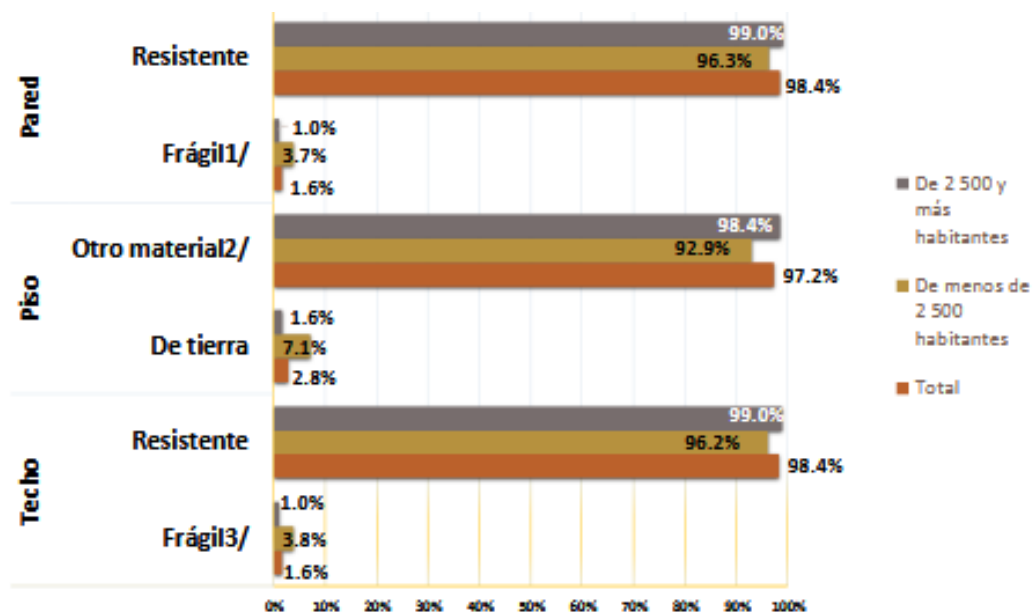
Por tanto, se puede concluir que, en nuestro país, los materiales predominantes para la construcción de las viviendas son el concreto, mortero, madera, adobe, tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, metales, teja o cerámicos como los mosaicos; sin embargo,

¹² De 1900 a 1970, la población de la ciudad se multiplicó 8.86 veces, sin embargo, esta tendencia de crecimiento disminuyó manteniéndose en un 0.31 por ciento anual del 2010 al 2015 (INEGI, 2015) y sumando un total de 8 millones 985 mil 399 de habitantes para ese año.

¹³ Los materiales a los que se refiere este término, se explican a detalle y por rubro dentro de la Figura 8.

aún dentro de estos materiales, el uso del concreto y mortero, supera por mucho el de los otros.

La presencia del concreto dentro de las construcciones es tan alta, que resulta razonable suponer que su comportamiento térmico, forma parte de los factores que causan el aumento de temperatura que se presenta en las áreas urbanas.



1/ Los materiales frágiles de paredes son: de desecho, lámina de cartón, lámina de asbesto o metálica, carrizo, bambú o palma, embarro o bajareque. Los resistentes son: madera, adobe, tabique, ladrillo, block, piedra, cantera o concreto.

2/ Los otros materiales de piso son: cemento o firme, madera, mosaico u otro recubrimiento y casos no especificados.

3/ Los materiales frágiles de techos de vivienda son: de desecho, lámina de cartón, palma o paja. Los materiales resistentes son: lámina metálica, lámina de asbesto, madera o tajamanil, terrado con viguería, teja, losa de concreto o viguetas con bovedilla.

Nota: Los totales pueden no sumar cien por ciento debido al redondeo.

Figura 8.- Porcentaje de hogares por tipo de materiales de construcción de la vivienda que habitan según tamaño de localidad. Figura obtenida con fines didácticos de la información proporcionada por el INEGI en el 2016 dentro de su informe "Encuesta Nacional de los Hogares (ENH) 2015".

Capítulo II

Estado del arte en las pastas cementantes

2.1. Usos y características

El mortero, según el Instituto Americano del Concreto (ACI), se define como “la mezcla de cemento hidráulico, agregados y agua con o sin aditivos, fibra u otros materiales cementosos” ((ACI), 2013). Es importante mencionar que el término “mortero”, está mal empleado y actualmente se busca implementar de manera general el uso del término correcto, que sería “cemento de albañilería”.

Los agregados con lo que normalmente se generan los morteros, son arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partícula de hasta 10 mm (Pérez M. , 2010). Por último, el porcentaje de cemento dentro de la mezcla puede variar del 25 al 40% del volumen total de la mezcla, dependiendo del uso que se le vaya a dar al material.

El mortero y el concreto comparten sus cuatro principales características básicas: trabajabilidad, cohesividad, resistencia y durabilidad (IMCYC, 2011); Asimismo, ambos pasan por tres estados durante su proceso de secado: plástico, fraguado y endurecido.

En su estado fresco el mortero parece una masa moldeable y sus principales características son la trabajabilidad y la cohesividad. En el fraguado (lo que ocurre después de la compactación) el material comienza a adquirir rigidez. Por último, en su estado endurecido, adquiere la propiedad de resistencia y durabilidad (IMCYC, 2011).

Actualmente el mortero es uno de los materiales (junto con el concreto) con el uso más extendido dentro de las zonas urbanas y se utiliza normalmente para acabados o para unir muros de mampostería.

En la normativa de los diferentes países, los morteros son normalmente clasificados de acuerdo a su resistencia, composición y proporción de su mezcla. A nivel nacional, la clasificación hecha por la N.CMT.2.01.004/2 (SCT, 2017) (Tabla 1) es un ejemplo de lo anterior.

Tabla 1.- Tipos de mortero. Tabla tomada con fines didácticos del libro CMT características de los materiales, parte 2, capítulo 4 de la Secretaría de Caminos y Transporte.

Tipo	Partes de cemento Portland	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal	Partes de arena
I	1	0	0 a ¼	No menos de 2.25 ni más de 4 veces la suma de cementantes en volumen
	1	0 a ½	0	
II	1	0	¼ a ½	
	1	½ a 1	0	
III	1	0	½ a 1 ¼	

Los tres tipos de morteros mencionados en la tabla 1, se fabrican con el objetivo de obtener distintas resistencias a compresión ($F'c$), de acuerdo al uso que se le dará al material, siendo el tipo I el más usado para acabados o pega de muros de mampostería.

Las principales pruebas para caracterizar las mezclas de mortero, además de la resistencia a compresión, son la de revenimiento, la de fluidez, el contenido de aire y la densidad (IMCYC, 2011).

A los cementos de albañilería también se les puede añadir aditivos químicos con el objetivo de producir morteros con capacidades físicas o estructurales mejoradas; siendo los aditivos más usados en el mortero, aquellos destinados a mejorar la impermeabilidad del material o para aumentar su resistencia a los ambientes extremos.

Sin embargo, ya que el costo e impacto ambiental por la creación de los aditivos químicos es muy elevado, es más económica y ecológicamente rentable, mejorar las características de los morteros usando materiales que requieran un mínimo de tratamiento previo antes de ser usado dentro de la mezcla, tales como las puzolanas naturales.

2.2. El comportamiento térmico de las pastas cementantes

Existen tres formas de transmitir el calor: Radiación, conducción y convección. Siendo las primeras dos las de mayor relevancia para este trabajo:

1. La radiación es la propagación de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas subatómicas a través del vacío o por medio de un material (Real Academia Española, 2015). Un ejemplo de esto, es el proceso generado entre el sol y la tierra.
2. La conducción se refiere a la transmisión de calor a través del contacto directo entre los cuerpos, en donde el calor fluye desde el cuerpo con mayor temperatura hacia el de menor (Real Academia Española, 2015). Un ejemplo de esto sería cuando un muro transmite su temperatura a los objetos con los que se encuentra en contacto.

El comportamiento térmico de los materiales también es fruto de la interacción de numerosas variables, siendo las algunas de las principales:

- a) **La conductividad térmica (λ):** Se refiere a la capacidad de un material de transferir energía térmica (calor) (Lira-Cortés, González Rodríguez, & Méndez-Lango, 2008).
- b) **Albedo:** Es la relación en porcentaje, entre la energía luminosa reflejada por una superficie con respecto al total que recibe (Alchapar, Correa, & Cantón, 2012).
- c) **Densidad (ρ):** Es la relación entre la masa y el volumen de una sustancia, o entre la masa de una sustancia y la masa de un volumen igual de otra sustancia tomada como patrón (Real Academia Española, 2015).
- d) **Calor específico (C_p):** Es la cantidad de calor necesario para aumentar un grado centígrado la temperatura de 1 unidad de masa. Se mide en J/KgK (Hernández, 2014).
- e) **Calor específico volumétrico (ρC_p):** Se le denomina así a la capacidad volumétrica de almacenamiento de calor de un determinado material (Hernández, 2014).
- f) **Inercia térmica:** Es la propiedad de la masa de conservar cierta cantidad de la energía térmica que ha recibido e ir liberándola progresivamente.

Sin embargo, el coeficiente de conductividad térmica es el factor más utilizado para cotejar el rendimiento térmico de los materiales, así como para realizar diversos cálculos. Asimismo, para que la comparación del comportamiento térmico de dos materiales sea correcta, estos deben ser medidos a la misma temperatura.

En la tabla 2 se pueden apreciar las principales capacidades térmicas de diversas variaciones del concreto y de algunos de los materiales más empleados dentro de la construcción (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017). Sin embargo, los valores proporcionados no son índices aplicables de forma general ya que en la determinación de estas capacidades influyen muchas variables (humedad, temperatura del ensayo¹⁴, etc.), por lo que es recomendable realizar mediciones específicas sobre cualquier material que se vaya a emplear (Secretaría de Energía, 2011).

Tabla 2.- **Capacidades térmicas del concreto y sus componentes.** Desarrollada con fines didácticos en base a la información proporcionada por la página web: www.miliarium.com

Material	Densidad Kg/m ³	Calor Esp. J/(Kg*K)	Conductividad térmica W/(m*K)	Difusividad térmica (m ² /s) (x10 ⁻⁶)
Acero	7850	460	47-58	13.01-16.06
Agua	1000	4186	0.58	0.136
Asfalto	2120	1700	0.74-0.76	0.205-0.211
Cemento (duro)			1.047	
Concreto ligero	800	920	0.3	0.41
Bloque concreto ligero	1400	1050	0.56	0.38
concreto armado	2400	1050	1.63	0.65
Mortero de cemento	2000	1050	1.40	0.67
Arena seca	1400	795	0.33-0.58	0.296-0.521
Grava	1700	920	1.21	0.77

La densidad de los materiales también es un parámetro fundamental para diferenciar la conductividad térmica de dos elementos muy similares, así como en las variaciones de las pastas cementantes, volviéndose aún más recomendable, realizar mediciones específicas para el manejo de estos materiales (Secretaría de Energía, 2011).

Asimismo, se debe considerar que existe una relación entre la baja conductividad de un material con una baja densidad, dado que la ligereza del material suele estar producida

¹⁴ Se suele inferir que la temperatura a la que se suelen realizar los ensayos es a 20 °C, aunque de necesitarse una variación de este factor, es necesario realizar mediciones específicas.

por huecos ocupados por aire en su interior, por lo que los materiales compactos serán menos aislantes (Hernández, 2014).

Finalmente, con base en lo anterior, se puede entender por qué los materiales como el mortero o el concreto, tienden a absorber radiación solar (convirtiéndola en energía calorífica); ya que estos materiales (al igual que el resto de los componentes ambientales), buscan estar en equilibrio térmico con el ambiente que lo rodea (Figura 9).

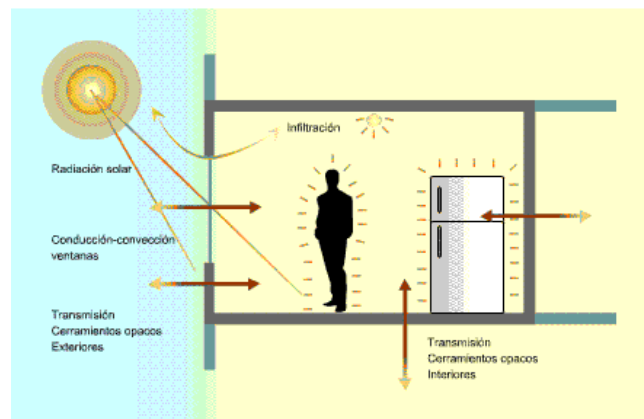


Figura 9.- Esquema de transmisión de calor al interior de una construcción. Figura obtenida con fines didácticos de la página <http://www.euskadi.eus/web>

2.3. Casos análogos de modificación de pastas cementantes alrededor del mundo

La generación de pastas cementantes especiales se realiza a través del uso de variaciones de proporción en la mezcla de materiales o con inclusión de algún agregado químico o mineral, en la misma.

Esto normalmente se realiza para fabricar nuevos concretos que cumplan con alguna característica deseada, como mayor resistencia estructural o tiempo de vida, pero también existen casos enfocados en los morteros, siendo los principales ejemplos los siguientes:

2.3.1. Mezcla de cal y cemento con características térmicas y acústicas mejoradas

Diseñada y patentada por la Universidad de Alcalá, esta mezcla se creó para que contar con características térmicas y acústicas mejoradas, así como mayor resistencia y durabilidad. Es aplicable para interiores y exteriores en obra nueva, rehabilitación o restauración. Se caracteriza por contener un conglomerante hidráulico y otro aéreo, un

árido silíceo o calcáreo, un árido ligero (tales como perlita expandida, pizarra expandida o arcilla expandida), fibras cortas de celulosa y/o pigmentos minerales.

Actualmente este producto se encuentra en el punto de buscar empresas que se interesen en producirlo y comercializarlo.

2.3.2. Pasta auto regeneradora – en prueba

Sin importar cuán resistente pueda ser el concreto en su máximo rendimiento, con el tiempo le terminan saliendo grietas y estas generan infiltraciones. Este punto desconcertó al microbiólogo holandés Henk Jonkers y profesor de la Universidad Técnica de Delf en los Países Bajos quien desarrolló un mortero que se repara asimismo como respuesta a esta problemática (Alvarez, 2015) (Figura 10).

El microbiólogo determinó que la solución para la creación de este nuevo tipo de mortero era la adición de bacilos a la mezcla del material, ya que estos resolvían los tres principales problemas de su investigación (Stewart, 2015):

- a) **La extrema alcalinidad del material:** Dado que los bacilos prosperan en esta clase de ambientes.
- b) **Las bacterias “curativas” deberían poder permanecer inertes durante años¹⁵:** Los bacilos producen esporas que pueden sobrevivir durante décadas sin alimento ni oxígeno y solo requieren agua para activarse.
- c) **Después de activada, las bacterias debían producir piedra caliza:** Para resolver este punto era necesario agregar a la mezcla alguna fuente de alimentación para los bacilos¹⁶, por lo que finalmente se adicionó lactato de calcio a las capsulas de plástico biodegradable en donde se colocan a los bacilos

El ciclo del funcionamiento de esta pasta se completa cuando el agua entra en contacto con el material y abre las capsulas, haciendo que las bacterias germinen y se alimenten del lactato, combinando así el calcio con iones de carbonato para formar calcita

¹⁵ Esto a fin de hacer más funcional al nuevo material.

¹⁶ Y el agregado de azúcar se descartó ya que generaría un concreto suave y débil.

o piedra caliza (Stewart, 2015). Por último, si bien la creación de este nuevo tipo de concreto representa un increíble avance, aún posee dos principales desventajas (Alvarez, 2015):

1. Hasta el momento solo puede reparar fracturas de hasta 0.8 mm de grosor.
2. Los altos costos de producción¹⁷. Esto es en el que se está trabajando además de estudiar las reacciones del material con el medio ambiente natural (Figura 11).



Figura 10.- Fotografía del concreto que se auto repara. Imagen obtenida con fines didácticos de la página <http://cnnespanol.cnn.com>



Figura 11.- Primer edificio elaborado utilizando el concreto auto reparador. Imagen obtenida con fines didácticos de la página <http://elcomercio.pe/tecnologia/inventos/>

2.3.3. Pasta fosforescente – en prueba

En nuestro país el doctor en ciencias José Carlos Rubio, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH), generó una pasta que tiene la capacidad de emitir luz hasta por 12 horas (Figura 12) (Excelsior, 2016).



Figura 12.- Imagen de un camino elaborado con el concreto fosforescente. Imagen obtenida con fines didácticos de la página <http://www.excelsior.com.mx/nacional/2016/05/15/1092726>

Para lograrlo el investigador y su equipo modificaron la mezcla del material mediante un proceso de policondensación de materias primas, cambiando así la estructura microscópica del material, a fin de lograr que esta pudiera absorber rayos UV (BBC Mundo, 2016).

¹⁷ Aproximadamente cincuenta por ciento más que un cemento tradicional.

El principio de este material consiste en absorber la radiación ultravioleta en el día para luego brillar durante la noche, permitiendo la difusión de la radiación de luz a través de sílice (mismo material con el que se encuentra elaborado el cemento) (Mulato , 2016).

Las pruebas realizadas en el concreto fosforescente han demostrado que su tiempo de vida es similar al de un concreto tradicional, sin embargo, su costo de producción es muy elevado (cinco veces o más que uno común) por lo que ahora el equipo creador se encuentra centrado en disminuirlos.

2.4. Propuesta del proyecto

Tras analizar las modificaciones previas que se han realizado en las pastas cementantes, se determinó que para lograr los resultados esperado, se emplearon diversos agregados químicos y minerales; por ello se decidió emplear puzolanas naturales para mejorar las capacidades de conducción térmica del mortero, debido principalmente a que estos materiales cuentan con capacidades aislantes innata y que además, existen de manera abundante en nuestro país, lo que hace que un material creado con base en ellas, pudiera ser reproducido y utilizado fácilmente.

Procediendo posteriormente a definir las características de la mezcla control y del experimento a realizar.

Capítulo III

Primera parte experimental

3.1. Diseño del experimento

Para desarrollar este punto, primero es necesario establecer las características de la mezcla control. En un experimento se le conoce con ese nombre o “testigo” a la muestra base de la que parte todo el experimento y que no incluye ninguna modificación, es decir, la “original” (University of California Museum of Paleontology, 2016).

3.1.1. Proporción de la mezcla control

El mortero o cemento de albañilería es un material compuesto elaborado con la mezcla de cemento, un agregado fino y agua con o sin aditivos, fibra u otros materiales cementosos ((ACI), 2013). La resistencia de este material depende directamente de la proporción o la cantidad de materiales que se agreguen o no en la mezcla.

Por ello, la proporción de materiales para crear un mortero se selecciona de acuerdo al uso que se le dará al material y con base en las diversas normas a nivel nacional e internacional que existen para definir las características y resistencias esperadas para el mortero, tales como la NMX-C-486-ONNCCE-2014 o la ASTM C-270 y ASTM C-780.

En México los principales usos que se le dan al mortero son la construcción de plantillas, acabados, zarpeados, pisos, firmes, banquetas, guarniciones, repellados, entortados, y junteo de blocks, tabiques y mosaicos, (CEMEX, 2018).

Sin embargo, ya que el uso para el que estará destinado el mortero a fabricar será el de acabado arquitectónico, la proporción más utilizada para dicho fin es la cemento-arena 1:3 (Tabla 3); por lo que fue seleccionada para la creación de la mezcla control. Asimismo, considerando que la arena es el elemento que se integra con mayor volumen dentro de la mezcla, se decidió integrar las puzolanas naturales como sustituto de una parte del volumen de este elemento.

Tabla 3.- Principales proporciones de mortero empleadas comercialmente y sus usos. Tabla extraída con fines didácticos de elconstructorcivil.com

Proporción cemento: arena por volumen	Aplicaciones y observaciones
1: 1	Mortero rico, empleado para rellenar grietas o resanar. Consistencia aguada. Alta adhesividad e impermeabilidad.
1: 2	Mortero útil para juntar mampostería de alta resistencia (piedra, tabique o bloque de concreto). Alta impermeabilidad.
1: 3	Junteo de mamposterías para juntar mamposterías de uso común. Buena resistencia al intemperismo. Aplanados en general.
1: 4-6	Enladrillados en azoteas, pisos en baños. Aplanados en general. Junteo de piedra braza en lugares no muy húmedos.

Una vez que seleccionada la proporción de la mezcla, se procedió a establecer la composición y resistencia esperada por las diversas normativas para este fin, las cuales se resumen en la tabla 4.

Tabla 4.- Composición y resistencia del mortero con proporción cemento- arena 1:3 de acuerdo con la norma NMX-C-486-ONNCCE-2014, N-CMT-2-01-004/02 de la SCT, la ASTM C-270 y ASTM C-780. Tabla de elaboración propia.

Tipo	Partes de cemento Portland	Partes de arena	Resistencia mínima esperada MPa (kg/cm ²)
I	1.0	2.5 – 4.0	12.5 (127)
M	1.0	2.0 – 3.5	17.5 (178)
S	1.0	2.0 – 3.5	12.5 (127)
N	1.0	2.0 – 3.5	7.5 (76)

3.1.2. Materiales

Para la creación de la mezcla control se emplearon los siguientes materiales: cemento, arena de río, agua y un reforzamiento de fibra de vidrio. Los detalles de cada uno se muestran a continuación:

3.1.2.1 Arena

Se utilizó arena de río del tipo riolítico como agregado fino para el mortero a fabricar. Se eligió este material porque contiene un porcentaje de cuarzo, lo cual ayudará a mejorar las capacidades estructurales de la mezcla a generar. Cabe mencionar que se adquirió la

cantidad suficiente de este elemento, a fin de garantizar que se utilice el mismo en todas las unidades experimentales y muestras que se elaboren en esta investigación.

3.1.2.2 Cementante

Tras estudiar las características de los diversos cementos ofrecidos en las compañías comerciales, se decidió utilizar en las mezclas a fabricar, el cemento elaborado por la marca CEMEX. Se eligió este cemento porque su composición favorece la resistencia a los sulfatos, lo que ampliará el tiempo de vida del material fabricado en esta investigación.

ESPECIFICACIONES MECÁNICAS	MÉTODO DE PRUEBA	RESULTADOS	UNIDADES	CONDICIÓN ESPECIFICADA EN LA NORMA RESPECTIVA
Resistencia a compresión a 3 días	NMX-C-061	20	N/mm ²	Valor mínimo esperado
Resistencia a compresión a 28 días	NMX-C-061	30	N/mm ²	Valor mínimo esperado
ESPECIFICACIONES FÍSICAS	MÉTODO DE PRUEBA	RESULTADOS	UNIDADES	CONDICIÓN DEL RESULTADO
Tiempo de fraguado inicial	NMX-C-059	45	Minutos	Valor promedio
Tiempo de fraguado final	NMX-C-059	600	Minutos	Valor promedio
Expansión en autoclave	NMX-C-062	0.8	%	Valor máximo esperado
Contracción en autoclave	NMX-C-062	0.2	%	Valor mínimo esperado
ESPECIFICACIONES ESPECIALES	MÉTODO DE PRUEBA	RESULTADOS	UNIDADES	CONDICIÓN DEL RESULTADO
Blancura	NMX-C-414	70	%	Valor mínimo esperado

Figura 13.- Ficha técnica del cemento Blanco de Cemex CPO-30 B. Figura tomada con fines didácticos de la página de oficial de la empresa Cemex.com

ESPECIFICACIONES MECÁNICAS	MÉTODO DE PRUEBA	RESULTADOS	UNIDADES	CONDICIÓN DEL RESULTADO
Resistencia a compresión a 3 días	NMX-C-061	20	N/mm ²	Valor mínimo esperado
Resistencia a compresión a 28 días	NMX-C-061	30	N/mm ²	Valor mínimo esperado
ESPECIFICACIONES FÍSICAS	MÉTODO DE PRUEBA	RESULTADOS	UNIDADES	CONDICIÓN DEL RESULTADO
Tiempo de fraguado inicial	NMX-C-059	45	Minutos	Valor mínimo esperado
Tiempo de fraguado final	NMX-C-059	600	Minutos	Valor máximo esperado
Expansión en autoclave	NMX-C-062	0.80	%	Valor máximo esperado
Contracción en autoclave	NMX-C-062	0.20	%	Valor máximo esperado
Expansión por ataque de sulfatos	NMX-C-418	0.10	%	Valor máximo esperado

Figura 14.- Ficha técnica del cemento Portland de Cemex CPO-30 RS. Figura tomada con fines didácticos de la página de oficial de la empresa Cemex.com

Entre los diferentes tipos de cementos que ofrece la marca CEMEX, se seleccionaron dos tipos: el CPO-30 RS y el CPO-30 B. El primero es un tipo de cemento especialmente diseñado para resistir los álcalis y el segundo es el cemento blanco básico de la compañía.

Se compararon estos dos tipos de cemento con el objetivo de establecer si ambos materiales poseían un tiempo de vida similar, aun estando en contacto con la zeolita, para así definir la viabilidad de utilizar el CPO-30 B en el experimento en lugar del CP-30 RS, ya que este último posee un costo mucho más elevado que el del cemento blanco, así como una menor asequibilidad. Por último, la ficha técnica de ambos cementos es la que aparece en las figuras 13 y 14.

3.1.2.3. Agua

Existen diversas normas, como la N·CMT·2·02·003/02, enfocadas a la calidad del agua dentro de las mezclas cementantes; más que nada establecen la cantidad máxima de contaminantes que debe incluir, así como los métodos para transportarla y/o almacenarla.

En este trabajo, se cuidó de cumplir con lo solicitado en la norma anterior mencionada, procurando usar agua potable que se encontrara libre de aceites o sustancias en suspensión.

3.1.2.4. Fibra de vidrio (refuerzo)

Para mejorar el rendimiento estructural del mortero a preparar, se decidió agregar un refuerzo de fibra de vidrio a la mezcla control. Según el IMCYC, las mezclas con fibra de vidrio ofrecen una alta resistencia al fuego, a la corrosión y al ataque biológico de macroorganismos, sin importar las condiciones ambientales a las que someta el concreto (IMCYC, 2004). Otras características ofrecidas por la fibra de vidrio a la mezcla, son:

- Las fibras ayudan a distribuir las cargas en el concreto
- Mayor resistencia media global
- Mejoran la resistencia y manipulación de elementos recién colados.
- Aumentan la resistencia a la tracción y flexión del material; logrando incluso eliminar la necesidad de refuerzos de acero en algunos elementos no estructurales
- Disminuyen el agrietamiento del hormigón por contracciones plásticas

Ahora bien, por su composición y características, existen cinco tipos de fibra de vidrio, las cuales tienen diferentes usos (Tabla 5). Sin embargo, ya que en este trabajo se

utilizará la fibra como refuerzo de una pasta cementante, se usará el tipo AR. Por último, se debe mencionar que el porcentaje de fibra de vidrio que se empleará dentro de las mezclas, se determinó a través de experimentos previos que se explicarán en el siguiente capítulo.

Tabla 5.- Tipos, características y usos de los diferentes tipos de fibra de vidrio. Tabla elaborada con base en la información del Máster en Ciencia y Tecnología de los materiales de Villamudría Rivera Sandra.

Tipo	Características y usos
E	Es el más empleado y se caracteriza por sus propiedades dieléctricas. Se utiliza para moldes y de refuerzo para composites
R	Tiene muy buenas prestaciones mecánicas y se utiliza en el sector espacial, de aviación y armamento
D	Excelente característica dieléctrica. Aplicación en radares y ventanas electromagnéticas
AR	Posee un alto contenido de óxido de circonio, lo que lo hace fuerte a los álcalis y, por tanto, apto para ser empleado como refuerzo en los concretos
C	Se caracteriza por una alta resistencia a agentes químicos

3.1.3. Experimentos previos y caracterización de los materiales de la mezcla control

Una vez establecidos los materiales a utilizar en la mezcla control, se realizaron experimentos previos para definir a detalle las características y cantidades en los que estos elementos se integrarían dentro de la mezcla. Los resultados de esto se incluyeron en el apartado de resultados.

3.1.4. Establecimiento de la resistencia a compresión esperada

En las pastas cementantes, el modo más común para establecer sus características mecánicas, es a través del ensayo de resistencia a la compresión, ya que es fácil de realizar, y estos materiales responden naturalmente a este tipo de esfuerzos.

En cuanto a la resistencia mínima a compresión esperada para un mortero proporción cemento-arena 1:3, existen diversas normas como la N-CMT-2-01-004/02 de la SCT, la ASTM C-270 y ASTM C-780, que indican este dato (Tabla 4), sin embargo, ya que en trabajos anteriores se observó que al añadir una puzolana natural en una pasta cementante, estas tienden a disminuir su resistencia a la compresión en al menos un 10% con respecto a su resistencia original (Andrada, y otros, 2012), (Urday Ochoa, 2015); se decidió aumentar

la resistencia de la mezcla control, a fin de que los morteros puzolánicos elaborados para el experimento, cumplan con la resistencia mínima solicitada por las normas.

Por lado, dado que las pastas cementantes presentan la tendencia de que “a menor cantidad de agua, mayor resistencia” (Quintero Ortiz, Cruz Hernández, & Peña Santos, 2014), entonces, para aumentar la resistencia a compresión de la mezcla control, se decidió reducir su relación agua-cemento.

Con base en la curva de Abrahams (Figura 15), originalmente la relación agua-cemento recomendada para un mortero es de 1:0.95, a fin de que obtenga una resistencia de 127 kg/cm²; sin embargo, dado que la resistencia mínima esperada para los morteros tipo M es de 178 kg/cm² (tabla 4), se decidió aumentar la resistencia de la mezcla control a 210 kg/cm², ya que, con esta resistencia, se espera que todos los mor-

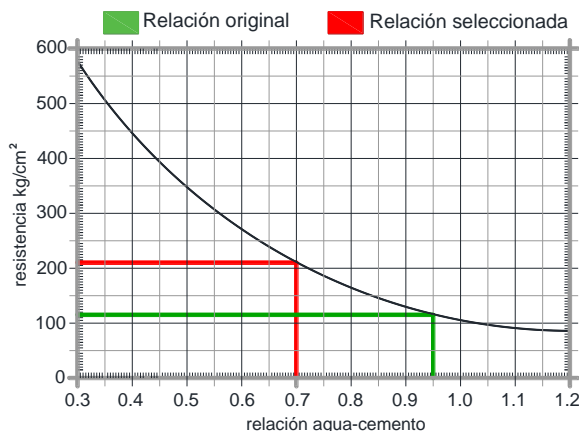


Figura 15.- Curva de Abraham donde se muestra la relación de la resistencia a compresión de un concreto con respecto a la relación agua – cemento. Imagen extraída con fines educativos de la página bestsupportunderground.com

teros puzolánicos cumplan con la resistencia mínima esperada para los morteros tipo M o al menos con la de los morteros tipo S (127 kg/cm²) (tabla 4).

Una vez decidida la resistencia a alcanzar en la mezcla control, usando la curva de Abraham (figura 14) se pudo apreciar que la proporción de agua-cemento que se utilizar para lograrlo es la de 1:0.70. Sin embargo, es sabido que la disminución de agua en la mezcla, causa menor revenimiento y manejabilidad.

3.2. Diseño del experimento con la adición de puzolanas naturales

Una vez que se tuvieron los datos de la mezcla control completos, se pasó al diseño de las mezclas de los morteros puzolánicos, en el que se aplicaron los tres componentes de un experimento científico: constantes, variables dependientes y variables independientes.

3.2.1. Constantes

Es el nombre de los factores que se mantienen iguales en todas las unidades experimentales. Las constantes que se manejaron en todas las mezclas de mortero fueron:

- Tipo y cantidad de cemento a emplear
- Tipo de arena usada
- Tipo y cantidad de Fibra de vidrio
- Cantidad de agua a usar

3.2.2. Variables independientes

Son las variables que se modifican por los investigadores con respecto al material original (mezcla control), a fin de determinar los resultados generados por dichos cambios.

En este experimento se manejaron dos variables de este tipo:

- Tipo de puzolana natural usada como sustituto de arena
- Porcentaje de sustitución de arena en la mezcla

3.2.2.1. Selección de puzolanas naturales para el experimento

Según la ASTM-C-125, las puzolanas se definen como “un material silíceo o silicoaluminoso que posee poco o ningún valor cementante, pero que en una forma finamente dividida y en presencia de la humedad, reacciona químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos con propiedades cementantes” (ASTM Internacional, 2014).

La reactividad de las puzolanas es causada mayormente por la sílice activa que se encuentra en ellas formando compuestos mineralógicos silícicos (Salazar J., 2018); y en la actualidad ya se ha documentado que es posible realizar, en las pastas cementantes, la sustitución a gran escala del cemento por subproductos industriales y/o materiales puzolánicos (Stulz & Mukerji, 1993), ya que esto es sumamente ventajoso desde el punto de vista de económico, energético, de durabilidad, eficiencia y de desarrollo sustentable (Pérez M., 2010).

Con respecto a la viabilidad del uso del cemento puzolánico, en la actualidad varias cementeras ya cuentan con este material entre sus productos, el cual es una mezcla de cemento Portland y puzolanas naturales o artificiales en una proporción del 15 al 55%, según la fórmula de cada uno (Vidaud, 2013); siendo considerado por ello, un eco material; sin embargo, dado que no se puede establecer cuál es el tipo y puzolana utilizada para la generación de estos cementos puzolánicos comerciales, no se emplearán como parte de esta investigación.

