



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

“Proceso de Restauración a Base de Morteros con
Aditivo Orgánico“

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el

Grado de
Maestra en Ciencias línea terminal en Construcción

Presenta:

Arq. Karen Elizarraraz Castro.

Dirigido por:

Dr. José Luis Reyes Araiza

Querétaro, Qro. A 2 de Julio del 2020.



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería

Maestría en Ciencias línea terminal Construcción
"Proceso de Restauración a Base de Morteros con Aditivo Orgánico"

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestra en Ciencias línea terminal en Construcción

Presenta:

Arq. Karen Elizarraraz Castro.

Dirigido por:

Dr. José Luis Reyes Araiza

Dr. José Luis Reyes Araiza
Presidente

Dr. Alejandro Manzano Ramírez
Secretario
Mtro. Rubén Ramírez Jiménez
Vocal.

Dr. José de Jesús Pérez Bueno
Suplente

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Julio, 2020 México.

INDICE

RESUMEN	9
ABSTRACT	10
I.INTRODUCCION	11
1.1 DEFINICIÓN DEL PROYECTO	11
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	11
1.3 HIPOTESIS	12
1.4 OBJETIVO GENERAL	12
1.4.1 Objetivos Particulares.....	12
1.5 ALCANCES Y LÍMITES	12
1.5.1 Alcances.....	12
1.5.2 Límites.....	13
1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS	13
II. ANTECEDENTES	15
2.1 EVOLUCION HISTORICA DE LOS MORTEROS	16
2.1.1 Morteros Prehistóricos.....	17
2.1.2 Morteros Egipcios.....	17
2.1.4 Morteros Romanos.....	19
2.1.5 Morteros Medievales.....	20
2.1.6 Morteros del Renacimiento y Barroco.....	21
2.1.7 Morteros Modernos.....	22
2.1.8 Morteros Actuales.....	22
2.1.9 Morteros de Cal - Yeso.....	23
2.2 DESGASTE DE MORTEROS	24
2.2.1 Proceso de Deterioro Mecánico.....	24
2.2.2 Proceso de Deterioro Químico.....	24
2.3 INVESTIGACIONES PREVIAS	26
2.3.1 Clara de huevo.....	26
2.3.2 Caseína.....	26
2.3.3 Estiércol.....	27
2.3.4 Fibras Naturales.....	27
2.3.5 Cenizas Naturales.....	30
2.3.6 Puzolanas Naturales.....	33
2.3.7. Material Cambio de Fase.....	34

2.3.8. Mucílago de Nopal como Aditivo	35
III. MATERIALES SELECCIONADOS.	38
3.1 SUELOS.	38
3.1.1 Muestras de la Solana.	38
3.1.2 Caolinita.....	39
3.2 CEMENTANTES.....	39
3.2.1 Cal.	39
3.2.2 Yeso.	42
3.3 EL NOPAL.....	46
3.3.1 El Nopal en México.....	47
3.4 ADITIVOS.....	49
3.4.1 Aditivos Orgánicos.....	51
3.4.2 Mucílago de Nopal.....	51
3.4 AGUA.....	53
IV. METODOLOGIA.....	54
4.1 PRUEBA DE GRANULOMETRÍA.....	54
4.2 PRUEBAS DE DETERMINACIÓN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA.	55
4.3 DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO POR EL PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR.....	55
4.3. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO.....	57
4.4 MEDICIÓN DE FLUIDEZ (NMX-C-061-ONNCCE).	58
4.5 MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL.....	59
4.6 ELABORACIÓN DE MUESTRAS (ASTM C 109).	63
4.7 PRUEBA DE COMPRESION.....	63
4.8 PRUEBA DE ADHESIÓN (ASTM C 1583).	65
V. RESULTADOS.....	71
5.1 RESULTADOS DE PRUEBAS DE CARACTERIZACION DEL SUELO.....	71
5.1.1 Prueba de Granulometría.	71
5.1.2 Prueba de Determinación del Límite Líquido por el Procedimiento Estandar.	73
5.1.3 Prueba de Determinación del Límite Plástico.	75
5.2 RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESION.....	76
5. 2.1. Resistencia a Compresión de Mezclas con Suelo de la Solana para Tabique Rojo Recocido.	78
5.2.2. Resistencia a Compresión de Mezclas con Suelo Caolinitico.	79

5. 2.3. Gráficas de los Resultados de la Prueba de Resistencia a Compresión de las Diferentes Muestras.....	80
.....	85
5.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	86
5.4 RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN MUESTRAS DE SUELOS.	86
5.5 RESULTADOS DE MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM).	92
5.6 RESULTADOS DEL ESPECTRO REALIZADO AL MUCILAGO DE NOPAL.	97
VI. CONCLUSIONES	98
VII.REFERENCIAS.....	100

Dirección General de Bibliotecas UAQ

INDICE DE ILUSTRACIONES.

<i>Ilustración 1. Tabiguera en la Solana</i>	38
<i>Ilustración 2. Caolinita utilizada en las muestras de mortero.</i>	39
<i>Ilustración 3. Ciclo de la Cal (Cazalla Vázquez, 2002).</i>	42
<i>Ilustración 4. Ciclo del Yeso (Igea Romera, 2011).</i>	46
<i>Ilustración 5. Mucílago de Nopal</i>	51
<i>Ilustración 6. Prueba de Límite Líquido</i>	56
<i>Ilustración 7. Realizando prueba de límite líquido. Ilustración 8. Prueba de Límite Líquido Casagrande.</i>	57
<i>Ilustración 9. Prueba de fluidez realizada en el Laboratorio de Materiales.</i>	59
<i>Ilustración 10. Penca de nopal.</i>	60
<i>Ilustración 11. Pulpa de Nopal.</i>	60
<i>Ilustración 12. Pulpa de nopal cortada en cuadros de 1 x 1 cm</i>	61
<i>Ilustración 13. Pulpa de nopal hirviendo en combinación con agua.</i>	62
<i>Ilustración 14. Materiales utilizados en la elaboración de muestras.</i>	63
<i>Ilustración 15. Prueba compresión.</i>	64
<i>Ilustración 16. Falla en muestra después de prueba a compresión.</i>	65
<i>Ilustración 17. Superficie de concreto sobre la cual se va aplicar el recubrimiento.</i>	66
<i>Ilustración 18. Aplicando las mezclas de morteros.</i>	66
<i>Ilustración 19. Muestras expuestas a la intemperie.</i>	67
<i>Ilustración 20. Muestras de morteros expuestas.</i>	67
<i>Ilustración 21. Aplicación pegamento epóxico.</i>	68
<i>Ilustración 22. Funcionamiento prueba adhesión.</i>	68
<i>Ilustración 23. Colocando el aparato de prueba.</i>	69
<i>Ilustración 24. Tipos de fallas.</i>	69
<i>Ilustración 25. Falla tipo C.</i>	70
<i>Ilustración 26. Falla presentada en la prueba</i>	70
<i>Ilustración 27. SEM de Cal con Mucílago de Nopal.</i>	92
<i>Ilustración 28. SEM de muestra de Cal con Mucílago de Nopal.</i>	93
<i>Ilustración 29. SEM de muestra de Cal con Mucílago de Nopal.</i>	93
<i>Ilustración 30. SEM de Yeso con Mucílago de Nopal.</i>	94
<i>Ilustración 31. SEM de Yeso con Mucílago de Nopal.</i>	94
<i>Ilustración 32. SEM de Suelo con Mucílago de Nopal.</i>	95
<i>Ilustración 33. SEM de Yeso con Mucílago de Nopal.</i>	95
<i>Ilustración 34. SEM de Suelo con Mucílago de Nopal.</i>	96
<i>Ilustración 35. SEM de Suelo con Mucílago de Nopal.</i>	96

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Mallas utilizadas en prueba de granulometría</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 8. Resultados de los primeros ensayos a compresión.</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 9. Nomenclatura de Mezclas.</i>	<i>76</i>
<i>Tabla 10. Porcentaje Volumétrico de Mezclas</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 11. Nomenclatura de las Mezclas.</i>	<i>77</i>
<i>Tabla 12. Resultados prueba a compresión a los 68 días en muestras de suelo.</i>	<i>78</i>
<i>Tabla 13. Nomenclatura de los materiales.</i>	<i>79</i>
<i>Tabla 14. Resultados de prueba de compresión en muestras con caolín.....</i>	<i>80</i>
<i>Tabla 15. Difracción de Rayos X de una muestra del Suelo 2 que pasó la malla No. 200.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 16. Difracción de Rayos X de una muestra del Suelo 1 que pasó la malla No. 200.....</i>	<i>88</i>
<i>Tabla 17. Difracción de Rayos X de una muestra de suelo que se obtuvo por el método de lavado del Suelo 1.</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 18. Difracción de Rayos X de una muestra de suelo que se obtuvo por el método de lavado del Suelo 2.</i>	<i>90</i>
<i>Tabla 19. Difracción de Rayos X de una muestra de caolín.....</i>	<i>91</i>

INDICE DE GRAFICAS

<i>Gráfica 1. Resultados de prueba de granulometría (Muestra 1).....</i>	<i>71</i>
<i>Gráfica 2. Resultados de la muestra de granulometría. (Muestra 2).</i>	<i>72</i>
<i>Gráfica 3. Resultado del ensayo del 21 de Mayo del 2019.</i>	<i>81</i>
<i>Gráfica 4. Resultados del ensayo de muestras del 12 de Junio 2019.....</i>	<i>82</i>
<i>Gráfica 5. Resultados del ensayo de muestras del 24 de julio del 2019.....</i>	<i>82</i>
<i>Gráfica 6. Resultados del ensayo de muestras el 27 de Agosto del 2019 (yeso).</i>	<i>83</i>
<i>Gráfica 7. Resultados del ensayo de muestras el 27 de Agosto del 2019 (cal).....</i>	<i>84</i>
<i>Gráfica 8. Resultados del ensayo de muestras el día 6 de febrero del 2020 (68 días de curado).....</i>	<i>85</i>

Dirección General de Bibliotecas UAG

RESUMEN

Este trabajo reporta el efecto del mucilago de nopal sobre las propiedades mecánicas de mezclas para morteros base suelo caolinítico y cal (hidróxido de calcio)-yeso (sulfato de calcio), el cual, podría utilizarse como recubrimiento en muros de edificaciones nuevas y antiguas. El comportamiento fue contrastado con el de morteros elaborados con los mismos aditivos y diferente tipo de suelo. De acuerdo con algunos resultados preliminares se optó por tres mezclas diferentes en función de la cantidad de mucilago en relación al agua para mezclado: 0% (100% de agua), 50%, 100%. Para cualquier mezcla se mantuvo una proporción de 1 a 3 entre el cementante y la cantidad de suelo respectivamente, y en algunos tipos de mezcla solo se consideró un solo cementante; yeso o cal. La cantidad de agua se determinó por medio de una prueba de fluidez de acuerdo a normas ASTM. Posteriormente al proceso de curado de los especímenes, estos fueron ensayados a compresión, además, se elaboraron especímenes para determinar la capacidad de adherencia de cada uno de los morteros. SEM y XDR fueron utilizadas para observar la microestructura y obtener la composición mineralógica. Los resultados muestran que la resistencia a compresión de morteros a temprana edad con mucilago de nopal y combinación de yeso-cal como cementante, es mayor, a la de los morteros que solo consideran un solo cementante. Sin embargo, los morteros con suelo caoliníticos que tienen solo yeso y un 100 % de mucilago mostraron mayor resistencia a compresión (25 kg/cm²). Tales resultados pueden deberse a que la relación agua-cementantes es menor con solo incluir el mucilago, además, es posible que a temprana edad no han concluido el proceso de formación de microestructuras cristalinas. Tales efectos se corroborarán con ensayos a mayor periodo de curado, además de la necesidad de validar la durabilidad de las mezclas de morteros con suelos caoliníticos. En relación a la caracterización microestructural, se observa en las micrografías de SEM una morfología porosa, la cual, puede estar acorde con los resultados de los ensayos. En relación a las fases cristalinas falta corroborar que estructuras pudieron haberse generado al combinarse los cementantes con el mucilago de nopal, o en su defecto si se fusionaron tales elementos como aditivos estabilizadores del suelo.

ABSTRACT

This research reports the effect of nopal mucilage on the mechanical properties of mixtures for kaolinite soil and lime (calcium hydroxide)-gypsum (calcium sulfate) based mortars, which could be used as a coating on walls of new and old buildings. The behaviour was contrasted with that of mortars made with the same additives and different types of soil. According to some preliminary results, three different mixtures were chosen depending on the amount of mucilage in relation to the water for mixing: 0% (100% water), 50%, 100%. For any mixture, a ratio of 1 to 3 was maintained between the cementitious agent and the amount of soil, respectively, and in some types of mixture only one cementitious agent was considered; gypsum or lime. The amount of water was determined by means of a flowability test according to ASTM standards. After the specimens were cured, they were tested by compression. In addition, specimens were made to determine the adhesion capacity of each of the mortars. SEM and XDR were used to observe the microstructure and obtain the mineralogical composition. The results show that the compressive strength of mortars at an early age with nopal mucilage and a combination of gypsum-lime as a cementitious material is greater than that of mortars that only consider a single cementitious material. However, mortars with kaolinitic floors that have only gypsum and 100% mucilage showed greater compressive strength (25 kg/cm²). Such results may be due to the fact that the water-cement ratio is lower when only the mucilage is included, and it is also possible that at an early age they have not completed the process of forming crystalline microstructures. Such effects will be corroborated by tests at longer curing periods, in addition to the need to validate the durability of mortar mixtures with kaolinitic soils. In relation to the microstructural characterisation, a porous morphology is observed in the SEM micrographs, which may be in accordance with the test results. In relation to the crystalline phases, it is not possible to corroborate what structure could have been generated by the combination of the cementing agents with the nopal mucilage, or if they did not fuse such elements as soil stabilizing additives.

I.INTRODUCCION

1.1 DEFINICIÓN DEL PROYECTO

En este proyecto se realizó una investigación de las propiedades que aporta el mucílago de nopal, y su compartamiento al ser combinado con suelo y dos cementantes para conformar un mortero, esto como propuesta de un agregado orgánico para ser utilizado en recubrimientos para su conservación y construcciones nuevas.

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.

Uno de los principales retos de la conservación de una construcción es garantizar la salvaguarda de las edificaciones para transmitirlo a futuras generaciones con toda la riqueza de su autenticidad. El deterioro del patrimonio cultural tangible es inevitable ya que se encuentra expuesto a diversos factores climatológicos que con el paso de los años van erosionando los recubrimientos de las edificaciones.

Para lograr que el conjunto de operaciones permanentes permitan conservar la consistencia física de los bienes culturales, evitando que las agresiones antropogénicas, físicas, químicas y biológicas aumenten en demérito del patrimonio; se requiere la aplicación de un material, en este caso mortero, que aporte características originales para mantener la autenticidad del bien.

Con este proyecto de investigación se busca obtener un mortero artesanal que contenga un aditivo orgánico, que se obtendrá de un recurso natural renovable para aplicarlo como recubrimiento en trabajos de conservación y mantenimiento en inmuebles que requieran reparaciones.

1.3 HIPOTESIS

La incorporación de mucílago de nopal al mortero, genera las microestructuras que promueven un aumento en la adherencia y mejora sus propiedades mecánicas retardando el deterioro en los recubrimientos.

1.4 OBJETIVO GENERAL.

Analizar el comportamiento mecánico de los morteros modificados con aditivo orgánico (mucílago de nopal) utilizados como recubrimiento y así mismo identificar las propiedades que aporta el aditivo al mortero.

1.4.1 Objetivos Particulares.

- Establecer proporciones del aditivo orgánico (mucílago de nopal), en combinación con suelo y los cementantes, siguiendo la normativa de morteros.
- Analizar la adherencia y la resistencia a compresión de las mezclas de mortero propuestas.

1.5 ALCANCES Y LÍMITES.

1.5.1 Alcances.

Los alcances del proyecto se basan en la importancia y justificación del tema, los cuales tienen como intención desarrollar un mortero con suelo que contenga un aditivo orgánico, en este caso el mucílago de nopal.