A pesar de eso, en trabajos previos se ha visto que las mezclas puzolánicas producen materiales con un fraguado más lento que el cemento Portland común y mayor resistencia a los agentes químicos (Rodríguez Camacho, Dámazo Juárez, & Uribe Afif, 2000), además de que se caracterizan por desarrollar menos calor al fraguar, tener menor expansión álcali-agregado (Valdez Tamez, et al., 2008) y ser más impermeables que las mezclas tradicionales (López & Castro, 2010), disminuyendo así la exudación y segregación del material (Stulz & Mukerji, 1993).

Por otro lado, existen dos tipos de puzolanas: las artificiales y naturales. Las primeras son generalmente subproductos creados como resultado de diversos procesos industriales y agrícolas; siendo las más importantes la arcilla cocida, cenizas de combustible pulverizado (pfa), ceniza de cascara de arroz (RHA) y escoria de altos hornos granulada y molida (ggbf) (Stulz & Mukerji, 1993). Sin embargo, las puzolanas artificiales son de menor acceso y estabilidad estructural que las naturales, por lo que se decidió usar estas últimas.

En cuanto a las puzolanas naturales, históricamente estos son los materiales a partir de los cuales se ha producido el cemento, siendo los romanos los que desarrollaron el cemento romano o puzolánico (Vidaud, 2013). Las puzolanas naturales pueden ser de origen mineral u orgánico. Las primeras son producto de la transformación del polvo y “cenizas” volcánicas aptas para sufrir acciones endógenas, tales como la zeolitización y la cementación; Las cuales, tras recibir una continua acción atmosférica (también conocida como meteorización), se convierten en rocas volcánicas. Siendo este proceso determinante en la estructura final de estos materiales (Salazar J., 2018).

Por otro lado, las puzolanas naturales de origen orgánico son rocas sedimentarias abundantes en sílice hidratada y formadas en yacimientos de origen submarino por acumulación de esqueletos y caparazones silíceos de animales o plantas, siendo la diatomita su principal representante (Borgel Espinoza, 2007).

Ahora bien, para la definición de las puzolanas a emplear en este trabajo, se investigaron primero muchos tipos de puzolanas, ya sea que necesiten o no recibir un tratamiento previo antes de poder ser utilizadas, tales como las cenizas volantes, los vidrios volcánicos, las tierras diatomáceas y algunas arcillas o esquistos.

Tras esa investigación, se seleccionaron la diatomita, perlita y zeolita para incluirlos en este trabajo: la primera fue elegida por su gran porosidad que le permite almacenar gran cantidad de agua; la perlita es un material ligero y extremadamente poroso y la cual ya se ha empleado previamente como base para la generación de concreto ultraligeros y aislantes (Termolita, 2017); Por último, la zeolita se seleccionó por su capacidad de hidratación reversible¹⁸ (Bosch, 2003). Asimismo, en la tabla 6 se aprecian sus coeficientes de conductividad y el de otros de los principales aislantes térmicos y materiales constructivos.

Claro está, materiales tales como la lana mineral o el poliestireno expandido, poseen un menor coeficiente de conductividad térmica que las puzolanas, pero se decidió trabajar con ellas considerando que los materiales industriales requieren un mayor proceso para su fabricación y que en cambio, las puzolanas seleccionadas no requieren prácticamente ningún proceso previo antes de ser usadas en obra, produciendo así un menor impacto ambiental.

Por otro lado, las puzolanas seleccionadas ya han sido utilizadas con anterioridad como parte de otras investigaciones. Por ejemplo, la zeolita y la perlita se han utilizado para generar elementos estructurales aligerados (Lorrio Domene, 2011), (Borbón Almada, et al., 2018); mientras que la diatomita se ha usado para mejorar las capacidades estructurales de las bloqueras artesanales (Urday Ochoa, 2015), y para mejorar la resistencia a compresión

¹⁸ Característica que básicamente consiste en que este material tiende adsorber humedad del ambiente y a liberarla cuando es expuesto a temperaturas elevadas (Bosch, 2003).

del concreto (Chacón Sánchez & Astete García, 2015). Sin embargo, en ninguno de estos fue estudiado el comportamiento térmico del material.

Tabla 6.- Coeficientes de conductividad térmica de materiales constructivos y puzolanas naturales. Información tomada con fines didácticos del trabajo fin de Master para Arquitecta técnica de la Lic. Lorrío Domene, Laura, 2011

Materiales	Valor λ (W/m K)
Ladrillo	1.15
Vidrio	1.05
Diatomita	0.057
Lana mineral	0.040
Madera	0.144
Fibra de vidrio	0.05
Poliestireno expandido (20 kg/m ³)	0.034
Zeolita (clinoptilolita)	0.065
Arcilla expandida	0.098
Perlita	0.046
Hormigón	1.25

Una vez definidas las puzolanas a utilizar, se realizó una investigación para describir las características los tres materiales, así como para establecer los yacimientos de donde se obtendrían las muestras para este trabajo.

3.2.2.1.1.- Diatomita

a) Definición y origen geológico

Es una roca porosa silícica de origen biogénico, conformada por gránulos finos de sílice amorfa, pero principalmente por los esqueletos fosilizados de las frústulas de las diatomeas¹⁹ (Borgel Espinoza, 2007); debido al ambiente acuático en los que se desarrollan estos organismos, los bancos de diatomita se forman por acumulación sedimentaria, en lo que fueron antiguos cuerpos de agua prehistóricos.

¹⁹ Algas unicelulares que viven en colonias y tienen cada una un esqueleto silícico formado por dos valvas que se unen entre sí, los cuales varían su forma y tamaño de 10 a 150 μm , de acuerdo a las diferentes especies.

b) Usos y características

La diatomita es un material que posee excelentes propiedades tales como: inercia química, alta porosidad, baja densidad, gran capacidad de absorber líquidos, entre otras; y que se puede encontrar en tres presentaciones, con diferentes tamaños de partículas:

- **Natural:** Se refiere a la utilización del material tal y como es extraído de los bancos.
- **Calcinado:** Se obtiene por calcinación directa sin uso de químicos.
- **Calcinado con fundente:** Se obtiene agregando un compuesto químico antes del proceso de calcinación para generar partículas de mayor tamaño y más permeables.

Con respecto a los usos de este material, se debe mencionar que el 60% de la producción mundial de diatomita es empleada como filtro (especialmente en bebidas como cerveza y vino) y el resto se usa principalmente como agente de carga en diferentes industrias, sobre todo en la producción de pintura y plástico. Por último, en la tabla 7, se encuentran todos los otros usos que se le dan a este mineral.

Tabla 7.- Usos de la diatomita a nivel mundial. Tabla tomada con fines educativos de la tesis de licenciatura que para ingeniero Minero Metalúrgico de Borgel Espinoza Iván.

Propiedades Físicas	Uso	Rama Industrial
- Alta porosidad	- Filtro-ayuda	- Elaboración de productos químicos - Industria de licores, vinos y cervezas - Industria farmacéutica - Purificación de agua
- Alta área superficial	- Cargador y aditivos	- Industria de pinturas - Industria de papel - Industria de plástico
- Permeabilidad	- Materiales aislantes	- Producción de aislantes térmicos
- Alta capacidad de absorción	- Elementos absorbentes	- Manejo y almacenamiento de productos químicos peligrosos, como ácido fosfórico - Absorbente de nitroglicerina
- Baja conductividad	- Fuente de sílice	- Industria de fibra de vidrio
- Baja abrasividad	- Abrasivos	- Materiales destinados al pulido de automóviles y metales preciosos - Pastas dentífricas
- Intercambio iónico	- Análisis cromatográfico	- Industria cromatográfica

c) Funcionamiento térmico

La diatomita es un vidrio volcánico que dependiendo del uso que se le dará, se le puede proporcionar o no un tratamiento de calcinación, pero en general su funcionamiento térmico es bastante similar en ambos casos: debido a la forma de las frústulas de las algas diatomeas que lo conforman (Figura 16), este material contiene muchos “espacios

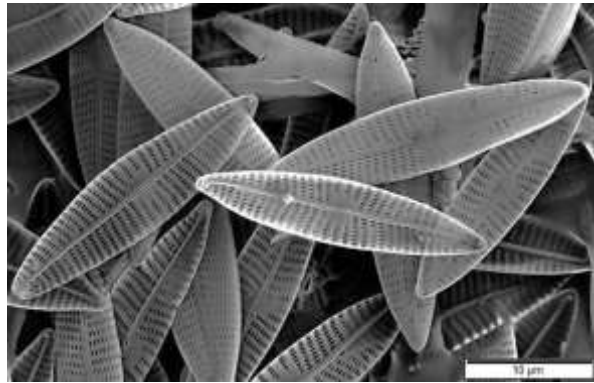


Figura 16.- Fotografía de algas diatomeas. Imagen tomada con fines educativos de la página [www. Cienciatoday.com](http://www.Cienciatoday.com)

vacíos” dentro del mismo. Estos espacios, son precisamente los que causan que la diatomita presente un bajo coeficiente de conducción térmica (Chacón Sánchez & Astete García, 2015).

d) Caracterización del yacimiento

El yacimiento de diatomita que se utilizó en este trabajo se encuentra en el ejido de Loma Larga, Hidalgo; en las coordenadas 20° 16' 45" N y 98° 26' 00" O, con una altitud de 2140 msnm y a 52 km de la ciudad de Pachuca de Soto y 23 km de Tulancingo de Bravo. Este banco fue previamente caracterizado por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo como parte de la tesis de licenciatura de Borgel Espinoza Iván.

El primer procedimiento al que se sometió la diatomita, fue la espectrometría de absorción atómica para establecer la composición química del material y cuyos resultados aparecen en la tabla 8, con los cuales se demostró que el material del yacimiento es de buena calidad y cerca de los estándares establecidos para las diatomitas comerciales, en los que el contenido de SiO₂ varía del 83 al 92% (Borgel Espinoza, 2007).

Asimismo, se encontró que el promedio del tamaño de poro de las tres presentaciones de la diatomita analizada son los que aparecen en la tabla 9 y se observó que el tamaño de los poros de este material, aumenta al recibir los tratamientos de calor.

Tabla 8.- Composición química de la diatomita natural, calcinada y calcinada con fundente del lugar analizado. Tabla tomada con fines educativos de la tesis de licenciatura que para ingeniero Minero Metalúrgico de Borgel Espinoza Iván.

Proceso Térmico	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	Na ₂ O (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	TiO ₂ (%)	XE (%)
Natural	76.00	11.63	2.41	0.61	0.85	1.95	1.79	0.50	4.26
Calcinada	81.50	12.00	2.10	0.45	0.10	1.44	0.48	0.00	1.93
Calcinada con fundente	82.00	11.15	1.96	2.82	0.13	1.44	0.48	0.00	0.02

XE = elementos no determinados

Tabla 9.- Tamaño promedio de poro en cada una de las presentaciones de la diatomita del lugar estudiado. Tabla tomada con fines educativos de la tesis de licenciatura que para ingeniero Minero Metalúrgico de Borgel Espinoza Iván.

Material	Tamaño promedio de poro (μm)
Natural	1.5
Calcinada	3.0
Calcinada con fundente	7.0

Finalmente, con base en los resultados obtenidos durante esta caracterización, se establecieron los usos más recomendados para la diatomita presente en este yacimiento, siendo los que aparecen a continuación:

Tabla 10.- Usos industriales propuestos para la diatomita del ejido de Loma Larga, Hidalgo. Tabla tomada con fines educativos de la tesis de licenciatura que para ingeniero Minero Metalúrgico de Borgel Espinoza Iván.

Tipo de diatomita	Color	Densidad		Ph	Tamaño promedio del poro (μ)	Usos industriales propuestos
		Seca	Húmeda			
Natural	gris	7.0	16.0	7	1.5	- Filtros de aceites vegetales - Filtros para aceites comestibles
Calcinada	rosa	8.0	18.0	7	3.0	- Filtro para cerveza y vino
Calcinada con fundente	blanco	9.0	18.0	10	7.0	- Solventes de lavado en seco - Químicos - Azúcar

3.2.2.1.2.- Perlita

a) Definición y origen geológico

La perlita es un vidrio volcánico amorfo con 5% de agua en su composición, lo que le permite expandirse hasta 20 veces con respecto a su volumen original cuando es sometido a temperaturas de entre 760 y 1100°C²⁰, adquiriendo así una baja densidad, textura porosa, liviana y capacidades aislantes (Termolita, 2017).

La composición química de la perlita corresponde al de la roca riolítica o andesita con la que se produjo, aunque su constitución típica es la siguiente (Martínez, y otros, 2006):

- 70-75% dióxido de silicio: SiO₂
- 12-15% óxido de aluminio: Al₂O₃
- 3-4% óxido de sodio: Na₂O
- 3-5% óxido de potasio: K₂O
- 0,5-2,0% óxido de hierro: Fe₂O₃
- 0,2-0,7% óxido de magnesio: MgO
- 0,5-1,5% óxido de calcio: CaO
- 3-5% agua pérdida en el horno (agua químicamente combinada)

Geológicamente, la perlita se forma por la hidratación de derrames volcánicos y acumulaciones piroclásticas. Básicamente son lavas volcánicas enfriadas y con una estructura cristalina (Figura 17) (Fideicomiso para el fomento minero, 1997).



Figura 17.- Origen de los yacimientos de perlita. Imagen obtenida con fines didácticos del estudio de Mercado, bloque no. 3 del Fideicomiso de Fomento Minero.

En el corazón de los yacimientos de perlita se encuentran cristales parcialmente desvitrificados y un interior félsico (los cuales pueden convertirse en perlita con la incorporación de agua); mientras que en las capas exteriores son comunes pumitas,

²⁰ Esto debido a que cuando el contenido de agua se evapora, el calor suaviza o ablanda los granos inflándose de adentro hacia afuera, hasta que ahueca las partículas celulares (Fideicomiso para el fomento minero, 1997)

obsidianas compactadas y tefras volcánicas que, gracias a la hidratación, se convierten en las diferentes variedades de perlita (Figura 17) (Fideicomiso para el fomento minero, 1997):

- **Clásica:** Es el tipo de perlita más densa y mejor desarrollada. Se caracteriza por tener una textura suave y lustrosa. Se presenta en vesículas espaciales, pero fácilmente colapsables, con nódulos remanentes de obsidiana muy abundantes.
- **Granular:** Se distingue por su apariencia sacaroidea, brillo sedoso, fracturas en bloque y escasos nódulos de obsidiana.
- **Pumicita o pómez:** Comúnmente aparece en el exterior de los depósitos. Presenta características filamentosas y vesículas abiertas con muy escasos remanentes de obsidiana.

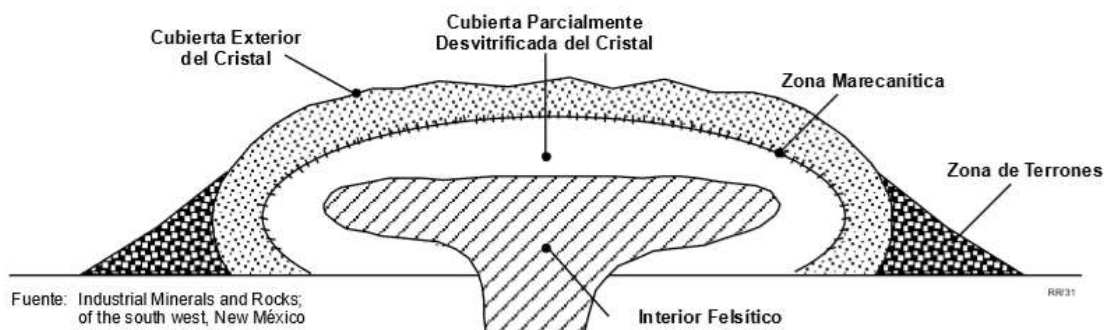


Figura 18.- Estratigrafía de un depósito de perlita. Imagen obtenida con fines didácticos del estudio de Mercado, bloque no. 3 del Fideicomiso de Fomento Minero.

Por último, dado su origen ígneo, la perlita es un material que se encuentra distribuido de forma natural por todo el planeta, pero se destacan Estados Unidos, Grecia y Japón como productores a nivel mundial. En México existen yacimientos de perlita por todo el país, pero en especial en los estados de Durango e Hidalgo.

b) Usos y características

La perlita es un material inerte y altamente poroso que tiene un pH neutro; no es inflamable y su color varía desde el blanco aperlado hasta el gris oscuro con brillo lustroso, lo que reduce su temperatura y aumenta su capacidad de reflexión de luz. Su densidad baja tras sufrir el proceso de calentamiento ya que al estar “cruda” es de +/- de 1100 kg/cm³, mientras que ya expandida, se encuentra entre 30 y 150 kg/cm³ (Termolita, 2017).

La perlita se utiliza comercialmente sobre todo como sustituto de las arenas en la mezcla de los sustratos para plantas, ya que este material absorbe muy poca agua, pero tiene la capacidad de retenerla en su superficie (Martínez, y otros, 2006).

Dentro de la industria, a la perlita se le asignan cuatro principales usos: agregado, transportador y acondicionador, aislante y filtrante. Por lo que es utilizada en los siguientes procesos:

- En el aislamiento térmico de edificaciones
- En la creación de impermeabilizantes y cielorrasos.
- Cultivos hidropónicos y por su neutralidad, es ideal como sustrato de propagación de todo tipo de plantas.
- Material en fundiciones y aislamiento criogénico
- Aditivo liviano en morteros ignífugos

Sin embargo, la producción y consumo de perlita ha disminuido mucho porque la industria de la jardinería ha comenzado a utilizar sustitutos de este material, tales como la vermiculita, diatomita o lutita (Fideicomiso para el Fomento Minero, 1997).

c) Funcionamiento térmico

La perlita es un material inerte de baja conductividad térmica y acústica, cuyas propiedades físicas dependen del material empleado en su producción (Fideicomiso para el Fomento Minero, 1997). Sus capacidades térmicas se explican en la Figura 19.

a) Caracterización del yacimiento

Se utilizará la perlita extraída del yacimiento ubicado en la comunidad de “El banco”, municipio de San Agustín Metzquititlan, Estado de Hidalgo. Este material fue caracterizado previamente por la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo para la empresa “Pastas cerámicas especializadas S.P.R.” y toda esa información permite entender su comportamiento. El primer paso de la caracterización, consistió en determinar la composición química de la perlita y los resultados son los que aparecen en la tabla 11.

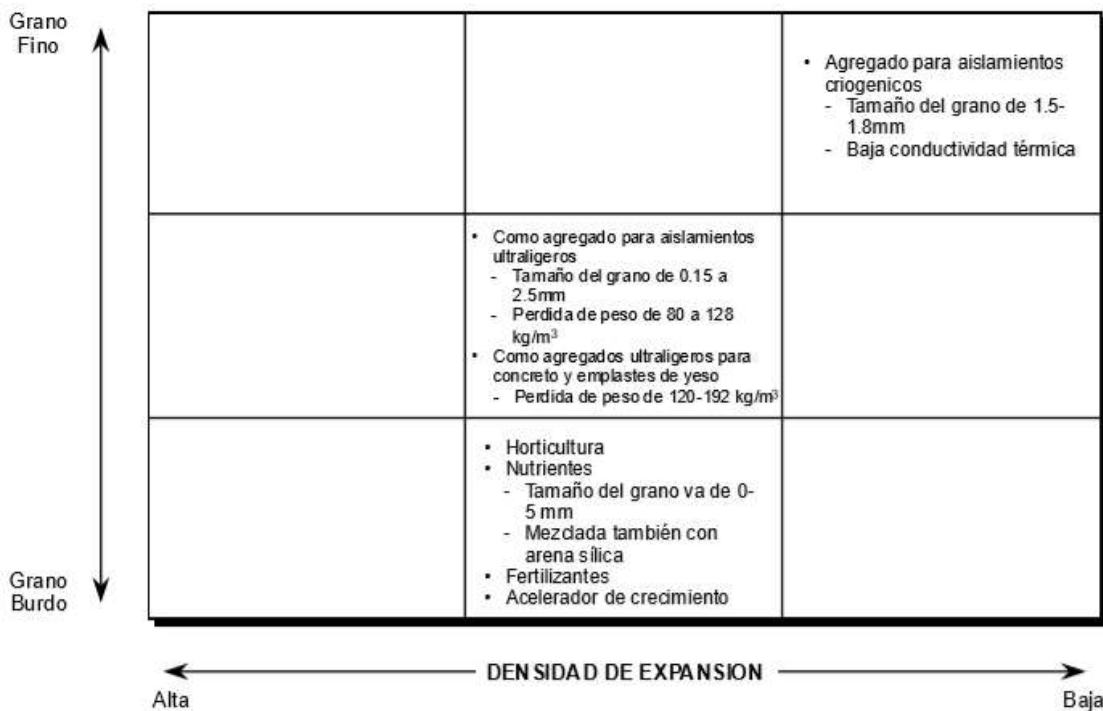


Figura 19.- Uso de la perlita como aislamiento térmico. Diagrama tomado con fines didácticos del estudio de Mercado, bloque no. 3 del Fideicomiso de Fomento minero.

Tabla 11.-Composición química de la perlita de “El banco” de San Agustín Metzquititlan, en el estado de Hidalgo. Tabla tomada con fines didácticos del reporte de resultados de las pruebas de inflado y densidad de mineral de perlita, realizada para la empresa “Pastas cerámicas especializadas S.P.R.” por la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo.

Compuestos	Porcentaje	Compuestos	Porcentaje
SiO ₂	72.50	MgO	0.20
Al ₂ O ₃	13.40	Na ₂ O	4.60
Fe ₂ O ₃	0.80	K ₂ O	4.40
TiO ₂	0.06	H ₂ O+	3.00
CaO	0.89		

Luego se calentaron 150 g de perlita (la cual había sido tamizada previamente por malla no. 200) hasta los 850°C, observándose que a los 670°C se presentó el inflado de los primeros granos. El cambio de densidad que se generó en el material por el proceso de calentamiento es el que se aprecia en la tabla 12.

Una vez expandida toda perlita calentada, se tamizo nuevamente para establecer cuáles fueron los cambios de volumetría que se generaron en el material por este proceso. El resumen de estos resultados aparece en la tabla 13. Finalmente, se realizó también un

resumen de todos los resultados obtenidos en las pruebas de caracterización de este material y que aparece en la tabla 14.

Tabla 12.- Diferencia de densidad entre la perlita cruda y la expandida. Tabla tomada con fines didácticos del reporte de resultados de las pruebas de inflado y densidad de mineral de perlita, realizada para la empresa “Pastas cerámicas especializadas S.P.R.” por la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo.

Material	Densidad (kg/m ³)
Perlita cruda	1.6780
Perlita expandida	0.4655

Tabla 13.-Porcentaje de perlita expandida retenida en diferentes tamaños de mallas. Tabla tomada con fines didácticos del reporte de resultados de las pruebas de inflado y densidad de mineral de perlita, realizada para la empresa “Pastas cerámicas especializadas S.P.R.” por la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo.

Tamaño de malla	Porcentaje retenido (%)	Tamaño de malla	Porcentaje retenido (%)
20	43.10	70	1.40
30	21.03	140	1.10
50	32.15	-140	1.20

Tabla 14.-Tabla de resultados obtenidos de la perlita expandida con respecto a la “cruda” u original del material obtenido de “El banco” de San Agustín Metzquititlan, en el estado de Hidalgo. Tabla tomada con fines didácticos del reporte de resultados de las pruebas de inflado y densidad de mineral de perlita, realizada para la empresa “Pastas cerámicas especializadas S.P.R.” por la Universidad Autónoma del estado de Hidalgo.

Descripción	Porcentaje (%)
Peso resultante del material expandido en relación al peso inicial crudo	0.93
Rendimiento volumétrico de perlita cruda	27.74
Volumen por tonelada de perlita cruda (m ³ /ton)	0.56
Relación de volumen expandido a volumen crudo	75.45

3.2.2.1.3.- Zeolita: clinoptilolita

a) Definición y origen geológico

Las zeolitas son aluminosilicatos hidratados que conforman una familia de minerales altamente cristalina que al deshidratarse desarrollan una estructura porosa con diámetros de poro de 3 a 10 angstroms (Bosch & Schifter, La zeolita, una piedra que hierve, 1997). Sus

poros o cavidades son ocupadas por iones grandes y moléculas de agua con gran libertad de movimiento (Petranovskii & Hernández, 2012).

El número de átomos de oxígeno (z) presentes dentro de las zeolitas, guardan una relación directa de dos con respecto a la suma de los átomos de silicio y aluminio. Asimismo, cuando se forman las zeolitas, cada átomo de aluminio que sustituye isomórficamente a uno de silicio, proporciona una carga negativa, la cual se neutraliza con las cargas positivas que aportan los cationes (Gómez Martín, 2001).

En este proceso se forman las cavidades o canales de la zeolita de distinto tamaño (donde se alojan cationes y moléculas de agua) que están conectados entre sí por medio de aberturas o poros de dimensiones constantes, dotando al material de una baja densidad, en comparación con otros tectosilictos como el cuarzo o los feldespatos (Centro de Investigación Regional del pacifico Sur, 2004).

El armazón básico de las zeolitas se encuentra conformado por tetraedros que conforman estructuras tridimensionales (Centro de Investigación Regional del pacifico Sur, 2004), (Figura 20). Estos tetraedros (unidades básicas de las zeolitas) se enlazan por sus átomos de oxígeno originando estructuras poliédricas (poliedros simples) que constituyen estructuras secundarias. A su vez, estos poliedros se unen formando estructuras terciarias más complejas (Figura 21). Las diferentes formas de coordinación de los tetraedros, así como la relación silicio/aluminio originan los distintos tipos de zeolitas (Gómez Martín, 2001).

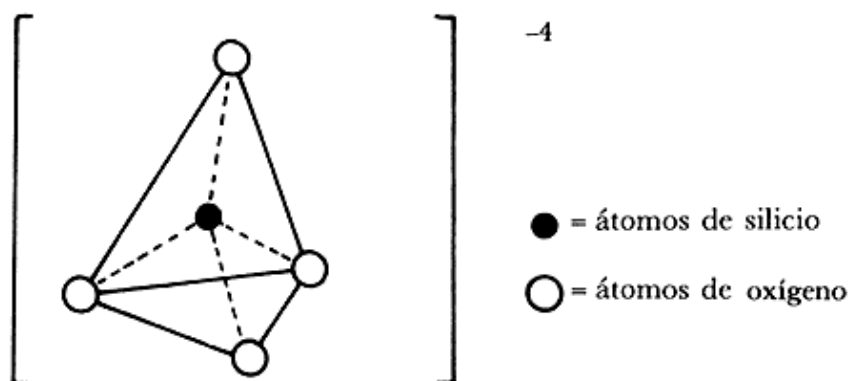


Figura 20.- Unidad Estructural tetraédrica integrada por un átomo de silicio en el centro y cuatro de oxígeno que constituyen el "ion orto silicato". Imagen obtenida con fines didácticos del libro "zeolita, una piedra que hierve" de los autores Bosh, P. y Schifter I.

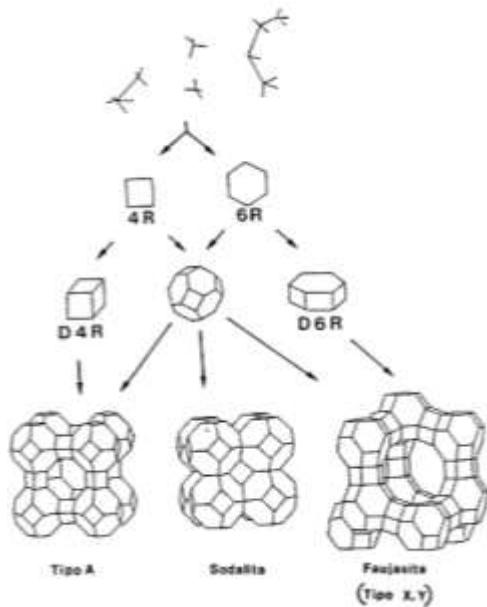


Figura 21 .- Ejemplo del proceso de formación de la estructura de una zeolita. Imagen obtenida con fines didácticos de la tesis doctoral de José María Gómez Martín titulada: "síntesis, caracterización y aplicaciones catalíticas de zeolitas básicas" de la pág. 19

Por otro lado, las zeolitas son un grupo mineral muy abundante, donde todos sus miembros presentan características estructurales comunes, aunque se pueden presentar características físicas y químicas únicas aun dentro de zeolitas con composición química similar (Kumar Varoon, 2011).

Hasta el momento se han descubierto 40 tipos de zeolitas naturales (Loera Serna, 2010), sin embargo, desde los años 60 se comenzaron a sintetizar diferentes tipos de zeolitas para usos industriales, logrando que para el 2001 ya estuvieran reportadas 133 tipos de zeolitas artificiales (Baerlocher, Meier, & Olson, 2001).

Por ello, y con base a las características comunes en sus estructuras, las zeolitas se clasifican en 7 grupos (Jímenez Cedillo, 2004), siendo uno de ellos el de la heulandita, donde se incluye a la clinoptilolita, la cual es el tipo de zeolita que se usará en este trabajo.

Se decidió utilizar este tipo de zeolita porque al investigar el material presente en los yacimientos de zeolitas registrados a nivel nacional, se determinó que la clinoptilolita es la que existe en mayor cantidad (Figura 22).

En cuanto a su origen geológico, las zeolitas son un grupo mineral que se presenta en los tres tipos de rocas: ígneas, sedimentaria y metamórficas (Servicio Geológico Mexicano, 2017). La síntesis de las zeolitas de origen volcánico se genera siguiendo lo establecido en la Figura 23, requiriendo para ello, la presencia de un magma rico en sílice y con gran rendimiento de feldespatos. En condiciones particulares, los feldespatos generan arcillas, zeolitas y a la larga, a alúminas como la bauxita (Bosch & Schifter, 1997). La "zeolitización" también se origina mediante una caída súbita de la temperatura en una lava basáltica (Bosch, La zeolita, una piedra que hierve, 2003).

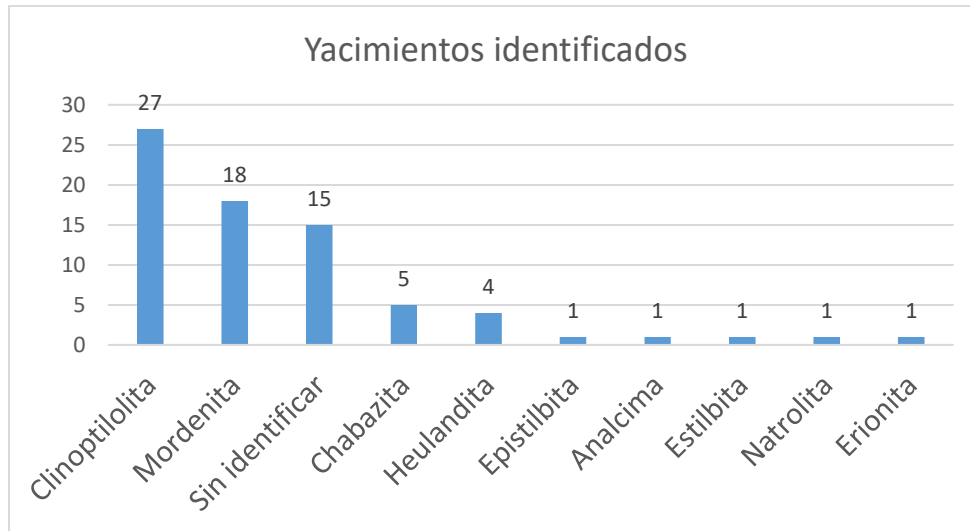


Figura 22.- Grafica de la cantidad de yacimientos localizados por el tipo de zeolita a nivel nacional. Figura de elaboración propia.

En cuanto a las zeolitas con origen sedimentario, estas se caracterizan por ser conjuntos de cristales de tamaños muy reducidos y a menudo con caras cristalinas mal desarrolladas (Bosch, La zeolita, una piedra que hierve, 2003); siendo la clinoptilolita el tipo de zeolita sedimentaria la más abundante.

Con respecto a las zeolitas generadas metamórficamente, estas pueden derivarse de múltiples materiales, siendo los vidrios volcánicos, los minerales aluminosilicados o incluso otras zeolitas, los principales precursores de estos materiales (Tabla 15),

(Mendoza Córdoba, Et. Al, 2014).

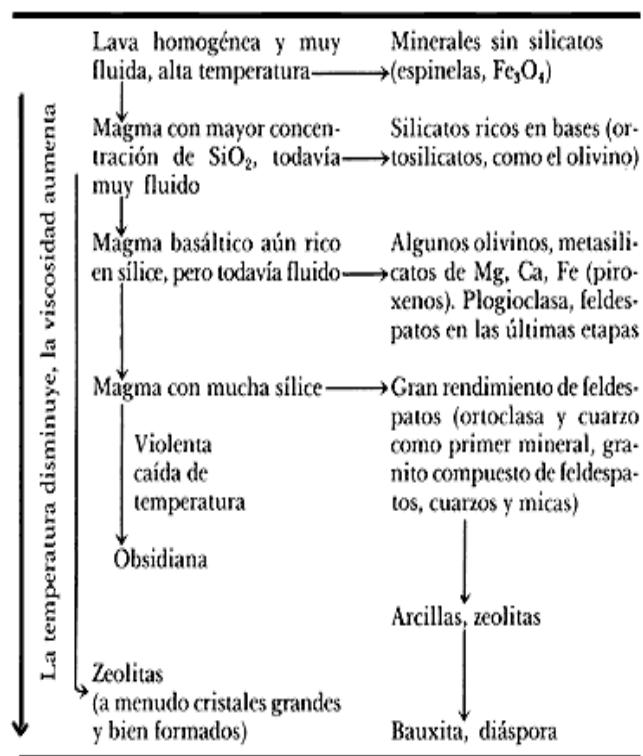


Figura 23.- Formación de zeolitas en la naturaleza. Imagen obtenida con fines educativos del libro "zeolita, una piedra que hierve" de los autores: Bosch P. y Schifter I.

Tabla 15.- Productos típicos de reemplazo por alteración hidrotermal. Figura obtenida con fines didácticos del documento titulado "alteración" y publicado por la universidad de chile, pág.3

Mineral Original	Productos de reemplazo hidrotermal
Vidrio volcánico	Zeolitas (Ej. Mordenita, laumontita), cristobalita, cuarzo, calcita, arcillas (Ej. Montmorillonita)
Magnetita/ ilmenita / titanomagnetita	Pirita, leucoxeno, esfena, pirrotina, hematita
Piroxena/ anfibola/ olivino/ calcita/ biotita	Clorita, illita, cuarzo, pirita, anhidrita
Plagioclasa cálcica, biotita	Calcita, albita, adularia, wairakita, cuarzo, anhidrita, clorita, illita, caolín, montmorillonita, epidota
Ortoclasa/ sanidina	Adularia

Con base en su localización y composición mineralógica, existen 3 tipos de depósitos de zeolita que son de interés comercial por su contenido: (Mumpton, 1976)

- a) Depósitos formados de material volcánico en sistemas "cerrados" de lagos salinos.
- b) Depósitos formados en sistemas "abiertos" en lagos de agua dulce o subterránea.
- c) Depósitos formados en ambientes marinos.

En específico, la clinoptilolita suele encontrarse de forma común en las tobas, como producto de desvitrificación de cristales volcánicos silíceos; así como también rellenando cavidades en rocas de tipo riolíticas, andesíticas o basálticas (Jímenez Cedillo, 2004).

b) Usos y características

Las dos principales características que distinguen a las zeolitas son su capacidad de intercambio iónico y su hidratación reversible. Lo primero se refiere a que estos minerales pueden desprenderse de iones propios y captar iones disueltos en el agua, siendo por ello idóneos para utilizarse como medios filtrantes.

Por otro lado, la hidratación reversible se genera a causa de la capacidad de adsorción que posee este material, lo cual no es lo mismo que la absorción, ya que la adsorción es la formación de una película líquida o gaseosa en la superficie de un sólido o líquido, pero sin ingresar al interior del material (Facultad de Química, UNAM, 2015).

Para entender mejor el concepto de adsorción, pensemos en la superficie de un material expuesto a una atmósfera gaseosa. Si bien en su interior todos los enlaces están

satisfechos, por definición el perímetro del material representa una discontinuidad de esos enlaces y son estos enlaces incompletos, los que tienden a reaccionar de forma espontánea con los materiales de su alrededor (Facultad de Química, UNAM, 2015).

Como se puede ver, la adsorción es fenómeno muy general, sin embargo, solo ciertos sólidos exhiben suficiente especificidad y capacidad de adsorción para ser usados industrialmente (García Rojas, Villanueva Díaz, Campos Medina, & Velázquez Rodríguez, 2012); ya que la industria, prefiere utilizar sólidos altamente porosos con áreas internas muy grandes por unidad de volumen y donde las energías de enlace son debido básicamente a las fuerzas de Van der Waals²¹, tal como es el caso de las zeolitas (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, 1999).

Por ello, cuando las zeolitas son expuestas al medio ambiente, estas tenderán a adsorber moléculas de agua de manera espontánea. Sin embargo, ya que el agua tiene un papel químico nulo dentro de estos minerales²², se puede eliminar sin afectar la estructura del material, lo que sucede cuando se incrementa la temperatura ambiental y se rompen los enlaces sencillos que los unen (proceso similar al de una esponja) (Petranovskii & Hernández, 2012): lo cual es conocido como desorción.

Es por la tendencia de las zeolitas de adsorber moléculas de agua del ambiente, que se dice que estos materiales son hidrofílicos; sin embargo, si se les somete a un proceso de desaluminización, también se les puede convertir en hidrofóbicas.

Con respecto a la capacidad de adsorción, existen 5 tipos de isothermas de adsorción²³, las cuales sirven para indicar el comportamiento esperado en un adsorbente, siendo la que se ha registrado para la clinoptilolita en trabajos previos, la del tipo mono molecular o de Langmuir (Figura 24) (Alvarado Ibarra, Terán Samaniego, Vargas Hernández, & Bautista Olivas, 2020) (Aguilar Armenta & Patiño Iglesias, 2002).

²¹ Nombre de las fuerzas atractivas o repulsivas que se generan entre moléculas (o entre partes de la misma) debido a los enlaces que se genera entre iones con otros o con moléculas neutras (áreacencias.com, 2013).

²² Es decir, que no tiene ningún papel dentro de la estabilidad de la red cristalina de las zeolitas.

²³ Es la relación general entre la cantidad de gas adsorbido por un sólido a temperatura constante como función de la presión del gas.

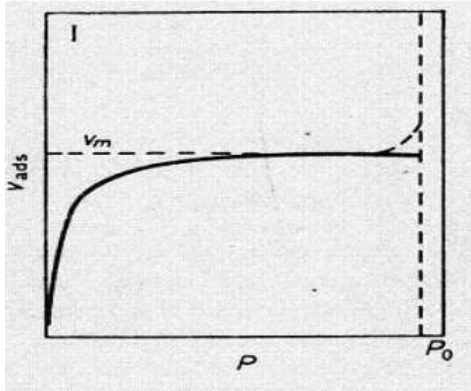


Figura 24.- Isotherma de adsorción de Langmuir.
 Imagen obtenida con fines didácticos de la página de la facultad de química, UNAM

Las zeolitas también poseen una baja densidad y propiedades como: estabilidad en su estructura cristalina, volumen vacío, intercambio catiónico, diámetro de canales regular y comportamiento catalítico (Centro de Investigación Regional del pacifico Sur, 2004).

Con respecto a las características físicas de la clinoptilolita, este título agrupa a 3 minerales: clinoptilolita-Ca, clinoptilolita-K y clinoptilolita-Na. Este mineral tiene un lustre vitreo y se le encuentra en color blanco o rojizo. Por último, su estructura es la que aparece en la figura 25,

presentando tres diferentes tamaños de poro, los cuales se pueden apreciar en la tabla 16.

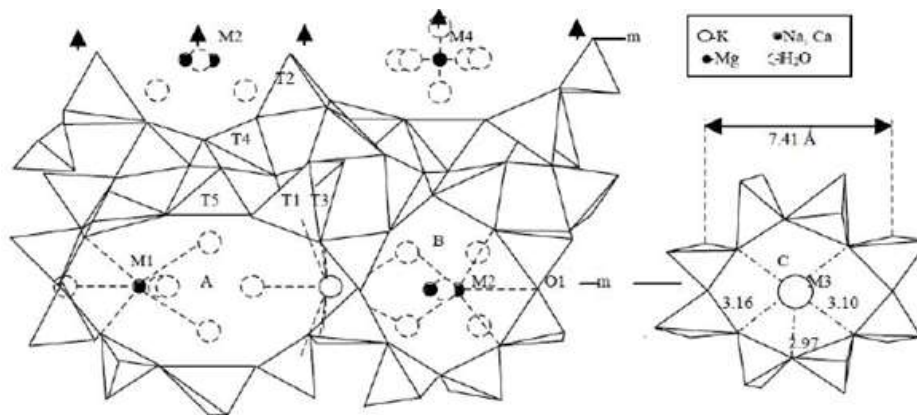


Figura 25.- Estructura de la clinoptilolita. Imagen obtenida con fines didácticos del artículo llamado “Caracterización de la clinoptilolita natural y la modificada con Ca” (Montes Luna, y otros, 2015).

En cuanto a los usos que se les dan a las zeolitas dentro de la industria, el interés por ellas se despertó a finales de los años 50, cuando se descubrió su potencial para ser usadas como filtros moleculares y se encontraron depósitos sedimentarios de estos minerales (Centro de Investigación Regional del pacifico Sur, 2004).

Tabla 16.- Tabla de clasificación de tamaños de poro de zeolitas naturales mexicanas. Tabla de elaboración propia.

Tipo de Zeolita	No. De tipos de poro	Medidas de poro (Å)	Cantidad de miembros	clasificación de poro
Clinoptilolita	1	7.2 x 4.4	10	Medio
	2	5.5 x 4.0	8	Pequeño
	3	4.7 x 4.1	8	Pequeño
Mordenita	1	7.0 x 6.5	12	Grande
	2	5.7 x 2.6	8	Pequeño
Chabasita	1	3.8 x 3.8	8	Pequeño
Heulandita	1	7.5 x 3.1	10	Medio
	2	4.6 x 3.6	8	Pequeño
	3	4.7 x 2.8	8	Pequeño
Epistilbita	1	5.6 x 3.4	10	Medio
	2	6.2 x 2.6	10	Medio
	3	4.5 x 3.7	8	Pequeño
Analcima	1	4.2 x 1.6	8	Pequeño

Lo anterior, sumado a todas las capacidades naturales de las zeolitas, ha causado que los usos de estos minerales sean muy amplios y variados, siendo los principales los siguientes:

1. Como piedra de cantera ligera: siendo de uso especialmente conveniente en zonas sísmicas como en Oaxaca, en donde en su catedral se percibe una diferencia entre la temperatura interna del edificio y la exterior (Figura 25) (Loera Serna, 2010).
2. Creación de elementos arquitectónicos aligerados y sustituto de un porcentaje de cementante en las mezclas del concreto, aumentando así su sustentabilidad.
3. Sustitutos de fosfatos en la creación de detergentes (Bosch, 2003).
4. Eliminación de contaminantes (como el flúor) y tratamiento de agua.
5. Creación de desecantes (Loera Serna, 2010).
6. Tamices Moleculares usados sobre todo en procesos como la refinación del petróleo (Bosch & Schifter, La zeolita, una piedra que hierve, 1997)
7. Suplemento alimenticio dentro de la dieta de los animales (pollos, peces, etc.)
8. Mejoradores de suelo (Centro de Investigación Regional del pacifico Sur, 2004)
9. Tratamiento de malos olores y adsorción de gases invernadero(Loera Serna, 2010).
10. Medicamentos para la regeneración de tejidos (Petranovskii & Hernández, 2012).



Figura 26.- Fotografía de la fachada de la catedral de la Ciudad de Oaxaca. Imagen obtenida con fines didácticos del trabajo “zeolita-una roca útil” de Vitali Pretranovskii y Miguel Ángel Hernández

A pesar de todos sus usos, en México el potencial de las zeolitas no se aprovecha al máximo, porque su manejo requiere de tecnología para procesarlas. En países en desarrollo como el nuestro, la explotación de estos minerales se enfoca más a usos agrícolas y depende fuertemente de la existencia de grandes depósitos de zeolita, con potencial para una explotación minera rentable (Centro de Investigación Regional del pacífico Sur, 2004).

c) Comportamiento térmico

Las zeolitas poseen la capacidad de hidratación reversible y su coeficiente de conductividad térmica es 0.065 W/m K (Bosch & Schifter, 1997), por lo que los edificios que incluyen zeolitas en sus componentes arquitectónicos, poseen grandes capacidades de aislamiento térmico (Centro de Investigación Regional del pacífico Sur, 2004).

En cuanto a investigaciones que aborden específicamente el funcionamiento térmico de las zeolitas, existe uno que se tomó en cuenta: en este se sustituyó 20% del cemento por zeolitas, logrando con ello una reducción del índice de transmitancia térmica de entre el 5 al 10% con respecto a su índice inicial (Andrada, y otros, 2012).

d) Caracterización química y física del yacimiento

Para la selección de este yacimiento, se estudió previamente un banco de material piroclástico ubicado en el municipio de Santiago de Anaya, Hidalgo. Este material se

caracterizó, no solo para tratar de utilizarlo como parte de este trabajo, sino también con el objetivo de generar información que pudiera resultar útil para esa comunidad y con vías a fomentar la explotación minera social.

Sin embargo, tras realizarle varias pruebas al material, los resultados indicaron que no contaba con el porcentaje suficiente de zeolitas en su composición como para ser empleado en la elaboración de las muestras para este trabajo, sin embargo, la información detallada obtenida del mismo, se puede apreciar en el apartado de “otras aportaciones”.

En cuanto a la zeolita que se utilizó para el desarrollo de los morteros, finalmente se utilizaron las extraídas de un yacimiento ubicado en el ejido El Zapote, municipio de Huayacocotla, Veracruz; el cual fue caracterizado previamente (Delgadillo-García, y otros, 2017) y cuyos resultados se resumen a continuación:

Al material se le hicieron las pruebas de estabilidad térmica y difracción de rayos X. La primera reveló la presencia de zeolita como fase mayoritaria dentro del yacimiento y las demás especies mineralógicas identificadas que coexisten dentro del mismo son:

- Heulandita-Ca
- Sanidina
- Cristobalita baja
- Ilita

Por otro lado, los resultados de la prueba de estabilidad térmica se usaron como base para la elaboración de los difractogramas que aparecen en la Figura 60. Con base en esto, se concluyó que el material del yacimiento es del tipo clinoptilolita y cuenta con un índice de estabilidad térmica que le permite resistir temperaturas entre 600 y 800 °C antes de su colapso. Asimismo, se determinó que esta zeolita, de acuerdo con su clasificación de estabilidad térmica, cuenta con dos características:

- Estabilidad de su estructura a 450°C, presentando una reducción en su estructura de 450 a 650°C.
- Deshidratación reversible continua con pequeños cambios en la concentración de la estructura. Su estructura se colapsa a 750°C.

3.2.2.1. Porcentaje de sustitución del volumen del agregado fino por puzolana natural

Después de definir las puzolanas y yacimiento a utilizar en este trabajo, es importante mencionar que siguiendo el método de igualación marcado por el método científico²⁴, estos materiales se usaran en una granulometría similar a la de la arena de río para así obtener características físicas similares en todas las mezclas (tanto la de control como las experimentales), además de garantizar con ello, la comparabilidad entre los resultados de las mismas.

Por otro lado, se decidió realizar la sustitución de un volumen de agregado fino por uno similar de alguna de las puzolanas seleccionadas, ya que, dentro de la mezcla del mortero, el material con mayor presencia es el agregado fino, por lo que es la opción con mayor potencial de impacto en el comportamiento térmico y estructural del mortero.

Por último, con base en estudios previos (Vera Barrios & Ledezma Elizondo, 2018) (Raggiotti, Positieri, Locati, Murra, & Marfil, 2015), se decidió crear unidades experimentales que tuvieran el 25 y el 50% de sustitución respectivamente, creando así dos mezclas de mortero por cada una de las puzolanas seleccionadas (Figura 27).

3.2.3. Variables dependientes

Esta clase de variables, son aquellas que responden ante el efecto de las variables independientes y, sobre todo, son las que se toman en cuenta para determinar los resultados de los experimentos. Las variables dependientes que se consideraron fueron:

1. El coeficiente de conducción térmica
2. La resistencia a la compresión

Existen varios factores para determinar el comportamiento térmico de los distintos materiales, sin embargo, la principal propiedad para caracterizar esta clase de comportamiento, es el coeficiente de conductividad térmica (λ), ya que con base en él se pueden calcular otros elementos, tales como la resistencia térmica.

²⁴ El método indica que todos los materiales analizados deben tener tamaños y características físicas similares.

El coeficiente de conductividad térmica se define como la relación entre el calor transportado a través de un cuerpo, por unidad de tiempo y el gradiente de temperatura (W/m.K) (Rivero Nogueiras, 2016).

Por su parte, la resistencia a compresión se define como la cantidad de carga que resiste un material (en este caso el mortero) antes de colapsar bajo una presión constante. Se seleccionó esta prueba porque las mezclas cementantes trabajan de forma natural bajo esta clase de esfuerzos (Rivera L., 2009). Además de que este factor se determina de una manera relativamente sencilla a través del ensayo de compresión.

Posteriormente, con base en los resultados obtenidos en estas dos pruebas, se procederá a seleccionar la muestra con el mejor rendimiento entre su coeficiente de conducción térmica y su resistencia a la compresión.

3.3. Diseño de las unidades experimentales y del experimento

Tras investigar las definiciones y características de los diversos diseños experimentales²⁵, se decidió que el diseño más adecuado para este trabajo era uno del tipo factorial. Este tipo de experimentos se definen como aquellos en los que se estudian dos o más factores y donde las unidades experimentales son todas las posibles combinaciones de los factores elegidos. Por ello, la denominación de estos ensayos se hace por el número de variables independientes y niveles de cada una de ellas (Ramon S., 2001).

En el caso de este trabajo, se utilizó un modelo de 3 x 2 niveles (Figura 27), lo que se reflejó en la creación de seis unidades experimentales y marcó el procedimiento a seguir: Realizar la mezcla control (o testigo) y las 6 mezclas de mortero experimentales, para luego medir la conductividad térmica y resistencia a compresión de todas ellas, estableciendo por comparativa de resultados, la mezcla con el mejor rendimiento. De este modo, el diseño final del experimento que se utilizó fue el que se aprecia en la Figura 28.

²⁵ Tipos estudiados: Posprueba y grupo de control, Con preprueba-posprueba y grupo de control, cuatro grupos de control de Salomón, Series cronológicas múltiples y diseño factorial.

Por último, se debe mencionar que, cumpliendo con lo establecido por el método científico, a cada una de las unidades experimentales se le efectuaron tres repeticiones de cada una de las pruebas que se les realizaron.



Figura 27.- Esquema del experimento factorial aplicado en este trabajo. Imagen de realización propia.

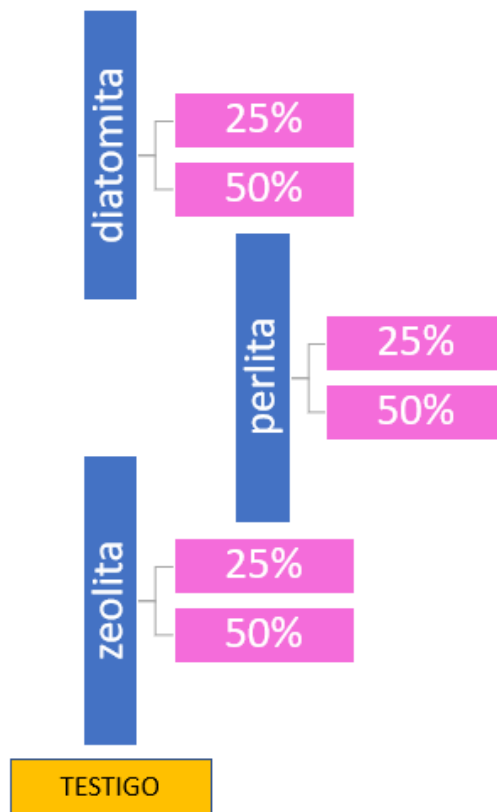


Figura 28.- Diseño de la primera etapa de experimentación. Esquema de elaboración propia.

Capítulo IV

Segunda parte experimental

En este capítulo se explicará el desarrollo de los experimentos previos que se efectuaron, así como los métodos y procedimientos de las pruebas programadas.

4.1. Experimentos previos para mezcla control

4.1.1. Cementante

Para determinar el cemento a usar en el desarrollo de las muestras, se compararon dos cementos de la marca Cemex: el CPO-30 RS y el CPO-30 B, de los cuales ya se describieron sus características en el apartado 3.1.2.2.

Para lograrlo, se generaron 3 placas de 15 x 7.5 x 1.5 cm de cada uno de los cementos estudiados²⁶, a los cuales se les adiciono zeolita²⁷ en mezcla (Figura 29). La composición a detalle de las muestras elaboradas, se aprecia en la tabla 17.

Tabla 17.- Tabla de composición de muestras prueba para cámara de intemperismo UV. Tabla de elaboración propia.

Nomenclatura	Proporción	Cantidad (%)			
		Cemento	Arena	Zeolita	Fibra de vidrio
M RS-1, 2 Y 3	1:3	0.24	0.53	0.18	0.05
M B-1, 2 Y 3	1:3	0.24	0.53	0.18	0.05

Una vez estuvieron secas las muestras, estas se ingresaron en una cámara UV de intemperismo acelerado (Accelerated weathering Tester) Modelo LU-0819 QUV/Spray, ubicada en el instituto de materiales de la UNAM; la cual se programó para que cada mes dentro de la misma equivalga más o menos a un año a la intemperie en la ciudad de México.

4.1.2. Fibra de vidrio

En el caso de la fibra de vidrio, se recogieron bibliográficamente los porcentajes recomendados para aplicar en las mezclas de mortero. De este modo se realizaron 4 juegos

²⁶ El proceso para generar estas muestras se puede apreciar a detalle en el anexo 4

²⁷ Se usaron porque de las 3 puzolanas estudiadas, estas son las que generan la mayor cantidad de sulfatos.

de muestras de 15 x 7.5 x 1.5 cm, con composiciones similares²⁸, salvo la variación del porcentaje de fibra de vidrio agregado a cada una, el cual fue del 2 hasta el 10% del porcentaje del volumen de la mezcla.



Muestras M B 1, 2 y 3



Muestras M RS 1, 2 y 3

Figura 29.- Muestras elaboradas para la comparación del tiempo de vida de los dos tipos de cemento. Fotografías de elaboración propia.

4.1.3. Aserrín

Durante el diseño del mortero de esta investigación, se pensó en incluir aserrín como una constante secundaria dentro de la mezcla control, el cual tendría un papel como un segundo elemento aislante al interior de la mezcla. Por ello se elaboraron muestras con diversos porcentajes de aserrín para apreciar los efectos que este material causaba en el mortero, creándose así muestras con tres porcentajes diferentes de presencia de aserrín, en los que la arena era sustituida en un 15, 25 y 35%.

De este modo, y siguiendo los procedimientos marcados por la NOM-018-ENER-2011, se produjeron tres piezas de cada una de estas mezclas de mortero²⁹ así como un cuarto juego sin agregado, es decir, la mezcla control para esta prueba (Tabla 18).

Posteriormente, todas estas muestras de mortero fueron sometidas a las pruebas de placa caliente aislada y ensayo de compresión, obteniendo así los resultados que se incluyeron en el apartado correspondiente.

²⁸ Un tanto de cemento por tres de arena y 1:0.70 de proporción de agua.

²⁹ El proceso para generar estas muestras se puede apreciar a detalle en el anexo 5.

Tabla 18.- Composición de las mezclas con aserrín. Tabla de elaboración propia.

Nomenclatura	Proporción	Cantidad (%)			
		Cemento	Arena	Aserrín	Fibra de vidrio
M 0 -1,2 Y 3	1:3	0.24	0.71	0.00	0.05
MA 15 -1,2 Y 3	1:3	0.24	0.60	0.11	0.05
MA 25 -1,2 Y 3	1:3	0.24	0.53	0.18	0.05
MA 35 -1,2 Y 3	1:3	0.24	0.46	0.25	0.05

4.2. Caracterización de las puzolanas naturales utilizadas en las unidades experimentales

Para caracterizar a las puzolanas naturales con las que se elaboraron las unidades experimentales de este trabajo, se les realizaron las siguientes pruebas, empleando en ellas, muestras con granulometría arena, similar a la del agregado fino utilizado:

4.2.1. Color

Una de las características físicas con la que más fácilmente se identifican los distintos materiales, es el color. Para caracterizarlo, uno de los métodos más empleados es la escala Munsell, la cual consiste en una serie de libros que contienen diferentes graduaciones de colores especializadas en diversos rubros (plantas, suelos, etc.), en los que se aprecian los diferentes colores que pueden poseer los materiales y el código asignado para cada uno.

Para esta caracterización en particular, se utilizó la “Munsell Rock Color Book”, y se determinó que el código de color presente en cada puzolana.

4.2.2. Granulometría

Para realizar esta prueba, se pasaron 100 g de cada uno de los minerales caracterizados (diatomita, perlita y zeolita) por los tamices de número 1, 4, 6, 10, 18, 20, 25 y 200) a fin de establecer la cantidad de material que era retenido en cada uno. Con ello se determinó el porcentaje de gravas, arenas y limos presentes en cada una de las muestras. Los resultados de este examen se muestran en el apartado de resultados.

4.2.3. Microscopio Estereoscópico

Utilizando este aparato se tomaron fotos de la diatomita, la perlita y la zeolita a diversas escalas (1x, 2x, 3x, 4x y 5x) con el fin de establecer la apariencia de cada uno de estos materiales previo a utilizarlos como componentes dentro de las muestras de mortero.

Esto se realizó con el objetivo de tratar de localizar estos materiales posteriormente, cuando ya se encontrarán integradas dentro del mortero, a fin de establecer si su estructura física se ve afectada durante el proceso de elaboración de la mezcla.

4.2.4. pH

En esta prueba, se siguió el procedimiento sugerido en el Manual de elaboración de muestras (López de Juambelz, Sainz Arellano, Hernández Pérez, Zabicky López, & Coca Olgún, 2015). De acuerdo con esto, se colocó dentro de una probeta de 10 ml, 2 gramos del material a analizar y 2 ml de agua. Luego se dejaba reposar por unos minutos antes de introducir una tira reactiva al agua de la mezcla, verificando después el color alcanzado por el papel y determinando, con base en la escala de color presente en el empaque de las tiras reactivas, el nivel de pH presente en la muestra analizada.

4.3.5. Fluorescencia de Rayos X

Se realizó esta prueba utilizando un espectrofotómetro de marca BRUKER, Modelo S1 TITAN, con el fin de determinar la composición química presente en las puzolanas analizadas. Después de realizar tres repeticiones de las mediciones tomadas de cada una de las muestras (utilizando para examinarlas la programación de "GEOCHEM" del aparato) se promediaron los datos obtenidos, generando así los resultados finales de esta prueba.

4.2.6. Porcentaje de porosidad

Esta prueba se realiza con el fin de determinar el porcentaje de porosidad que poseen los materiales analizados y el procedimiento para realizarla es el siguiente:

1. Se llena una probeta de 100 ml con el material analizado hasta la marca de 100 ml, cuidando de no golpear la probeta para no asentar el mineral analizado.

2. Con ayuda de una pipeta, se introduce agua a la probeta hasta que el agua también alcanza el nivel de los 100 ml.
3. Se registra la cantidad de agua necesaria para llenar la probeta y con este dato, se calculan los resultados finales usando la siguiente formula; registrando posteriormente los productos obtenidos, los cuales se muestran en el apartado correspondiente.

$$n = (Vv / Vt) \times 100$$

Donde:

Vv = Volumen ocupado por espacios vacíos o cantidad de agua ingresada

Vt = Volumen total del material usado

4.2.7. Porcentaje de humedad

Para calcular esta característica, fue necesario realizar el siguiente procedimiento (López de Juambelz, Sainz Arellano, Hernández Pérez, Zabicky López, & Coca Olguín, 2015):

1. Pesar una charola de aluminio (u otro material) en una balanza y anotar su peso
2. Agregar a la charola 20 g del material a analizar (diatomita, perlita o zeolita)
3. Colocar la charola con la muestra dentro de la mufla a una temperatura de 110°C de 12 a 24 horas aproximadamente, hasta que está alcance un peso constante
4. Después de sacar la charola de la mufla y dejarla enfriar en el desecador, se debe pesar la muestra con todo y charola. Posteriormente se calcularon los resultados utilizando la siguiente formula:

$$\% \text{ humedad de suelo} = [(Pi - Pf) / Pi] * 100$$

Donde:

Pi = Peso inicial: charola + suelo + humedad

Pf = Peso final: charola + suelo

El proceso de esta prueba se repitió tres veces para cada uno de las puzolanas estudiadas, promediando posteriormente los resultados obtenidos y generando así los datos que aparecen en el capítulo de resultados.

4.3. Pruebas del experimento

A continuación, se procederá a describir todos los procesos que se seguirán para realizar las pruebas propuestas para la parte central del experimento, las cuales servirán como base para seleccionar la mezcla de mortero con los mejores rendimientos térmico-estructurales.

4.3.1. Prueba de plato caliente aislada

Uno de los factores que tiene mayor impacto para comprender el comportamiento térmico de un material, es la conductividad térmica (λ), ya que este factor se refiere a la capacidad de un material para transferir energía térmica a través de él, además con este valor se calculan otros elementos, tales como el coeficiente de resistencia térmica (R).

Por ello se realizó la prueba de placa caliente aislada, ya que esta sirve para establecer el coeficiente de conductividad de un material. Para realizarla se tomó en cuenta lo establecido en la NOM-018-ENER-2011 y se siguió el método descrito en la NMX-C-189-ONNCE-2010.

Para efectuar esta prueba, se deben utilizar tres placas de 30 x 30 cm,³⁰ del mismo material, con características físicas similares y con un grosor máximo de 2.5 cm. Asimismo, también se requiere el uso de un instrumento llamado “aparato de placa caliente”, el cual consiste básicamente en dos placas, una caliente y otra fría, conectadas por un medidor de flujo de calor. El funcionamiento de este aparato se basa en la ley de Fourier (Figura 30), la cual dice (Connor, N., 2020):

“Si un material en forma de lámina plana, se encuentra en contacto con dos focos térmicos a diferente temperatura t_c (caliente) y t_f (frío) y ha alcanzado el régimen estacionario, la cantidad de calor por unidad de tiempo y superficie que atraviesa la placa será proporcional a la diferencia de temperaturas e inversamente proporcional a su espesor, dicha constante de proporcionalidad se denomina conductividad térmica, k , del material”.

³⁰ La elaboración de esta clase muestras se describe detalladamente en el Anexo 5.

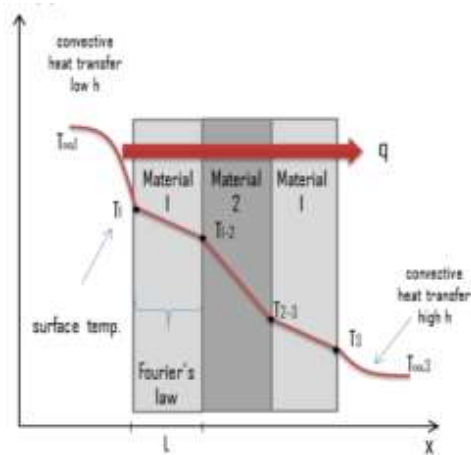


Figura 30.- Representación del funcionamiento del aparato de placa caliente. Figura extraída con fines educativos de la página www.thermal-engineering.org



Figura 31.- Aparato con el que se realizó la prueba de placa caliente aislada en el instituto de materiales de la UNAM. Fotografía de realización propia.

Para el desarrollo de esta prueba, por turnos se ingresa cada placa al aparato de placa caliente, el cual comienza a generar calor de manera uniforme sobre una de las dos caras de la placa, hasta lograr que $1^{\circ} C^{31}$ atraviese el material y sea registrado en la otra placa inerte que mira directamente hacia la cara contraria de la placa (Figura 31).

Por último, los resultados de esta prueba se establecen en W/mK , ya que esta prueba establece el tiempo que tarda el material analizado en dejar pasar un $1^{\circ}C$ a través de él. Por último, se debe mencionar que el tiempo de duración de esta prueba es variado, ya cada medición se puede tardar en realizarse desde algunas horas, hasta dos días.

4.3.2. Ensayo de compresión

Esta prueba se realizó siguiendo lo establecido por la NMX-C-159-ONNCCE-2004. Para realizarlo se utilizan moldes cilíndricos, cuyas medidas de perímetro y altura, deben seguir una relación de 1:2. En el caso de este trabajo se utilizaron moldes con 10 centímetros de diámetro por 20 de altura y el proceso fotográfico se aprecia en el anexo 6.

El llenado de los cilindros se debe hacer en tres etapas (fondo del molde, intermedio y parte superior), procurando que las tres se realicen con el mismo espesor. En cada una de

³¹ O $1^{\circ}K$ dependiendo del sistema métrico que se utilice para realizar la medición de esta prueba.

estas etapas debe realizarse un proceso penetraciones y asentamiento, usando una varilla y un martillo de goma, antes de colocar la siguiente capa de concreto.

El tamaño de la varilla a usar, así como la cantidad de penetraciones a realizar se hicieron tomando en cuenta lo que se aprecia en la tabla 19. Las penetraciones de las varillas debieron hacerse, asegurándose que la varilla penetrara a la capa inferior del concreto y una vez completada la serie de penetraciones por nivel, se compactaba cada capa golpeando ligeramente con el mazo de goma las paredes externas del cilindro a fin de tratar de eliminar todas las oquedades que deja la varilla (IMCYC, 2004).