Se elaboraron varias muestras con el mortero obtenido, las cuales fueron sometidas a diferentes pruebas, para comprobar las propiedades obtenidas gracias al aditivo orgánico.

1.5.2 Límites.

Los límites que tiene este trabajo es que no se elaboró una caracterización química profunda, se analizaron los resultados de algunas pruebas como difracción de rayos X y SEM (microscopio electrónico de barrido) pero falta corroborar que estructura pudieron haberse generado al combinarse los cementantes con el mucílago de nopal, o en su defecto si fusionaron tales elementos como aditivos estabilizadores del suelo.

1.6 ESTRUCTURA DE LA TESIS

En este capítulo se enunciaron la justificación y planteamiento del problema; los objetivos e hipótesis y por último los alcances y limitaciones.

En el capítulo II, Antecedentes, se mencionan los diversos proyectos que se han realizado en el campo de los aditivos naturales utilizados en la construcción. Por otro lado, se explican los elementos y conceptos teóricos necesarios para comprender la investigación.

El capítulo III describe los materiales que fueron seleccionados para la elaboración de muestras que fueron ensayadas.

En el capítulo IV detalla el proceso que se llevó durante toda la investigación, las pruebas que se realizaron y las caracterizaciones necesarias para mostrar resultados.

En el capítulo V se muestran los resultados encontrados de los distintos morteros que se realizaron, mostrando las discusiones a las que se llegaron. En el último capítulo, conclusiones, se finaliza mostrando de manera general las conclusiones a las que se llegaron en este trabajo.

Dirección General de Bibliotecas UAQ

II. ANTECEDENTES

El mortero es un conglomerado que ha sido utilizado desde la era neolítica y a través de los años se ha ido modificando conforme a las necesidades de recubrimiento y a los avances en cuestión de materiales y nuevos procesos constructivos (Coronado, 2009).

El término genérico de mortero se define como una mezcla homogénea de uno o más aglomerantes inorgánicos, áridos y agua, en diferentes proporciones, pudiendo contener, además, aditivos. Todos estos componentes deben permitir que la mezcla sea trabajable cuando está fresca y con propiedades físico-mecánicas aceptables además de presentar cierta durabilidad al endurecer.

El origen del mortero antiguo supuso un avance importante en la técnica de construcción. Este avance se consiguió cuando tuvo lugar el descubrimiento del aglomerante y su mezcla con otros componentes (áridos), con lo que se obtenía un material capaz de endurecer y comportarse como un material pétreo natural.

En los primeros morteros las dos funciones básicas (ligante y árido) no estaban bien delimitadas pudiendo ser desarrolladas por una gran variedad de materiales, con un mayor o menor grado de aptitud. El descubrimiento de sustancias con una mayor capacidad ligante como el yeso o la cal, daría lugar a su diferenciación como materiales con capacidad cementante frente a otros más inertes, que constituirían el esqueleto o armazón del mortero (Alejandre, 2002).

El desarrollo de morteros modernos ha estado marcado por el descubrimiento del cemento. Dentro del término mortero, en la actualidad se incluyen los materiales que se emplean en los trabajos de albañilería: morteros de construcción de obras de tabique, morteros de capa fina y morteros ligeros, así como trabajos de recubrimientos externos e internos. Dentro de éstos, podemos diferenciar los

morteros de restauración como aquellos que se utilizan en las intervenciones arquitectónicas de edificios. Estos morteros deben ser compatibles con el resto de materiales existentes en la obra y ser resistentes a la alteración de los agentes ambientales, garantizando así su durabilidad en el tiempo. (Igea, 2012).

El mortero debe de ser trabajable, capaz de adoptar diferentes acabados, durable, impermeable y resistente al desgaste. Estas cualidades frecuentemente se pueden obtener seleccionando los materiales adecuados para cumplir con las especificaciones o incluyendo algún aditivo para la mezcla. El mortero que se desarrollará en este proyecto será en base de suelo, cal, yeso y agua; esta combinación se tomo de trabajos anteriores donde se han estudiado morteros artesanales, teniendo en cuenta el uso de un aditivo orgánico (mucílago de nopal) en diferentes proporciones; y para eso debemos tener un panorama teórico de los diferentes elementos que se incluyeron para este proyecto de investigación.

2.1 EVOLUCION HISTORICA DE LOS MORTEROS.

Los morteros se conocen desde la antigüedad y han evolucionado en función de la disponibilidad de materias primas, de los recursos productivos y tecnológicos y de las demandas constructivas y artísticas. La elaboración de un mortero comienza con la selección del material, su extracción, transporte, fabricación y puesta en obra independientemente de que sus constituyentes procedan de cantera, del río, del mar o que provengan de la reutilización de materiales. Para que se abran canteras, no solo deben existir construcciones, sino que es necesaria la presencia de una mano especializada. Los morteros han ido evolucionando en función de las demandas y los conocimientos técnicos (Caballero *et al.*, 2012).

Cronologicamente, los morteros pueden clasificarse en:

- Morteros prehistóricos.
- Morteros egipcios.

- Morteros griegos.
- Morteros romanos.
- Morteros medievales.
- Morteros del renacimiento y barroco.
- Morteros modernos.
- Morteros actuales.

2.1.1 Morteros Prehistóricos.

Hay pocos datos de los morteros neolíticos pero algunos autores informan que los morteros de esa época se elaboraban a base de piedra calcinada, piedra apagada y agua en baja porción. Se han encontrado monumentos megalíticos cementados a base de arcillas de gran dureza a la que se añadía agua para su manipulación. También se han descubierto suelos de cal pertenecientes al 3^{er} y 4^{to} milenio a.C. En casas excavadas en Turkmenistan por arqueólogos rusos y en las figuras de terracota de los guerreros de la Dinastía Qin, descubiertos en el mausoleo de Qin Shi Huang y datadas en 210-209 a.C., se han detectado cales pigmentadas en las policromías (Gárate, 2002).

Los hallazgos hechos en las excavaciones practicadas en la ciudad de Jericó revelaron la presencia de cráneos recubiertos de yeso, datados en 7.000 a.C. e incluso se han descubierto morteros en pavimentos de Turquía del 8.000-10.000 a.C. (Rojo, 2015).

2.1.2 Morteros Egipcios.

Los egipcios fueron los primeros en utilizar yeso hemihidratado, obtenido a temperaturas de 120°C para unir bloques, como en el caso de la pirámide de Kheops, datada en el 2.600 a. C. Estos hechos evidencian que los egipcios fabricaban materiales conglomerantes (yesos y cales aéreas) que usaban para

reforzar los aparejos de piedra y ladrillos, para revestir y decorar sus muros. Prácticamente no se usaban morteros de cal entre el periodo de 2.000 y 4.000 a. C. La madera, como fuente de energía necesaria para la calcinación, era un recurso escaso; dieron diferentes utilidades al yeso como yeso de colocación, yesos de acabado y yesos de decoración. En el primer caso, el yeso se empleaba como lubricantes para facilitar el deslizamiento de grandes bloques de piedra; en el segundo, se usaba para el taponado de las irregularidades superficiales de juntas de acabado o de enlucido de decoración, y en el tercero, como base de preparación para la decoración pictórica sobre el gres. (Rojo Álvarez, 2015).

2.1.3 Morteros Griegos.

Los griegos fueron los primeros en usar la cal propiamente dicha, heredando de los fenicios la tradición de morteros con cal calcinada y arena volcánica.

Una de las finalidades de los morteros era recubrir muros, costumbre que comienza a finales del siglo II – siglo I a. C. En esta época se recurre con profusión al pulimiento de los estucos, al igual que el de los morteros de revestimiento (Furlan y Bissenger, 1975).

Vitrubio hace referencia en sus libros a las antiguas técnicas griegas, lo que demuestra el grado técnico alcanzado por los griegos en la elaboración de morteros, con dosificaciones de 2 de cal, 3 de arena o 2 de cal, 5 de arena, con la aplicación del mortero en varias capas de 3 a 6. Los morteros helénicos están hechos a base de cal y arena fina; los estucos a base de cal, yeso y polvo de mármol y, según las necesidades, se añadían aditivos para hacer los morteros más duros y estables. (Rojo, 2015).

En Thera se introdujo la cal mezclada con arena, procedente del polvo volcánico de la tierra de Santorín para producir morteros resistentes al agua. Conocidas estas propiedades hidráulicas a falta de roca volcánica, se usaba teja o ladrillo picado.

En lo que respecta a la acepción genérica de los términos: revoco (enfoscado y enlucido) y estuco. Antiguamente se entendía por revoco la capa o mezcla de cal y arena, u otro material análogo con el que se enlucen los muros y por estuco la pasta de cal apagada y mármol pulverizado o alabastro, con que se cubren o enlucen las paredes, antes de ser pintadas o mezcla de cal, yeso y arena de mármol molido con una temperatura tal que no se pega a la ropa y queda tan lustroso en la pared que parece abalastro con pulimento. Actualmente la acepción ha variado, la composición de un mortero ya no es determinante para definir el término, pero si lo es su uso o destino (Rojo, 2015).

2.1.4 Morteros Romanos.

Los romanos heredaron la tradición de elaboración de morteros de los griegos, pero la mejoraron en cuanto a procedimientos de fabricación de la cal, técnicas de aplicación, pulimento, aplicación en multicapa e incorporación de aditivos (caseína, albúmina, urea y aceites). Introducen la aplicación del mortero en multicapas para favorecer el endurecimiento de cada una de ellas.

Vitrubio es el que aportó más información sobre los morteros de cal y recomienda superponer 3 capas de mortero y 3 capas de estuco de mármol, cuyos grosores variaban de 5 a 8 cm. Estos estucos eran decorados al fresco, con pigmentos diluidos en aguas de cal sobre el mortero todavía fresco. Normalmente estas aplicaciones se realizaban en tajos y algunas veces se retocaba en seco, sobre paramentos ya fraguados, con pintura. Los dibujos se hacían generalmente con incisión, se rellenaban los fondos y posteriormente se pintaba encima.

Entre la tipología de revocos romanos se encuentran el opus tectorium o arenatum, el opus mamoratum y el opus figlinum. El primero compuesto por cal y arena con la

capa superior muy blanca para recibir la pintura al fresco; el segundo, por cal y polvo de mármol, y el tercero, por ladrillos o teja, posteriormente revocado (Rojo, 2015).

La calidad de los morteros romanos se debe al cuidado con que se elegían y mezclaban sus elementos constitutivos, mejorando los procesos de fabricación y las técnicas de aplicación (Álvarez *et al.*, 1995).

2.1.5 Morteros Medievales.

Las construcciones de la época medieval, además sufrieron destrucciones y saqueos continuos, a causa de las grandes invasiones, teniendo en cuenta además que era común el empleo de materiales combustibles, poco resistentes (Cazalla, 2003).

Al margen de las variaciones regionales, los constructores medievales siguieron usando los mismos materiales empleados por los romanos, pero con una selección de materiales menos depurada. Independientemente de la disminución en la calidad de preparación de la cal, no se debe de subestimar la importancia de la aplicación del mortero en obra. En esta época, la relación árido-matriz es muy variable, con una proporción de conglomerante muy superior a la de los morteros actuales (Álvarez *et al.*, 1995).

Viollet-Le-Duc establece una clasificación cronológica según la cual los morteros de los siglos IX, X y XI son de peor calidad: frágiles, poco homogéneos y mal aplicados. A partir del siglo XII, la calidad de los morteros mejora y las mezclas son más homogéneas, pero a comienzos del siglo XIII vuelven a empeorar por las restricciones económicas, recomendándose el uso de poca cal, mezclada con arena y tierra. Este autor añade que en el siglo XII a menudo los morteros eran una mezcla de gravas gruesas y cal, con carbón de leña (Furlan, 1975).

Durante los siglos XIV y XV escasea el empleo de arenas gruesas en los morteros y es frecuente el lavado de las mismas, con el fin de eliminar las sales y arcillas que éstas pudieran incorporar.

A final de la Edad Media comienza la construcción en piedra, iniciada en Francia. Aunque algunos países durante el siglo XIV, promulgaron este uso constructivo, tuvo que pasar tiempo para que se generalizara esta costumbre (Furlan y Bissenger, 1975).

2.1.6 Morteros del Renacimiento y Barroco.

En Italia, durante el renacimiento y el barroco hay un gran desarrollo de los morteros de cal ya que la piedra se reserva para los detalles escultóricos y ornamentales. Los materiales más frecuentes en la construcción son los ladrillos revestidos de estuco (Gárate, 2002).

Los primeros cementantes endurecen bajo el agua comienzan a introducirse con el empleo de las calizas margosas que producen una reacción lenta entre la cal, la sílice y la alumina coloidal, dando lugar a la formación de aluminosilicatos cálcicos. A partir del siglo XVIII se produjeron aglomerantes hidráulicos, aunque griegos y romanos ya conocían estas propiedades de los morteros, con el uso de las tierras de Santorin y tejoleta los primeros, y de puzolanas los segundos.

Además, durante el siglo XVIII se introduce la escayola como tratamiento de interiores, a imitación de los mármoles (Callaza, 2003). En el barroco europeo del siglo XVIII cobra importancia el tratamiento de los muros interiores, los frisos son decorados con estucos en relieve que enmarcan los techos decorados. La parte central de los muros se cubre de telas molduras, a veces doradas, formando recuadros que enmarcan cuadros, tapices o pinturas murales (Gárate, 2002).

2.1.7 Morteros Modernos.

Están ligados al descubrimiento del cementante hidráulico. En 1756, durante la construcción del faro de Eddyston en Plymouth, Smeaton propone buscar una cal que resista la acción del agua del mar, y obtiene una con resultados positivos. Las cales hidráulicas pueden ser consideradas los productos intermedios entre la cal hidratada y el cemento portland actual (Álvarez *et al.*, 1995).

El empleo de calizas con cierto contenido de arcillas desemboca en la producción de silicatos de calcio. Durante la calcinación de estas calizas se produce la deshidratación de la arcilla y la descomposición de la caliza, generando una reacción entre la sílice, la cal y los óxidos de hierro y aluminio. Este descubrimiento constituye la base del desarrollo de los cementos rápidos. Con anterioridad, las calizas arcillosas eran rechazadas sistemáticamente. Las cales hidráulicas pueden ser consideradas los productos intermedios entre la cal hidratada y el cemento portland actual (Rojo, 2015).

2.1.8 Morteros Actuales.

En 1811 Jame Frost patenta el cemento artificial, anticipándose al cemento Portland, patentado por Vicat y Joseph Apsdin en 1824 (Rojo, 2015).

En 1845 L. C. Johnson descubre el Clinker por calcinación a 1450°C de moliendas finas de cal y arcillas, obtenidas de una primera calcinación. En 1851 hay una gran difusión del Clinker, con motivo de la exposición universal de Londres. La adición al Clinker de pequeñas cantidades de yeso es lo que hoy se conoce como cemento Portland, pero en los últimos años se han descubierto una amplia gama de aglomerantes, derivados del cemento (Rojo, 2015).

2.1.9 Morteros de Cal - Yeso.

Los morteros artesanales fabricados mediante una mezcla de yeso y cal se utilizan desde tiempo inmemorial en construcción y decoración como morteros de junta o de revoco, o como yesería o estuco.

Tradicionalmente, estos morteros han sido mezclados con proporciones variables de áridos generalmente silíceos (arenas) y en muchos casos también aditivos orgánicos e inorgánicos de todo tipo para retardar el fraguado del yeso o mejorar las propiedades de la mezcla. Estos morteros se conocen comúnmente con el término de trabadillos (Igea, 2012).

La combinación de yeso y cal aérea para fabricar morteros ha demostrado propiedades muy aprovechables ya que incorpora parte de las ventajas de la cal y el yeso; rápida capacidad de cubrición, mejora de la trabajabilidad de la pasta retardando el fraguado del yeso e incremento de la resistencia mecánica y durabilidad a largo plazo del material debido a la lenta carbonatación de la cal y por lo tanto, progresivo endurecimiento (Luxán *et al.*, 2000).