Tabla 19.- Diámetro de la varilla y número de penetraciones empleados para moldear especímenes de prueba. Tabla extraída con fines educativos del documento elaborado por el IMCYC titulado “el concreto en la obra: problemas, causas y soluciones” en la pág. 71

Diametro del cilindro en cm	Diametro de la varilla mm	Número de penetraciones por capa
Cilindros verticales		
Entre 5 y menos de 15	10	25
15	16	25
20	16	50
25	16	75
Cilindros horizontales (para flujo plastico)		
15	16	50 en total, 25 de cada lado del eje
Vigas y prismas:		
Area superficial superior del especimen en cm²		
1600 menos	10	25
Entre 165 y 310	10	Uno por cada 7 cm ² de superficie
320 a mas	16	Uno por cada
	10 cm ² de superficie	

Una vez que se terminaba de llenar el molde cilíndrico, se terminó la superficie superior enrasándola con un enrasador de metal. Para evitar la evaporación de agua en los especímenes de concreto sin fraguar, se cubrían inmediatamente después de terminarlos con una película plástica. Por último, se procuró hacer el descimbrado de los moldes entre 20 y 48 horas después de su elaboración, tal y como se marca en la NMX-C-159-ONNCCE-2004.

Con respecto al curado de los especímenes, se procuró hacerlo en contenedores de agua saturada al 2% con cal, cuidando que el agua cubriera completamente a las muestras y que no hubiera ni fuertes variaciones de temperatura ni caídas de agua constantes que pudieran afectar el proceso de curado.

Los cilindros se curaron hasta que tuvieron la edad para ser utilizados para ser empleados dentro del ensayo de compresión, lo que se realizó a los 7, 14 y 28 días, probando tres cilindros por vez. Para este ensayo, los cilindros se sacaban una hora antes del ensayo del agua para permitir que el cemento perdiera un poco de humedad antes de la prueba y, de ser necesario, se cabeceaban utilizando el método descrito en la NMX-C-109-ONNCCE.

Los ensayos de compresión se realizaron en el laboratorio 4 de la FES Aragón (Figura 32), en una máquina universal de ensayos a compresión que sometía a los cilindros durante un tiempo constante, a una carga uniforme, a fin de establecer cuál era la resistencia máxima de estos. Finalmente, los resultados finales de este ensayo, se obtienen promediando los resultados obtenidos en cada tanda de tres cilindros, utilizando la siguiente fórmula:

$$F'c = P / A$$

Donde:

P = Carga máxima resistida por los cilindros antes de fallar

A = Área del espécimen usado en el ensayo

Para poder comprender mejor los resultados que se obtendrán de esta prueba, es necesario comparar estos datos con las resistencias mínimas establecidas en las diferentes normas correspondientes: a nivel nacional la norma N-CMT-2-01-004/02, emitida por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), considera a los morteros elaborados con la proporción 1:3 como del tipo I, de los que se espera una resistencia mínima de 127 kg/cm². Asimismo, la NMX-C-486-ONNCCE-2014, considera que un mortero estructural tipo



Figura 32.- Elaboración del ensayo de compresión de cilindros de concreto en el laboratorio 4 de FES Aragón. Fotografía de elaboración propia.

l debería tener una resistencia a la compresión de entre 125 kg/cm² y 180 kg/cm² en promedio. Por último, a nivel internacional, las normas ASTM C-270 y ASTM C-780 divide a los morteros con dicha proporción en M, S o N, teniendo diferentes resistencias mínimas esperadas para cada uno de estos tipos. Toda esta información se resume en la tabla 20.

Tabla 20.- Resistencias esperadas y usos para los morteros con proporción cemento-arena 1:3. Tabla de elaborada con base en la información de las normas: NMX-C-486-ONNCE-2014, N-CMT-2-01-004/02, ASTM C-270 y ASTM C-780.

Tipo	Resistencia mínima MPa (kg/cm ²)	Usos
I	12.5 (127)	Estructural, acabados, pegado de piezas
M	17.5 (178)	Pisos, mortero para impermeabilización
S	12.5 (127)	Pegado de ladrillos y baldosas, relleno de celdas de mampostería
N	7.5 (76)	Mampostería en general y paños interiores

4.4. Interpretación de los resultados

Después de determinar la mezcla de mortero con el mejor rendimiento, se procederá a analizar como los resultados obtenidos impactan en el posible uso del material. Para lograrlo, se calculará la resistencia térmica (R) del material seleccionado con base en los resultados obtenidos en la prueba de placa caliente aislada.

La resistencia térmica se obtiene al dividir el espesor en metros de un material por su coeficiente de conducción térmica. Por ello, este factor sigue la siguiente lógica: “Entre mayor sea el grosor del material, mayor será la resistencia. Entre mayor sea la resistencia, mejor será el aislamiento” (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2017). En el caso de las paredes o cerramientos, para conocer su resistencia térmica total, se suman las diferentes resistencias parciales de cada material que lo conforme, añadiendo a la suma, la resistencia superficial (aproximadamente 0,2). Por último, el cálculo de la resistencia térmica de un material, se realiza utilizando la siguiente formula:

$$R = e / \lambda$$

Donde:

R = Coeficiente de resistencia térmica

λ = Coeficiente de conducción

e = Espesor de la pieza en metros

4.5. Caracterización de la mezcla de mortero seleccionada

Una vez que fue seleccionada la mezcla con mejor rendimiento entre su comportamiento térmico y estructural, se decidió realizarle una segunda serie de pruebas para poder establecer si el material presentaba comportamientos hidrofílicos. Para lograrlo, se decidió comparar el mortero seleccionado con una mezcla control sin presencia de puzolanas, mediante las siguientes pruebas:

4.5.1. El comportamiento del material con respecto a la humedad

Se consideró necesario establecer este punto, ya que, con base a nuestra hipótesis y el comportamiento esperado del material, la humedad es el factor clave que permitirá establecer la diferencia de comportamiento que distinguen al mortero elaborado en este trabajo, así como si presenta o no características hidrofílicas. Para lograrlo, se utilizaron estos tres exámenes:

1. Pruebas de absorción de humedad de ambos materiales.
2. Muestreos de humedad interna a distintas horas del día.
3. Prueba de intemperismo avanzado.

Para determinar la capacidad de absorción de los dos morteros que se compararon, se siguió lo establecido en la NMX-C-037-ONNCE-2005 y la NMX-C-037-1986, las cuales marcan que existen dos procedimientos para determinar la absorción de humedad de un material: la prueba de absorción máxima inicial y la de absorción total a 24 horas.

Estas pruebas se realizan usando juegos de 5 piezas de características similares, las cuales previamente deben haber alcanzado un peso constante. Este término se refiere a un proceso de secado que consiste en que las muestras deben secarse en un horno a una temperatura de entre 100 y 110 °C, siendo sacadas periódicamente y dejadas en un desecador antes de volver a pesarlas para luego volver a introducirlas al horno (Figura 33).

Dicho procedimiento se debe repetir hasta que en dos pesadas sucesivas la diferencia en masa no sea mayor de 0.2% de la masa de las piezas. Una vez completado

todo el proceso de desecado, las muestras se dejaban reposar por seis horas antes de realizar las pruebas.

Por otro lado, el procedimiento para realizar la prueba de absorción máxima inicial es el siguiente: en un recipiente rectangular, se deben colocar soportes hechos de barras de metal inoxidable de una altura aproximada de 6 mm y cuya sección transversal pueden ser de distintas formas, tales como triangulares o rectangulares, pero la que se usó en nuestro caso fue semicircular.



Figura 33.- Muestras descansando en el desecador durante el procedimiento para alcanzar su peso constante. Fotografía de elaboración propia.

Luego se debe llenar el recipiente con agua potable de modo que el nivel del agua se encuentre a 3 o 3.5 mm arriba del nivel superior de los apoyos de metal (Figura 34) y después, se pone en contacto una de las caras del espécimen analizado, procurando colocar una cara de acabado liso contra el agua, cuidando que esta quedara 5mm por debajo del nivel del agua por 10 minutos y contando el tiempo desde que la muestra tocó el agua.



Figura 34.- Prueba de absorción máxima inicial. Fotografía de elaboración propia.

Pasado el tiempo requerido, se retira el espécimen y se remueve el exceso de agua utilizando un trapo húmedo antes de volver a pesarlo, finalizando así esta prueba. Para determinar el porcentaje absorbido por las muestras, se utiliza la siguiente formula:

$$A = ((P1 - P0) / P0) * 100$$

Donde:

A = Absorción en porcentaje (%)

P0 = Es la masa seca del espécimen en kg

P1 =Masa saturada y superficialmente seca en kg

Con la prueba anterior también se puede determinar la absorción máxima inicial en gramos/minutos, lo que permite calcular la velocidad de absorción de un material. Para lo cual se utiliza la siguiente formula:

$$Cb = 100 M / S \sqrt{t} = 100 (P1 - P0) / S \sqrt{10}$$

Donde:

Cb = Absorción máxima inicial en g/min

M = Es el peso del agua absorbido por la muestra durante la prueba, en gramos

S = Es la superficie de la cara sumergida en cm²

t = Tiempo de inmersión en minutos

Por otro lado, para el procedimiento para realizar la prueba de absorción total a 24 horas, después de haber alcanzado el peso constante de todas las piezas que se utilizarán en el ensayo, estas se amarran utilizando un hilo plástico (Figura 35) y luego se sumergen dentro de un recipiente, procurando que ninguna de ellas toque alguno de los lados o el fondo del mismo.



Figura 35.- Preparación de las muestras para prueba de absorción total a 24 horas. Fotografía de elaboración propia.



Figura 36.- Exposición de las piezas a la intemperie para determinar su humedad interna. Fotografía de elaboración propia.

El primer pesado de las muestras se realiza cuando estas se encuentran sumergidas en el agua y luego, pasadas 24 horas, las mismas se retiran del recipiente y se secan superficialmente utilizando un paño húmedo, para pesarlas nuevamente y concluyendo así la prueba. De este modo, los resultados de la misma se establecen utilizando la siguiente formula:

$$A = ((M_{sss} - M_s) / (M_{sss} / P_a)) * 1000$$

Donde:

A = El volumen de agua absorbida referido al volumen aparente del espécimen en dm³/m³

M_s = Es la masa seca de la muestra en kg

M_{sss} = Masa saturada y superficialmente seca en kg

P_a = Peso ahogado en kg

Ahora bien, la determinación de humedad interna de las muestras de ambos materiales, se realizó utilizando un medidor de humedad para pastas cementantes; Para hacerlo, se expusieron a la intemperie las muestras seleccionadas para la prueba (Figura 36), esto con el objetivo de establecer si se presentaban diferencias en su reacción a la humedad ambiental entre ambas mezclas.

Con respecto a la prueba de intemperismo, está se realizará para establecer si la presencia de puzolanas naturales redujo el tiempo de vida del mortero. Para esta prueba se utiliza un aparato llamado “cámara de intemperismo”, la cual se encuentra diseñada con base en normas internacionales para recrear en su interior las condiciones climáticas del medio ambiente, a fin de poder apreciar en poco tiempo, los efectos que se generan por años de exposición al medio ambiente y a sus componentes (humedad, rayos UV, etc.), causan en los distintos materiales.

En nuestro caso, para realizar la prueba se utilizará una máquina de intemperismo avanzado con rayos ultravioleta ubicada en el instituto de materiales de la UNAM y muestras de 7.5 x 15 x 1.5 cm. La cámara fue programada para que exponga durante todo el día a los morteros a una onda de radiación UV que va de 295 nm a 800 nm, logrando así que por cada mes que la muestras pasen dentro de la máquina, estas reciban los efectos equivalentes más o menos a un año en la intemperie en la Ciudad de México.

Por último, los resultados obtenidos de todas estas pruebas, se usarán para obtener las conclusiones finales del trabajo, ya que tal como se mencionó, se espera que, con base en ellos, se puedan establecer las diferencias que aparecen en el funcionamiento del mortero gracias a la presencia de las puzolanas naturales.

Capítulo V

Resultados: análisis y discusión

En este apartado se presentarán y analizarán los resultados obtenidos durante todo este trabajo, dividiendo la información de acuerdo a la etapa de la investigación en donde se obtuvieron cada uno de estos.

5.1. Resultados para materiales de la mezcla control

5.1.1. Cementante

Se dejaron 7 meses las muestras en el interior de la máquina de intemperismo (Figura 37) antes de verificar los resultados, se pudo apreciar que a pesar de la presencia la zeolita en ambas mezclas, ninguno de los dos materiales mostraba señales visibles de daño,



Figura 37.- Cámara de intemperismo UV, modelo LU-0819 QUV/Spray en la que se realizó la prueba.
Fotografía de elaboración propia.

por lo que se concluyó que el tiempo de vida de ambas mezclas era bastante similar.

Por lo tanto, considerando las diferencias de costo y asequibilidad entre los dos tipos de cementos, finalmente se decidió emplear el cemento CPO-30 B (cemento Portland Blanco) en el desarrollo de la mezcla control y el experimento en general.

5.1.2. Agregado fino

La arena de río seleccionada para ser incluida como agregado fino en la mezcla control y en las unidades experimentales, fue caracterizada con tamices de diferentes tamaños de malla, a fin de comprobar que cumpliera con los límites granulométricos establecidos en la N-CMT-2-02-002/02. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 21 y con estos se pudo corroborar que era un material viable y cumple con la norma para ser usado en la elaboración de las mezclas de mortero de esta investigación.

Tabla 21.- Resultados de la caracterización con tamices de la arena de río usada en la mezcla control. Tabla de elaboración propia.

No. de Malla	Porcentaje retenido acumulado (%)	No. de Malla	Porcentaje retenido acumulado (%)
4	0.00	20	52.39
6	11.62	25	57.83
10	25.97	200	95.90
18	46.92		

5.1.3. Fibra de vidrio

Después de preparar 4 de muestras de mortero con diferentes porcentajes de fibra de vidrio, se obtuvieron los resultados de la tabla 21, los cuales son congruentes con la información de investigaciones previas en las que se determinó que entre mayor sea la cantidad de fibra de vidrio presente en la mezcla, menor será su trabajabilidad (Huamán Quispe, 2015).

Por ello, se agregó el 5% del porcentaje del volumen de la mezcla en fibra de vidrio como refuerzo estructural a todas las mezclas, siendo este el porcentaje máximo recomendado para elementos arquitectónicos (Villamudria Rivera, 2014).

Tabla 22.- Tabla de resultados obtenidos en las muestras con variaron del porcentaje de fibra de vidrio. Tabla de elaboración propia.

Porcentaje de Fibra de vidrio (%)	Características
2 – 4	Refuerzo insuficiente.
4 – 5	Buena manejabilidad.
5 – 8	Difícil manejabilidad
8 – 10	Muy difícil manejabilidad

5.1.4. Aserrín

Tras completar el colado de todos los juegos de muestras de mortero con aserrín, estas fueron sometidas a las pruebas de placa caliente aislada y ensayo de compresión³², obteniendo así los resultados que se muestran en la tabla 23.

³² Para esta muestra se necesitó la preparación de cilindros de proceso con 7, 14 y 28 días de secado. El proceso de elaboración de estas muestras se puede apreciar a detalle en el anexo 5

Tabla 23.- Resultados obtenidos de las muestras elaboradas con agregado de aserrín. Tabla de elaboración propia.

porcentaje de aserrín agregado (%)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Coefficiente de conductividad (W/mK)
0	98.532	0.765
15	62.634	0.668
25	35.863	0.562
35	--	0.511

Dichos resultados a su vez, permitieron la creación de un gráfico de comparación (Figura 38), mismo que permitió apreciar mejor los resultados y concluir lo siguiente:

1. **En la mezcla MA 35:** se presentó tal fragilidad que, aunque se realizó la prueba de placa caliente aislada, no se realizó la prueba de compresión porque era notorio que su resistencia era muy baja y por tanto no serviría para ser usada comercialmente.
2. **En la mezcla MA 15:** Se presentó una reducción del 12.68% su conducción térmica pero el 36.43% de su resistencia a la compresión.
3. **En la mezcla MA 25:** Se generó una reducción del 26.53% de la conducción térmica pero el 63.60% de la resistencia mecánica

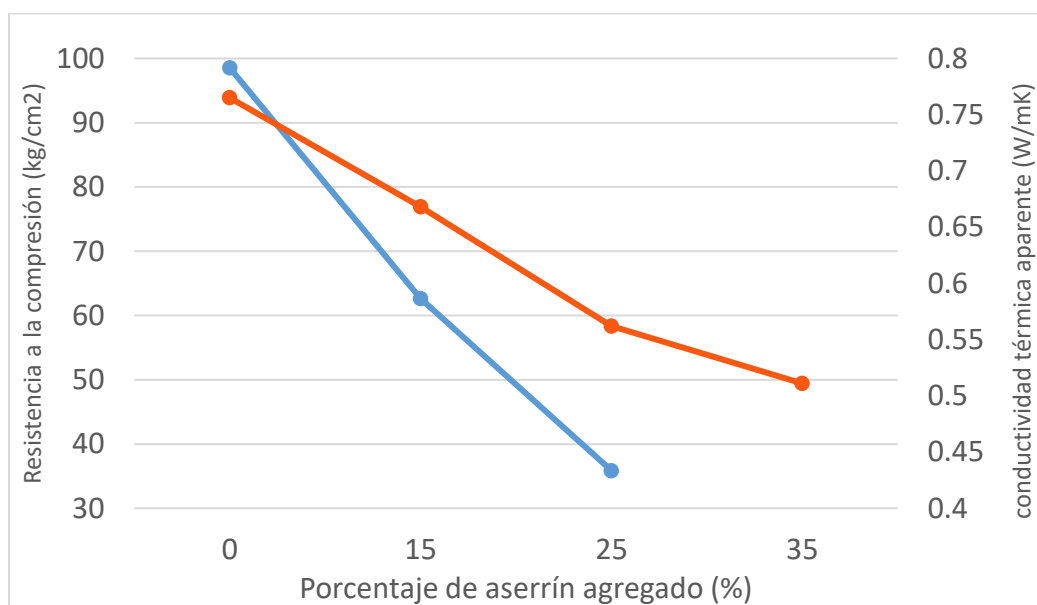


Figura 38.- Gráfico comparativo entre la conducción térmica y la resistencia a la compresión de las muestras de concreto con aserrín. Gráfico de elaboración propia.

En consecuencia, considerando el gran porcentaje de pérdida de resistencia estructural que se presentó en las muestras de mortero por la presencia del aserrín, se decidió no agregarlo como una constante dentro de las muestras del experimento central, ya que estos no cumplen ni siquiera con lo solicitado para los morteros tipo N de 76 kg/cm² (Tabla 22), sin embargo, este material podría integrarse a investigaciones posteriores que tengan diferentes objetivos a los de este trabajo.

5.2. Caracterización de las puzolanas naturales usadas en las unidades experimentales

La caracterización de las tres puzolanas elegidas para utilizarse dentro de las mezclas de mortero de las unidades experimentales se realizó con base en las siguientes pruebas, los resultados obtenidos para cada puzolana se presentan más adelante.

1. Color	5. Porcentaje de porosidad
2. Curva granulométrica	6. Fosforescencia de rayos X
3. pH	7. Porcentaje de humedad
4. Microscopio estereoscópico	

5.2.1. Color

Tabla 24.- Códigos de color de las puzolanas naturales utilizadas. Tabla de elaboración propia.

Materiales	Código de color
Diatomita	10YR 8/2 Very Pale Orange
Perlita	N9 White
Zeolita	5Y 8/1 Yellowish Gray

5.2.2 Granulometría

Una vez que se completó todo el proceso descrito en el capítulo cuatro para realizar esta prueba, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 25.- Resultados de curva granulométrica de los agregados minerales a emplear. Tabla de elaboración propia.

Materiales	Tipo de suelo
Diatomita	GRAVA
Perlita	ARENA
Zeolita	ARENA

5.2.3. Microscopio Estereoscópico

Las siguientes son fotos tomadas a las tres puzolanas estudiadas usando este método.

Diatomita:

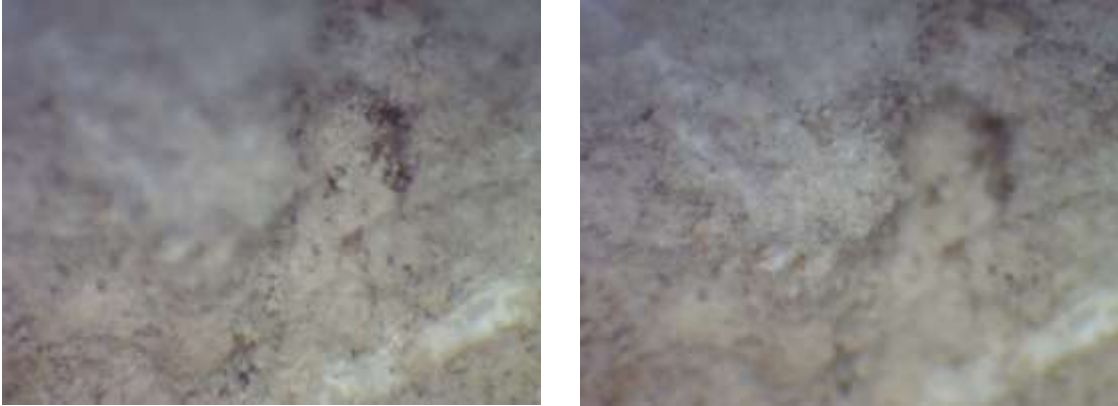


Figura 39.- Fotografías de diatomita tomadas con el microscopio estereoscópico con una lente de 4X. Imágenes de elaboración propia.

Perlita:

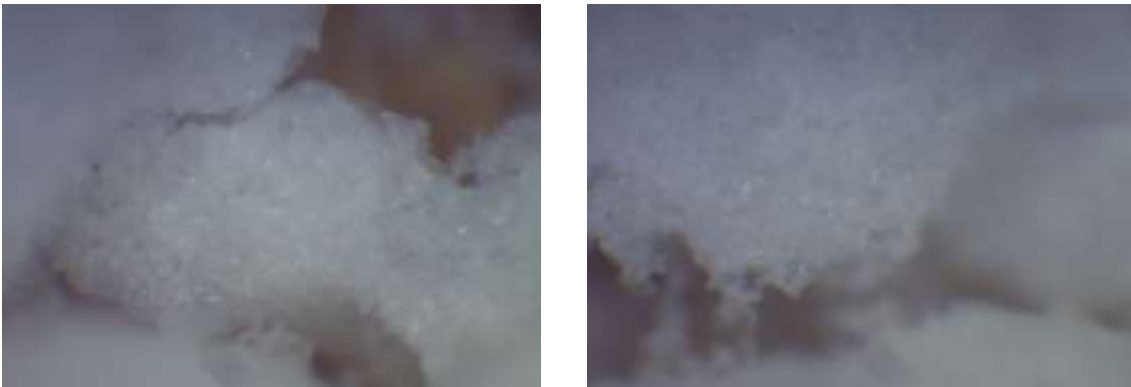


Figura 40.- Fotografías de perlita tomadas con el microscopio estereoscópico con una lente de 4X. Imágenes de elaboración propia.

Zeolita:



Figura 41.- Fotografías de perlita tomadas con el microscopio estereoscópico con una lente de 4X. Imágenes de elaboración propia.

5.2.4. pH

Tabla 26.- pH de los agregados minerales a utilizar en las muestras. Tabla de elaboración propia.

Materiales	pH
Diatomita	7
Perlita	7
Zeolita	7

5.2.5. Fluorescencia de Rayos X

En esta prueba se tomaron muestras de los tres materiales analizados y se examinaron realizando tres mediciones de cada uno de ellos para finalmente promediar los datos obtenidos y los resultados finales se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 27.-Tabla de composición química de los agregados minerales examinados. Tabla de elaboración propia

Compuesto		Muestra		
		Zeolita	Perlita	Diatomita
SiO ₂	(%)	50.483	50.921	56.853
Al ₂ O ₃		5.652	6.765	3.765
P ₂ O ₅		0.411	0.505	0.495
S		0.228	0.241	0.280
K ₂ O		1.704	3.546	1.083
CaO		1.291	0.792	1.307
TiO ₂		0.142	0.200	0.414
Fe ₂ O ₃		1.604	1.284	2.651
MnO		0.016	0.010	0.033
Cl		0.027	0.050	0.042
V		---	0.004	0.006
Cu		0.003	0.003	0.017
Zn		---	0.004	0.007
As		0.002	0.004	---
Rb		0.022	0.044	0.010
Sr		0.055	0.005	0.038
Y		0.007	---	0.011
Zr		---	0.002	0.025
Nb		0.003	0.003	0.004
Ba	0.091	---	0.055	

5.2.6. Porcentaje de porosidad

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos en esta prueba:

Tabla 28.- Porcentaje de porosidad en los agregados minerales analizados. Tabla de elaboración propia.

Material	Volumen total	Agua agregada (ml)	% de Porosidad
Diatomita	100.00	75.75	75.75
Perlita	100.00	51.60	51.60
Zeolita	100.00	39.00	39.00

5.2.7. Porcentaje de humedad

Tabla 29.- Porcentaje de humedad de los agregados minerales a emplear. Tabla de elaboración propia.

Material	Volumen total	Agua agregada (ml)	% de Porosidad
Diatomita	100.00	75.75	75.75
Perlita	100.00	51.60	51.60
Zeolita	100.00	39.00	39.00

5.3. Resultados de las pruebas a las probetas puzolánicas

5.3.1. Prueba de placa caliente aislada

Los resultados de esta prueba demostraron una disminución del coeficiente de conductividad térmico del mortero por la adición de las puzolanas naturales, aunque los resultados variaron en cada puzolana, tal y como se aprecia en la tabla 30.

Tabla 30.- Resultados obtenidos de la prueba de plato frío y porcentaje de disminución del coeficiente de conducción térmica. Tabla de elaboración propia.

Agregado mineral empleado	Porcentaje agregado (%)	Coficiente de conductividad (W/mK)	Error experimental	Porcentaje de reducción (%)
Ninguno (Testigo)	0%	0.765	± 0.010	---
Diatomita	25%	0.648	± 0.013	15.294
	50%	0.557	± 0.011	27.190
Perlita	25%	0.640	± 0.015	16.340
	50%	0.507	± 0.012	33.682
Zeolita	25%	0.635	± 0.010	16.950
	50%	0.479	± 0.011	37.386

Posteriormente se realizó el cálculo del error para los resultados obtenidos, siendo un rango aceptable de ± 0.010 a ± 0.015 . Este cálculo se incluyó en la tabla 30 y como se aprecia, todos los resultados obtuvieron un rango de error aceptable.

Asimismo, con el fin de entender mejor los resultados obtenidos en esta prueba, se elaboró la Figura 42. Dentro de ella se desarrollaron dos gráficas: en la A se observa una comparativa visual entre los resultados de los morteros estudiados con respecto a la mezcla control; en la gráfica B se aprecia la comparativa de los resultados de las muestras con respecto a su porcentaje de agregado mineral.

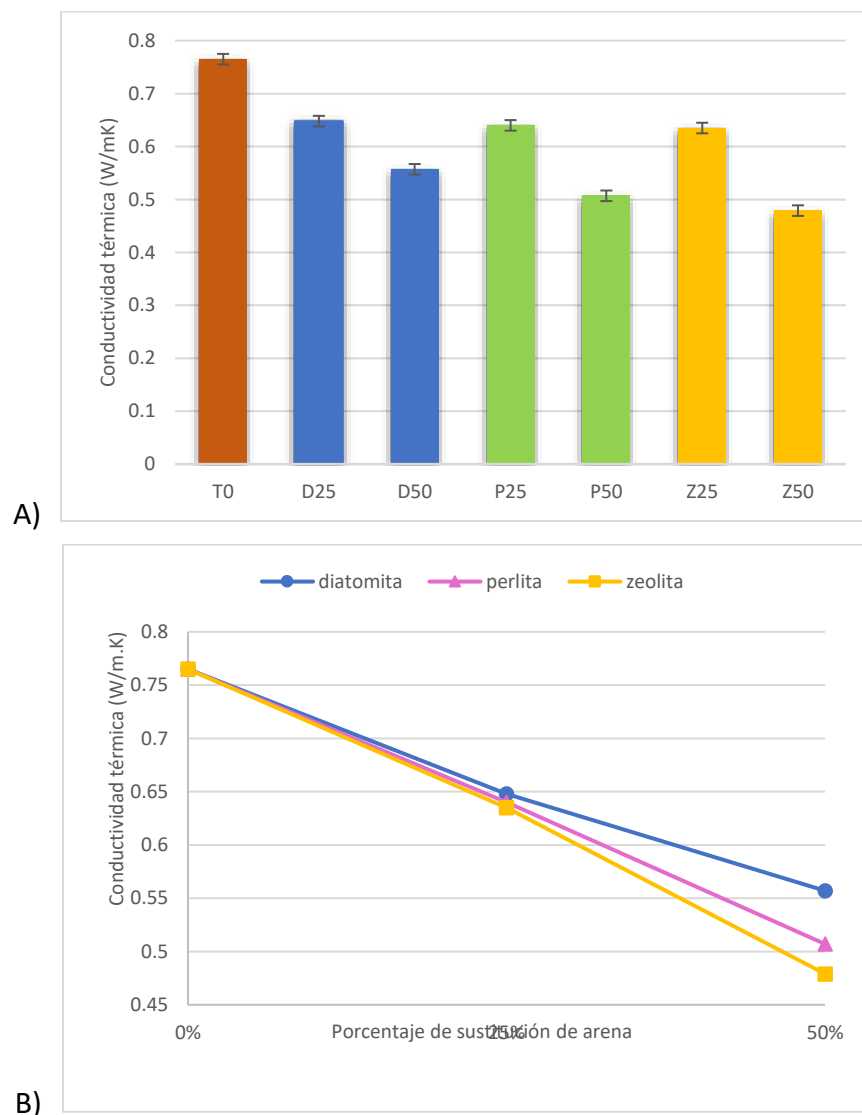


Figura 42.- Gráficos de comparativa de los resultados de la prueba de placa caliente aislada de las seis muestras de mortero estudiadas con respecto a la mezcla control. La primera grafica es del tipo de barras para Figuras de elaboración propia.

Estos resultados permitieron realizar algunas observaciones:

- La puzolana natural con la que se obtuvo el mejor comportamiento del mortero, fue la zeolita. Debido probablemente, a su capacidad de hidratación reversible.
- Los concretos elaborados con perlita y diatomita, demostraron un comportamiento térmico similar, siendo ligeramente mejor el de la perlita.
- El desarrollo de la prueba de plato frío con las placas hechas con zeolita, tardaron mucho más tiempo que con los otros dos materiales (diatomita y perlita), esto probablemente fue causado por el efecto de hidratación reversible de las zeolitas que ya ha sido estudiado previamente (Bosch, 2003).

5.3.2. Ensayo de compresión

En esta prueba se realizaron 3 cilindros de cada una de las seis muestras estudiadas más el testigo, los cuales se probaron a los 7, 14 y 28 días. Los resultados de estos muestreos aparecen en la tabla 31 y con base en estos datos, también se elaboró la Figura 43.

Tabla 31.- Resultados de los ensayos de compresión de los especímenes hechos para las seis mezclas analizadas, a diferentes tiempos. Tabla de realización propia.

Agregado mineral usado	Porcentaje de puzolana agregada (%)	Edad de los cilindros (días)	Resistencia Promedio(kg/cm ²)
Ninguno (Testigo)	0	7	133.308
		14	180.540
		28	215.177
Zeolita	25	7	93.710
		14	174.384
		28	218.169
	50	7	68.245
		14	140.691
		28	197.288
Diatomita	25	7	117.520
		14	161.247
		28	194.975
	50	7	98.676
		14	138.252
		28	185.829

Perlita	25	7	77.413
		14	110.784
		28	142.157
Perlita	50	7	61.497
		14	72.791
		28	80.087

Por otra parte, dado que la resistencia final del mortero se alcanza a los 28 días, se decidió estudiar a fondo los resultados obtenidos en esta fecha por las muestras para entender a fondo el comportamiento del material. Para lograrlo, lo primero que se hizo fue calcular el error experimental aplicable para estos resultados, los cuales se pueden apreciar en la tabla 32.

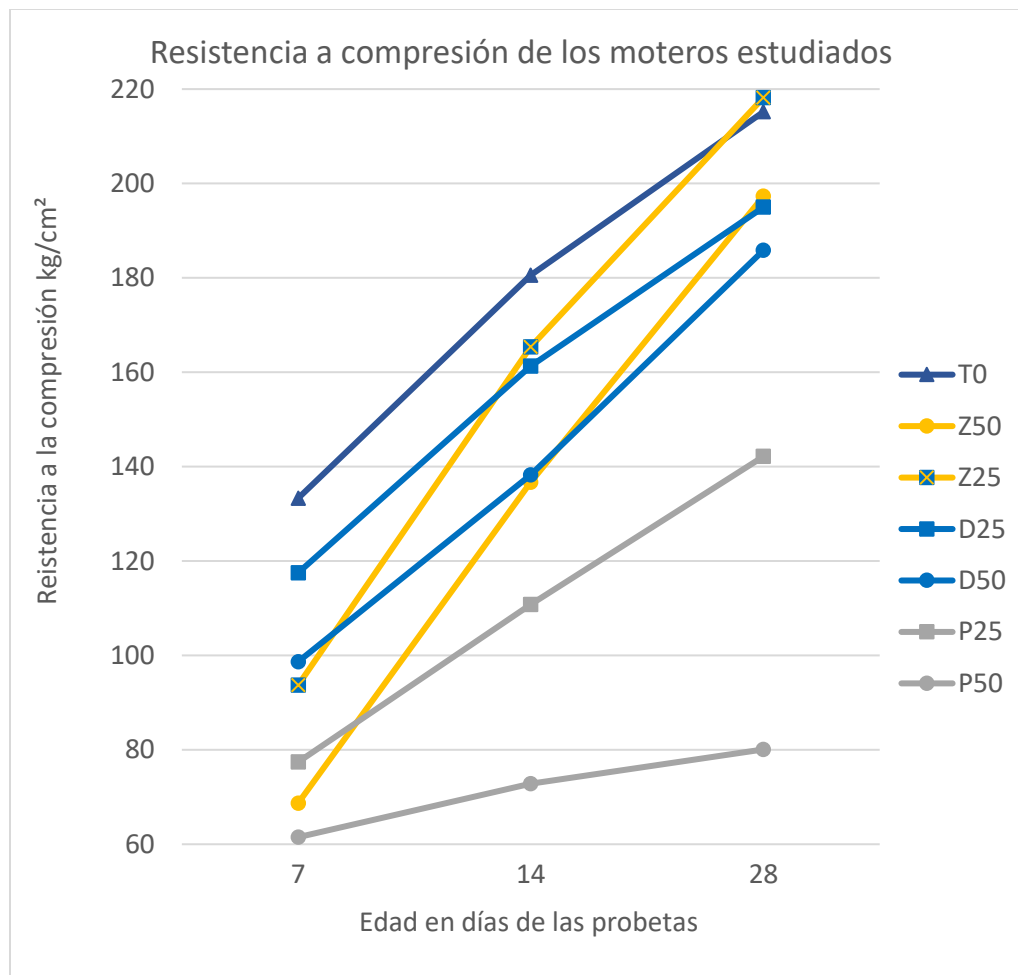


Figura 43.- Comparativa de los resultados de las muestras estudiadas en el ensayo de compresión a 7, 14 y 28 días.
Figura de elaboración propia.

El rango del error experimental que se presentó en los datos fue de ± 2.32 a ± 0.85 , lo que pudiera parecer un rango elevado, sin embargo, el IMCYC y el ACI marcan que el rango aceptable para la variación de los resultados de los juegos de tres cilindros de medidas de 10 x 20 cm, es en promedio de hasta el 3.0, por lo que los datos obtenidos de esta prueba, se consideraron aceptables; diseñando con base en estos, la Figura 44.

Tabla 32.- Resultados de los ensayos de compresión de los especímenes hechos para las seis mezclas estudiadas, a 28 días. Tabla de realización propia.

Agregado mineral empleado	Porcentaje agregado (%)	F'c (kg/cm ²) a 28 días	Error experimental	Porcentaje de reducción (%)
Ninguno (Testigo)	0%	215.18	± 1.81	---
Diatomita	25%	194.97	± 0.85	9.39
	50%	185.50	± 0.94	13.63
Perlita	25%	142.18	± 1.70	33.93
	50%	80.13	± 2.32	62.76
Zeolita	25%	218.15	± 1.78	+ 1.38
	50%	197.31	± 2.15	8.30

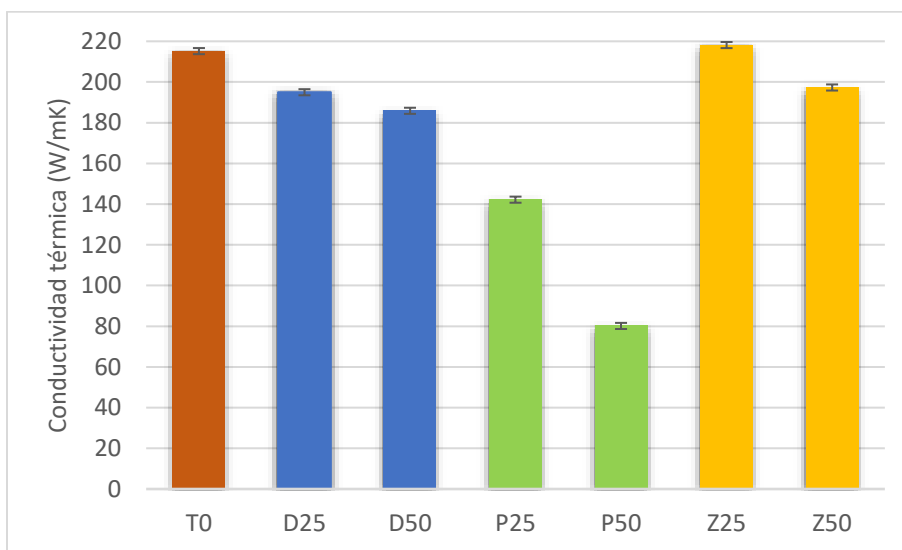


Figura 44.- Comparativa de la resistencia a compresión a 28 días de los morteros estudiados. Figura de elaboración propia.

Para comprender mejor los resultados obtenidos, es necesario compararlos con la información que aparece en la tabla 20, sin embargo, aun sin esa comparación se pueden realizar algunas observaciones.

- ❖ De las tres puzolanas estudiadas, la diatomita fue el material que mostró el comportamiento estructural más estable, ya que en sus resultados conforme aumento la edad de los cilindros, demostraron un comportamiento con un crecimiento en su resistencia, muy similar al que mostró el testigo.
- ❖ La perlita fue el material que demostró causar mayores afectaciones negativas a la resistencia final del mortero ya que los cilindros muestreados, demostraron una reducción de hasta el 60% de su resistencia con respecto a los resultados de la muestra control.
- ❖ La zeolita fue el agregado mineral que demostró los resultados más llamativos. Su resistencia fue apenas ligeramente superior a la de las muestras con diatomita, (Raggiotti, Positieri, Locati , Murra, & Marfil, 2015); pero lo realmente interesante fue el hecho de que las muestras de zeolita de hecho no demostraron alcanzar una buena resistencia al día 7 (como fue el caso de la diatomita) si no hasta el día 14, aunque este también era un comportamiento esperado con base en la información obtenida en trabajos previo (Andrada, y otros, 2012). Por ello, estos factores deben ser considerados a futuro, cuando el material quiera ser utilizado en obra.

5.4. Selección de la mezcla e impacto de los resultados en el uso del material

Con base en los resultados obtenidos dentro del experimento central, se concluyó que la mezcla Z50, fue aquella que demostró el mayor equilibrio entre su rendimiento estructural y el desempeño térmico; con lo que se comprobó lo teorizado en la hipótesis principal de este trabajo.

Una vez se seleccionó este mortero como aquel con el mejor rendimiento, se procedió a realizar, con base en su coeficiente de conducción térmica, el calculo de su resistencia térmica. Por ello, después de aplicar la fórmula de cálculo para la resistencia térmica, se obtuvieron los resultados que aparecen en la Tabla 31.

Por otro lado, dado que por definición un material se considera aislante térmico cuando tiene un coeficiente de conductividad térmica menor a 0.060 W/m.K y/o una resistencia mayor a 0.25 m² .K/W (Peña Ramírez & Roman Enciso, 2018); entonces, de acuerdo a los cálculos que se hicieron, con un mortero control, sin presencia de puzolanas, se requiere un espesor de 20 cm para lograr obtener una pieza que se pudiera considerar “aislante”, mientras que con el material seleccionado Z50, se requeriría un espesor de 12 cm (Tabla 33).

Tabla 33.- Calculo de Resistencia Térmica (R) a distintos espesores de los morteros estudiados. Tabla de realización propia.

Agregado mineral empleado	Porcentaje agregado (%)	Conductividad térmica (λ)(W/mK)	(R) (m ² K/W) (6 cm)	(R) (m ² K/W) (12cm)	(R) (m ² K/W) (20cm)
Ninguno (Testigo)	Testigo	0.765	0.0784	0.1569	0.2614
Zeolita	Z-25	0.641	0.0936	0.1872	0.3120
	Z-50	0.479	0.1253	0.2505	0.4175
Perlita	P-25	0.685	0.0876	0.1752	0.2920
	P-50	0.518	0.1158	0.2317	0.3861
Diatomita	D-25	0.655	0.0916	0.1832	0.3053
	D-50	0.514	0.1167	0.2335	0.3891

Por último, ya que se planea utilizar al mortero Z50 como acabado arquitectónico, este se podría colocar en ambas caras de los muros, lo que se traduciría en un mayor espesor del material aplicado en los muros, sin embargo, antes de considerar la posibilidad de aplicar este material en obra, es necesario realizar más estudios a fin de establecer qué clase de interacciones tiene este mortero con otros materiales.

5.5. Caracterización de la mezcla con mejor rendimiento

Tras realizar la selección del mortero con los mejores rendimientos, se inició sobre la mezcla Z50, una nueva serie de pruebas en las que se le comparó a este material con uno similar, pero sin presencia de zeolitas. Esto con el objetivo de determinar si este mortero posee o no, características hidrofílicas similares a las de las zeolitas, obteniendo así los siguientes resultados:

5.5.1. Comportamiento en fraguado y peso final

Para comenzar la caracterización de la mezcla Z50, lo primero que se hizo fue generar nuevos juegos de muestras de mortero de las dos mezclas a comparar. Sus medidas fueron de 7.5 x 15 x 1.5 cm y 10 x 10 x 2 cm. Asimismo, se decidió vigilar el proceso de fraguado de las mezclas para determinar si presentaban alguna diferencia durante el mismo, registrando para ello, el peso de los especímenes cada 24 horas.

Como resultado de estos muestreos, se observó que el peso y fraguado de ambas mezclas mostró un comportamiento similar (Figura 45), sin embargo, al final del proceso de curado, ambos morteros presentaron una diferencia de aproximadamente un 6%, entre sus pesos finales.

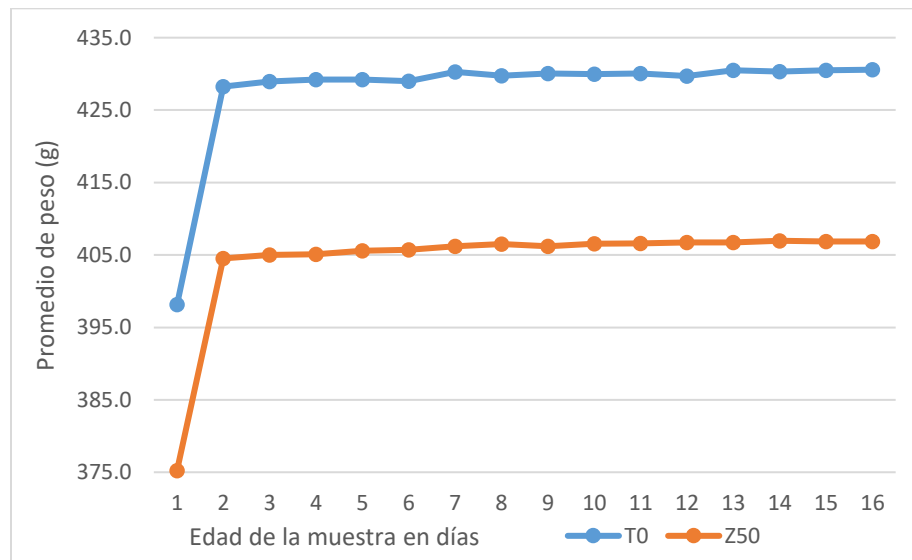


Figura 45.- Comparativa entre los pesos diarios de las muestras de 10 x 10 x 2 cm de la mezcla control y la MZ50.
Figura de elaboración propia.

Sin embargo, se debe considerar que los pesos anteriores se obtuvieron mientras las piezas se encontraban en su proceso de “curado” estando sumergidas en agua saturada con 2% de cal; por ello, también se compararon las muestras 3 días después de haber salido del agua, habiéndolas dejado secar a la intemperie, lo que permitió observar que las piezas, tras este periodo, perdieron el peso que se aprecia en la Tabla 34.

Con esto se pudo apreciar que, tras secarse, la mezcla control T0 perdió un promedio de 6.22% de su peso, mientras que la Z50 perdió lo equivalente al 8.24%.

Por otro lado, tomando en cuenta los pesos finales de las muestras estando secas, se determinó el peso final por tonelada de ambas mezclas, mostrando entre ellas una diferencia de aproximadamente el 8% a favor del material Z50, siendo los siguientes los resultados obtenidos:

Mezcla control = 2020 kg/m³

Mz50 = 1870 kg/m³

Tabla 34.- Diferencia de pesos de las muestras una vez que se secaron. Tabla de realización propia.

Mezcla	Peso final húmedo	Peso seco	Peso perdido	Promedio
T0	438.9	409.6	29.3	26.8
	416.7	397.1	19.6	
	432.7	403.9	28.8	
	438.8	410	28.8	
	428.8	401.3	27.5	
Z50	397.9	364.9	33	33.58
	399.5	371.5	28	
	418.7	384.2	34.5	
	413	374.7	38.3	
	407.4	373.3	34.1	

5.5.2. Pruebas de absorción de humedad

Una vez concluido el proceso del fraguado, a las muestras se les realizó primero la prueba de absorción máxima inicial, obteniendo así los resultados que aparecen en la tabla 35 y en donde se puede apreciar que los resultados de ambas mezclas (columna A) presentaron una diferencia de 3.5% en el promedio de absorción. Asimismo, la desviación estándar calculada para estos datos fue de 0.24 en la mezcla control y 0.28 en el material Z50.

Además de estos resultados, también se realizó en la misma tabla el cálculo de la capacidad de absorción de agua por minuto, utilizando la formula correspondiente y obteniendo los datos que se muestran en la columna Cb.

Como resumen de todos estos resultados se debe resaltar la gran diferencia en la velocidad de absorción que mostraron ambas muestras y que, según los datos, aumentan

al incrementar el área de la pieza expuesta. En este caso, la desviación estándar calculada para estos datos fue de 2.07 para la mezcla T0 y 2.64 para la Z50. Por último, se realizó un cálculo de correlación de Pearson de los resultados de velocidad (columna Cb), obteniendo una correlación de 0.9023.

Por otro lado, en la tabla 36 aparecen los resultados de la prueba de absorción total a 24 horas, presentándose nuevamente diferencias entre los resultados de los dos morteros comparados. Del mismo modo, de los resultados que aparecen en la columna “% de absorción por formula”, se realizó el cálculo de correlación de Pearson y se obtuvo un resultado de 0.367. Por último, la desviación estándar calculada para estos datos fue de 1.028 para la mezcla control y 0918 en el material Z50.

Por ello, si se comparan los resultados obtenidos de las dos pruebas de absorción, se puede apreciar que hubo un mayor margen de diferencia entre los obtenidos en la absorción máxima inicial con respecto a los de la absorción total a 24 horas, así como una mayor correlación de Pearson en los primeros resultados, lo que indicaría que la presencia de la zeolita contribuye a que el material Z50 absorba mayor cantidad de agua en poco tiempo, pero su influencia disminuye con el tiempo, cuando la zeolita se satura de agua y baja su capacidad de adsorción.

5.5.3. Intemperismo

Con respecto a esta prueba, han pasado tres meses desde que se ingresaron las muestras a la máquina de intemperismo, lo que significa que hasta el momento las muestras han sido expuestas a una cantidad de energía y daño equivalente a haber estado expuestas más o menos a tres años en la intemperie de la ciudad de México. Sin embargo, dado que ninguna muestra de las dos mezclas comparadas, han presentado ni cambios de coloración o desgaste en su perímetro (Figura 46), se puede asumir que ambos morteros cuentan con al menos tres años de vida útil sin recibir daños significativos.

Aun así, se ha decidido continuar con esta prueba por al menos otros 3 meses para verificar si los resultados de esta prueba se modifican o se mantienen de la misma forma.

Tabla 35.- Resultados de la prueba de absorción máxima inicial. Tabla de realización propia.

Mezcla	Unidad	Medida		Área cm ²	Peso seco (g)	P0 (kg)	Peso saturado (g)	P1 (kg)	Peso absorbido	A (%)	Promedio	Cb (g/min)
		Largo	Ancho									
M0	1	14.95	7.15	106.89	249.8	0.2498	267.7	0.2677	0.0179	7.17	6.88	52.95
	2	14.90	7.25	108.03	271.7	0.2717	290.6	0.2906	0.0189	6.96		55.33
	3	14.90	7.1	105.79	265.0	0.2650	282.2	0.2822	0.0172	6.49		51.41
	4	14.95	7.25	108.39	281.0	0.2810	300.4	0.3004	0.0194	6.90		56.60
	5	14.85	7.15	106.18	258.5	0.2585	276.3	0.2763	0.0178	6.89		53.01
MZ50	1	14.90	7.15	106.54	248.2	0.2482	274.5	0.2745	0.0263	10.60	10.35	78.07
	2	14.90	7.15	106.54	259.8	0.2598	287.0	0.2870	0.0272	10.47		80.74
	3	14.85	7.20	106.92	250.5	0.2505	276.9	0.2769	0.0264	10.54		78.08
	4	14.90	7.20	107.28	279.5	0.2795	308.0	0.3080	0.0285	10.20		84.01
	5	10.85	7.25	78.66	195.2	0.1952	214.6	0.2146	0.0194	9.94		77.99

Tabla 36.- Resultados de la prueba de absorción total a 24 horas. Tabla de realización propia.

Mezcla	Unidad	peso seco (g)	peso seco (kg)	peso bajo agua (g)	peso bajo agua (kg)	peso saturado (g)	peso saturado (kg)	peso absorbido	% absorción por formula	Promedio
M0	1	374.2	0.3742	200	0.2000	438.6	0.4386	0.0644	29.37	31.06
	2	350.4	0.3504	200	0.2000	415.8	0.4158	0.0654	31.46	
	3	364.6	0.3646	202	0.2020	432.6	0.4326	0.068	31.75	
	4	363.5	0.3635	207.5	0.2075	429.5	0.4295	0.066	31.89	
	5	363.2	0.3632	202.5	0.2025	428.5	0.4285	0.0653	30.86	
Z50	1	313.6	0.3136	175	0.1750	398.1	0.3981	0.0845	37.15	37.71
	2	315.1	0.3151	175	0.1750	399.6	0.3996	0.0845	37.01	
	3	333.3	0.3333	195	0.1950	417.3	0.4173	0.084	39.25	
	4	326.1	0.3261	177	0.1770	413.2	0.4132	0.0871	37.31	
	5	319.3	0.3193	175	0.1750	407.4	0.4074	0.0881	37.84	



Figura 46.- Fotografías de comparación del desgaste de las muestras de ambas mezclas. Figura de elaboración propia.

5.5.4. Evaluación de la humedad interna

Una vez se concluyeron las pruebas anteriores, se inició un proceso donde las piezas se colocaron al sol, tomando mediciones de la humedad al interior del material constantemente, ya que de este modo se buscaba establecer el comportamiento que presentaban las dos mezclas durante el día.

De este modo, se obtuvieron los resultados que se en la figura 46, pero para corroborar la validez de los resultados obtenidos, se realizó un cálculo del coeficiente de regresión o correlación lineal, a fin de establecer la correlación que mostraron las dos variables estudiadas en esas mediciones, es decir, el porcentaje de presencia de zeolita con respecto a la humedad interna de las muestras, obteniendo así lo que se muestra en la figura 47.

Con base en estos resultados, se puede afirmar que existe una fuerte correlación entre la presencia de la zeolita y el aumento de la humedad interna de las mezclas, confirmando de este modo la teoría con la que iniciamos esta segunda ronda de mediciones, es decir, que efectivamente la presencia de la zeolita es lo que causa la diferencias en los resultados obtenidos.

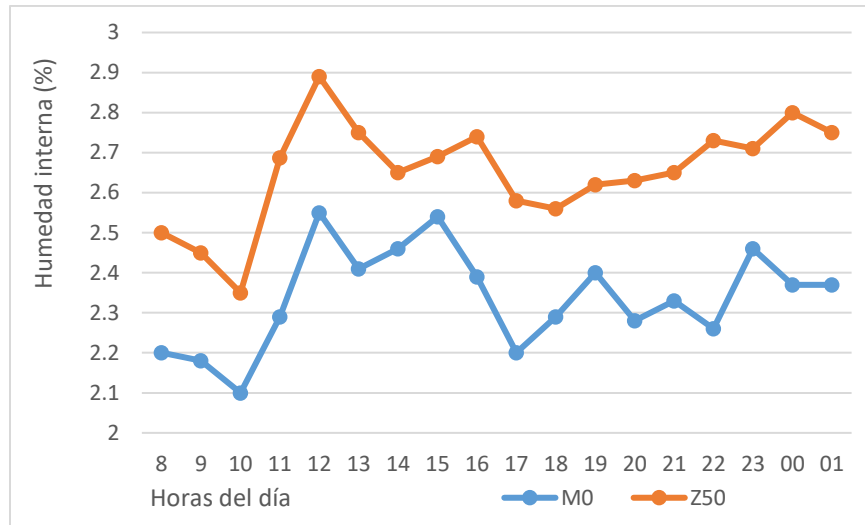


Figura 47.- Promedio del comportamiento de la humedad interna de las muestras de las mezclas comparadas al primer mes de edad. Figura de elaboración propia.

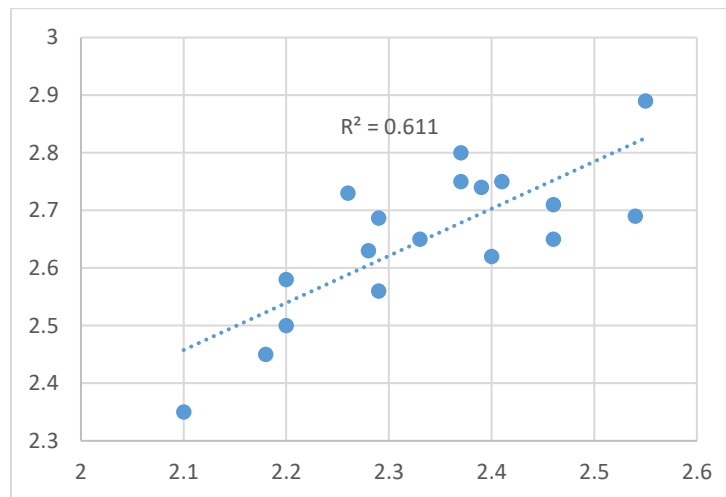


Figura 48.- Grafica que muestra el cálculo del coeficiente de regresión o correlación lineal al primer mes de edad de las muestras estudiadas. Figura de elaboración propia.

Estos muestreos de humedad interna se continuaron por otros cuatro meses, lo que dio como resultado que, tras este periodo de tiempo, los promedios de humedad interna se redujeran (Figura 48), sin embargo, a pesar de esto, se siguió manteniendo la diferencia entre los resultados de ambas muestras, además de un coeficiente de regresión o correlación lineal muy similar al calculado en el primer mes de muestreo (Figura 49).

Todo lo anterior permite establecer que, si bien el material parece reducir su funcionamiento de adsorción al paso del tiempo, esto no evita que siga mostrando un comportamiento térmico superior a la muestra control.

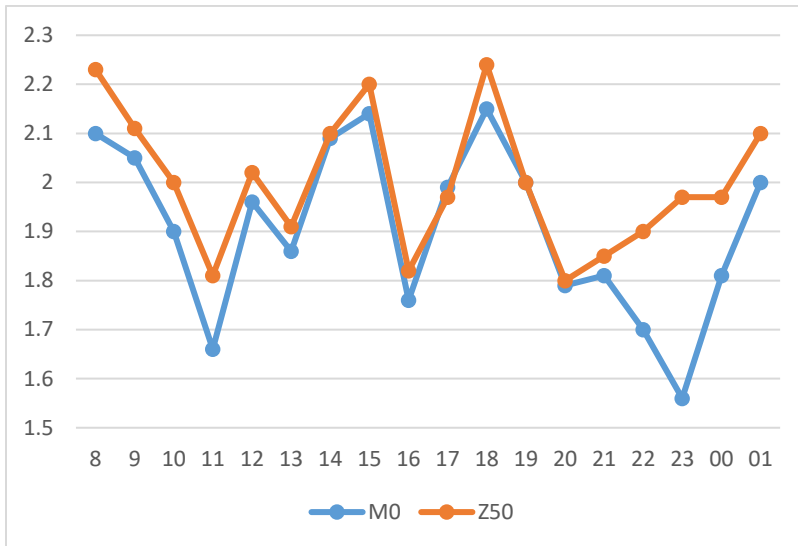


Figura 49.- Promedio del comportamiento de la humedad interna de las muestras de las mezclas comparadas al cuarto mes de edad. Figura de elaboración propia.

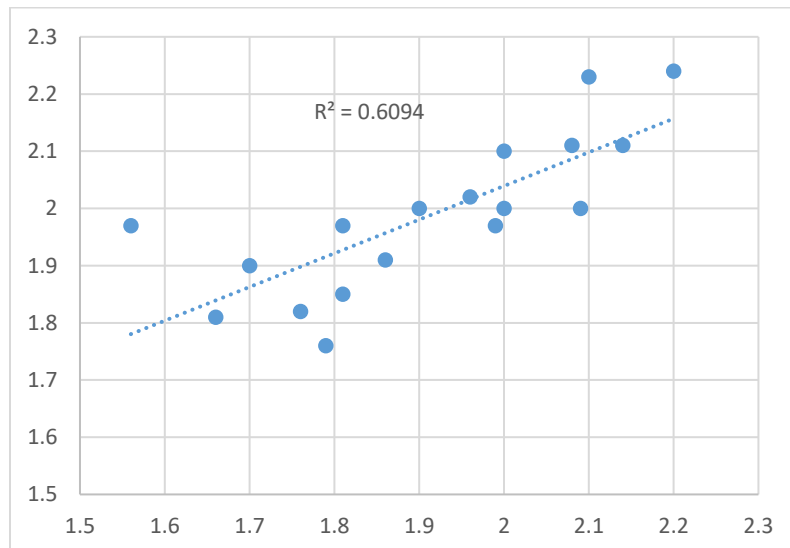


Figura 50.- Grafica que muestra el cálculo del coeficiente de determinación lineal al cuarto mes de edad de las muestras estudiadas. Figura de elaboración propia.

5.6. Discusión y análisis de resultados

Existen muchas investigaciones centradas en la aplicación de puzolanas naturales a las pastas cementantes, sin embargo, la mayoría de ellas se centra en utilizarlas como sustitutos de un porcentaje del cemento dentro de las mismas. En cuanto a las investigaciones centradas en la parte térmica de las pastas cementantes, en realidad no

existen muchos estudios, pero a continuación mencionare los más similares, tanto por el empleo de diatomita, perlita o zeolita, o por el procedimiento de experimentación:

El primero es el trabajo de Chacón Sánchez & Astete García (2015), en este trabajo se utilizó diatomita natural (no calcinada) como agregado mineral en la elaboración de concreto. En esta investigación, se concluyo que la formulacion óptima en el que se podia emplear ese material como aditivo, era del 25%, y que el motivo por el que no se alcanzaron mejores resistencias, era la gran presencia de calcio dentro de la diatomita.

Con respecto a la perlita, en general, existen pocas investigaciones previas en donde se investigue a este material como agregado para pastas cementantes; sin embargo, el que aportó la información mas interesante fue el de Borbón Almada et. al. (2018), en donde se investigaron los efectos sobre la resistencia a compresión y la aislación térmica de un mortero proporción 1:4 en los que se utilizo perlita como sustituto del agregado fino a diferentes proporciones. En este caso los resultados indicaron que las mezclas potencialmente utilizables dentro de la construcción de acuerdo con la NMX-C-486-ONNCCE-2014 (con resistencia por encima de 75 kg/cm²) fueron los que poseían el 20% y 40% respectivamente de sustitución de agregado fino por perlita, aumentando hasta en un 20% la capacidad del mortero por encima de los resultados de un mortero base.

En este caso en especial, los resultados son de gran importancia para este trabajo, sin embargo se tiene que tomar en cuenta que estos se obtuvieron con base en un mortero con mayor cantidad de agregado fino que el que se utilizó en este trabajo (1:3) lo que abrio el margen de comparación entre ambas investigaciones.

Con respecto a la zeolita, las 3 investigaciones más similares a este trabajo son la de Lorrío Domene (2011), Andrada et. al. (2012) y la de Vera Barrios y Ledezma Elizondo (2018).

En la primera se estudiaron los concretos con agregados de zeolitas naturales y artificiales como agregado ligero para la generación de pendientes y techumbres, en lugar de arcilla expandida. En este trabajo se hizo mayor énfasis en el uso de la zeolita artificial, mas que en la natural, ya que esas cuentan con mayor capacidad de aislamiento térmico, sin embargo, también con mayor costo de producción.

Los resultados de la investigación de Lorrio Domene (2011) arrojaron que, si bien la zeolita artificial generaba mejores rendimientos térmicos que la arcilla expandida, por su peso y costo no se recomendaba utilizarlas en la fabricación de esta clase elementos arquitectónicos, pero si se consideraban viables para la creación de otra clase de componentes constructivos, especialmente aquellos en donde su peso no produzca sobre esfuerzos en la estructura de los edificios; todo esto se tomó en cuenta al proponer diseñar un mortero de acabado dentro de este trabajo.

En el caso de la investigación dirigida por Andrada et. al. (2012), se utilizó zeolita como sustituto del 20% cementante dentro de diferentes tipos de mortero para luego compararlos entre ellos con respecto a su resistencia a compresión y su coeficiente de conductividad térmica. Los resultados indicaron que el mortero elaborado con la sustitución de zeolita si presentaba diferencias térmicas positivas con respecto al mortero patrón, conservando resistencias a compresión aceptables.

Por último, en el trabajo de Vera Barrios y Ledezma Elizondo (2018), se generaron morteros con adición de zeolita y hierro en polvo con el fin de establecer las diferencias en las resistencias a la compresión y manejabilidad de la mezcla a causa de esto. Como resultado se obtuvo la fabricación de morteros que si cumplían con lo recomendado por las normas ASTM-270 y ASTM-780 para esta clase de materiales (5.20 MPa), pero ya que se necesitaba mayor cantidad de agua para fabricarlos, presentaban resistencias inferiores que la del mortero de control.

Ahora bien, si se resumen los resultados obtenidos en la primera serie de pruebas de laboratorio, se puede asumir lo siguiente:

1. Se comprobó que en los morteros entre mayor fue el porcentaje de puzolanas incluidas en su mezcla, más grande fue la disminución que se produjo en su coeficiente de conductividad térmica y su resistencia a la compresión. Lo que confirma la primera hipótesis secundaria de este trabajo y concuerda también con lo observado previamente en otras investigaciones (Andrada, y otros, 2012) (Chacón Sánchez & Astete García, 2015) (Quintero Ortiz, Cruz Hernández, & Peña Santos, 2014).

2. Los morteros elaborados con perlita mostraron un comportamiento térmico muy similar al de la zeolita, siendo ligeramente superior este último.
3. La puzolana que generó la mayor disminución del coeficiente térmico de las mezclas fue la zeolita, logrando una reducción del 37% del mismo, cuando se sustituyó el 50% del volumen de la arena por este material.
4. La diatomita fue la puzolana que generó menores reducciones en el coeficiente térmico de los morteros, ya que, a pesar de contar con un gran porcentaje de porosidad, este material, al contrario de los otros dos, no posee capacidades especiales que le permitan retener la humedad.
5. El material que aportó un mejor comportamiento mecánico a las mezclas fue la zeolita, ya que el mortero Z25 logró incluso, una resistencia ligeramente superior a la obtenida por la mezcla control, mientras que la Z50 solo mostró una disminución del 8% respecto a la misma y ambos morteros cumplieron con lo solicitado para morteros tipo M (Tabla 20), lo cual coincide con los datos que se obtuvieron en trabajos previos (Raggiotti, et al., 2015).
6. La presencia de la perlita redujo mucho la resistencia a compresión de los morteros en los que fue incluida. Sin embargo, la muestra P25 cumplió con el rendimiento solicitado para los morteros tipo I o S, mientras que el P50, apenas y cumplió con lo requerido para los morteros tipo N, es decir, 76 kg/cm² (Tabla 20). Sin embargo, aún con esos resultados se obtuvieron mejores rendimientos en esta mezcla, que los obtenidos en el trabajo de Borbón Almada et. al. (2018), lo cual se explica por las diferentes proporciones (1:3 y 1:4) que se emplearon en ambos trabajos. Asimismo, se debe mencionar que con la perlita se generaron las muestras de mortero más ligeras, punto que se podría estudiar a fondo en futuras investigaciones.
7. Los morteros elaborados con diatomita cumplieron los 178 kg/cm² solicitados por las normas ASTM C-270 y ASTM C-780 para los concretos tipo M (Tabla 20), siendo el segundo material con mejores resultados estructurales después de la zeolita.
8. Dado que los morteros elaborados con diatomita, si bien mostraron unas resistencias que cumplen por lo solicitud o por las normas, fueron los de conductividad térmica

más altas y los que incluían perlita, tuvieron un comportamiento térmico similar a las que incluían zeolita, pero una significativa reducción de la resistencia a la compresión en comparación a las demás, entonces, se puede concluir que la puzolana que generó los mejores rendimientos en las unidades experimentales fue la zeolita, ya que con este material se obtuvieron resultados positivos en las dos variables estudiadas. Comprobando así lo que se teorizó en la hipótesis principal de este trabajo.