Por otra parte, las mezclas de yeso con cales hidráulicas o cementos, no son recomendables para la fabricación de morteros de construcción, estas mezclas pueden dar lugar a un compuesto altamente expansivo al reaccionar dicho yeso con los aluminatos y silicatos presentes en estos materiales formando minerales de reacción como ettringita y thaumasita. (Blanco-Varela *et al.*, 2003).

Así, la incorporación de áridos de distinta naturaleza, unido a la diversidad de dosificaciones da lugar a una gran variedad de tipos de mortero que por sus propiedades, facilidad y economía de preparación permiten su utilización en obras de restauración.

2.2 DESGASTE DE MORTEROS.

Así como la gran mayoría de los materiales utilizados en la construcción el mortero esta expuesto a diversos factores los cuales producen algún tipo de desgaste a través del tiempo. Existe multiplicidad de factores que intervienen en la degradación de los morteros (mecánicos, térmicos, químicos, biológicos, etc.).

2.2.1 Proceso de Deterioro Mecánico.

Cuando el mortero de cal se encuentre entre mampostería se pueden producir fatigas compresoras, que pueden llegar a ser muy grandes, originando en el mortero esfuerzos que sobrepasen el límite de elasticidad y el de ruptura.

El proceso de ruptura por fatiga se caracteriza por tres etapas: la primera es la iniciación de la grieta, en la cual se forma una grieta en algún punto de alta concentración de esfuerzos. La segunda etapa es la propagación de la grieta, durante la cual la grieta avanza de manera incremental y la tercera etapa es la ruptura final, la cual ocurre una vez que la grieta ha alcanzado un tamaño crítico. (Cañón, 2012).

El crecimiento de grietas puede ser ya sea transgranular (a través de los granos) o intragranular (a lo largo de los límites del grano). La resistencia a la fractura de morteros puede verse afectada por diminutas grietas superficiales o grietas interiores y por poros internos o externos que de lograrse reducir mejoraría la capacidad de carga (Cañón, 2012).

2.2.2 Proceso de Deterioro Químico.

Los procesos de deterioro de tipo químico pueden definirse como aquellos que implican un cambio en la composición química del mortero. Cañón menciona que

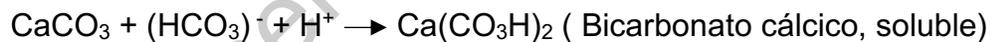
generalmente, estos procesos de alteración suponen la interacción de una solución acuosa con el material, produciendo una solución de composición diferente a la inicial. El medio de alteración transporta parte de los productos fuera del material, diluyendo el material.

La disolución es el tipo de reacción química más importante en los procesos de alteración ya que los productos de reacción suelen ser transportados fuera del sistema.

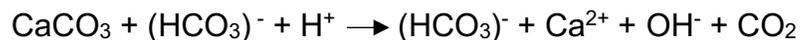
El carbonato de calcio sufre disolución a través de ataque ácido. El ácido carbónico H_2CO_3 se forma por reacción entre el dióxido de carbono (CO_2) procedente de la atmósfera y el agua (U. de Granada, 2007). Esta reacción es la siguiente:



La calcite en contacto permanente con el ácido carbónico se disuelve según la siguiente reacción (Bores, 1998):



El bicarbonato cálcico es un producto muy poco estable y muy soluble en agua, de tal forma que el carbonato de calcio se va disolviendo con el agua de lluvia y demás agentes agresivos.



De estas ecuaciones se deduce que cuanto más ácida es la disolución, mayor es su capacidad de disolver el carbonato CaCO_3 .

2.3 INVESTIGACIONES PREVIAS.

Se han realizado diferentes investigaciones para encontrar las diferentes opciones de aditivos orgánicos que se pueden emplear en la elaboración de morteros y concretos.

2.3.1 Clara de huevo.

Un aditivo orgánico que se ha estudiado es la clara de huevo, para su uso se bate la clara de huevo hasta el punto de obtener un aditivo espumoso para añadirlo directamente a la mezcla de mortero; obteniendo un mejoramiento en la plasticidad de la mezcla, hidrofobia y como acelerador de fraguado. Se detectaron desventajas como menor resistencia a la compresión, tensión simple y posibilidad de ataques bióticos. (Romero, 2005).

2.3.2 Caseína.

La caseína, también se ha investigado como alternativa de aditivo para mezclas de mortero, es una fosfoproteína presente en la leche y en algunos de sus derivados. En la leche, se encuentra en la fase soluble asociada al calcio, en un complejo que se ha denominado caseinógeno. Para su uso, se mezcla leche con vinagre y se deja reposar durante 12 horas para que la leche obtenga una consistencia viscosa; se utiliza solo la leche cuajada y se elimina el suero.

Utilizando este aditivo se obtienen propiedades adhesivas, espesante e hidrofugantes. Las desventajas que se encontraron al usar este aditivo fueron ataques biológicos y oxidación. (Coronado, 2009).

2.3.3 Estiércol.

Algunos desechos como el estiércol, también ha sido material de investigación como aditivo. El estiércol del ganado equino y bovino es benéfico para su adición en los morteros de tierra, ya que su alto contenido en paja con la ayuda de las bacterias aerobias descompone las fibras con alto contenido en polisacáridos para generar una glucosa que sirve como plastificante al momento de la aplicación del mortero y como hidrofugante una vez colocado como recubrimiento.

Cuando se utilizó el estiércol como aditivo, en la mezcla de mortero, se encontraron propiedades adhesivas, espesantes e hidrofugantes; de lo contrario se observaron ataques biológicos y oxidación. (Romero, 2005).

2.3.4 Fibras Naturales.

Las fibras naturales deben contar con propiedades mecánicas para ser consideradas como posible refuerzo de matrices de cemento. Pueden ser utilizados diversos tipos de fibras naturales. No puede generalizarse el contenido de fibra ni su longitud, ya que cada tipo tiene sus valores idóneos. Se recomienda que estén libres de carbohidratos y sin señales aparentes de ataques de microorganismos.

Entre ellas, se encuentra una investigación que se realizó en India acerca de las propiedades físicas y mecánicas de la planta sisal, en este caso se utilizó solo la estructura fibrosa de la planta como aditivo orgánico; dando como resultado el aumento de la hidrofobia en el mortero, al igual que se encontraron que este aditivo es plastificador y un magnífico adhesivo natural. (Rajesh y Thirumalini, 2018).

En Malasia Sobral, H. S. (2004). realizaron pruebas para utilizar en la construcción la fibra de coco como refuerzo de placas delgadas de cemento. Se ensayaron a flexión placas planas y acanaladas con un espesor de 10mm, con relación A/C = 0.35 y contenidos de fibra hasta un 5%, después de este porcentaje la resistencia

disminuye ligeramente, siendo el 4% el que presentó una mayor resistencia. El comportamiento a flexión resultó ser dúctil con las mayores cantidades de fibra y en la superficie de falla se observó la ruptura de la fibra. Las placas expuestas al ambiente natural redujeron su resistencia post agrietamiento en un 30%.

En la Universidad Autónoma de Nuevo León se trabajó con fibras que fueron extraídas del bambú, encontró que utilizando la fibra sin ningún tratamiento previo, el fraguado de la mezcla se retardaba debido a la acción de la glucosa presente en las fibras. Además, la resistencia a flexión del compuesto no presentaba una mejoría significativa en comparación con un concreto sin fibras. Se probaron dos métodos como posibles tratamientos a la fibra, el primero de ellos consistía en sumergir las fibras durante 15 min en cemento diluido en agua o lechada, mientras que el segundo método se hirvieron las fibras durante el mismo intervalo de tiempo en agua. Posteriormente, se fabricaron cubos con las fibras ya tratadas y se ensayaron a compresión.

Los cubos reforzados con fibras tratadas por el segundo método dieron una más alta carga de falla 42.2 kN, sin embargo, esta carga es menor que la carga de falla de un cubo sin fibra la cual fue 60.5 kN.

Por otra parte, se fabricaron paneles encontrando que el procedimiento de compactación de los elementos afectaba considerablemente la resistencia de los mismos, así como la adecuada distribución de la fibra en la matriz. Otra observación que se realizó fue que la fibra pierde humedad dentro de la matriz de cemento y esto origina una contracción que afecta seriamente la adherencia fibra-matriz. (Alvarado, 2002).

Otros estudios fueron realizados en la misma universidad para utilizar las fibras de maguey en compuestos a base de cemento Portland. De la caracterización física de las fibras se reportan longitudes de 304 a 508mm obteniendo el porcentaje de

absorción de agua de la fibra que se satura en un 67%. Se realizaron diferentes muestras, las mismas que fueron sometidas a ensayos de flexión, con lo que se encontró que el volumen de la fibra no influye en la resistencia a la primera grieta.

Los investigadores sostienen que se produce un comportamiento elástico-plástico posterior al agrietamiento para fracciones de volumen mayores a 7%. Sin embargo, estas propiedades mecánicas disminuyen cuando las muestras son sometidas a ciclos de humedecimiento y secado. También se reportaron que la exposición de las muestras a ambientes alcalinos generados por hidróxido de calcio y sulfato de sodio no parecen afectar su resistencia a flexión. Debido a los resultados obtenidos en estas investigaciones las fibras naturales aportan propiedades beneficiosas a las mezclas sometidas a pruebas de flexión. (Alvarado, 2002).

Otro tipo de fibras naturales utilizadas como aditivo fueron las de nopal deshidratadas, las cuales se integraron en un mortero de cal-arena sílice, proporción 1:3 en peso. Se determinaron sus características bajo diferentes sollicitaciones como compresión, cortante, flexión y tensión, además de una comparación entre pilas de mampostería de arcilla recocida, adheridas con mortero de cal, adicionado con las mismas fibras de nopal y pilas con las mismas características, pero recubiertas en ambas caras con el mortero mencionado. Los materiales empleados son cal grado industrial, arena de río cribada entre las mallas N°16 y 30, y fibras deshidratadas pulverizadas de nopal, ladrillos rojos recocidos y agua potable.

Las edades de prueba de los morteros fueron a edades tempranas de 7, 14, 28 y 35 días, y a edades tardías de 473 y 504 días. El mortero se elaboró bajo condiciones controladas de laboratorio, con adición de 1% de fibras deshidratadas pulverizadas de nopal respecto al peso de la cal; el agua se agregó hasta tener una fluidez de 90% cuantificada en mesa de fluidez. El mortero se caracterizó, así como la materia prima, según los estándares de la American Society for Testing and Materials (ASTM) y los resultados se compararon contra el Reglamento de

Construcciones de Michoacán. Las pruebas mecánicas se realizaron en el Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas” de la Facultad de Ingeniería Civil, de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Por lo anterior se puede determinar que los aditivos orgánicos están en constante investigación y que pueden aportar distintas propiedades a los morteros dependiendo su aplicación y al tratamiento previo que se somete el material para usarlo como aditivo.

2.3.5 Cenizas Naturales.

Por otro lado, se han llevado a cabo estudios e investigaciones con cenizas de materiales orgánicos como lo son la cáscara de arroz, la caña de azúcar, paja de trigo, maíz, por mencionar algunos.

La ceniza de bagazo de la caña de azúcar es el producto de la congeneración y combustión de ésta, la cual se produce en enormes cantidades en países en vías de desarrollo por lo que podría ser una opción como material puzolánico y ha sido utilizado con éxito como suplemento del cemento portland. Cordeiro et al., (2012) reportaron que, con una sustitución del 40% en peso de cemento por BA, disminuyó significativamente el aumento máximo de la temperatura adiabática del concreto convencional.

Este tipo de ceniza es producida con calcinación al aire a 600 °C y a una velocidad de calentamiento de 10°C/min presenta sílice amorfa, una superficie amplia y un bajo contenido de carbono (Cordeiro et al., 2009). Las pérdidas por calcinación en este material se presentan por arriba del 10% sin embargo, no tiene un efecto perjudicial en sus propiedades como aglutinante, aun así, pérdidas por debajo del 10% proveen un excelente material puzolánico.

Ganesan *et al.*, (2007) utilizaron mezclas que integraban, en proporciones del 5 al 30%, de sustitución en peso del cemento por ceniza de bagazo. Se extrajo ceniza de bagazo de caña de manera controlada a 650°C por una hora. La mezcla de control (1:3:3) se mantuvo en una relación agua cemento del 0.53 y fue preparada para especímenes cúbicos (100mm x 100mm x 100mm), encontrando que hasta un 20% del cemento Portland podría ser sustituido por ceniza de bagazo de caña sin efectos adversos, e incluso presentando resistencias más altas en los primeros días, reducción en la permeabilidad y apreciable resistencia a la permeabilidad y difusión de cloruros, todo esto abonando a la durabilidad del concreto reforzado.

El esfuerzo a compresión óptimo fue obtenido por el espécimen con proporción de 20% del peso del cemento a 28 días y 90 días. Rukzon and Chindapasirt, (2012) reportaron un esfuerzo de 68.6 MPa a 28 días.

Se puede concluir que las partículas de BA son más pequeñas que las de cemento portland, por ello el agua necesaria para la mezcla incrementa, al mismo tiempo que la superficie de reacción; acelerando el proceso de fraguado, debido a su alto contenido de sílice y alúmina. (Escandón *et al.*, 2012).

La ceniza de la mazorca de maíz es el desecho más fino derivado de la combustión del maíz y el elote.

Estudios previos se estimó que para el año 2000, la producción mundial se estimó de 589 millones de toneladas de grano de maíz en 139 millones de hectáreas (FAO, 2014). (Adesanya, 1996; Adesanya and Raheem, 2009a, 2010) observaron que la ceniza de la mazorca del maíz contiene un 65% de sílice y combinaciones de óxido

de aluminio y óxido de sílice en un rango del 70%-75% . Mostrando que la CCA puede ser utilizada como SCM en el concreto, con la sustitución de cemento portland en proporciones de 0%, 2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 15%, 20% y 25%, observando incremento en el tiempo de fraguado; mayor que las mezclas de control.

Por lo tanto, este material reduce el calor por hidratación del concreto. Más aun, éstos autores llevaron a cabo más pruebas en morteros, evaluando la trabajabilidad y la resistencia a la compresión en concretos (Adesanya and Raheem, 2009b), con una relación agua cemento de entre 0.5 y 0.7. y proporciones de 1:11/2:3:4 y 1:3:6, respectivamente.

Concluyendo que la resistencia a la compresión de mezclas de concreto-CCA está por debajo de lo común en los primeros días, pero incrementa significativamente, con una mezcla optima de sustitución de CCA en 8%. (Gonzalez, 2019).

La ceniza de la paja del trigo se ha estudiado como material puzolánico; Steenari and Lindqvist, (1998) hacen un primer acercamiento al material en combinación con aditivos como caolinita y dolomita, y observan las reacciones que estas combinaciones tienen a altas temperaturas, descubriendo la formación de óxidos y silicatos en temperaturas arriba de 800°C, concluyendo que el contenido de sílice en la WSA es del 73% y encontrando propiedades puzolánicas en aquellas mezclas calcinadas a 670°C, mientras proponen una etapa de preliminar de quemado.

Con estos resultados Biricik *et al.*, (2000) y Al-Akhras and Abu- Alfoul, (2002) investigan en mezclas de mortero resistentes a sulfatos y morteros de autoclave, respectivamente, de ahí se desprende el conocimiento de que un enfriamiento rápido de la muestra después de calcinada, se traduce en una mejor actividad puzolánica del material; proponen pruebas de resistencia a compresión y flexión, y concluyen

que el reemplazo de cemento por la WSA beneficia a la resistencia a la compresión de morteros en solución al ataque de sulfatos, mientras que a flexión las muestras no son satisfactorias. (Cobrerros, *et al.*, 2015).

Por otro lado también se ha estudiado la ceniza de cascarilla de arroz, esta se produce en la etapa del crecimiento del arroz, formándose una piel alrededor del grano. No tiene interés comercial después del proceso de producción. La industria del arroz es de las más importantes en ciertos países como China, India, Indonesia, Malasia y Bangladesh. Hacia finales del 2013, la producción de arroz alcanzó los 742 millones de toneladas, cantidad que incrementa año con año (FAO, 2013), de las cuales más del 20% es cascarilla. La baja densidad de este residuo es una ventaja (Khan *et al.*, 2012) por ejemplo, países con basta producción de arroz, han aprovechado este residuo para contrarrestar los problemas de vertederos, dado que éste puede abarcar grandes extensiones de terreno. Una enorme cantidad de ceniza de cascarilla de arroz (RHA) se produce globalmente, estimada en 7.5 millones al año, con una tasa de crecimiento del 1.1 %.

2.3.6 Puzolanas Naturales.

Una de las formas de reducir las emisiones de CO₂ producidas por la industria de la construcción es sustituir el cemento Portland por puzolanas. La aplicación de la utilización de residuos agrícolas en la producción de material puzolánico es técnicamente factible, debido a la calcinación de materiales orgánicos y a dejar cenizas con un tamaño de partícula fino y alto contenido de SiO₂. Se discutió el efecto puzolánico de las cenizas de bagazo de caña de azúcar (SCBA) de Taretan, Michoacán, México, sobre las propiedades físicas y mecánicas de un mortero de cemento Portland. Las muestras de prueba se prepararon en base al reemplazo de porcentajes de cenizas de bagazo de caña de azúcar de 5, 10, 15, 20 y 30%, en relación con el peso del cemento. Para validar las propiedades mecánicas de las

muestras, se determinó la resistencia a la tracción, a la flexión y a la compresión. La porosidad del mortero se determinó mediante pruebas ultrasónicas no destructivas de la frecuencia del pulso y la resistividad eléctrica. La contribución de este documento fue determinar la resistencia de la unión de un mortero de recubrimiento con SCBA unido al sustrato de concreto mediante pruebas de extracción. Los resultados mostraron que la adición de cenizas de bagazo de caña de azúcar mejoró la resistencia mecánica, la adherencia del mortero al concreto y disminuyó la porosidad en tiempos de curado grandes. Por lo tanto, se sugiere el uso de cemento de puzolana Portland que contiene puzolana de ceniza de bagazo de caña de azúcar, con el beneficio adicional del uso de residuos agrícolas. (Rodríguez Bucio, et, al, 2016).

2.3.7. Material Cambio de Fase.

Se utilizó material cambio de fase (PCM) y material ligero (pomacita) en mezclas de mortero, en base de cemento portland, con el objetivo de mejorar las condiciones térmicas y mecánicas bajo esfuerzos de compresión y flexión en los morteros y con esto reducir la demanda energética en el sector residencial. Se realizó una primera mezcla de control con una relación de cemento-arena 1:3 y una fluidez de 110% +/- 5%, en base a ésta se elaboró una segunda mezcla sustituyendo por material ligero. La tercer y cuarta mezcla fue una relación 1:2 cemento-arena variando la cantidad de PCM y cambiando la proporción de la mezcla de control. La quinta y sexta mezcla fue una relación 1:1 cemento-arena y variando la cantidad de PCM y cambiando las proporciones de la mezcla de control. De cada dosificación se realizaron 10 probetas para ensayos a esfuerzos de compresión, y 10 para ensayos a esfuerzos de flexión con la finalidad de identificar las muestras con las mejores propiedades mecánicas. Adicionalmente, se realizaron 5 probetas para las dosificaciones que contienen únicamente PCM para obtener el comportamiento térmico de las muestras. Para todas las mezclas se obtuvo la fluidez, esfuerzos a compresión y a flexión en los morteros. Los resultados demuestran que una de las mezclas de mortero ensayada

obtuvo una notable resistencia bajo esfuerzos de compresión y una mejora bajo esfuerzos de flexión. Por lo tanto, de acuerdo a los resultados se presume que el PCM podría representar una alternativa como agregado en paneles prefabricados.

2.3.8. Mucílago de Nopal como Aditivo

Uno de los recursos naturales renovables utilizado en la construcción es el nopal, al cual, se le extrae el mucílago para incorporarlo como aditivo. El nopal es una planta de la familia de las cactáceas, con tallos aplastados, carnosos, formados por una serie de palas ovas de 30 a 40 centímetros de longitud y 20 de anchura, erizadas de espinas, y que procede de México. Los tejidos de los nopales pueden almacenar considerables cantidades de agua lo que permite a las plantas soportar largos periodos de sequías (Coronado, 2009).

Una investigación de este aditivo fue realizada en la Universidad Autónoma de Querétaro en la cual se realizaron muestras de mortero de cemento Portland, agua y 5% de nopal en polvo por kilogramo de mortero, que es otra forma en la que se puede trabajar el nopal. Las muestras fueron sometidas a fuerza de compresión, dando como resultado un incremento de 72% más resistencia que la mezcla que no contenía el aditivo; con esto se verifico que el aditivo de nopal mejora la trabajabilidad de la mezcla y la resistencia a la compresión.

Sumada a esta investigación, se realizó otro trabajo en el que también utilizaban como aditivo el concentrado de nopal, pero en esta ocasión lo utilizaron en diferentes cantidades con las que realizaron 5 diferentes mezclas. Las muestras se sometieron a pruebas de fuerza de compresión y de corrosión; obteniendo como resultado en las muestras que reposaron 3 días y con un contenido 1.5gr de aditivo de nopal adquirieron un incremento del 65% en la prueba de resistencia a la compresión. En el caso de la prueba de corrosión los resultados arrojaron que las

muestras con aditivo de nopal retardan la corrosión en le mortero. (Hernández *et al.*, 2007).

En la Universidad Autónoma de Tamaulipas, se abordaron diferentes pruebas y metodologías con el fin de determinar que tan afectada y mejorada se puede ver la resistencia del concreto, utilizando como base soluciones de mucílago de nopal, comparando de igual forma los resultados con solución a base agua y a base de fibra natural.

Las muestras fueron elaboradas en tres tipos para tener un margen de comparación. La primera era a base de agua potable, la segunda llevaba como base el extracto del Nopal y la última llevaba una dosificación de fibra de ixtle en una proporción de 50 ppm diluida de igual forma en mucílago de nopal. Con las muestras se realizaron pruebas de flexión, compresión, ultrasonido, transferencia de calor y análisis de rugosidad.

Los resultados de las pruebas de flexión fueron que las pruebas a los catorce días lograron un incremento del 72.62% en la mezcla de mucílago, en la mezcla de fibra incrementó del 20.68% y la mezcla en blanco disminuyó en un 12.72%. Con lo cual se comprueba que las mezclas con aditivos organicos incrementaron considerablemente su resistencia a flexión. (Goyes, 2019).

En la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo también se han realizado proyectos en lo que se han puesto a prueba morteros de cal para restauración sobre muros de mampostería. El trabajo realizado en la universidad hace una comparación entre pilas de mampostería de arcilla recocida adheridas con mortero de cal adicionado con fibras desecadas y pulverizadas de nopal cactus opuntia y

pilas con las mismas características, pero recubiertas en ambas caras con el mortero mencionado.

Las piezas cerámicas son hechas a mano, con arcillas montmoriloníticas del grupo sectitas. El mortero es con cal normalizada, condiciones de laboratorio, en proporción 1:3 en peso y con adición de 1% de fibras pulverizadas de nopal, el agua se agregó hasta tener una fluidez del 90% cuantificada en mesa. El mortero se caracterizó, así como la materia prima y las pilas, según los estándares de la ASTM y los resultados se compararon contra el Reglamento de Construcciones Vigente en el Estado de Michoacán. Las pruebas mecánicas se realizaron en la Facultad de Ingeniería Civil dando como resultado se determinó que la adición de nopal en polvo incrementa la resistencia solo en un uso menor al 10% del peso del cementante, siendo la cantidad óptima del 1% del nopal en polvo en peso de la cala para morteros en proporción 1:3. Conforme se incrementa la cantidad de nopal en polvo en un mortero se reduce su resistencia mecánica, se incrementa su contracción lineal, se disminuye su peso propio, se incrementa la plasticidad de la mezcla y se incrementan los tiempos de fraguado. (W. Martínez Molina et al., 2011)

En comparación los aditivos orgánicos antes mencionado, el mucílago de nopal por su consistencia acuosa es un aditivo que puede ser usado en lugares con problemas de escases de agua sin sufrir ataques bióticos; aparte el nopal un recurso natural renovable que es abundante en México por lo que se puede dar por hecho que todas las personas tienen un fácil acceso a este.

III. MATERIALES SELECCIONADOS.

Para poder seleccionar los materiales que se utilizaron se realizaron pruebas preliminares que consisten en determinar las características que tienen los materiales y si estas cumplen con las especificaciones de nuestra investigación.

3.1 SUELOS.

3.1.1 Muestras de la Solana.

Se ubicaron los bancos de donde se obtuvieron dos muestras de suelos con lo que se trabajaron. Los suelos se extrajeron de la comunidad de la Solana en el estado de Querétaro; estos se localizaban dentro de tabiqueras, por lo que son suelos que utilizan como materia para la elaboración de tabiques rojos recocidos. Las muestras recolectadas fueron de aproximadamente 15 kilos cada una.



Ilustración 1. Tabiguera en la Solana

3.1.2 Caolinita.

La caolinita es un material arcilloso de interés cerámico, que ha sido objeto de numerosos estudios en diversos países debido a sus aplicaciones industriales (Rodríguez, *et al.*, 1996).

Algunas de los usos de la caolinita son en cerámicos incluyendo refractarios, cementos especiales y fabricación de fibras de vidrio y sialones, catalíticas en la industria química y otras como tintes, pinturas, adhesivos, adsorbentes (García *et al.*, 2005)

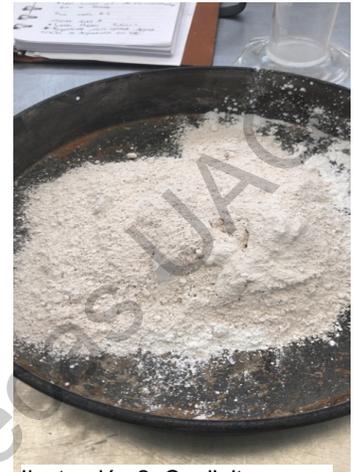


Ilustración 2. Caolinita utilizada en las muestras de mortero.

La caolinita proviene del municipio de Comonfort ubicado en el estado de Guanajuato. Este suelo lo emplean para la elaboración de porcelanas y debido a su resistencia a los ácidos se utiliza en la construcción.

3.2 CEMENTANTES.

Los materiales cementantes son los materiales encargados del proceso de fraguado y endurecimiento de las mezclas, que, al contacto con el agua, sufren un proceso de consolidación de naturaleza química, a partir del cual se unen las partículas y se cohesiona el conjunto (Willianson, 2015).

3.2.1 Cal.

La cal es un cementante que hará una mezcla con mejor plasticidad, evita que el mortero pierda agua fácilmente y así evitar las grietas. Una de las consideraciones que se deben tener en cuenta es que la cal puede ser de dos tipos: aérea o hidráulica. La primera se obtiene a partir de la calcinación de calizas cálcicas o cálcico-magnésicas con contenidos en arcillas inferiores al 6%. La segunda, a partir de calizas mezcladas con arcillas a altas temperaturas (1000-1300 °C), o de calizas

que contienen un 20% de sílice y/o alúmina. A 900°C se forman compuestos puzolánicos por descomposición de los carbonatos y las arcillas y a 1000°C se forman silicatos, aluminatos cálcicos y clinker. Los morteros de cal aérea tienen un endurecimiento lento, con una importante retracción de volumen; los de cal hidráulica fraguan rápidamente al aire o en presencia de agua, debido a la formación de silicatos cálcicos.

La cal cuya proporción de magnesio (MgO) es superior al 5% se denomina dolomítica o cal magra y es de color grisáceo. Si esta proporción es inferior se denomina cal grasa y es de color blanco. La primera es más adecuada para trabajos toscos y asentado de fábricas; la segunda para revocos, blanqueos y acabados. En función del contenido en agua, la cal puede suministrarse en forma de polvo o en pasta. En este último caso, a la cal, durante su hidratación se le añade un exceso de agua o bien, la cal, previamente apagada se mezcla con agua. (Rojo, 2013)

La cal empleada en la elaboración de los morteros y obtenida por calcinación de rocas calizas se denomina cal viva (CaO), la cual al extinguirla posteriormente con agua, produce una reacción exotérmica pasando a cal muerta o hidratada [Ca(OH)₂]. A partir de este hidróxido y absorbiendo CO₂ atmosférico, se produce el fraguado del mortero con la consiguiente incorporación de carbono atmosférico, dando lugar finalmente a un carbono cálcico (CO₃Ca), denominado calcita.

La calcinación se produce en varias etapas: a 110°C se pierde la humedad de cantera, a 700°C se descomponen las arcillas y a 800-1200 °C, se produce la disociación de la calcita, por ello las temperaturas para la calcinación de calizas puras se sitúan entre 800 y 1200° C y para calizas impuras o dolomías entre 700 y 800°C, siendo la calcinación más rápida a menor tamaño de partículas. Durante el proceso, algunas partículas no completan la calcinación, otras se calcinan completamente y otras rebasan el punto de calcinación. En el primer caso aumenta la densidad, la porosidad y la reactividad química en el mortero con la consiguiente

disminución de retracción; en el segundo disminuye la densidad aparente y aumenta la reactividad del agua y en el tercero aumenta la densidad, disminuye la porosidad y la reactividad de la cal viva con el agua.

El agua necesaria para el correcto apagado de cal se calcula registrando el peso de la cal viva, la cual se sumerge en exceso de agua hasta que se produzca una pasta. Eliminada el agua restante se vuelve a pesar la pasta y por diferencia de peso se calcula la cantidad de agua necesaria para el apagado de cal. El apagado puede hacerse por fusión en agua, inmersión o aspersion. La velocidad con la que se produce la hidratación de la cal depende de varios factores, entre los que se incluye: la composición de la cal viva, la pureza de la cal, el tamaño de las partículas de cal, la temperatura y el tiempo de hidratación, el contenido en agua, la agitación de la mezcla y la presencia de coloides.

La cal calcita se hidrata más rápidamente que la magnésica, las impurezas inhiben el grado de hidratación, disminuyendo la absorción de agua. A menor tamaño de partícula, temperaturas más elevadas, o mayor agitación de la mezcla se acelera el proceso de hidratación. Este proceso no conviene que sea excesivamente rápido, para evitar la formación de caliches en el interior del mortero. La cal magnésica es menos porosa, proporciona mayor dureza al mortero y es menos soluble que la calcita, por lo tanto es más estable en ambientes salinos.

Para la obtención del mortero de cal, la cal se mezcla con arena y agua en diferentes proporciones, el cual es aplicado en la construcción. Una vez aplicado comienza el proceso de fraguado, al reaccionar con el dióxido de carbono ambiental, se carbonata y adquiere endurecimiento:



Hidróxido de calcio + dióxido de carbono \longrightarrow carbonato de calcio + agua evaporada

Este proceso es conocido como carbonatación, es originado por la reacción del dióxido de carbono contenido en la atmósfera y que al penetrar en el concreto poroso encuentra el hidróxido de calcio contenido en el concreto. De esta manera se completa el ciclo de la cal, el cual inicia y termina con el carbono de calcio, es decir se forma un material químicamente idéntico a la materia prima que se empleó para la producción de cal (Díaz, 2016).