9. De los dos morteros elaborados con zeolita, se seleccionó al mortero Z50 como aquel que cumplió con el objetivo propuesto para este trabajo, ya que presentó un menor coeficiente de conducción térmica que la Z25 y una resistencia a la compresión superior a lo solicitado para los morteros tipo I (tabla 19).

Ahora bien, con respecto a los datos obtenidos en la segunda serie de pruebas, cuando se realizó el cálculo del peso final por metro cúbico de la mezcla Z50 y la de control T0, se determinó una diferencia de 8% a favor de la primera, lo cual puede explicarse por el hecho de que el peso molecular de los compuestos hechos con base en silicatos de estructura abierta, como las zeolitas, es menor que los hechos con base en otros silicatos y/o carbonos, como es el caso de las pastas cementantes en general. Sin embargo, como un aspecto positivo extra, la prueba de intemperismo avanzado, demostró que el tiempo de vida del mortero Z50 al menos cuenta con tres años de vida útil.

Por otro parte, si a los datos obtenidos en la primera parte del trabajo, se le suman aquellos que se generaron en la segunda serie de mediciones, se puede llegar a la conclusión de que las diferencias en las capacidades de absorción y humedad interna detectadas en las pruebas a favor del mortero Z50, son la clave para explicar la disminución en el coeficiente de conducción térmica establecido previamente, comprobando así que el efecto hidrofílico de la mezcla genera una mayor capacidad de aislamiento térmico.

Del mismo modo, si analizamos los datos obtenidos en los muestreos durante a diferentes horas, podemos asumir que el material Z50 adquiere y pierde humedad a lo largo del día, al igual que la muestra de control; sin embargo, el primero siempre mostró tener mayor humedad interna. No obstante, al paso del tiempo se observó que ambas mezclas mostraban menos humedad interna, lo cual se atribuye al normal del proceso de

envejecimiento de las mezclas cementantes, pero lo interesante es que aun con eso, se puede seguir apreciando diferencias entre ambos morteros, ya que la muestra Z50 tiende a aumentar su humedad interna en las horas nocturnas y perderlas durante el día.

Por lado, si comparamos los datos arrojados por las dos pruebas de absorción, podremos observar que, en la prueba de absorción máxima inicial, el material Z50 mostró una velocidad de absorción mucho mayor que la muestra de control. Sin embargo, en el caso de la prueba de absorción total, aunque los datos también mostraron diferencias a favor del mortero Z50, estos se diferenciaron de la muestra control en menor proporción que en la primera prueba.

Todo lo anterior se puede explicar si tomamos en cuenta el comportamiento esperado y previamente establecido de las zeolitas con respecto al procedimiento requerido para realizar las pruebas de absorción: Por un lado, en la prueba de absorción máxima inicial, el material es expuesto durante 10 minutos a una película de agua, mientras que en la de absorción total, se sumerge durante 24 horas en agua. Por ello, se puede asumir que cuando el material Z50 es expuesto directamente a agua, tiene a adsorber grandes cantidades de agua gracias a las partículas de zeolita que son expuestas directamente al líquido, sin embargo, al paso del tiempo su adsorción baja, lo que se puede suponer que sucede cuando las partículas de zeolita del material Z50, comienzan a saturarse de humedad.

Esto a su vez corresponde con el comportamiento previamente observado en trabajos previos, así como con la isoterma de adsorción establecida para la clinoptilolita (Figura 23) (Alvarado Ibarra, et al., 2020) (Aguilar Armenta & Patiño Iglesias, 2002), ya que con base en esto se puede esperar que este material tienda a adsorber rápidamente otras moléculas y a disminuir la su adsorción cuando la puzolana comienza a saturarse.

No obstante, dado que los datos indican que si bien la adsorción del mortero baja con el paso del tiempo, no indican que necesariamente se detenga totalmente, por lo que se puede concluir que probablemente el comportamiento que sigue el mortero Z50 es que primero se saturan las moléculas de zeolita que se encuentran en o cerca del perímetro de la muestra, pero conforme la humedad ingresa en la misma, las partículas de zeolita que

se ubican más profundamente dentro del espécimen, también comienzan a adsorber humedad, pero a menor velocidad que las que se encuentran en el perímetro de la placa.

La premisa anterior también se apoya en el comportamiento observado durante el proceso de secado para alcanzar el peso constante de las muestras del material Z50. En este material, se necesitaron alrededor de cinco horas más de calor para alcanzar el peso constante de los especímenes, en comparación con la muestra control, por lo que se puede asumir que el calor suministrado por el horno, primero rompía los enlaces sencillos que retenían la humedad en las zeolitas ubicadas en el perímetro de las muestras y conforme un área de las muestras, se quedaba sin moléculas de agua para liberar, se comenzaban a romper los enlaces presentes en sitios más profundas de los especímenes.

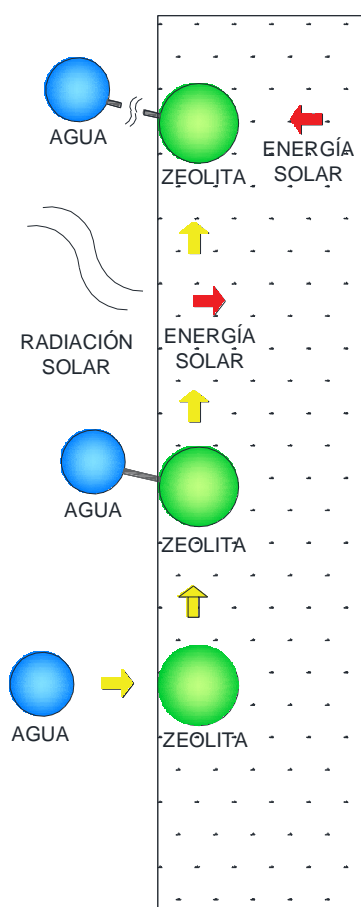


Figura 51.- Esquema del funcionamiento general del mortero Z50. Figura de elaboración propia.

No obstante, también se observó que cuando las muestras del mortero Z50 concluyeron su proceso de “curado” y fueron extraídas del agua, éstas perdieron mayor humedad en comparación de la mezcla control, por lo que se puede asumir que, aunque en menor proporción, este material es capaz de perder humedad a temperatura ambiente, después de haberse saturado de humedad, sin necesidad de apoyo mecánico.

Por último, todo lo antes descrito coincide con el comportamiento previo que se ha descrito de las zeolitas en otras investigaciones (Bosch & Schifter, La zeolita, una piedra que hierve, 1997); Por ello, se puede concluir que la capacidad de hidratación reversible de las mismas, sigue activa en el mortero Z50, lo que demuestra lo anticipado en la segunda hipótesis secundaria y, por tanto, el comportamiento del mortero Z50 sería similar a lo que se aprecia en la Figura 51.

Conclusiones y recomendaciones

- De las tres puzolanas trabajadas en esta investigación (diatomita, perlita y zeolita) la que produjo el mortero con mejores funcionamientos, fue la zeolita.
- La diatomita sirvió para generar morteros con resistencias a la compresión que cumplen con lo solicitado por las normas, pero con rendimientos térmicos bajos.
- Con la perlita se fabricaron morteros con muy buenas capacidades de aislamiento térmico, pero muy bajas resistencias a la compresión.
- El mortero con el comportamiento térmico-estructural más óptimo fue el Z50, elaborado sustituyendo la mitad del volumen del agregado fino de la mezcla por zeolita. Este mortero presentó una reducción del 37% del coeficiente de conducción térmica y 8% de la resistencia a compresión, con respecto a los resultados de la mezcla control.
- Para elaborar morteros puzolánicos con resistencias a compresión viables de acuerdo con las normas NMX-C-486-ONNCCE-2014, ASTM C-270 y ASTM C-780, fue necesario reducir el agua de la mezcla de proporción 1:0.95 a 1:0.70.
- En los morteros puzolánicos, entre más porcentaje de puzolanas incluya, menor será su coeficiente de conducción térmica y su resistencia a la compresión.
- La capacidad de hidratación reversible de la zeolita, se mantiene activa aun cuando ya se encuentre integrada dentro del cemento de albañilería, generando así un mortero hidrofílico y cumpliendo el objetivo principal de este trabajo.
- Se recomienda seguir la investigación de los morteros elaborados con diatomita, pero se recomienda emplearlos en usos donde su porosidad pueda resultar de utilidad, tal como en los morteros permeables.
- En el caso de los morteros elaborados con perlita, se recomienda continuar su investigación, pero para la elaboración de elementos arquitectónicos super ligeros.
- Como líneas de investigación a futuro, sería conveniente realizar un microanálisis químico sobre el material Z50, con el objetivo de establecer claramente como es la estructura de este mortero, ya que con esto se puede comprender si las zeolitas

se encuentran totalmente integradas en la mezcla o no, lo que podría explicar la capacidad de hidrofílica del material.

- Sería interesante repetir la prueba de absorción de humedad total a 24 horas, pero pesando las muestras cada hora para así establecer a detalle el comportamiento del material, así como para determinar claramente la curva de adsorción de este mortero y/o si es que existe un punto en el que deja de adsorber.
- Se sugiere estudiar las interacciones del mortero Z50 con otros materiales, a fin de establecer cuál sería el rendimiento de este mortero al ser utilizado en obra como material de acabado en las construcciones.
- Por último, sería interesante establecer el funcionamiento del mortero Z50 en diferentes tipos de climas, aunque se considera especialmente importante establecer su rendimiento en áreas con climas desérticos, ya que se teoriza que dado que este material ha mostrado presentar resistencia para eliminar sus reservas de humedad, aun cuando es expuesto a altas temperaturas, entonces, si se le humedece con cierta regularidad, podría utilizarse como material de apoyo en el aislamiento térmico de las edificaciones de estas zonas.

Anexos:

1.- Caracterización de un banco de material piroclástico en Santiago de Anaya, Hidalgo

Este banco de material fue localizado en el municipio de Santiago de Anaya, Hidalgo, en las coordenadas $20^{\circ}24'30.39''\text{N}-98^{\circ}58'37.79''\text{O}$, sobre el kilómetro 8 del camino entre de Santiago de Anaya y el poblado del Águila (Figura 52). Este material fue caracterizado, no solo para utilizarlo como parte de esta investigación, sino también para generar información que pudiera resultar útil para esa comunidad y que fomentará la generación de una minería social.

El objetivo de la caracterización del yacimiento fue corroborar la existencia de zeolitas en el material, así

como determinar su porcentaje de presencia. Para lograrlo, tras concluir las pruebas, se compararon los resultados obtenidos con los datos obtenidos del material del ejido El Zapote, municipio de Huayacocotla, Veracruz; del cual ya se había comprobado que contaba con una alta presencia de zeolitas del tipo clinoptilolita.

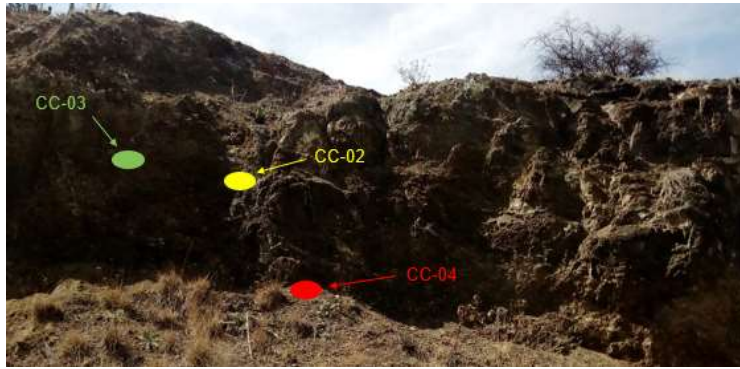
a) Muestreo

El área muestreada es un banco de material piroclástico que tiene mucho potasio y muestra señales de alteración argílica y/o hidrotermal, lo que ha dado pie a la generación de zeolitas en el lugar. Cabe mencionar que el lugar contiene muchas arcillas y que se encuentra al lado de una falla inversa, en la que se aprecian diversas características físicas que permitieron realizar la localización de este banco.

Con respecto a los muestreos, se realizaron dos: uno el 23 de febrero de 2018, en donde se tomaron muestras de tres puntos, a los que les asigno la nomenclatura CC-02, CC-03 y CC-04, mismos que se encuentran ubicados a detalle en la figura 53.



Figura 52.- Imagen del Yacimiento de Zeolita en Santiago de Anaya, visto desde la carretera. Fotografía de elaboración propia.



CC-02



CC-03



CC-04

Figura 53.- Imágenes de la ubicación y a detalle de los lugares de donde se tomó el primer muestreo. Fotografías de elaboración propia.

Posteriormente, el día 18 de abril de 2019, se procedió a realizar un segundo muestreo en el que se obtuvieron las muestras CC-05, CC-06 y CC-07. Esta última muestra se conformó específicamente de las pequeñas rocas blancas que sobresalían de las muestras CC-05 y CC-06 para averiguar cuál la composición exacta de las mismas (Figura 54).

b) Descripción de las pruebas de caracterización del banco

Una vez que se obtuvieron las seis muestras del banco a analizar, estas se rotularon con la clave y ubicación que se aprecia en la tabla 37. Estas claves se usaron para su identificación en las pruebas posteriores.

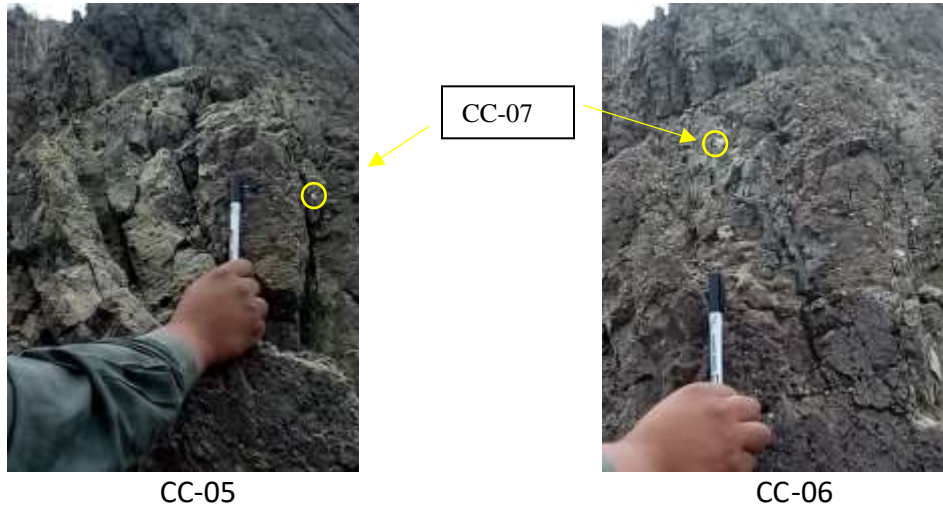


Figura 54.- Imágenes de la ubicación y a detalle de los lugares de donde se tomó el segundo en el yacimiento de Santiago de Anaya. Fotografías de realización propia.

Tabla 37.- Clave y ubicación de las muestras para la caracterización del banco de Santiago de Anaya. Tabla de elaboración propia.

Clave de muestra	Ubicación	Clave de muestra	Ubicación
CC-2	Pared izquierda del banco	CC-5	Pared derecha superior del banco
CC-3	Material de brecha	CC-6	Pared derecha baja del banco
CC-4	Material en el suelo	CC-7	Material de relleno de las brechas

1.- Granulometría

El procedimiento para la preparación de las muestras de la caracterización del banco de material de Santiago de Anaya, consistió primeramente en hacer pasar el material por una serie de mallas; en este caso se usaron los números: 6, 10, 18, 20, 25 y 200, para lo que se empleó una tamizadora marca W. S. TYLER modelo RX-812, con un ciclo de tamizado de

dos minutos y medio, para luego determinar la cantidad de material que era retenido en cada malla, pesándolo con una báscula electrónica, registrando y guardando estos datos para cálculos posteriores (figura 55).



Figura 55.- Proceso de tamizado y pesado de las muestras. Fotografía de elaboración propia.

Una vez que se pasaron todas las fracciones por mallas, se generaron las curvas granulométricas de las mismas. El resumen de los resultados obtenidos en este apartado aparece en el capítulo de resultados y las curvas elaboradas, se muestran en el anexo 2.

2.- Fluorescencia de rayos X

Para realizar esta prueba, se procedió a moler las muestras, pasando el material por la malla 200. Para el proceso de molido, se utilizó un mortero de porcelana sobre las muestras hasta lograr obtener un aproximado de 25 gramos de material fino de cada una (figura 56).

Una vez listas las muestras, la prueba de fluorescencia de rayos X se realizó utilizando un analizador de marca BRUKER, Modelo S1 TITAN. El procedimiento para realizar la prueba consistía en colocar aproximadamente 10 g de la muestra a analizar dentro de unos recipientes circulares, que son accesorios del espectrofotómetro. Luego la muestra analizada, se sellaba con una membrana plástica de la marca CHEMPLEZ de 3.0" de diámetro (Figura 57).



Figura 56.- Proceso de molido de muestras. Fotografía de elaboración propia.



Figura 57.- Proceso para la prueba de fluorescencia de Rayos X. Fotografías d elaboración propia.

Una vez selladas las muestras, se colocaban en el compartimento del soporte del espectrofotómetro, asegurándose de colocar el recipiente al centro del lente del aparato. La medición se realizó utilizando la rutina llamada GEOCHEM, enfocada a la caracterización de suelos y obteniendo así los resultados de caracterización química con esta prueba.

3.- Microscopio electrónico de barrido (MEB-EDS)

Esta prueba se realizó utilizando un Microscopio electrónico de Barrido de la marca JEOL modelo JSM-IT300, equipado con un detector de energía retro dispersiva de rayos X (EDS) marca OXFORD INSTRUMENTS X-MAXn Modelo 51-XMX1181, equipo ubicado en la ciudad de Apan, Hidalgo, dentro de la Escuela Superior de Apan de la UAEH.

Para la realización de la prueba, los polvos secos (muestras se colocaron en capas uniformes sobre cinta de grafito en un porta muestra (Figura 58). Una vez preparadas las

muestras, estas se colocaron dentro del aparato (MEB) (Figura 59), donde con ayuda de software del mismo, se analizaron las muestras y se obtuvo la caracterización de las muestras (morfología y composición química semicuantitativa), misma que se puede apreciar a detalle en el Anexo 3.



Figura 58.- Proceso de preparación de muestra para la prueba del microscopio de barrido. Fotografías de elaboración propia.



Figura 59.- Proceso de utilización del microscopio de barrido, ejecutado por un técnico especialista. Fotografías de elaboración propia.

Para determinar si el yacimiento de Santiago de Anaya contiene zeolitas en su composición química, se compararon los resultados obtenidos con una clinoptilolita de Turquía, lugar del que se considera que se obtienen las muestras de clinoptilolita de mayor pureza a nivel mundial³³ (Lorrio Domene, 2011), también se comparó con una clinoptilolita proporcionada por un fabricante llamado ZEOCAT, el cual tiene su sede en Santa María de Palautordera en Barcelona (Tabla 38).

³³ De entre el 92 y 96% (Lorrio Domene, 2011)

Tabla 38.- Composiciones Químicas de zeolitas, utilizadas como base para la comparativa de los resultados de las muestras. Tablas obtenidas con fines educativos del Trabajo Fin de Máster para Arquitectura Técnica de la Lic. Lorrio Domene, Laura y de la tesis de Maestría en Ciencias de los Materiales del M. García Ramírez Marcelino

Composición química	% en peso
SiO ₂	62.53
Al ₂ O ₃	13.00
Fe ₂ O ₃	2.60
CaO	6.20
MgO	1.50
Na ₂ O	5.40
K ₂ O	1.80
Otros	6.92
Total	100

A

Composición química	% en peso
SiO ₂	68.15
Al ₂ O ₃	12.30
Fe ₂ O ₃	1.30
CaO	3.95
MgO	0.90
Na ₂ O	0.75
K ₂ O	2.80
Otros	0.20
Total	100

B

Una vez que se obtuvieron tanto los resultados de las muestras, como las composiciones base de zeolita por caracterización por MEB-EDS, se procedió a realizar el análisis, obteniendo los resultados que se muestran en el siguiente capítulo.

c) Resultados

1.- Granulometría

A partir de los resultados obtenidos a través del tamizado de las seis muestras de material analizado, se generaron curvas granulométricas de cada una de ellas. Estas curvas sirven para determinar el tipo de suelo al que pertenece cada una: gravas, arenas o finos.

Las curvas elaboradas se pueden consultar a detalle en el anexo 2 y el resumen de estos resultados se aprecia en la siguiente tabla:

Tabla 39.- Resultados del tipo de suelo obtenido por el tamizado. Tabla de elaboración propia.

Código de muestra	Tipo de suelo	Código de muestra	Tipo de suelo
CC-02	GRAVOSO	CC-06	GRAVOSO
CC-03	ARENOSO	CC-07	ARENOSO
CC-04	ARENOSO	Zeolita de "el banco"	ARENOSO
CC-05	GRAVOSO		

2.- Fluorescencia de rayos X y Microscopio electrónico

En la tabla 40 se aprecian los resultados obtenidos a través de esta prueba con respecto a las seis muestras analizadas del banco de material de Santiago de Anaya. Cabe mencionar que dichos resultados fueron comparados también con una muestra obtenida del yacimiento en el ejido el Zapote, municipio de municipio de Huayacocotla, Veracruz; a modo de referencia para analizar los datos recabados.

Asimismo, tras este análisis de los resultados de la prueba de fluorescencia y la composición química obtenida por EDS en el microscopio electrónico de barrido, se pudo apreciar que las muestras CC-02, CC-05 y CC-06 son la que tienen cierta similitud a la composición química de una zeolita (tabla 41).

Tabla 40.- Resumen de los resultados obtenidos de la comparación de la caracterización de las muestras tomadas del yacimiento de Santiago de Anaya, con respecto a las composiciones de zeolitas tomadas como base para el análisis. Tabla de elaboración propia.

Código de muestra	Descripción	Código de muestra	Descripción
CC-02	CIERTA SIMILITUD	CC-05	CIERTA SIMILITUD
CC-03	BAJA SIMILITUD	CC-06	CIERTA SIMILITUD
CC-04	BAJA SIMILITUD	CC-07	MUY BAJA SIMILITUD

3.- Análisis de los resultados de la caracterización del banco de material

Con base en todos los resultados obtenidos en las diferentes pruebas realizadas al yacimiento de Santiago de Anaya, y tomando en cuenta un análisis mineralógico preliminar por difracción de rayos X (Figura 60) se pudo concluir lo siguiente:

1. Se corrobora la presencia de zeolitas del tipo chabasita en la muestra cc02, en una presencia que equivalente al 7% del volumen total del área que ocupa este material, ya que fue la única que presentó la presencia de chabasita.
2. Las muestras cc03 y cc07, estuvieron compuestas predominantemente por calcita, además de contar con pequeñas cantidades de moscovita en el caso de la primera y de cuarzo en la segunda.
3. La muestra cc04 estuvo dominada por calcita y en menor proporción por plagioclasas y moscovita (mica), así como una pequeña cantidad de magnetita.

4. La muestra cc05 y cc06, son básicamente iguales y mostraron los minerales característicos de las rocas dacíticas-andesíticas, pero con menos calcita, por lo que se puede concluir que se trata de la roca encajonante y, por tanto, aquella en donde la influencia de los fluidos calientes fue menor.

Tabla 41.- Resultados de la caracterización de las muestras por Fluorescencia de Rayos X. Tabla de elaboración propia.

Compuesto		Muestra						
		zeolita de "el puerto"	CC-2	CC-3	CC-4	CC-5	CC-6	CC-7
SiO ₂	(%)	50.483	34.014	23.295	25.761	35.981	35.776	17.291
Al ₂ O ₃		5.652	4.043	2.371	2.918	6.253	6.349	0.307
P ₂ O ₅		0.411	0.525	0.646	0.623	0.657	0.706	0.880
S		0.228	0.238	0.203	0.236	0.259	0.225	0.096
K ₂ O		1.704	1.608	1.520	0.899	0.752	0.688	---
CaO		1.291	3.872	24.177	15.339	7.841	7.169	45.345
TiO ₂		0.142	0.673	0.353	0.675	1.370	1.241	0.100
Fe ₂ O ₃		1.604	15.095	8.837	11.389	8.096	7.952	1.799
MnO		0.016	0.379	0.106	0.188	0.067	0.051	0.211
Cl		0.027	---	---	---	---	---	---
V		---	0.022	0.014	0.020	0.020	0.019	---
Cr		---	0.022	---	0.013	0.026	0.023	---
Ni		---	0.018	0.006	0.015	0.008	0.009	0.004
Cu		0.003	0.033	0.008	0.008	---	0.004	0.004
Zn		---	0.012	---	0.005	0.009	0.007	---
Rb		0.022	0.031	0.046	0.024	0.006	0.007	0.003
Sr		0.056	26.000	0.010	0.027	0.064	0.066	0.006
Y		0.007	0.008	0.002	0.004	0.010	0.009	0.007
Zr		---	8.000	0.007	0.008	0.010	0.009	0.003
As		0.002	0.003	---	---	---	---	---
Nb		0.003	---	---	---	---	---	---
Ba		0.091	0.073	---	---	---	0.071	---

5. Los resultados arrojados por las pruebas realizadas, mostraron que el banco de material de Santiago de Anaya no cuenta con el suficiente porcentaje de zeolitas en su composición como para ser empleado en la elaboración de las muestras para este trabajo, por lo que, para ese fin, se decidió finalmente utilizar las zeolitas extraídas del ejido El Zapote, municipio de Huayacocotla, Veracruz.

6. Se concluyó que la retención de humedad que se observó en el material de Santiago de Anaya se debió a que en la muestra cc02, además de chabasita, también contenía moscovita, material que, por su composición mineralógica, retiene la humedad.
7. Tomando en cuenta la composición química y mineralógica de estas muestras y con base en investigaciones previas (Maria Ramírez & Juárez Hernández , 2021) (Obregón-Portocarrero, Díaz-Ortiz, Daza-Torres, & Aristizabal-Rodríguez, 2016), se considera que el material de este banco podría utilizarse de manera adecuada para eficientar el desempeño de los fertilizantes que se utilizan en la región para los cultivos de maíz, aunque es necesario realizar estudios más detallados para establecer el método y proporción adecuados para su uso.

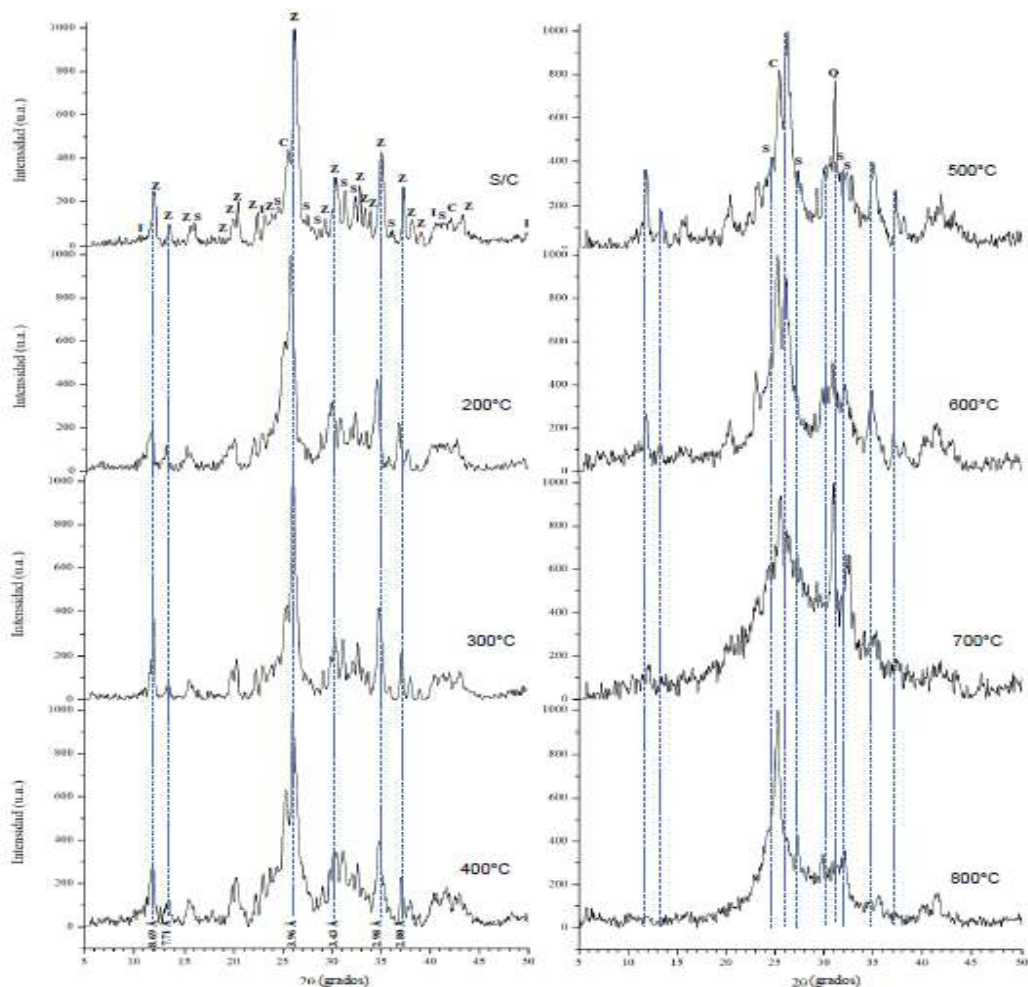


Figura 60.- Difractogramas de la zeolita utilizada en el trabajo, la cual fue calcinada a diferentes temperaturas. S/C=sin calcinar, I=Illita, Z=zeolita, S=Sanidina, C=Cristobalita y Q=Cuarzo. Imagen de tomada con fines educativos del artículo “Determinación de la estabilidad térmica de zeolitas procedentes de los estados de Guerrero y Veracruz”

Anexo 2: Tablas granulométricas elaboradas de las muestras de zeolita

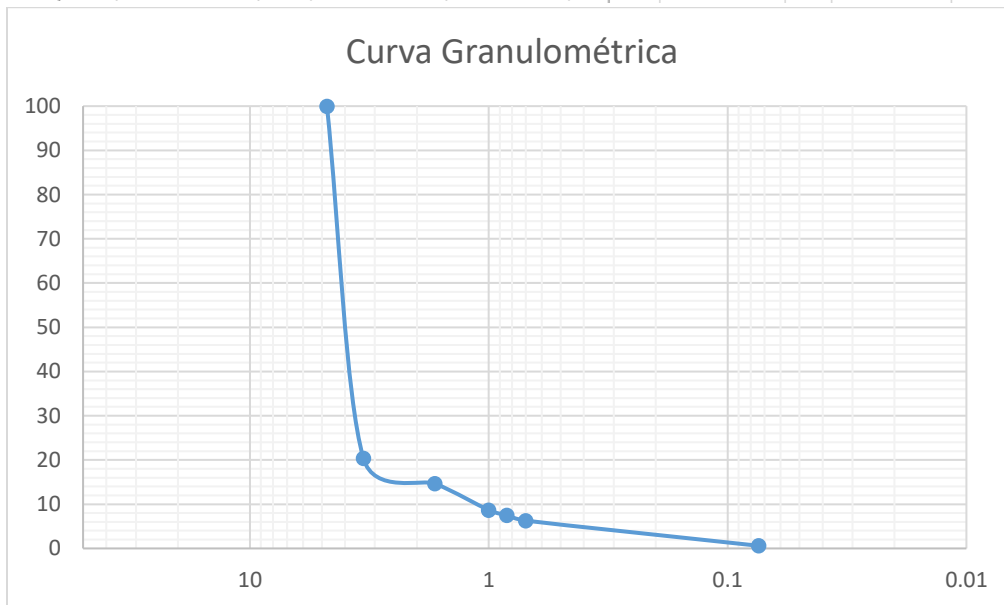
Muestra CC-02

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

TIPO DE SUELOS	MALLA No Pulg	ABERTURA (mm)	MASA SUELO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
GRAVAS	No. 4	4.76	0	0.00	0.00	100.00
	No. 6	3.35	266	79.64	79.64	20.36
ARENAS	* 10	1.68	19	5.69	85.33	14.67
	18	1.00	20	5.99	91.32	8.68
	20	0.84	4	1.20	92.51	7.49
	25	0.70	4	1.20	93.71	6.29
	* 200	0.074	19	5.69	99.40	0.60
FINOS	CHAROLA		2	0.60	100.00	0
Sumatoria			334	100.00		0

% GRAVAS	% ARENAS	% FINOS
79.64	19.76	0.60

Masa de la muestra inicial (m_{mi}) =	335	g	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD
Masa de la muestra final (m_{mf}) =	334	g	
$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 3.73$			COEFICIENTE DE CURVATURA
$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} = 2.87$			
$\epsilon\% = \frac{m_{mi} - m_{mf}}{m_{mi}} = 0.30\%$			Para gravas: $C_u < 4$ y $C_c =$ entre 1 y 3
D10 =	1.1	mm	Para arenas: $C_u > 6$ y $C_c =$ entre 1 y 3
D30 =	3.6	mm	
D60 =	4.1	mm	