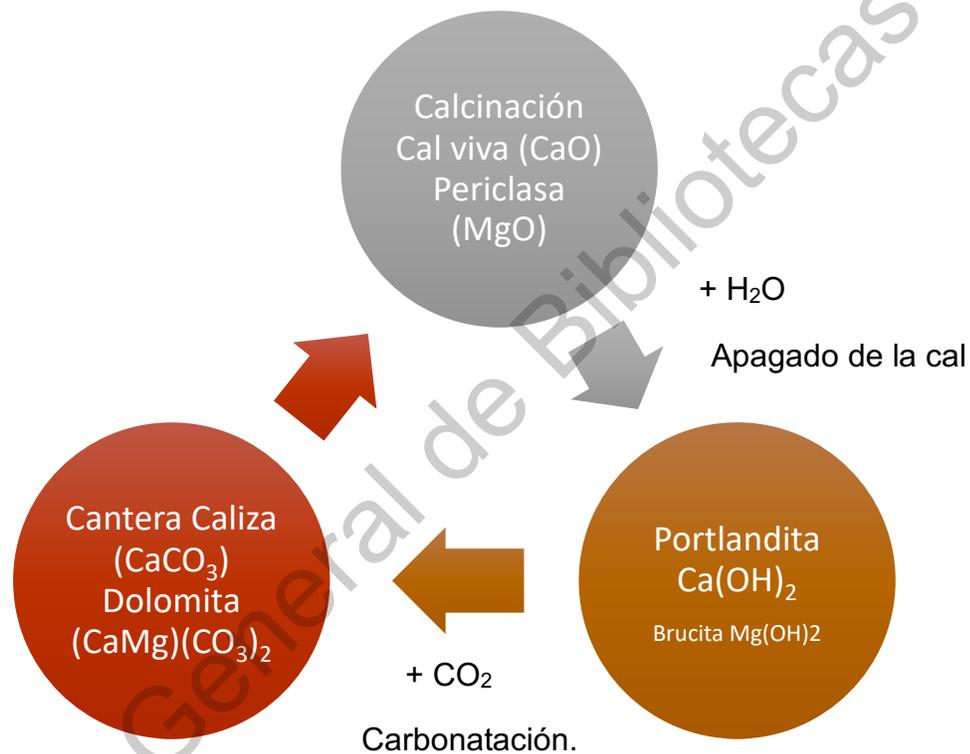


Ilustración 3. Ciclo de la Cal (Cazalla Vázquez, 2002).

3.2.2 Yeso.

El yeso como ligante ha sido empleado desde la antigüedad, quizás debido a que su temperatura de calcinación es notablemente más baja que la del resto de los aglomerantes. El yeso, en la construcción, se ha empleado para unir materiales o

elementos constructivos, para protecciones de paramentos internos o externos y para decoración.

Entre los aglomerantes tradicionales más representativos a base de yeso se encuentra el mortero de yeso, el cual se compone de yeso y arena fina y se utilizan principalmente para revocar paramentos interiores y para unir materiales o elementos de muros.

Otra forma de usar el yeso es como recubrimiento o en estucos que están formados por mezclas de yeso y aditivos generalmente de origen animal que retrasan el fraguado, aumentan la plasticidad y trabajabilidad de la pasta en estado fresco y mejoran la adherencia, dureza y resistencia a agentes externos. Entre las adiciones es frecuente también encontrar el empleo de la cal, marmolina o distintos pigmentos inorgánicos.

Tal como se emplea actualmente en la construcción, el yeso es un producto obtenido industrialmente a partir de la piedra de yeso cocida (sulfato de calcio dihidratado) o aljez. Este producto previamente molido fragua por adición de agua, regerando el dihidrato, debiendo el yeso a este fenómeno su carácter aglomerante; es lo que se conoce con el nombre del ciclo del yeso

El sistema dentro del que se enmarca el ciclo del yeso es:

Yeso – Hemihidrato – Anhidrita – Yeso

El ciclo se divide en dos partes:

- 1.- Deshidratación : Yeso – Hemihidrato – Anhidrita
- 2.- Hidratación: Hemihidrato y Anhidrita – Yeso

Ambos procesos son altamente complejos y en ellos influyen gran cantidad de factores que pueden modificar tanto el fenómeno de la deshidratación como el de hidratación. De entre ellos, cabe destacar los inherentes a la naturaleza del material; texturales (tamaño, forma y distribución granulométrica), microestructurales (vacancias y dislocaciones) y composicionales (presencia de impurezas). Por otra parte, también tienen una gran influencia factores ambientales como la temperatura, presión de vapor de agua y la velocidad de calentamiento en el horno.

En la primera parte del ciclo, el hemihidrato de yeso se obtiene a partir del siguiente proceso reactivo:



La temperatura de calcinación del yeso es variable y su rango puede ser muy amplio, desde 60°C hasta 1200°C, obteniéndose diferentes fases y estados alotrópicos que pueden coexistir debido a la complejidad del sistema. Según la temperatura de cocción, el sulfato que se forma presenta características diferentes:

-
- Entre 100-180°C se obtiene el hemihidrato, del que existen dos formas alotrópicas denominadas hemihidrato (α) y hemihidrato (β):
- Entre 100-120°C, se obtiene la variedad α del hemihidrato. El proceso térmico es muy restringido y tiene lugar en atmósfera saturada (en autoclave o en disolución salina) y presión superior a 1 bar. Esta variedad presenta unas propiedades técnicas superiores a las del demihidrato (β).
- Entre 120-180°C, se obtiene la variedad β del hemihidrato, a presión atmosférica. También denominado yeso cocido, es el componente más importante del yeso comercial.

Respecto al proceso de transformación del hemihidrato de yeso a anhidrita, cabe destacar que se produce por la salida del agua y la reordenación de la estructura cristalina. En la fabricación industrial, es difícil que se obtengan fases puras, siendo habituales las mezclas en función del tiempo de cocción y la temperatura. No obstante, podemos diferenciar distintos tipos de anhidrita en función de la temperatura:

- Entre 150-380°C se obtiene la anhidrita III o anhidrita soluble.
- Entre 380-1200°C se obtiene la anhidrita II o insoluble (sobrecocida).
- Entre 1200-1350°C se obtiene la anhidrita I, fase no estable que se transforma en anhidrita II al bajar la temperatura <1200°C. También denominada yeso hidráulico.
- A temperatura >1350°C, se produce la disociación térmica dando lugar a la transformación total en CaO y SO₃.

Por otra parte, en la fase de hidratación del hemihidrato de yeso, éste en contacto con el agua se vuelve a hidratar produciéndose la reacción inversa a la anterior:



Este proceso conocido con el nombre de fraguado de yeso, transcurre en tres etapas: hidratación, cristalización y endurecimiento. La hidratación del 95% del yeso tiene lugar en tres minutos aproximadamente y finaliza en menos de dos horas. Durante el fenómeno de fraguado se produce un aumento de volumen (expansión 0.3 – 1.5%) y un desprendimiento de calor (reacción exotérmica).

En el fraguado del yeso influyen diferentes factores, entre los que cabe destacar los siguientes: relación yeso/agua, temperatura del agua de amasado, tiempo transcurrido desde su deshidratación y el tamaño de las partículas o su finura del molido. Una de las propiedades más importantes del yeso es su rapidez del

fraguado, siendo comúnmente modificada mediante retardadores de fraguado, en el proceso de fabricación industrial (J. Igea, 2011).

Para la elaboración de mezclas se utilizó un yeso que se obtuvo en un negocio dedicado a la construcción en la ciudad de Querétaro.

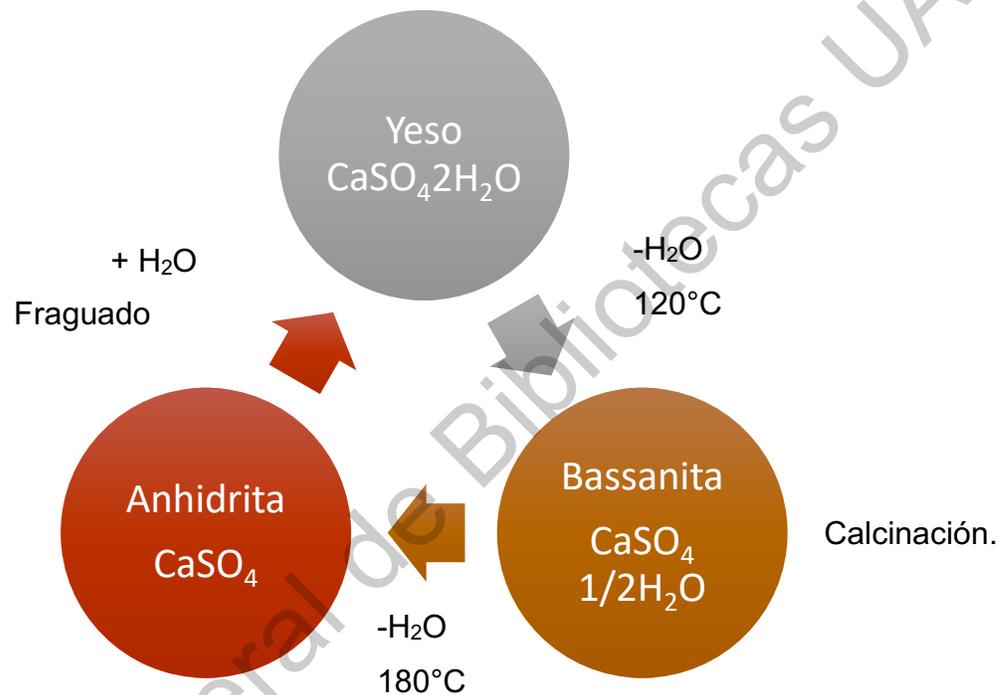


Ilustración 4. Ciclo del Yeso (Igea Romera, 2011).

3.3 EL NOPAL.

Los nopales son plantas arbustivas, rastreras o erectas, que pueden alcanzar de 3 a 5 m de altura. El sistema radical es muy extenso, densamente ramificado, rico en raíces finas absorbentes y superficiales en zonas áridas de escasa pluviometría. Su tronco es leñoso y mide entre 20 y 50 cm de diámetro. Sus ramas están formadas

por cladodios de 30 a 60 cm de largo x 20 a 40cm de ancho y de 2 a 3 cm de espesor. El cladodio fresco recibe el nombre de nopalito y el adulto de penca.

En las pencas, de color verde opaco, se realiza la fotosíntesis, pues éstas remplazan a las hojas con esa función. Se encuentran protegidas por una cutícula gruesa que, en ocasiones, está cubierta de cera o pelos que disminuyen la pérdida de agua, ya que poseen abundante parénquima. En este tejido se almacenan considerables cantidades de agua lo que permite a las plantas soportar largos periodos de sequía.

3.3.1 El Nopal en México.

El aprovechamiento y cultivo de los nopales, que pertenecen a la familia de las Cactáceas, se remonta a las antiguas culturas mesoamericanas y su importancia en la vida social, económica y religiosa alcanzó elevados niveles

En México existen más de 100 especies de nopales, la mayor parte de ellos localizados en zonas áridas, por lo cual algunos botánicos lo consideran como “centro de origen” de estas plantas, las cuales poseen características morfológicas y fisiológicas particulares que les permiten almacenar y conservar el agua en sus tejidos, con lo cual sobreviven a su escasez y a las marcadas variaciones de temperatura características de las zonas áridas y semiáridas.[11]

El nopal (*Opuntia* spp) ha representado, para los mexicanos, en su desarrollo histórico, uno de los elementos bióticos más relevantes y de mayor significado cultural, ya que se utiliza como alimento (verdura o fruto), bebida alcohólica, dulce, forraje, cerco vivo, producto industrial, etc. Su valor cultural y biótico ha quedado plasmado en códices, pinturas y bibliografías antiguas; su significado histórico es evidente.

La planta del nopal se distribuye en América, siendo México el país con mayor abundancia de especies por lo que se puede considerar como centro de origen y diversidad de esta especie. A partir de la conquista, las mejores variedades fueron llevadas por los conquistadores a Sudamérica y al resto del mundo.

La producción de nopal en México puede clasificarse en tres tipos: nopaleras silvestres, de huertos familiares y plantaciones. La producción en nopaleras, en su gran mayoría silvestres, se estima en 3 millones de Ha, distribuidas en 15 estados del país. El 52,5% de superficie nacional está ocupada por zonas áridas y semiáridas y ya que las condiciones climáticas que prevalecen en éstas impiden la producción de otros cultivos, el nopal se convierte en una de las alternativas económicas más viables para sus habitantes.

Son muchos los sectores industriales que se pueden beneficiar con la explotación del nopal, ya que esta planta es de gran ayuda para el desarrollo de diferentes tecnologías para beneficio del hombre. A continuación se mencionan algunas de las tecnologías:

- Agroindustria de alimentos y bebidas para el consumo humano (producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas y no alcohólicas de tuna y nopales).
- Agroindustria de alimentos para animales (suplementos y piensos de cladodios y de desechos de la industria procesadora de tuna, como las cáscaras y semillas).
- Industria farmacéutica (protectores gástricos de extractos de mucílagos; cápsulas y tabletas de polvo de nopal).
- Industria cosmética (cremas, jabones, lociones de cladodios).
- Industria de suplementos alimenticios (fibra y harinas de cladodios).
- Industria productora de aditivos naturales (gomas de cladodios; colorantes frutales).
- Sector de la construcción (compuestos ligantes de los cladodios).

- Sector energético (producción de biogás a partir de las pencas).
- Sector productor de insumos para la agricultura (productos del nopal como mejoradores del drenaje de suelos).
- Industria textil (uso de colorantes naturales, como el carmín de la cochinilla).
- Aditivo anticorrosivo en concreto reforzado.
- El mucílago también es empleado para fabricar pintura que actúa como impermeabilizante para ser usada en cualquier construcción. El mortero de cal adicionado con mucílago se utiliza también para restaurar y proteger edificios debido a su funcionamiento mejorado contra la penetración de la humedad y la aparición de grietas.

3.4 ADITIVOS

Las propiedades de un concreto endurecido se dan a partir de la combinación de los materiales fundamentales de una mezcla de concreto, como los son los cementantes, los agregados y el agua, pero se puede adicionar un ingrediente más a la mezcla de concreto: los aditivos, cuyo objetivo principal es el de modificar convenientemente el comportamiento del concreto previo o durante el fraguado e inducir o mejorar determinadas propiedades de este.

Un aditivo se puede definir como un producto químico que se agrega a la mezcla de concreto o morteros en cantidades no mayores de cinco por ciento por masa de cemento o mortero durante el mezclado o durante una operación adicional de mezclado antes de utilizarlos, para el propósito de realizar una modificación específica a las propiedades normales del concreto o mortero.

Investigaciones anteriores mencionan que la definición que da el Comité ACI 116(26) de un aditivo puede interpretarse de la siguiente manera, en donde un

material sólo puede considerarse como aditivo cuando se incorpora individualmente a la mezcla, es decir, se puede ejercer control sobre su dosificación. De esta manera, las puzolanas y las escorias solamente son aditivos si se les maneja y administra por separado del cemento portland. Lo cual no deja de ser más bien una cuestión de forma, ya que cualitativamente sus efectos son los mismos que si se administran por conducto del cemento.

Las principales razones del empleo de los aditivos son :

- Para reducir el costo de la construcción.
- Para obtener algunas propiedades en las mezclas de manera más efectiva que por otros medios.
- Para asegurar la calidad del mortero durante las etapas de mezclado, transporte, colocación y curado en condiciones ambientales adversas.
- Para superar ciertas eventualidades durante las operaciones de colado.

A pesar de estas consideraciones, se debe tener presente que ningún aditivo de ningún tipo ni en cualquier cantidad se podrá considerar como sustituto de una practica correcta de colado.

La efectividad del aditivo depende de factores tales como el tipo, marca y cantidad; el contenido de agua, la forma, la granulometría y proporciones de los agregados; el tiempo de mezclado; el revenimiento; y las temperaturas del concreto y del aire.

La mayoría de los aditivos inclusores de aire, reductores de agua, acelerantes y retardantes son líquidos generalmente de color oscuro y parecidos a un jarabe. Los aditivos se agregan a la mezcla en cantidades específicas; los aditivos líquidos comúnmente se surten individualmente en el agua de mezclado; de cualquier modo, no se deben entremezclar antes de su dosificación.

3.4.1 Aditivos Orgánicos.

Los aditivos orgánicos son los que se extraen de los recursos naturales y carecen de productos químicos; se ha incrementado su aplicación en la albañilería para fabricar y mejorar los morteros, sobre todo en su resistencia y durabilidad. Este tipo de aditivos varía de acuerdo a la localidad, el tipo de material que tengan disponible y las especificaciones de los constructores.

Los aditivos orgánicos de uso tradicional han sido: leche (caseína), albúmina de huevo, cola animal, ceras, grasas, aceites, sangre o tejidos animales, huesos, paja, madera, semillas, etc. (A. Rojo, 2015).

3.4.2 Mucílago de Nopal.

El aditivo orgánico seleccionado fue el mucílago de nopal es un carbohidrato complejo que constituye un hidrocólide que podría integrar la oferta de una gran gama de agentes espesantes de amplio uso, además de que tiene una gran capacidad de absorción de agua y propiedades adhesivas.

Los usos tradicionales que tiene el nopal y sus derivados, además del valor que tiene como alimento en forma directa en México, se suma su aplicación en rubros como el de la construcción por sus propiedades aglutinantes en adobes y pinturas, o anticorrosivos.

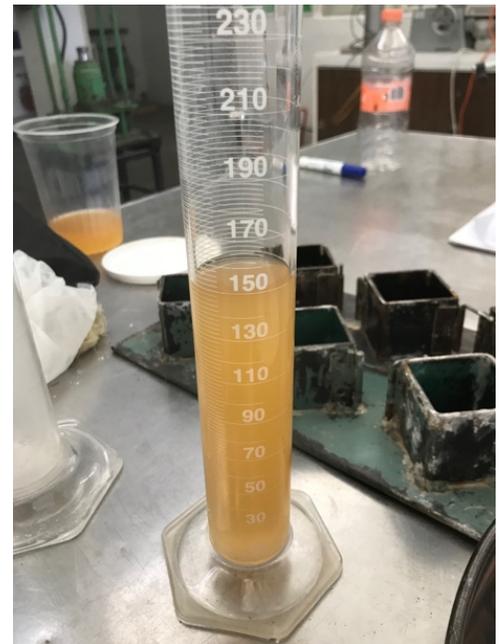


Ilustración 5. Mucílago de Nopal

El mucílago de nopal en solución acuosa mejora las características de cohesión durante la elaboración de mortero.

El concentrado de nopal se ha combinado con cal usando la mezcla como recubrimiento para muros; de este modo, se ha visto que el extracto de nopal originario de México en morteros con cementos Portland, incrementa la plasticidad, mejora la absorción del agua y hace que se desarrolle una mejor resistencia al congelamiento.

El hidróxido de calcio, producido por la hidratación del cemento Portland, interactúa con los componentes del extracto de cactus, este efecto ayuda en el proceso de cristalización. Las pruebas realizadas con pencas de nopal sin espinas, en contacto con el agua producen una solución con una consistencia aglutinante, la cual contiene proteínas y polisacáridos.

El mucílago concentrado se obtiene una vez que se han cortado las pencas de nopal, se pelan, cortando la orilla y después los lados de la penca, desprendiendo toda la estructura ósea de éste para evitar el vagazo(Coronado, 2009).

El mucílago es un carbohidrato complejo. Entre los monómeros contenidos en la cadena se encuentran: Larabinosa, D-galactosa, L-ramnosa, D-Xilosa y ácido galacturónico. La proporción de estos monómeros en la molécula varía de acuerdo a diversos factores como: variedad, edad, condiciones ambientales y estructura empleada para la extracción (fruto, cáscara, cladodio), entre otros factores. Este compuesto se presenta tanto en los cladodios como en la piel y pulpa de la fruta, aunque en muy diversas proporciones.

La viscosidad es la principal característica del mucílago, sobre la que se proyecta la aplicación como aditivo de alimentos, adhesivo de pinturas y recubrimiento de mucosa gástrica ulcerada, entre otras.

En México, hay una larga historia del uso del mucílago de nopal en combinación con cal: aumenta sus propiedades adhesivas y mejora su repelencia al agua. Tradicionalmente, se ha empleado de modo similar al yeso en muros.

El mucílago se extrajo de nopales silvestres recolectados en la ciudad de Querétaro.

3.4 AGUA.

El agua es uno de los elementos importantes del mortero, puesto que de ella depende la plasticidad que presente la argamasa, la cantidad de agua será la que determine la resistencia de la mezcla una vez seca, por lo que el agua utilizada durante el amasado como durante el curado en obra de ser de naturaleza inocua.

El agua de amasado para morteros será la considerada como potable, y se dosificará de manera que otorgue al mortero la docilidad necesaria para su empleo, nunca se dosificará en exceso, puesto que así será más fluido del mortero y producirá retracciones en su fraguado. Tampoco se debe aumentar la cantidad del mortero añadiendo agua, porque las partículas de la masa solo pueden retener una cantidad fija, en función de la superficie total de agua y su capacidad de absorción. Por tanto el exceso de agua separa la masa, aumentando la porosidad y perdiendo resistencia (Díaz, 2016).

Se utilizó agua simple de la red hidráulica de la Universidad Autónoma de Querétaro.

IV. METODOLOGIA.

En este capítulo se muestra una descripción de los procedimientos que se llevaron a cabo para cumplir con los objetivos que se plantearon anteriormente y obtener resultados.

La parte experimental de este proyecto se realizó en las instalaciones del laboratorio de Materiales y en el Laboratorio de Geotecnia de la Universidad Autónoma de Querétaro campus Centro Universitario.

A continuación se describen los métodos que se emplearon y pruebas aplicadas, con los materiales anteriormente descritos, para cumplir con los objetivos y obtener resultados.

Las muestras de suelos fueron llevadas al laboratorio de Materiales para realizar las pruebas correspondientes a los suelos y conocer sus características.

4.1 PRUEBA DE GRANULOMETRÍA.

La primer prueba realizada fue la de Granulometría; esta prueba se hizo a base del manual de Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales del Instituto Mexicano del Transporte. Esta prueba permite determinar la composición por tamaños de las partículas que integran los materiales, mediante su paso por una serie de mallas con aberturas determinadas.

Los materiales para realizar la prueba son un juego de mallas fabricadas con alambre de bronce o de acero inoxidable de diversos calibres, tejidos en forma de cuadrícula. Las mallas utilizadas fueron las mostradas en la siguiente tabla.

Mallas		
	Designación	Abertura Nominal (mm)
Gravas	No. 4	4.745
Arena con finos	No. 10	2
	No. 20	0.85
	No. 40	0.425
	No. 60	0.25
	No. 100	0.15
	No.200	0.05

Tabla 1. Mallas utilizadas en prueba de granulometría

4.2 PRUEBAS DE DETERMINACIÓN DE LÍMITES DE CONSISTENCIA.

Las pruebas realizadas fueron las de límite líquido por el procedimiento estándar y determinación del límite plástico; estas pruebas se hicieron a base del manual de Métodos de Muestreo y Pruebas de Materiales del Instituto Mexicano del Transporte.

Estas pruebas permiten conocer las características de plasticidad de la porción de los materiales que pasan la malla No. 40 (0.45 mm), cuyos resultados se utilizan principalmente para la identificación y clasificación de los suelos.

4.3 DETERMINACIÓN DEL LIMITE LIQUIDO POR EL PROCEDIMIENTO ESTÁNDAR.

La prueba consiste en determinar el límite líquido, es decir, el contenido de agua para el cual un suelo plástico adquiere una resistencia al corte de 2.45 kPa (25 g/cm²); éste se considera como la frontera entre los estados semilíquido y plástico.

Para determinar el límite líquido se utiliza el material cribado en forma manual por la malla No. 40 (0.45mm) y se satura. Para efectuar la prueba se utilizó la copa de Casagrande calibrada para una altura de caída de 1cm, provista de un ranurador plano.



Ilustración 6. Prueba de Límite Líquido



Ilustración 7. Realizando prueba de límite líquido.



Ilustración 8. Prueba de Límite Líquido Casagrande.

4.3. DETERMINACIÓN DEL LÍMITE PLÁSTICO.

El límite plástico o el contenido de agua para el cual un rollito se rompe en tres partes al alcanzar un diámetro de 3mm; éste se considera como la frontera entre los estados plástico y semisólido. El índice plástico se calcula como la diferencia entre los límites líquido y plástico.

Para efectuar la prueba se toma una porción de material de tamaño tal que se pueda formar una pequeña esfera de aproximadamente 12mm de diámetro, la que se moldea con los dedos para que pierda agua y se manipula sobre la palma de la mano para formar un cilindro. A continuación el cilindro se hizo girar con los dedos

de las manos sobre la placa de vidrio para reducir su diámetro hasta que se aproximadamente de 3mm en toda su longitud. Si al alcanzar un diámetro de 3mm el cilindro no se rompe en tres secciones simultáneamente, significa que su contenido de agua es superior al límite plástico.

4.4 MEDICIÓN DE FLUIDEZ (NMX-C-061-ONNCCE).

Esta prueba consiste en obtener el porcentaje que aumente el diámetro original de la base de un cono truncado formado previamente con un molde al centro de una mesa de fluidez, la medición del diámetro final se hace después de que la mesa ha sido sometida a una serie de 25 golpes por medios mecánicos.

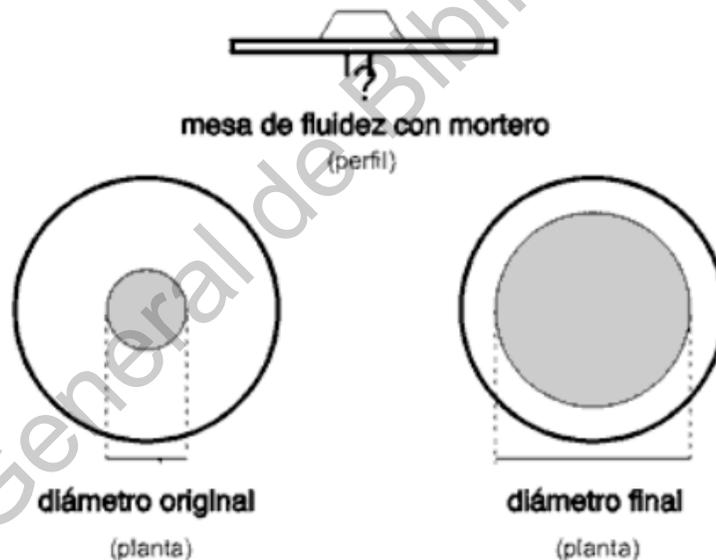


Diagrama prueba de fluidez NMX-C-061-ONNCCE.

La prueba se realizó en el laboratorio de Materiales de la Universidad Autónoma de Querétaro. Las dos muestras de suelo fueron sometidas a la prueba de fluidez para poder obtener las mezclas preliminares. Se utilizó una proporción 1:3, tomando una parte de cementante y tres de suelo recolectado, obteniendo tres mezclas para cada muestra de suelo, incluyendo en la prueba el mucílago de nopal. La cantidad

de agua de mezclado deber la que produzca una fluidez de $110 \pm 5\%$, el mezclado se hizo manualmente.



Ilustración 9. Prueba de fluidez realizada en el Laboratorio de Materiales.

4.5 MÉTODO DE EXTRACCIÓN DE MUCÍLAGO DE NOPAL.

Para obtener el mucílago de Nopal se utilizaron pencas de nopal silvestre cultivado en la ciudad de Querétaro. Se seleccionaron pencas que ya no tenían apariencia joven, aproximadamente de 30-40 centímetros de largo y que tuvieran un espesor de 1-2 cm aproximadamente, ya que las pencas maduraz son las que contienen mayor cantidad de mucílago de nopal.

Las etapas del proceso de extracción de mucílago fueron las siguientes:

Las pencas fueron seleccionadas de acuerdo a las características anteriormente seleccionadas, se cortaban alrededor de 5 a 6 pencas para trabajar.



Ilustración 10. Penca de nopal.

El lavado se realizó con agua potable previo a retirar las espinas para facilitar su manipulación.



Ilustración 11. Pulpa de Nopal.

Como siguiente paso se pelaron manualmenre con cuchillo, tratando de eliminar la menor cantidad de pulpa para retirar la corteza de la penca.

Una vez que se tiene limpia la pulpa de la penca se corta en cuadros de 1cm x 1 cm aproximadamente.



Ilustración 12. Pulpa de nopal cortada en cuadros de 1 x 1 cm

Los cuadros de pulpa se ponen a hervir en combinación con agua potable en una proporción 1:1 de por alrededor de media hora .

Esta metodología de extracción de mucílago de nopal se tomo de trabajo denominado: efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago del nopal realizado en la Universidad Politécnica de Valencia. Se hizo una revisión de la literatura encontrando este método como uno de los más recurrentes para la extracción de mucílago.



Ilustración 13. Pulpa de nopal hirviendo en combinación con agua.

Después del tiempo transcurrido de cocción se retira la pulpa de la penca de nopal y se vuelve a hervir por media hora, esto con el objetivo de reducir la mayor cantidad de agua posible mediante la evaporación. Al término de este proceso se obtuvo alrededor de un galón de mucílago de nopal.

4.6 ELABORACIÓN DE MUESTRAS (ASTM C 109).

Las muestras deben de elaborarse en moldes de cubos de ensayo de 50mm (2 pulgadas). Para realizar las mezclas primero se mezclaron los materiales secos para después integrar los líquidos y se compactan por medio movimientos vibratorios generados manualmente. Los cubos se curan un día en los moldes y luego se desmoldan.



Ilustración 14. Materiales utilizados en la elaboración de muestras.

4.7 PRUEBA DE COMPRESION.

La resistencia a compresión simple es la característica mecánica principal del concreto. El objetivo principal de la prueba consiste en determinar la máxima resistencia a la compresión de una muestra de un maezcla frente a una carga aplicada axialmente.

La resistencia a la compresión se mide tronando probetas de mezclas en una máquina de ensayos de compresión, en tanto la resistencia a la compresión se

calcula a partir de la carga de ruptura dividida entre el área de la sección que resiste la carga.

Se debe aplicar carga a la cara del espécimen que estuvo en contacto con las superficies verdaderamente planas del molde, a una velocidad moderada entre las platinas de la prensa correspondiente a una carga uniforme sobre el espécimen.

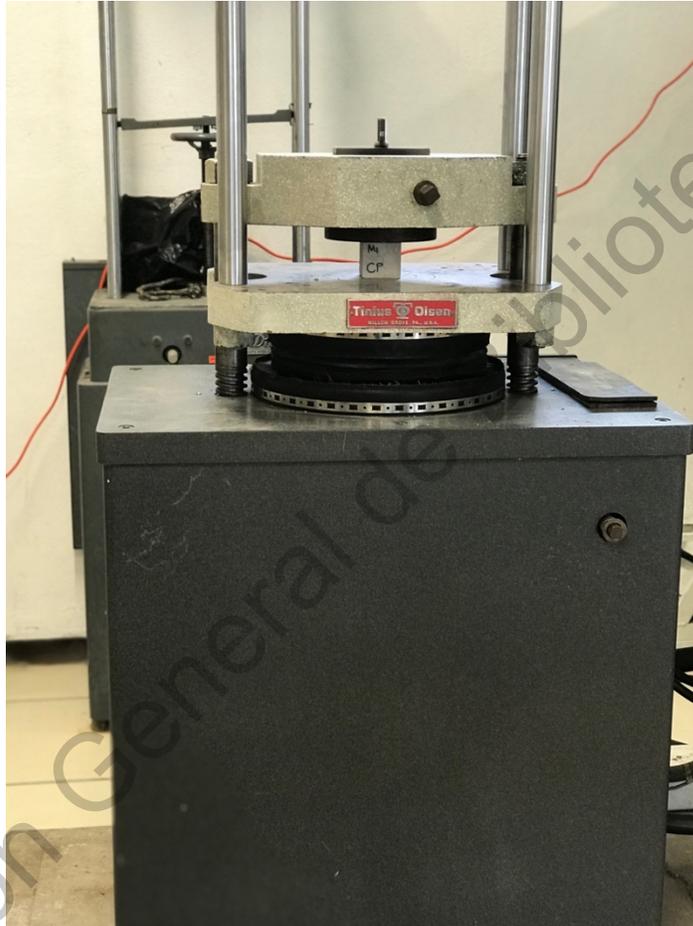


Ilustración 15. Prueba compresión.

Este ensayo provee un medio para la determinación de la resistencia a compresión del mortero y los resultados se pueden usar para determinar el cumplimiento con las especificaciones y métodos de ensayos.



Ilustración 16. Falla en muestra después de prueba a compresión.

4.8 PRUEBA DE ADHESIÓN (ASTM C 1583).

Este método de prueba determina la resistencia a la tracción de un material de reparación o recubrimiento, o un adhesivo utilizado en reparaciones, después de que el material se haya aplicado en una superficie.