Muestra CC-03

TIPO DE SUELOS	MALLA No Pulg	ABERTURA (mm)	MASA SUELO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
GRAVAS	No. 4	4.76	0	0.00	0.00	100.00
	No. 6	3.35	95	26.76	26.76	73.24
ARENAS	* 10	1.68	33	9.30	36.06	63.94
	18	1.00	58	16.34	52.39	47.61
	20	0.84	15	4.23	56.62	43.38
	25	0.70	15	4.23	60.85	39.15
	* 200	0.074	117	32.96	93.80	6.20
FINOS	CHAROLA		22	6.20	100.00	0
Sumatoria			355	100.00		0

% GRAVAS	% ARENAS	% FINOS
26.76	67.04	6.20

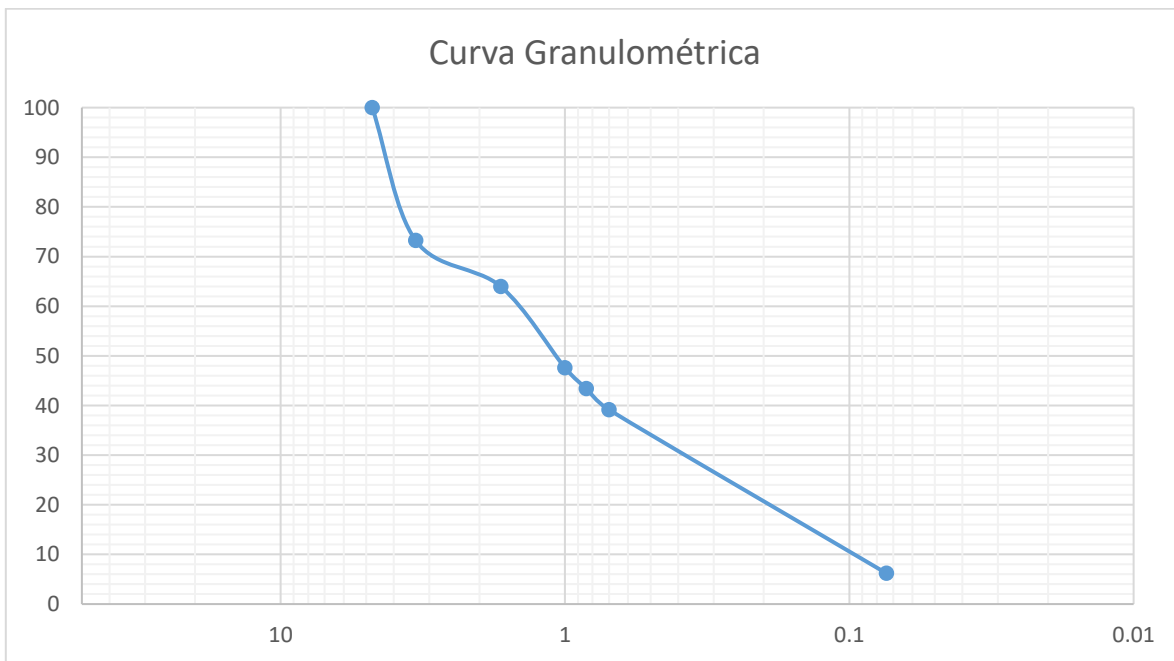
Masa de la muestra inicial (m_{mi}) =	357	g
Masa de la muestra final (m_{mf}) =	355	g
$\epsilon\% = \frac{m_{mi} - m_{mf}}{m_{mi}} =$	0.56%	
D10 =	0.1	mm
D30 =	0.4	mm
D60 =	1.55	mm

COEFICIENTE DE CURVATURA

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} = 1.03$$

Para gravas: $C_u < 4$ y $C_c =$ entre 1 y 3

Para arenas: $C_u > 6$ y $C_c =$ entre 1 y 3



Muestra CC-04:

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

TIPO DE SUELOS	MALLA No Pulg	ABERTURA (mm)	MASA SUELO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
GRAVAS	No. 4	4.76	0	0.00	0.00	100.00
	No. 6	3.35	51	11.62	11.62	88.38
ARENAS	* 10	1.68	63	14.35	25.97	74.03
	18	1.00	92	20.96	46.92	53.08
	20	0.84	24	5.47	52.39	47.61
	25	0.70	24	5.47	57.86	42.14
	* 200	0.074	167	38.04	95.90	4.10
FINOS	CHAROLA		18	4.10	100.00	0
Sumatoria			439	100.00		0

% GRAVAS	% ARENAS	% FINOS
11.62	84.28	4.10

Masa de la muestra inicial (m_{mi}) = 440 g
 Masa de la muestra final (m_{mf}) = 439 g

$$\epsilon\% = \frac{m_{mi} - m_{mf}}{m_{mi}} = 0.23\%$$

D10 = 0.11 mm
 D30 = 0.35 mm
 D60 = 1.1 mm

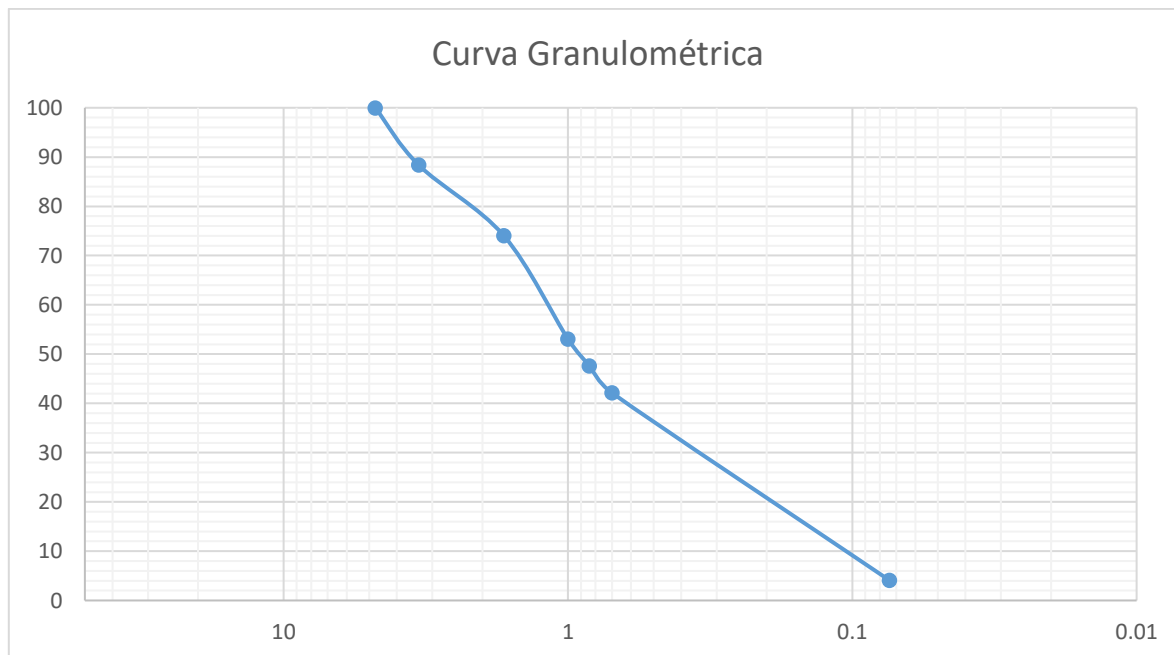
COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 10.00$$

COEFICIENTE DE CURVATURA

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} = 1.01$$

Para gravas: $Cu < 4$ y $Cc =$ entre 1 y 3
 Para arenas: $Cu > 6$ y $Cc =$ entre 1 y 3

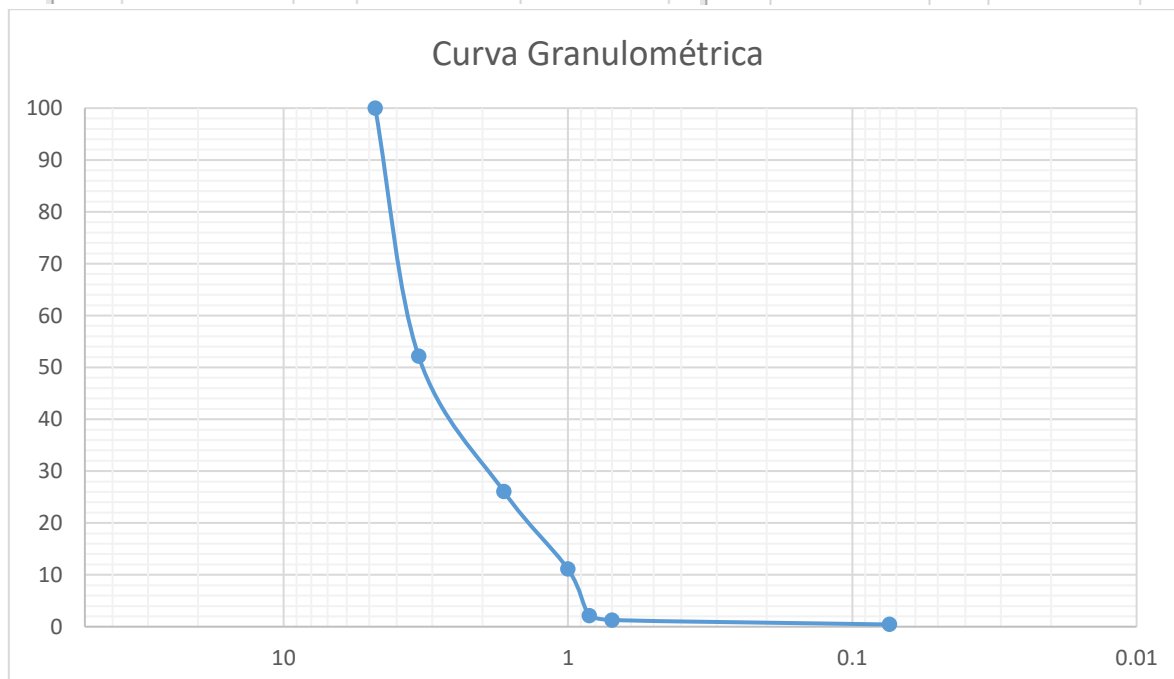


Muestra CC-05:

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO						
TIPO DE SUELOS	MALLA No Pulg	ABERTURA (mm)	MASA SUELO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
GRAVAS	No. 4	4.76	0	0.00	0.00	100.00
	No. 6	3.35	112	47.86	47.86	52.14
ARENAS	* 10	1.68	61	26.07	73.93	26.07
	18	1.00	35	14.96	88.89	11.11
	20	0.84	21	8.97	97.86	2.14
	25	0.70	2	0.85	98.72	1.28
	* 200	0.074	2	0.85	99.57	0.43
FINOS	CHAROLA		1	0.43	100.00	0
Sumatoria			234	100.00		0

% GRAVAS	% ARENAS	% FINOS
47.86	51.71	0.43

Masa de la muestra inicial (m_{mi}) =	235	g	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = 1.39$
Masa de la muestra final (m_{mf}) =	234	g	
$E\% = \frac{m_{mi} - m_{mf}}{m_{mi}} = 0.43\%$			COEFICIENTE DE CURVATURA
			$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} = 0.90$
D10 =	1.0	mm	Para gravas: $C_u < 4$ y $C_c =$ entre 1 y 3 Para arenas: $C_u > 6$ y $C_c =$ entre 1 y 3
D30 =	1.12	mm	
D60 =	1.39	mm	



Muestra CC-06:

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

TIPO DE SUELOS	MALLA No Pulg	ABERTURA (mm)	MASA SUELO RETENIDO (g)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE ACUMULADO (%)	PORCENTAJE QUE PASA (%)
GRAVAS	No. 4	4.76	0	0.00	0.00	100.00
	No. 6	3.35	147	50.69	50.69	49.31
ARENAS	* 10	1.68	77	26.55	77.24	22.76
	18	1.00	40	13.79	91.03	8.97
	20	0.84	21	7.24	98.28	1.72
	25	0.70	2	0.69	98.97	1.03
	* 200	0.074	2	0.69	99.66	0.34
FINOS	CHAROLA		1	0.34	100.00	0
Sumatoria			290	100.00		0

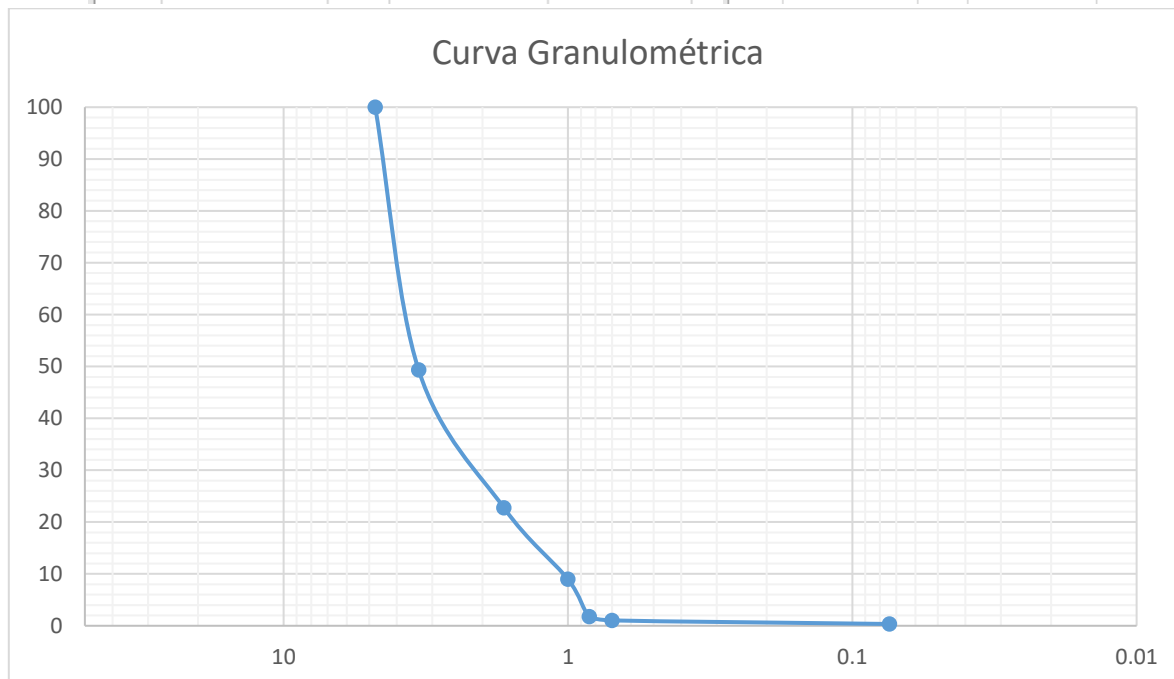
% GRAVAS	% ARENAS	% FINOS
50.69	48.97	0.34

Masa de la muestra inicial (m_{mi}) =	292	g
Masa de la muestra final (m_{mf}) =	290	g
$\epsilon\% = \frac{m_{mi} - m_{mf}}{m_{mi}} =$	0.68%	
D10 =	1.0	mm
D30 =	1.11	mm
D60 =	1.38	mm

COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD	
$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} =$	1.38

COEFICIENTE DE CURVATURA	
$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} * D_{10}} =$	0.89

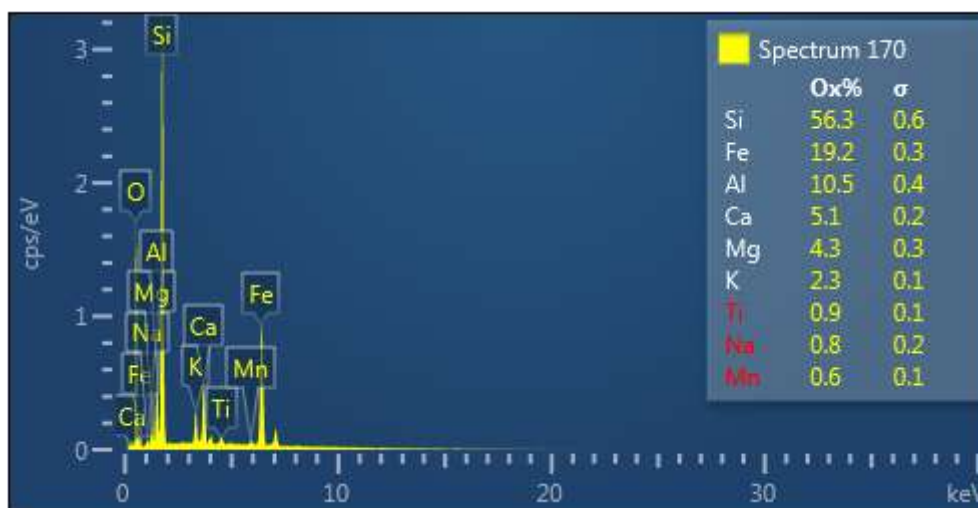
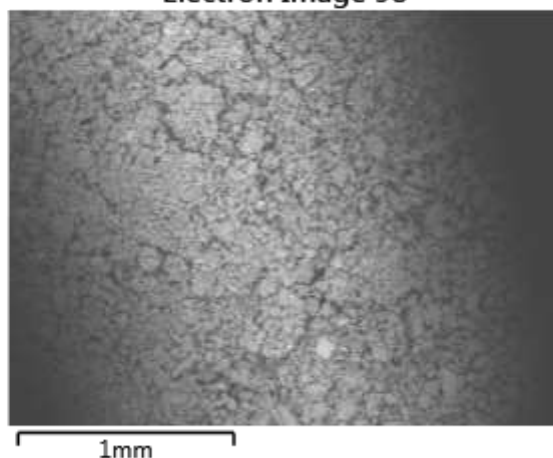
Para gravas: $Cu < 4$ y $Cc =$ entre 1 y 3
 Para arenas: $Cu > 6$ y $Cc =$ entre 1 y 3



Anexo 3: Tablas de resultado de la caracterización de las muestras por el Microscopio electrónico de barrido (MEB-EDS)

Muestra CC-02:

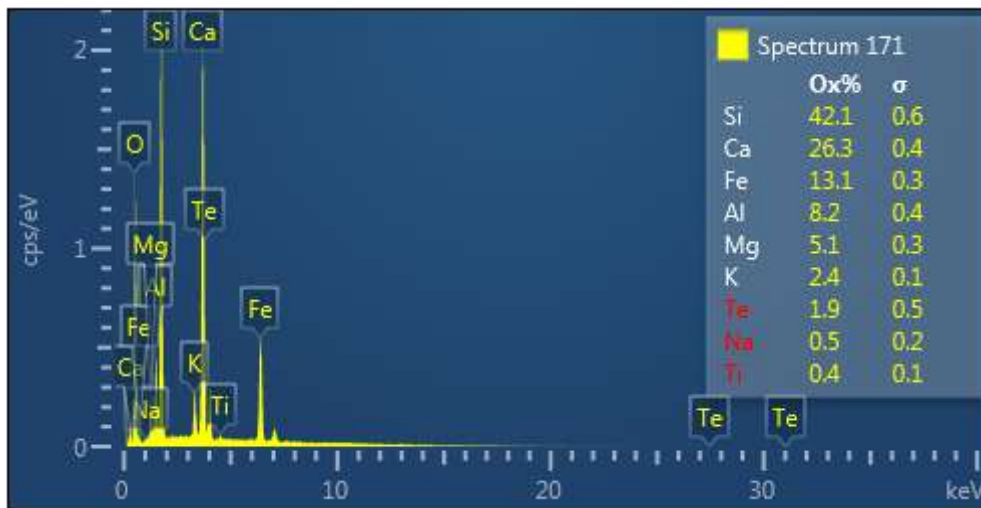
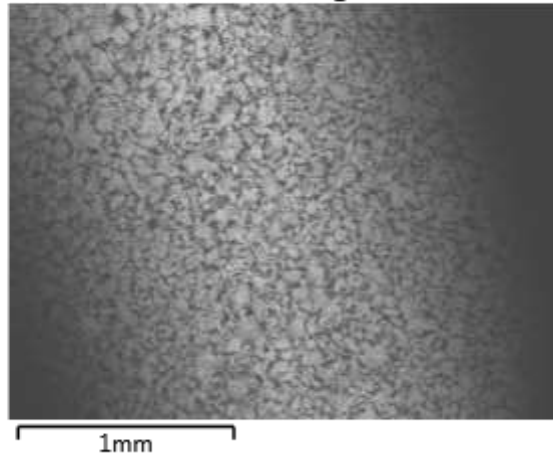
Electron Image 98



Element	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Oxide %	Oxide % Sigma
O	43.46		61.47		
Na	0.59	0.18	0.58	0.79	0.24
Mg	2.59	0.17	2.41	4.30	0.28
Al	5.57	0.19	4.67	10.53	0.35
Si	26.33	0.28	21.21	56.33	0.59
K	1.92	0.10	1.11	2.31	0.11
Ca	3.68	0.11	2.08	5.15	0.16
Ti	0.51	0.08	0.24	0.86	0.13
Mn	0.43	0.10	0.18	0.56	0.12
Fe	14.91	0.24	6.04	19.18	0.31
Total:	100.00		100.00	100.00	

Muestra CC-03

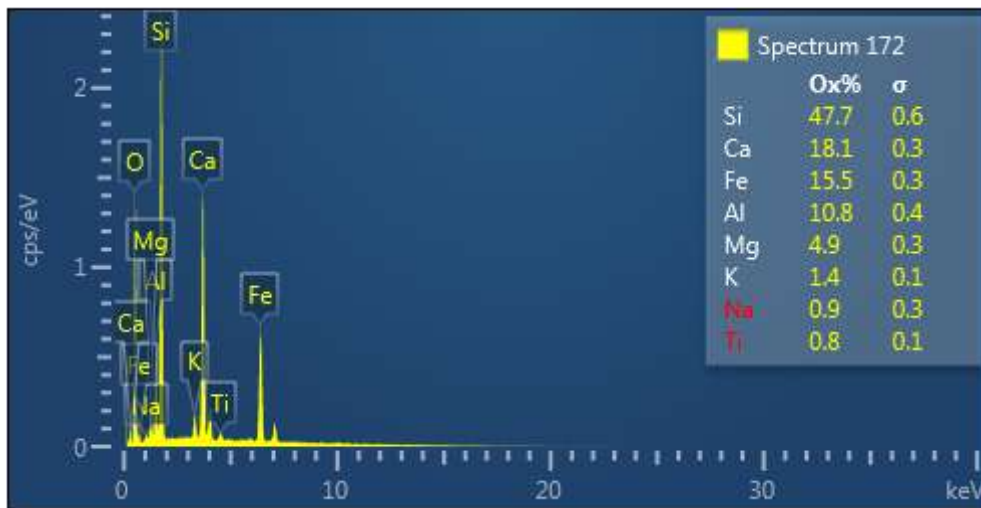
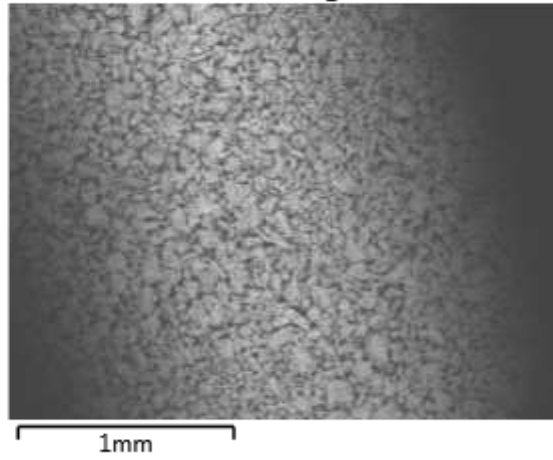
Electron Image 99



Element	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Oxide %	Oxide % Sigma
O	39.80		59.08		
Na	0.37	0.18	0.38	0.49	0.24
Mg	3.07	0.19	3.00	5.08	0.31
Al	4.35	0.20	3.83	8.23	0.37
Si	19.66	0.28	16.63	42.07	0.60
K	1.99	0.11	1.21	2.40	0.13
Ca	18.76	0.25	11.12	26.25	0.36
Ti	0.27	0.08	0.13	0.45	0.14
Fe	10.21	0.23	4.34	13.14	0.30
Te	1.51	0.40	0.28	1.89	0.50
Total:	100.00		100.00	100.00	

Muestra CC-04:

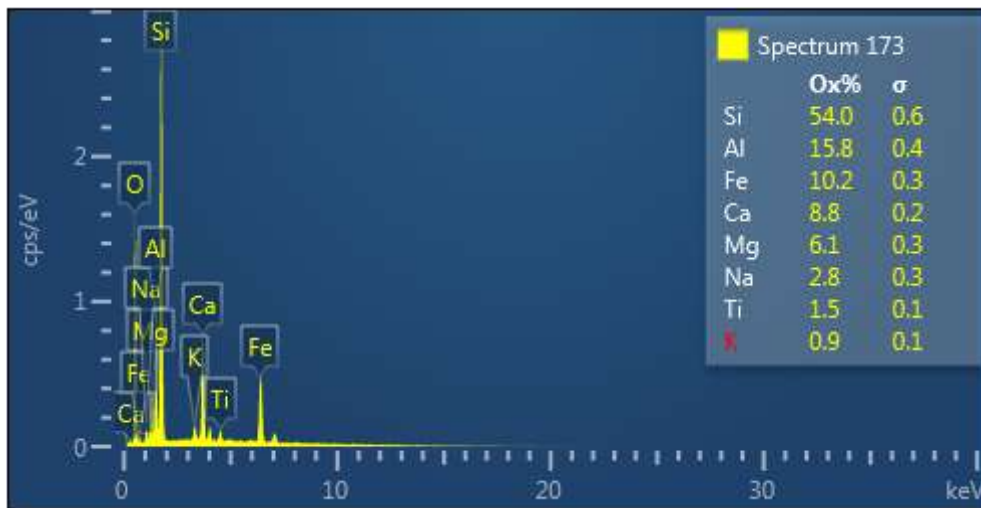
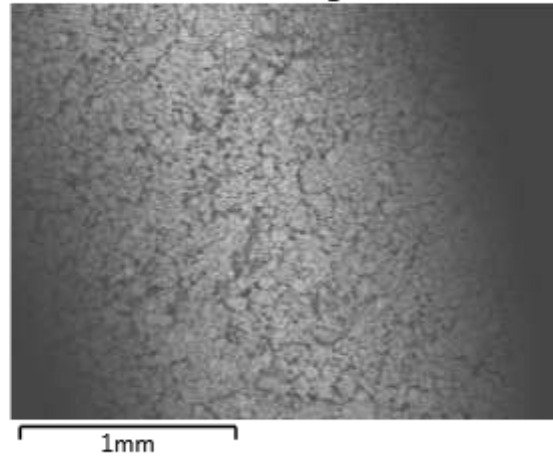
Electron Image 100



Element	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Oxide %	Oxide % Sigma
O	41.81		60.14		
Na	0.64	0.20	0.64	0.87	0.27
Mg	2.93	0.19	2.78	4.86	0.31
Al	5.69	0.20	4.85	10.75	0.38
Si	22.31	0.28	18.28	47.73	0.59
K	1.16	0.09	0.69	1.40	0.11
Ca	12.94	0.20	7.43	18.10	0.27
Ti	0.49	0.09	0.24	0.82	0.15
Fe	12.02	0.24	4.95	15.46	0.31
Total:	100.00		100.00	100.00	

Muestra CC-05:

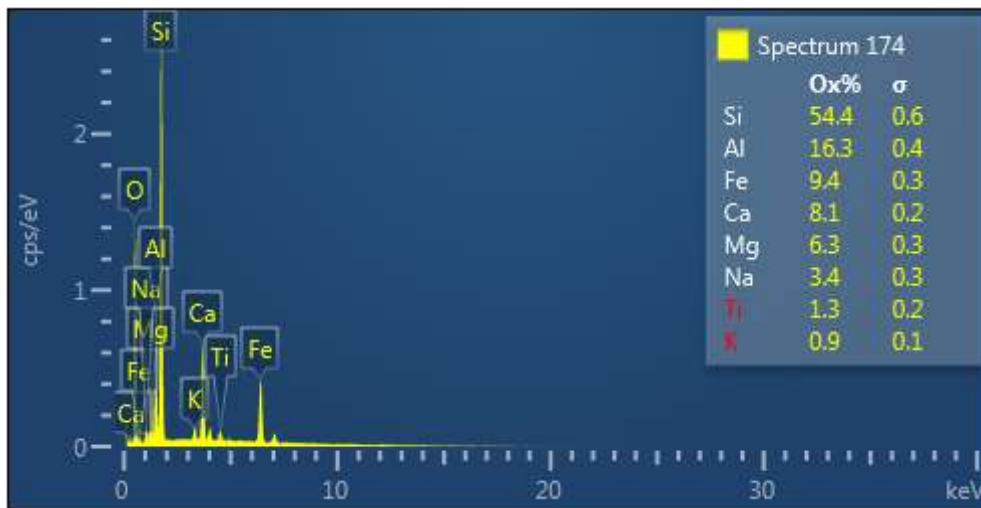
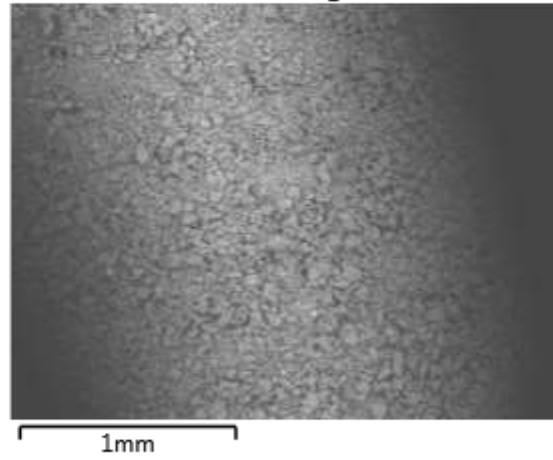
Electron Image 101



Element	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Oxide %	Oxide % Sigma
O	44.85		61.10		
Na	2.04	0.20	1.94	2.76	0.27
Mg	3.67	0.18	3.29	6.09	0.30
Al	8.38	0.21	6.77	15.83	0.40
Si	25.23	0.28	19.58	53.98	0.60
K	0.75	0.08	0.42	0.91	0.10
Ca	6.27	0.14	3.41	8.77	0.19
Ti	0.90	0.09	0.41	1.49	0.14
Fe	7.90	0.20	3.08	10.17	0.25
Total:	100.00		100.00	100.00	

Muestra CC-06:

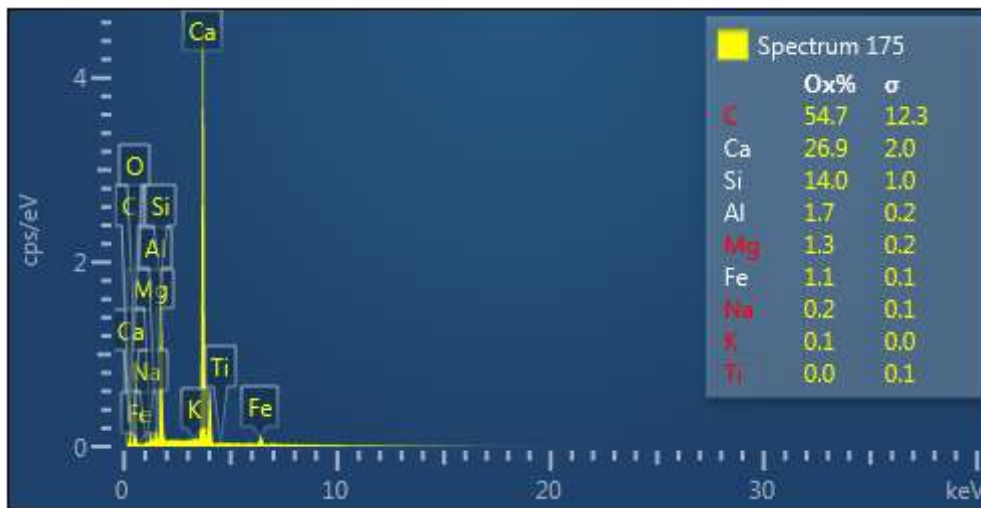
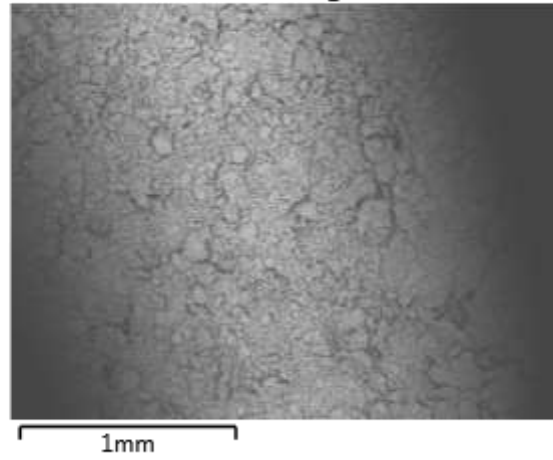
Electron Image 102



Element	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Oxide %	Oxide % Sigma
O	45.06		61.01		
Na	2.49	0.22	2.35	3.36	0.29
Mg	3.79	0.19	3.38	6.28	0.32
Al	8.64	0.22	6.94	16.33	0.42
Si	25.41	0.29	19.60	54.36	0.63
K	0.75	0.08	0.41	0.90	0.10
Ca	5.80	0.14	3.14	8.12	0.20
Ti	0.76	0.09	0.34	1.27	0.15
Fe	7.29	0.20	2.83	9.38	0.25
Total:	100.00		100.00	100.00	

Muestra CC-07:

Electron Image 103



Element	Wt%	Wt% Sigma	Atomic %	Oxide %	Oxide % Sigma
C	14.94	3.35	22.29	54.74	12.26
O	56.56		63.36		
Na	0.13	0.09	0.10	0.17	0.13
Mg	0.76	0.09	0.56	1.26	0.16
Al	0.90	0.09	0.60	1.69	0.18
Si	6.56	0.49	4.19	14.04	1.04
K	0.07	0.03	0.03	0.09	0.04
Ca	19.24	1.40	8.60	26.91	1.96
Ti	0.02	0.04	0.01	0.03	0.06
Fe	0.83	0.09	0.26	1.06	0.11
Total:	100.00		100.00	100.00	

Anexo 4: Proceso de elaboración de las muestras para la máquina de intemperismo con medidas de 15 x 7.5 x 1.5 cm:

1.- Para la generación de estas piezas, se utilizó un molde hecho de madera en el perímetro y vidrio en la base, con dichas medidas



2.- Se procedió a pesar cada uno de los componentes que se usarían en las mezclas de concreto y luego se revolviaron todos los componentes hasta obtener una masa uniforme con buena trabajabilidad vaciándola luego en los moldes de manera uniforme



3.- Por último, las piezas se dejaron fraguar hasta que estuvieron completamente secas antes de poder trabajar con ellas y/o ingresarlas a la cámara de intemperismo



Anexo 5: Proceso de elaboración de las muestras para la máquina de intemperismo con medidas de 30 x 30 x 2.5 cm:

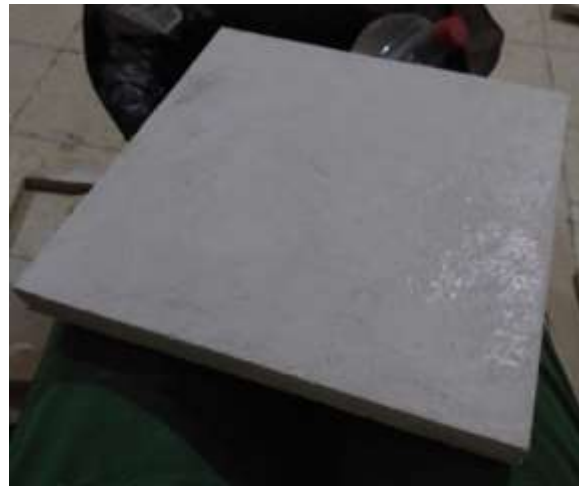
1.- Para la fabricación de estas piezas, se utilizó un molde hecho de madera en el perímetro y vidrio en la base, con dichas medidas



2.- Se procedió a pesar cada uno de los componentes que se usarían en las mezclas de mortero y luego se mezclaron todos los componentes hasta obtener una masa uniforme con buena trabajabilidad vaciándola luego en los moldes de manera uniforme



3.- Por último, las piezas se dejaron fraguar hasta que estuvieron completamente secas antes de poder trabajar con ellas y/o ingresarlas a la cámara de intemperismo



Anexo 6: Proceso de elaboración de los cilindros para el ensayo de concreto.