Primero se preparó la superficie de concreto sobre la cual se aplicaron los cuatro morteros a manera de recubrimiento.

Mezcla	Contenido
M6Y	Caolinita, yeso y mucílago
M4	Caolinita, cal, yeso, mucílago y agua
M3C	Caolinita, cal y agua
M4 Cal	Caolinita, cal, mucílago y agua

Tabla 2. Morteros para prueba de adhesión.



Ilustración 17. Superficie de concreto sobre la cual se va aplicar el recubrimiento.

Una vez que estaba lista la superficie se aplicaron las cuatro mezclas tratando de mantener un espesor uniforme.



Ilustración 18. Aplicando las mezclas de morteros.

En las fotografías se puede apreciar que dos muestras de mortero se agrietaron al dejarlas expuestas a la intemperie 74 días, quedando descartadas para aplicar la prueba de adhesión.

Una vez que se va a realizar la prueba, se utilizó un taladro con una broca circular de una pulgada y media de diámetro para perforar las muestras que serán evaluadas. Después se fijó el disco de acero a la parte superior de la muestra de prueba usando adhesivo epóxico para anclajes estructurales de la marca SIKA.



Ilustración 20. Muestras de morteros expuestas.



Ilustración 19. Muestras expuestas a la intemperie.



Ilustración 21. Aplicación pegamento epóxico.

Ya que haya transcurrido el tiempo de curado indicado por el fabricante del pegamento epóxico, se fija el dispositivo de carga de tracción al disco de acero utilizando el dispositivo de acoplamiento como lo muestra la imagen.

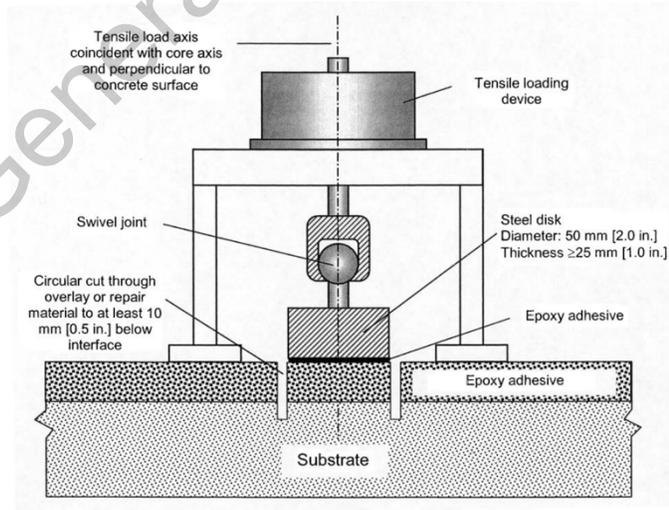


Ilustración 22. Funcionamiento prueba adhesión.



Ilustración 23. Colocando el aparato de prueba.

Una vez que esta colocado el dispositivo se aplica la carga de tracción a una velocidad constante, se debe de registrar la carga de falla y el modo de falla de cada muestra, en este caso, se probaron diez muestras por cada mortero.

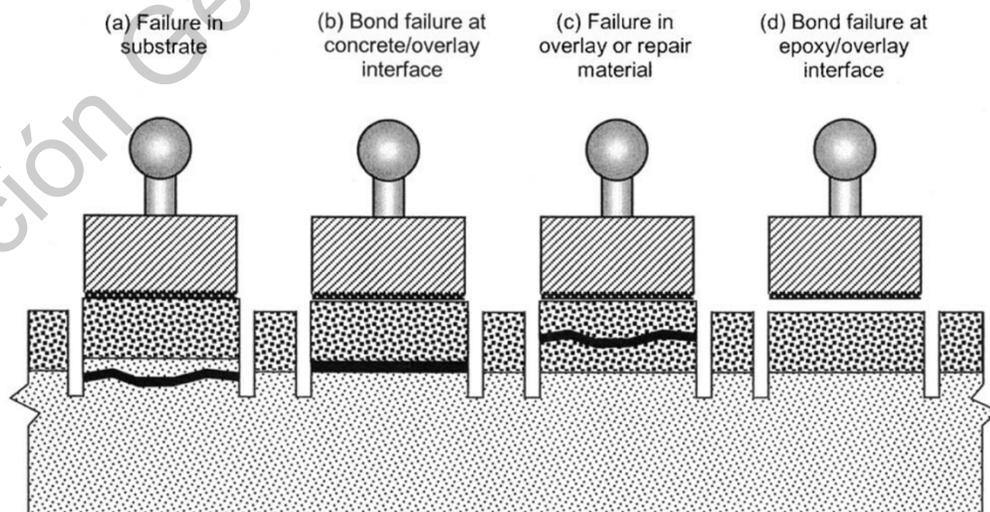


Ilustración 24. Tipos de fallas.



Ilustración 26. Falla presentada en la prueba



Ilustración 25. Falla tipo C.

En la prueba realizada se presentaron dos tipos de falla la primera fue falla en la línea de unión entre la superficie y el material de recubrimiento; la segunda falla fue en el material de recubrimiento.

V. RESULTADOS.

5.1 RESULTADOS DE PRUEBAS DE CARACTERIZACION DEL SUELO.

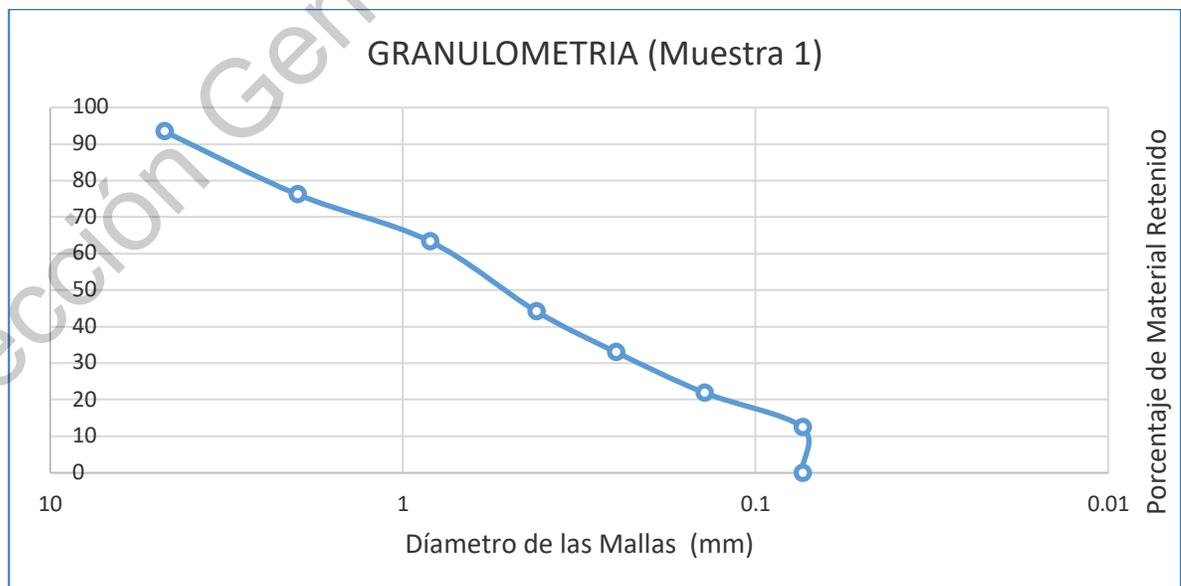
5.1.1 Prueba de Granulometría.

Los resultados de la prueba realizada a las dos muestras de suelos fueron las siguientes.

Resultados Material 1.

No. Malla	Diametro	Porcentaje
4	4.76	93.5
10	2	76.29
20	0.841	63.43
40	0.42	44.28
60	0.25	33.12
100	0.14	21.93
200	0.074	12.53

Tabla 3. Resultados de prueba de Granulometría (Muestra 1)



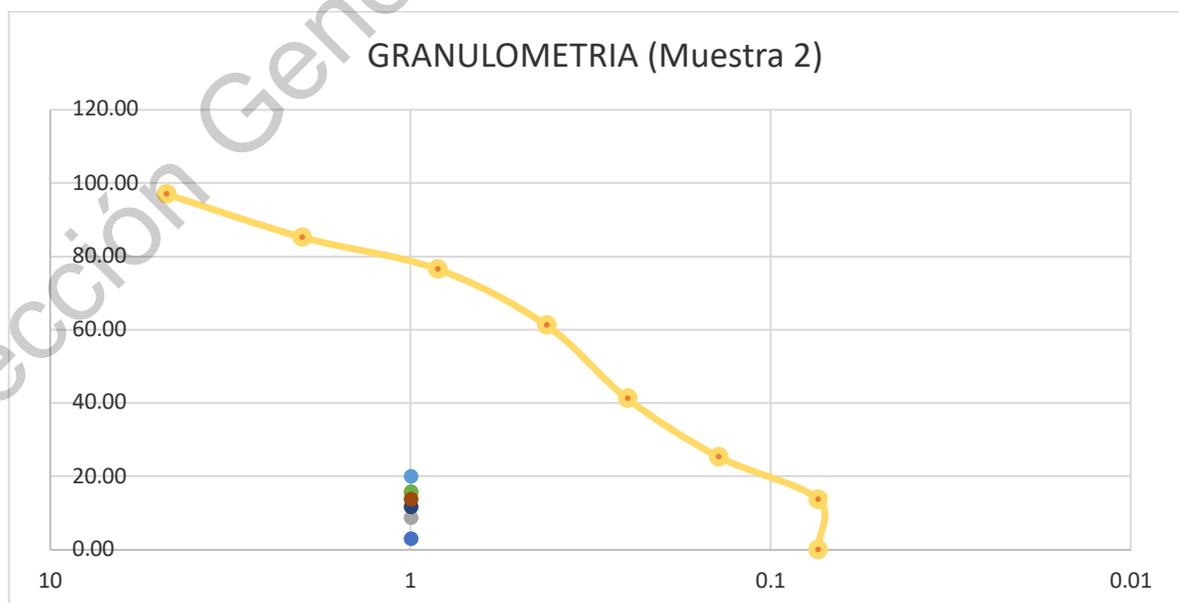
Gráfica 1. Resultados de prueba de granulometría (Muestra 1).

Lo que podemos concluir de esta prueba es que el mayor porcentaje de suelo pasó la malla no. 4 que se encuentra dentro del grupo de las gravas, seguida por la malla no. 10 que ya es un tamaño de partícula mayor.

Resultados Material 2.

No. Malla	Diametro	Porcentaje
4	4.76	96.99
10	2	85.25
20	0.841	76.53
40	0.42	61.269
60	0.25	41.23
100	0.14	25.4
200	0.074	13.77

Tabla 4. Resultados de la prueba de Granulometría (Muestra 2)



Gráfica 2. Resultados de la muestra de granulometría. (Muestra 2).

Lo que podemos concluir de esta prueba es que el mayor porcentaje de suelo pasó la malla no. 4 que se encuentra dentro del grupo de las gravas, seguida por la malla no. 10 que ya es un tamaño de partícula menor.

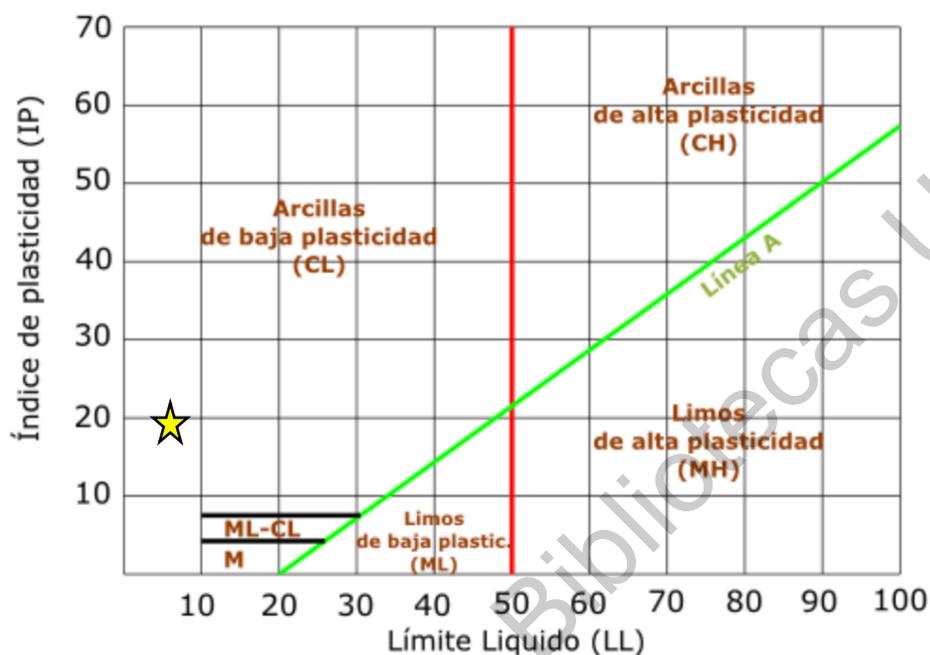
5.1.2 Prueba de Determinación del Límite Líquido por el Procedimiento Estandar.

Resultados de la prueba de Límite Líquido en Material 1.

Limite Liquido Material 1						
No. Capsula	Peso Capsula	Capsula + muestra	Capsula + muestra seca	Muestra seca	No. Golpes de copa	% Humedad
1	1.35	31.9	23.01	21.66	22	41.04
2	1.33	27.44	19.93	18.6	31	40.38
3	1.32	30.3	21.74	20.42	29	41.92
4	1.31	27.7	19.93	18.62	26	41.73
5	1.33	24.53	17.63	16.3	24	42.33

Tabla 5. Resultados de prueba de Límite Líquido (Material 1).

Gráfica de plasticidad del USCS



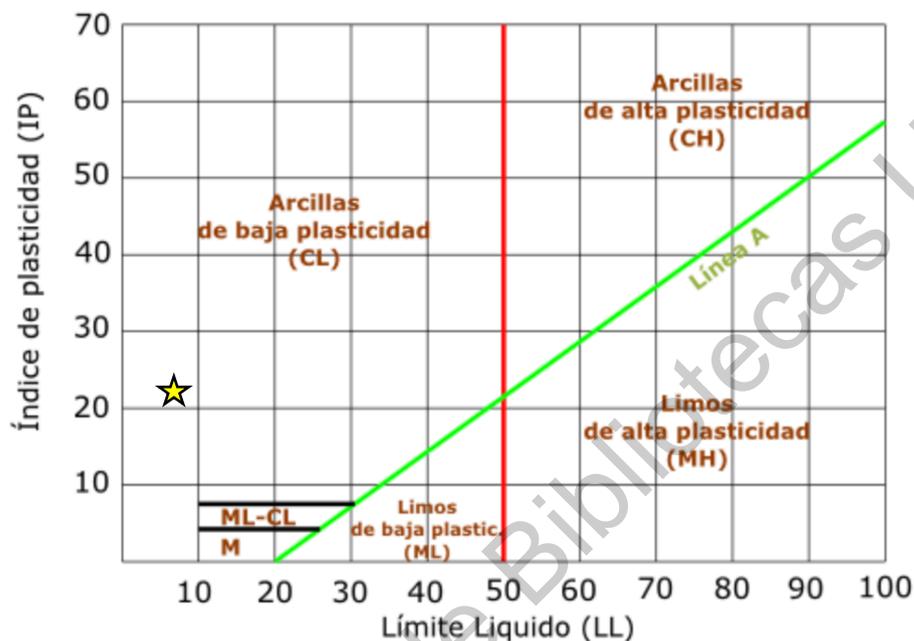
De acuerdo a la gráfica de SUCS la Muestra 1 se encuentra dentro del área perteneciente a las arcillas de baja pasticidad (CL).

Resultados de la prueba de Límite Líquido en Material 2.

Limite Liquido Material 2						
No. Capsula	Peso Capsula	Capsula + muestra	Capsula + muestra seca	Muestra seca	No. Golpes de copa	% Humedad
1	1.35	41.75	31.04	29.69	30	36.07
2	1.33	45.5	33.67	32.34	21	36.58
3	1.32	40.01	29.74	28.42	25	36.14
4	1.31	39.39	39.39	20.42	23	41.92

Tabla 6. Resultados de la prueba de Límite Líquido (Material 2)

Gráfica de plasticidad del USCS



De acuerdo a la gráfica de SUCS la Muestra 2 se encuentra dentro del área perteneciente a las arcillas de baja plasticidad (CL).