1.- Primero se pesaron y prepararon todos los ingredientes para llevar a cabo las mezclas, y una vez todo completado, se comenzaron a mezclar los ingredientes en una bandeja de metálica.





2.- después de armada e hidratada la mezcla, se procedió a colocar el desmoldante en los moldes de cilindro, para luego llenarlos siguiendo el proceso marcado en la norma: ingresar el concreto en tres capas, para después penetrarlas con una varilla 25 veces (procurando que la varilla atravesase hasta la capa anterior del concreto), golpeando suavemente el cilindro con un mazo de goma para tapar las irregularidades causadas por la varilla.

3.- Una vez lleno el molde, se tapaban con una bolsa plástica para evitar que se generará evaporación en los especímenes sin desmoldar.



4.- Una vez tapadas las piezas, se pusieron a descansar en el cuarto de curado.

5.- Pasado un día (pero menos de 48 horas) se procuró comenzar el desmolde de los cilindros, para luego ingresarlos a la tina de curado.



6.- El día en que se realizarían los ensayos de compresión, los cilindros a examinar se sacaban una hora antes del estudio y de ser necesario se cabeceaban.



7.- Finalmente, con los especímenes ya listos, se realizaba el ensayo, donde se registraba el esfuerzo máximo que presentaban los cilindros, ya que estos datos se usarían para posteriores cálculos.



Glosario:

Adsorción: Retención de las moléculas de un gas o de una sustancia en solución o en suspensión sobre la superficie de un sólido

Álcali: Óxido o hidróxido metálico soluble en agua que tiene reacción básica.

Anhidros: Que no tiene agua

Anhídrido: Se dice del producto formado por una combinación del oxígeno con un elemento no metal y que, al reaccionar con el agua, da un ácido.

Asequibilidad: Que puede alcanzarse, conseguirse, comprarse o pagarse.

Autígeno: Término que implica un desarrollo in situ durante o después de la deposición. Se aplica principalmente a material sedimentario; p. ej., crecimientos secundarios de los granos de cuarzo y arena y recristalización de calcita sobre fragmentos de conchas. Relativo a los minerales o los materiales que se desarrollan en sitio con una roca, en vez de haber sido transportados y depositados. Estos minerales son el cuarzo, la clorita y otros minerales o cementos que rellenan los poros, que se desarrollan durante la diagénesis. Los minerales evaporativos son autógenos o formados en sitio.

Depósitos epitermales: Son aquellos en los que la mineralización ocurrió dentro de 1 o 2 km de profundidad desde la superficie terrestre y se depositó a partir de fluidos hidrotermales calientes.

Diagénesis: La diagénesis (gr. δια- *dia-*, «a través de», y γένεσις *genesis*, «origen») es el conjunto de procesos de formación de una roca sedimentaria a partir de sedimentos, tales como compactación, recristalización o cementación. La diagénesis se produce en el interior de los primeros 5 o 6 km de la corteza terrestre a temperaturas inferiores a (Pérez , y otros, 1997) 150-200 °C; más allá se considera ya metamorfismo

Difracción de rayos X: Técnica utilizada para obtener información sobre la estructura y la composición de los materiales cristalinos.

Enlace molecular: Ligadura química que se produce cuando se comparten los electrones y se forma una molécula de alguna sustancia; su naturaleza es esencialmente eléctrica

Entalpia: (del griego ἐνθάλπω [enthálpō], «agregar calor»; formado por ἐν [en], «en» y θάλπω [thálpō], «calentar») es una magnitud termodinámica, simbolizada con la letra H mayúscula, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.

Epidota: *es un mineral sorosilicatado de calcio, aluminio y hierro, que responde a la fórmula $Ca_2(Al, Fe)_3(SiO_4)_3(OH)$. Cristaliza en el sistema monoclinico.*

Estratigrafía: es la rama de la geología que trata del estudio e interpretación de las rocas sedimentarias, metamórficas y volcánicas estratificadas, y de la identificación, descripción, secuencia, tanto vertical como horizontal, cartografía y correlación de las unidades estratificadas de rocas.

Facies metamórficas: Es un grupo de rocas caracterizadas por conjunto definido de minerales que, bajo las condiciones de su formación, alcanzaron el equilibrio perfecto entre ellos. La composición mineral cualitativa y cuantitativa en las rocas de una facies dada varía gradualmente en correspondencia con las variaciones en la composición química de las rocas". Lo anterior es aplicable tanto a rocas metamórficas como ígneas

Félsico: *La palabra surge de la combinación de feldespato y sílice. Los minerales félsicos son normalmente de color claro y tienen una densidad relativa inferior a 3. Además, están asociados con las rocas tradicionalmente denominadas de carácter ácido, aunque dicha terminología está en desuso.*

Feldespato: Silicato doble de aluminio y de un metal alcalino o alcalino-férreo, de estructura laminar y de coloración débil.

Fórmula química: Así como un elemento puede ser representado por su símbolo, también un compuesto puede representarse por su fórmula, que consiste en los símbolos de los elementos que constituyen los compuestos, colocados uno a continuación del otro. Una fórmula no dice tan sólo qué elementos están combinados en el compuesto sino también cuánto hay de cada uno.

Frústula: Es la pared celular dura y porosa de la capa externa, o teca, de las diatomeas. Está compuesta casi en su totalidad por sílice (óxido de silicio hidratado) proveniente del ácido silícico, y recubierta con una capa de materia orgánica, la cual fue referida en la temprana literatura acerca de las diatomeas como pectina, una fibra mucho más encontrada en la pared celular de las plantas. Esta capa está realmente compuesta por varios tipos de polisacáridos.

Hidrólisis: Descomposición de sustancias orgánicas por acción del agua.

Ignimbrita: Es una roca ígnea y/o depósito volcánico que consiste en toba dura compuesta de fragmentos de roca y fenocristales en una matriz de fragmentos vítreos. Las ignimbritas suelen ser de composición intermedia a félsica

Ion: Átomo, o grupo de átomos cargados eléctricamente y cuyas cargas son el resultado de la ganancia o pérdida de uno o más electrones.

Isomorfo: Que tiene la misma forma, referido especialmente a los cuerpos de diferente composición química e igual forma cristalina y que pueden cristalizar asociados, como el espató de Islandia y la Giobertita que forman la dolomía.

Litología: Parte de la geología que estudia las rocas.

Lixiviación: Extracción de la materia soluble de una mezcla mediante la acción de un disolvente líquido.

Máfico: Es un adjetivo que se aplica a un silicato o roca que es rico en magnesio y hierro. La palabra deriva de la contracción de "magnesio" y "férico". La mayoría de los minerales máficos son de color oscuro y su densidad relativa es mayor que 3. Son ejemplos de minerales máficos el olivino, el piroxeno, el anfíbol y la biotita. Son rocas máficas el basalto y el gabro.

Metasomatismo: *Es un proceso geológico que corresponde la sustracción o adición de componentes químicos a una roca mediante fluidos acuosos con el requisito de que la roca debe mantenerse en el estado sólido*

Molécula: La partícula más pequeña de un elemento o compuesto que tiene todas las propiedades de ese elemento o compuesto.

Piroclastos: *(del griego πῦρ "fuego" y κλαστός "roto") o tefra (del griego "ceniza"), a cualquier fragmento sólido de material volcánico expulsado a través de la columna eruptiva arrojado al aire durante una erupción volcánica. Petrológicamente, los piroclastos son fragmentos de roca ígnea volcánica*

Polimerización: Unión de varias moléculas de un compuesto para formar grandes moléculas

Plagioclasa: *es un conjunto de minerales que comprenden la serie albita-anortita, sección triclinica del grupo de los feldespatos, perteneciente al grupo de los tectosilicatos, que es un constituyente importante de muchas rocas. Su nombre proviene del griego πλάγιος: oblicuo, y κλάσις: rotura.*

Reacción química: Cambio en una sustancia o sustancias que produce otras con propiedades químicas diferentes.

Roca encajonante: Los cuerpos rocosos que rodean a una masa intrusiva de roca ígnea, a una serie de filones o a cuerpos de reemplazamiento

Apariencia sacaroidea: Un tamaño de grano fino o medio con cristales fuertemente entrelazados. Se aplica sobre todo a mármoles y cuarcitas. También se le conoce como apariencia azucarada

Tetraedro: Poliedro con cuatro caras triangulares

Toba: *La toba volcánica o tufo volcánico es un tipo de roca ígnea volcánica, ligera, de consistencia porosa, formada por la acumulación de cenizas u otros elementos volcánicos muy pequeños expelidos por los respiraderos durante una erupción volcánica.*

Bibliografía:

- Agencia de protección Ambiental de los Estados Unidos. (Mayo de 1999). *epa.gov*. Obtenido de Zeolita, un adsorbente versátil de contaminantes del aire: <https://www3.epa.gov/ttnatc1/cica/files/zeolits2.pdf>
- Aguilar Armenta, G., & Patiño Iglesias, M. E. (Noviembre de 2002). influencia del intercambio iónico de clinoptilolita natural en la cinética de adsorción de CO₂, N₂ y CH₄ a 20°C. *Revista de la sociedad química de México*, 46(4), 324-329.
- Alchapar, N. L., Correa, E. N., & Cantón, M. A. (2012). Solar reflectance index of façade coatings: mitigation potential of urban heat islands. *Ambiente Construido, Porto Alegre*, 107-123.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. 56. (O. d. (FAO), Ed.)
- Alvarado Ibarra, J., Terán Samaniego, K., Vargas Hernández, D., & Bautista Olivas, A. (29 de Julio de 2020). Clinoptilolita natural mexicana tratada con plata para remover DDT en agua. *Biotechnia*, XXII(3), 146-155.
- Alvarez, J. (14 de Mayo de 2015). *Arq.com*. Obtenido de Bioconcreto. Concreto que se auto repara.: http://noticias.arq.com.mx/Detalles/20001.html#.WSY_CNy1vIU
- Andrada, R., Baronetto, C., Positieri, M., Oshiro, A., Raggiotti, B., & Sánchez Soloaga, I. (2012). Evaluación térmica de morteros elaborados con zeolita como porcentaje de sustitución de aglomerante. *ASADES*, 16(08), 223-230.
- arquitecturaespectacular. (23 de Mayo de 2010). *arquitecturaespectacular*. Obtenido de Iglesia del Jubileo: <http://arquitecturaespectacular.blogspot.mx/2010/03/iglesia-del-jubileo.html>
- Asociación Nacional de Fabricantes de Aditivos para Hormigón y Mortero. (2005). *anfah.org*. Obtenido de Relación los hormigones y aditivos con el medio ambiente: <https://anfah.org/wp-content/uploads/pdf/articulo-tecnico-relacion-de-los-hormigones-y-aditivos-con-el-medio-ambiente.pdf>
- ASTM Internacional. (2014). *Historical Standard: Especificación Normalizada de Aditivos Químicos para Concreto*. ASTM C494/C494M - 08a.
- Baerlocher, C., Meier, W. M., & Olson, D. H. (2001). *Atlas of zeolite framework types*. Pennsylvania: ELSEVIER.
- Ballinas Oseguera, M. (2011). *Mitigación de la isla de calor urbana: Caso de la Zona Metropolitana de la ciudad de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciencias de la Tierra. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Barradas Miranda, V. L. (29 de Junio de 2012). *dgcs.unam*. Obtenido de Boletín UNAM-DGCS-407: http://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2012_407.html
- Barradas Miranda, V. L. (2013). *ecologia unam*. Obtenido de Oikos: <http://web.ecologia.unam.mx/oikos3.0/index.php/oikos-historico/numeros-antteriores/47-la-isla-de-calor-urbana-y-la-vegetacion-arborea>
- BBC Mundo. (29 de Junio de 2016). El cemento fosforescente mexicano que puede iluminar las carreteras del futuro. *BBC*, págs. <http://www.bbc.com/mundo/noticias-36662912>.

- Begoña, U. (18 de Mayo de 2015). *Archdaily*. Obtenido de Pabellón de Italia – Expo Milán 2015 : <http://www.archdaily.mx/mx/767016/pabellon-de-italia-nil-expo-milan-2015-nemesi>
- Borbón Almada, A., Burgos Flores, D., Castro Brockman, S., Duarte Gaxiola, A., & Quintana Pacheco, J. (2018). Análisis Termofísico de morteros cemento arena 1:4 para construcción, sustituyendo arena por perlita sintética. (U. d. Sonora, Ed.) *EPISTEMUS*, 46-52. Obtenido de <https://epistemus.unison.mx/index.php/epistemus/article/view/63/47>
- Borgel Espinoza, I. (2007). *Caracterización del yacimiento de Diatomita de Loma Larga, Municipio de Acatlán, Hidalgo; y evaluación de sus aplicaciones alternas*. Tesis que para obtener el título de Ingeniero minero-metalurgico, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Materiales y Metalurgia , Pachuca, Hidalgo.
- Bosch, P. (2003). La zeolita, una piedra que hierve. *Materiales Avanzados*, 1(1), 15-22.
- Bosch, P., & Schifter, I. (1997). *La zeolita, una piedra que hierve*. Ciudad de México: La ciencia para todos.
- Cañizares, M. (1998). *Desarrollo Urbano y Problemática Ambiental de la Ciudad de Portallano (Ciudad Real)*. (U. d.-I. Mancha, Ed.) Castilla: Ediciones de la Universidad de Castilla-la Mancha.
- Carrasco , C., Palme, M., & Gálvez, M. Á. (2016). Sky new factor and head island effect in Valparaizo. *Revista Urbano*(34), 26-33.
- CEMEX. (2018). *Cemexmexico*. Obtenido de Tipos de cemento: <https://www.cemexmexico.com/productos/cemento/cemex-mortero-optimo>
- Centro de Investigación Regional del pacifico Sur. (2004). *Zeolitas de oaxaca: Características mineralógicas y morfológicas*. Oaxaca: SAGARPA, Inifap.
- Cervantes Sánchez, E. (2014). EL DESARROLLO DE LA CIUDAD DE MÉXICO. *Revista de Comercio Exterior*, 50-66.
- CFE. (2015). *Informe Anual 2015*. Ciudad de México: Comisión Federal de Electricidad.
- Chacón Sánchez, V., & Astete García, J. (2015). *Estudio experimental del empleo de la diatomita en la producción de concreto con agregados de mina roja, Cunyac y Vicho*. Universidad Andina del Cusco. Cusco: Universidad Andina del Cusco. Recuperado el 20 de Noviembre de 2017
- Consejo Nacional de Población. (2014). Proyecciones de la población 2010-2050. *CONAPO*, 35.
- Delgadillo-García, A., Olguín-Martínez, Y., Corona-Hernández, L., Barrientos-Hernández, F., Salinas-Rodríguez, E., & García-Ramírez, M. (16 de Octubre de 2017). Determinación de la estabilidad térmica de zeolitas procedentes de los estados de Guerrero y Veracruz. (U. A. Hidalgo, Ed.) *Tópicos de Investigación en Ciencias de la Tierra y Materiales*, 4, 117-125. Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/aactm/article/view/3004/3025>
- Dirección General de Promoción Minera. (2006). *Perfil de mercado de la Diatomita*. Coordinación general de Minería.
- Excelsior. (15 de Mayo de 2016). Crean en México cemento con capacidad para emitir luz. *Excelsior*.
- Facultad de Química, UNAM. (2015). *depa.fquim. una*. Obtenido de http://depa.fquim.unam.mx/amyd/archivero/Unidad3Adsorcion_19664.pdf
- Fideicomiso para el fomento minero. (1997). *Estudio de mercado de productos minerales, bloque No. 3. Perlita*. Reporte final de estudio de Mercado, Consultoría en optimización empresarial, S.A. de C.V., Pachuca.

- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (Marzo de 2017). *fao.org*. Obtenido de <http://www.fao.org/3/y5013s/y5013s07.htm>
- Garces Riffo. (2004). *Hormigón con aserrín*. Tesis para obtener el título de ingeniero constructor, Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Valdivia, Chile.
- García Barcala, J. (23 de Marzo de 2017). *www.cienciahistorica.com*. Obtenido de puzolana: el ingrediente mágico de la ingeniería romana.: <https://www.cienciahistorica.com/2017/03/23/puzolana-ingrediente-ingenieria-romana/>
- García Ramírez, M. (2016). *Caracterización de depósito "El puerto" ubicado en Zimapán, Hidalgo y su uso metalúrgico*. Tesis de Maestría en Ciencias de los Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Pachuca.
- García Rojas, N., Villanueva Díaz, P., Campos Medina, E., & Velázquez Rodríguez, A. (junio de 2012). Analisis de la adsorción como método de pulimiento en el tratamiento de aguas residuales. *Quivera*, 109-129.
- Gobierno, S. d. (2012). *Evaluación de la conductividad o resistencia térmica de los materiales aislantes NOM-018-ENER-2011*.
- Gómez López, J. M., Antúnez Estrada, A. J., & Chavolla, F. (2018). *Comparativo de eficiencia energética de sistemas de aire acondicionado con tecnologías on-off e inverter*. Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, Dirección General de Eficiencia y Sustentabilidad Energética. Ciudad de México: Secretaría de Energía (SENER). Obtenido de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346457/Bolet_n_03_EE_Aire_Acondicionado.pdf
- Gómez Martín, J. M. (2001). *Síntesis, caracterización y aplicaciones catalíticas de zeolitas básicas*. Tesis Doctoral, Universidad Complutense de Madrid, Departamento de Ingeniería Química, Madrid. Recuperado el 09 de Diciembre de 2017
- Huamán Quispe, A. (2015). *Comportamiento mecánico del concreto reforzado con fibra de vidrio*. Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cajamarca, Facultad de Ingeniería.
- IMCYC. (Julio de 2011). *El concreto en la obra. Problemas, causas y soluciones*. Ciudad de México: Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Obtenido de Propiedades del concreto: <http://www.imcyc.com/cyt/julio04/CONCEPTOS.pdf>
- INAFED. (Septiembre de 2014). *inafed.gob*. Obtenido de Instituto Nacional para el Federalismo y el Desarrollo Municipal: <http://siglo.inafed.gob.mx/enciclopedia/EMM09DF/mediofisico.html>
- INEGI. (marzo de 2015). *cuentame inegi*. Obtenido de Instituto Nacional de Estadística y Geografía: <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/df/territorio/relieve.aspx?tema=me&e=09>
- INEGI. (2015). *Encuesta Nacional de los Hogares (ENH) 2014*. Ciudad de México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jímenez Cedillo, M. J. (2004). *Caracterización de minerales zeolíticos mexicanos*. Universidad Autónoma del Estado de México, Facultad de Química, Toluca.
- Lira-Cortés, L., González Rodríguez, O., & Méndez-Lango, E. (2008). Medición de la conductividad térmica de algunos materiales utilizados en edificaciones. *Simposio de Metrología 2008*. Santiago de Querétaro.
- Loera Serna, S. (2010). *Retención de gases en zeolitas*. Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciencia e Ingeniería en Materiales, Ciudad de México.

- López , M., & Castro, J. (Diciembre de 2010). Efecto de las puzolanas naturales en la porosidad y conectividad de poros del hormigón con el tiempo. *Revista ingeniería de construcción*, 25(3), 419-431. Obtenido de https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732010000300006
- López de Juambelz, R. I., Sainz Arellano, S., Hernández Pérez, E., Zabicky López, J., & Coca Olguín, J. (2015). *Manual de técnicas de análisis: Materiales ecológicos y constructivos*. Ciudad de México: UNAM.
- López Romero, M., Hernández Esponisa, M., Barahona Argueta , C., Martínez Guerrero, M., Portillo Reyes, R., & Rojas González, F. (marzo de 2010). Propiedades fisicoquímicas de la clinoptilolita tratada con fertilizantes a usar como aditivo en el cultivo de *Pleurotus ostreatus*. *terra Latinoamerica* , 247-254.
- Lorrio Domene, L. (2011). Análisis del comportamiento térmico de las zeolitas como material ligero, alternativo a la arcilla expandida, en hormigones para formación de pendientes. *Trabajo fin de Máster para Arquitecta Técnica*. (E. d. técnica, Ed.) Madrid, España: Universidad Politécnica de Madrid.
- MAPAMA, Gobierno de España. (10 de Agosto de 2015). <http://www.mapama.gob.es/es/>. Obtenido de Problemática ambiental y contaminantes: <http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/atmosfera-y-calidad-del-aire/emisiones/prob-amb/default.aspx>
- Martínez Arroyo, A. (julio-septiembre de 2007). El agua en la atmosfera. *Ciencia*(36).
- Martínez, D., Landiini, A., Svartz, H., Vence, L., Bottini , L., Mascarini, L., . . . Villela , F. (2006). Propiedades físicas e hidráulicas de perlita en cultivo de rosas y sus variaciones temporales. *Ciencia del suelo*, 24(2). Recuperado el 25 de Febrero de 2019, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672006000200010
- McHarg, I. L. (2006). Un paso adelante. En I. L. McHarg, *Proyectar con la naturaleza* (págs. 31-41). Estados Unidos: Gustavo Gili.
- Mendoza Córdova, A., Flores Valenzuela, J., Flores Acosta, M., Vidal Solano, J., & Paz Moreno, F. (2014). Estudio sobre la incorporación y retención de plomo en zeolita natural. *EPISTEMUS*, 8(17), 16-22.
- Montes Luna, A., Fuentes López, N., Perera Camacho, O., Castruita de León, G., García Rodríguez, S., & García Zamora, M. (marzo de 2015). caracterización de clinoptilolita natural y modificada con Ca²⁺ por distintos métodos físico-químicos para su posible aplicación en proceso de separación de gases. *Superficies y Vacío*, 28(1), 5-11.
- Mulato , A. (30 de Junio de 2016). El cemento fosforescente inventado por un mexicano. *El país*.
- Navarro, M. F. (15 de 12 de 2015). La Ciudad de México tiene poco menos de 9 millones de habitantes. *Excelsior*.
- Obregón-Portocarrero, N., Díaz-Ortiz, J. E., Daza-Torres, M. C., & Aristizabal-Rodríguez, H. F. (enero-marzo de 2016). Efecto de la aplicación de zeolita en la recuperación de nitrógeno y el rendimiento de maíz. (U. N. Colombia, Ed.) *Acta Agrónomica*, 65(1), 24-30.
- Ortiz, L. (2001). *Criterios y especificaciones concernientes a la exploración y valoración de minerales en la república mexicana*. Dirección de Recursos Minerales, Gerencia de Recursos Mineros.
- Ostroumov, F., Ortiz, L., & Corona, C. (2003). *Zeolitas de México diversidad mineralógica y aplicaciones*. Universidad Michoaca de San Nicolás de Hidalgo. San Nicolás de Hidalgo: Sociedad Mexicana de Mineralogía.
- Palomo Cano, M. (2017). *Aislantes Térmicos. Criterios de Selección por requisitos energéticos*. Trabajo fin de grado, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.

- PAOT. (2010). *Presente y futuro de las áreas verdes y del arbolado de la Ciudad de México*. Ciudad de México: Procuraduría Ambiental y del Ordenamiento Territorial (PAOT).
- Pérez , D., Buxó, P., Maza, S., Mirabal , R., Ongay , M., & Ruiz , M. (1997). *Depósitos de zeolitas*. Universidad de Barcelona, Facultad de Geología. Barcelona: Fundació Folch.
- Pérez Arrau, C., & Peña, M. (26 de Diciembre de 2016). *Urban Heat Islands (UHIs)*. Obtenido de <http://www.urbanheatlands.com/>
- Pérez Miguel, M. (2017). *Distribución de monóxido de carbono, su relación con la isla de calor urbana y la temperatura del aire en la Ciudad de México*. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciencias de la Tierra. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Petranovskii , V., & Hernández, M. (2012). *Zeolita-una roca util*. Puebla: Universidad Autónoma de Puebla.
- Quintero Ortiz, L. A., Cruz Hernández, R. A., & Peña Santos, D. Y. (octubre-diciembre de 2014). Efecto del contenido de agua sobre la resistencia y la velocidad de pulso ultrasónico del concreto. (U. D. Caldas, Ed.) *Tecnura*, 18(42), 103-113.
- Raffo Benegas, M. D. (13 de Noviembre de 2014). la radiación solar y las plantas: un delicado equilibrio. (I. N. Apropocuaría, Ed.) *Fruticultura & Diversificación*(74), 40-44.
- Raggiotti, B. B., Positieri, M. J., Locati , F., Murra, J., & Marfil, S. (2015). Zeolita, estudio de aptitud como una puzolana natural aplicada a hormigón estructural. *Revista de la construcción*, 14(2), 14-20.
- Rahhal, V., Pedrajas, C., Irassar, F., & Talero, R. (enero-junio de 2005). Efecto de las puzolanas naturales sobre la reología de pastas de cemento portland. (I. M. Concreto, Ed.) *Concreto y cemento. Investigación y desarrollo.*, 5(2), 2-11.
- Real Academia Española. (2015). *dle.rae*. Obtenido de <http://dle.rae.es/srv/search?m=30&w=radiaci%C3%B3n>
- Rivero Nogueiras, V. (2016). *Análisis Medio Ambiental de los aislamientos térmicos en la construcción*. Coruña: Universidad de Coruña.
- Rodríguez Camacho, R., Dámazo Juárez, D., & Uribe Afif, R. (Julio de 2000). Los cementos puzolánicos aumentan la resistencia del concreto al ataque de los sulfatos. (A. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, Ed.) *Construcción y tecnología*.
- Salazar J., A. (11 de Noviembre de 2018). *Maternixsrl.com*. Obtenido de <http://maternixsrl.com.ar/wp-content/uploads/2018/11/11.-Informacion-t%C3%A9cnica-sobre-Puzolanas.pdf>
- Sarricolea Espinoza, P., & Martín-Vide, J. (2014). El estudio de la Isla de Calor Urbana de Superficie del Área Metropolitana de Santiago de Chile con imágenes Terra-MODIS y Análisis de Componentes Principales. *Revista de Geografía Norte Grande*,(57), 123-141.
- SCT. (2017). CMT. Características de los Materiales. En S. d. Transporte, *CMT. Características de los Materiales* . Ciudad de México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Secretaría de Energía. (2011). *NORMA Oficial Mexicana NOM-018-ENER-2011, Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba*. Secretaría de Energía. Ciudad de México: Dario oficial.
- Servicio Geológico Mexicano. (24 de Marzo de 2017). *www.sgm.gob.mx*. Obtenido de Tipos de rocas: <http://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Rocas/Rocas-igneas.html>

- Stewart, A. (2015 de Mayo de 2015). Profesor holandés crea un 'concreto vivo' que se repara a sí mismo. *CNN*. Obtenido de <http://cnnespanol.cnn.com/2015/05/15/profesor-holandese-crea-un-concreto-vivo-que-se-repara-a-si-mismo/>
- Stulz, R., & Mukerji, K. (1993). *Materiales de construcción apropiados. Catalogo de soluciones potenciales revisado edición ampliada*. (PATÍN, Ed.) SKAT, Gallen, Suiza: Publicaciones de SAKAT & IT. Obtenido de <http://wgbis.ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms00.htm#Contents>
- Tarbuk, E., & Lutgens, F. (2005). *Ciencias de la tierra. Una introducción a la geología física*. Madrid: Pearson Prentice Hall.
- Termolita. (2017). *Perlita Mineral*. Obtenido de Termolita: <http://www.termolita.com/es/Perlita-Mineral/>
- Tumini, I. (2010). Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. Estudio aplicado al caso de Madrid. *Metodología para evaluación ambiental* (págs. 1-5). Madrid: SB10mad.
- Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. (2003). *Pruebas de inflado y densidad de mineral de perlita, de la empresa Pastas Cerámicas Especializadas S.P.R.* Informe de laboratorio, Centro de investigaciones en materiales y metalurgia, Pachuca.
- Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (Uptc). (01 de Julio de 2017). *uptc.edu.co*. (F. d. Ingeniería, Editor) Obtenido de http://www.uptc.edu.co/docentes/oscar_gutierrez/En_Concreto/Materia4.html
- Urday Ochoa, A. A. (2015). *Uso de la Diatomita para la elaboración de bloquetas artesanales de concreto en la ciudad de Arequipa*. Universidad Católica de Santa María, Facultad de Arquitectura e Ingeniería civil y del ambiente. Arequipa: Escuela Profesional de Ingeniería Civil. Recuperado el 18 de noviembre de 2017
- Valdez Tamez , P., Fajardo San Miguel, G., Hermosillo Mendoza, R., & Flores Vivian, I. (24 de Julio-septiembre de 2008). Puzolanas naturales para reducir la expansión álcali-agregado. *Ciencia UANL, XI(3)*, 256-263. Obtenido de <http://www.revistacyt.com.mx/index.php/10-posibilidades-del-concreto/38-puzolanas-naturales-para-reducir-la-expansion-alkali-agregado>
- Vera Barrios, B. S., & Ledezma Elizondo, M. T. (2018). Pasta cementicia mejorada con adición de Zeolita y Hierro en polvo para morteros de pega o junteo. *ingeniería, investigación y tecnología, 19(2)*, 223-238.
- Vidaud, E. (28 de Octubre de 2013). De la historia del cemento. *Construcción y tecnología en concreto, 20-23*. Obtenido de <http://www.revistacyt.com.mx/pdf/noviembre2013/ingenieria.pdf>
- Villamudria Rivera, S. (2014). *Modificación de las propiedades del hormigón al ser reforzado con fibra de vidrio AR*. Máster en Ciencia y tecnología de Materiales, Universidad de Oviedo.
- Voogt, J. A. (Diciembre de 2008). *actionbioscience*. Obtenido de Islas de Calor en Zonas Urbanas: Ciudades Más Calientes: <http://www.actionbioscience.org/esp/ambiente/voogt.html>
- Yang, J., Wang, Z., & Kaloush, K. (2013). *Unintended Consequences, A Research Synthesis Examining the Use of Reflective Pavements to Mitigate the Urban Heat Island Effect*. Arizona: Arizona State University.
- Zeballos, C. (04 de Marzo de 2007). *moleskinearquitetonico*. Obtenido de La iglesia del Jubileo, Roma: <http://moleskinearquitetonico.blogspot.mx/2007/03/la-iglesia-del-jubileo-roma.html>