5.1.3 Prueba de Determinación del Límite Plástico.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de la prueba de límite plástico aplicada a las dos muestras de suelo por separado.

Limite Plastico						
No. Capsula	Material	Peso Capsula	Capsula + muestra	Capsula + muestra seca	Muestra seca	% Humedad
lp	1	1.32	17.97	14.92	13.6	22.43
lp	2	1.32	14.64	12	10.68	24.72

Tabla 7. Resultados de prueba de Límites Plásticos

5.2 RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESION.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos de la prueba de Resistencia a compresión de las distintas mezclas de mortero con las que se estuvo trabajando.

PORCENTAJE VOLUMETRICO DE MEZCLAS (%)									
				CEMENTANTES					
	Suelo (solana)	Caolin	Arena	Cal	Yeso	CP	Mucilago	Agua	Resistencia (Kg/cm2)
MRCP	-	-	58	-	-	19	-	23	115
MR	54	-	-	10	10	-	-	26	15
M1	54	-	-	10	10	-	13	13	24
M2	54	-	-	9	9	-	27	-	11.6
MRC	54	-	-	20	-	-	-	26	4.4
M1C	54	-	-	20	-	-	13	13	3.4
M2C	54	-	-	18	-	-	27	-	1.5
MR Y	54	-	-	-	20	-	-	26	4.12
M1Y	54	-	-	-	20	-	13	13	13.2
M2Y	54	-	-	-	18	-	27	-	7.1
M3	-	54	-	10	10	-	-	26	25.7
M4	-	60	-	10	10	-	10	10	15.8
M5	-	50	-	8	8	-	33	-	8.4
M3C	-	54	-	20	-	-	-	26	12.5
M4C	-	60	-	20	-	-	10	10	16.3
M5C	-	50	-	16	-	-	33	-	3.6
M3Y	-	54	-	-	20	-	-	26	31.7
M5Y	-	60	-	-	20	-	10	10	12.3
M6Y	-	50	-	-	16	-	33	-	24.5

Tabla 2. Resultados de los primeros ensayos a compresión.

Nomenclatura	Material
S	Suelo
C	Caolín
Y	Yeso
C	Cal
M	Mucílago de Nopal
A	Agua

Tabla 3. Nomenclatura de Mezclas.

PORCENTAJE VOLUMETRICO DE MEZCLAS (%)									
				CEMENTANTES					
	Suelo (solana)	Caolín	Arena	Cal	Yeso	CP	Mucilago	Agua	Resistencia (Kg/cm2)
MCP	-	-	58	-	-	19	-	23	115
SYCA	54	-	-	10	10	-	-	26	15
SYCM	54	-	-	9	9	-	27	-	11.6
SYCMA	54	-	-	10	10	-	13	13	24
SCA	54	-	-	20	-	-	-	26	4.4
SCM	54	-	-	18	-	-	27	-	1.5
SCMA	54	-	-	20	-	-	13	13	3.4
SYA	54	-	-	-	20	-	-	26	4.12
SYM	54	-	-	-	18	-	27	-	7.1
SYMA	54	-	-	-	20	-	13	13	13.2
CYCA	-	54	-	10	10	-	-	26	25.7
CYCM	-	50	-	8	8	-	33	-	8.4
CYCMA	-	60	-	10	10	-	10	10	15.8
CCA	-	54	-	20	-	-	-	26	12.5
CCM	-	50	-	16	-	-	33	-	3.6
CCMA	-	60	-	20	-	-	10	10	16.3
CYA	-	54	-	-	20	-	-	26	31.7
CYM	-	50	-	-	16	-	33	-	24.5
CYMA	-	60	-	-	20	-	10	10	12.3

Tabla 4. Porcentaje Volumétrico de Mezclas

Nomenclatura	Material
S	Suelo
C	Caolín
Y	Yeso
C	Cal
M	Mucílago de Nopal
A	Agua

Tabla 5. Nomenclatura de las Mezclas.

5. 2.1. Resistencia a Compresión de Mezclas con Suelo de la Solana para Tabique Rojo Recocido.

La mezcla que incluye suelo para tabique rojo recocido combinado con yeso-cal-mucilago-agua (SYCMA) presenta la mayor resistencia a compresión de este tipo de mezclas. Sin embargo, a una edad de 68 días la resistencia disminuye para tal mezcla. La mezcla con yeso-mucilago-agua (SYMA) muestra 290% más resistencia que la mezcla cal-mucilago-agua (SCMA). La mezcla con yeso-mucilago (SYM) muestra 373% más resistencia que la mezcla que contiene cal-mucilago (SCM). Comparando las mezclas que incluyen solo cal como cementante (SCA y SCM) podemos observar que las que solo tiene mucilago tienen menor resistencia. En relación a las mezclas que incluyen solo yeso como cementante (SYA y SYM) podemos observar que las que tiene mucilago muestran mayor resistencia. En contraste, para las mezclas que combinan cal y yeso como cementantes (SYCA y SYCM) no muestran alguna diferencia significativa en la resistencia.

PORCENTAJE VOLUMETRICO DE MEZCLAS (%)								
			Cementantes					
	Suelo	Arena	Cal	Yeso	CP	Mucilago	Agua	Compresión (kg/cm ²)
MCP	-	58	-	-	19	-	23	115
SYCA	54	-	10	10	-	-	26	15
SYCM	54	-	9	9	-	27	-	11.6
SYCMA	54	-	10	10	-	13	13	24
SCA	54	-	20	-	-	-	26	4.4
SCM	54	-	18	-	-	27	-	1.5
SCMA	54	-	20	-	-	13	13	3.4
SYA	54	-	-	20	-	-	26	4.12
SYM	54	-	-	18	-	27	-	7.1
SYMA	54	-	-	20	-	13	13	13.2
68 días								
SYCMA								8

Tabla 6. Resultados prueba a compresión a los 68 días en muestras de suelo.

Nomenclatura	Material
S	Suelo
C	Caolín
Y	Yeso
C	Cal
M	Mucílago de Nopal
A	Agua

Tabla 7. Nomenclatura de los materiales.

5.2.2. Resistencia a Compresión de Mezclas con Suelo Caolinitico.

La mezcla que incluye suelo caolinitico combinado con yeso-cal-mucílago-agua (CYCMA) presenta una resistencia a compresión intermedia comparado con los valores más altos y más bajos de este tipo de mezclas. La mezcla con yeso-mucílago-agua (CYMA) muestra 32 % menos resistencia que la mezcla cal-mucílago-agua (CCMA). Comparando las mezclas que incluyen solo cal como cementante (CCA y CCM) podemos observar que las que solo tiene mucílago tienen menor resistencia. En relación a las mezclas que incluyen solo yeso como cementante (CYA y CYM) podemos observar que las que tiene mucílago muestran menor resistencia. En relación, a las mezclas que combinan cal y yeso como cementantes (CYCA y CYCM) observamos que las que tiene mucílago muestran menor resistencia. En un tiempo de curado de 68 días podemos observar un aumento de resistencia del 100% para la mezcla CCMA y CYCM, en contraste para la mezcla CYM se obtuvo un decremento del 40 %.

Comparando los resultados para las mezclas con los dos tipos de suelos observamos que, a una edad de curado de 28 días, las que tienen suelo utilizado para tabique rojo recocido y mucílago tienen mayor resistencia a compresión que las que tienen suelo caolinitico (SYCMA>CYCMA, SYCM>CYCM). Sin embargo, a mayor edad de curado las mezclas con suelo caolinitico y mucílago van aumentando su resistencia

PORCENTAJE VOLUMETRICO DE MEZCLAS (%)								
	Caolin	Arena	Cementantes				Agua	Compresión (kg/cm ²)
			Cal	Yeso	CP	Mucilago		
CYCA	54	-	10	10	-	-	26	25.7
CYCM	50	-	8	8	-	33	-	8.4
CYCMA	60	-	10	10	-	10	10	15.8
CCA	54	-	20	-	-	-	26	12.5
CCM	50	-	16	-	-	33	-	3.6
CCMA	60	-	20	-	-	10	10	16.3
CYA	54	-	-	20	-	-	26	31.7
CYM	50	-	-	16	-	33	-	24.5
CYMA	60	-	-	20	-	10	10	12.3

Tabla 8. Resultados de prueba de compresión en muestras con caolín.

Nomenclatura	Material
S	Suelo
C	Caolín
Y	Yeso
C	Cal
M	Mucílago de Nopal
A	Agua

Tabla 15. Nomenclatura de los materiales.

5. 2.3. Gráficas de los Resultados de la Prueba de Resistencia a Compresión de las Diferentes Muestras.

Las siguientes gráficas muestran el compartamiento de las diferentes mezclas en la prueba de resistencia, observando cuales mezclas fueron las que presentaron mayor resistencia a la compresión.

Las proporciones de las mezclas elaboradas para realizar los ensayos fueron obtenidas de la prueba de fluidez realizada anteriormente repetando proporción de 1:3 que dicta la norma.



Gráfica 3. Resultado del ensayo del 21 de Mayo del 2019.

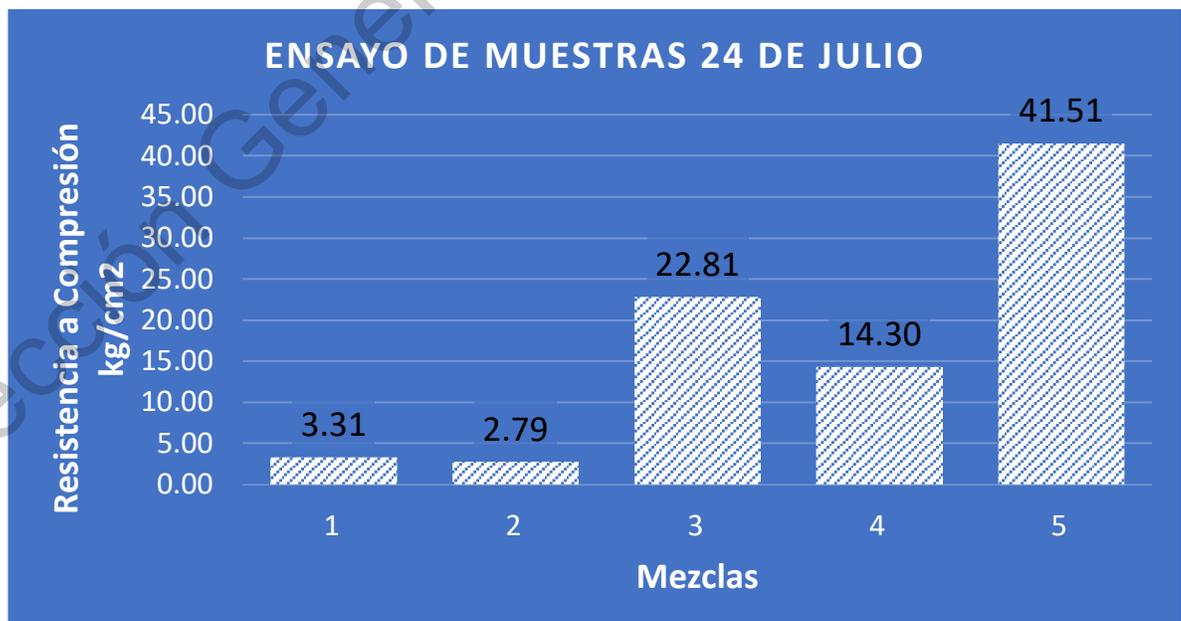
En la gráfica 3 podemos ver que la mezcla 1 que está conformada por suelo de la Solana, cal, yeso y agua; fue la que mostro una mayor resistencia a comparación de las otras dos mezclas que a su diferencia la mezcla 2 contiene una solución de agua y mucílago de nopal y la mezcla 3 carece de agua y contiene mucílago en su totalidad.

Después de realizar el primer ensayo se continuo con la elaboración de muestras pero en esta ocasión se incorporó un nuevo material que fue la caolinita para analizar su comportamiento al combinarla con cal, yeso, mucílago y agua.



Gráfica 4. Resultados del ensayo de muestras del 12 de Junio 2019.

En la gráfica 4 se entiende que la mezcla 3 es la que cuenta con mayor resistencia a compresión, ésta mezcla cuenta con caolinita, yeso, cal y agua; y la segunda con mayor resistencia a la compresión es la mezcla 2 la cual contiene suelo, cal, yeso y una solución de agua y mucílago de nopal.



Gráfica 5. Resultados del ensayo de muestras del 24 de julio del 2019.

La gráfica 5 nos muestra que la mezcla tiene una mayor resistencia en comparación de las demás mezclas, en esta ocasión la mezcla 5 está conformada por caolinita, cal, yeso y mucílago de nopal. Mientras que las mezclas 1 y 2 siendo las más bajas en este ensayo están conformadas con suelo de la solana como principal material. Con lo que podemos observar que los resultados varían en cada ensayo.



Gráfica 6. Resultados del ensayo de muestras el 27 de Agosto del 2019 (yeso).

La gráfica 6 es el resultado del ensayo realizado en Agosto del 2019, los datos de las mezclas mostradas fueron muestras realizadas con un solo cementante en esta ocasión fue yeso, dando como resultado la mezcla 4 con una mayor resistencia la cual combina caolinita, yeso y agua; la segunda con mayor resistencia es la mezcla 6 que está conformada por caolinita, yeso y mucílago de nopal. Y así es como vamos notando que las mezclas que contienen mucílago se van haciendo presentes en las mezclas con mayor resistencia a la compresión.



Gráfica 7. Resultados del ensayo de muestras el 27 de Agosto del 2019 (cal).

En la gráfica 7 se encuentran registrados los resultados de las mezclas realizadas con un solo cementante, el cual es la cal, obteniendo como resultado que la mezcla 5 es la que mostro una mayor resistencia a la compresión, ésta mezcla contiene caolinita, cal y una solución de agua con mucílago de nopal, seguida de ésta se encuentra la mezcla 4 que en la gráfica anterior se mostró como la mezcla con mayor resistencia a la compresión.

Después de obtener estos resultados se seleccionaron 5 mezclas para realizar muestras y dejarlas un mayor tiempo de curado en la cámara de temperatura constante para poder comprobar si a mayor tiempo de curado se obtienen diferentes resultados.



Gráfica 8. Resultados del ensayo de muestras el día 6 de febrero del 2020 (68 días de curado).

En la gráfica 8 se puede apreciar el comportamiento de la selección de muestras que se curaron por un periodo de 68 días, dando como resultado que la mezcla 1 fue la que mostro una mejor resistencia a la compresión; ésta mezcla esta conformada por caolinita, cal y una solución de agua y mucílago de nopal. La mezcla 2 es la que continua en cuanto a la resistencia a la compresión, pero esta ocasión se aprecia una mayor diferencia entre la mayor y la subsecuente resistencia a la compresión, teniendo en común que las dos mezclas tienen como aditivo el mucílago de nopal, pero en diferentes cantidades.

5.3 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

No se observa un efecto claro de los cementantes con el mucílago en la formación de las microestructuras, en relación al efecto del mucílago sobre el tipo de suelo se recomienda efectuar mezclas sin cementantes y con mucílago con o sin agua para comparar los efectos. El mucílago puede estar actuando como resina polimérica, sin embargo, no se obtiene una polimerización rápida por falta de promotores y catalizadores que unan cadenas poliméricas. En ese sentido el suelo solo está actuando como filler (relleno o carga).

5.4 RESULTADOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X EN MUESTRAS DE SUELOS.

El método de difracción de rayos X por la técnica de polvo, puede aplicarse a las diversas fases granulométricas del suelo (arena, limo y arcilla). Aunque todos los componentes pueden ser estudiados por difracción, se tratará especialmente lo concerniente a los minerales de arcilla.

Lo anterior es posible gracias a que los minerales son cristalinos y la distribución regular en el espacio de sus componentes se describe por medio de las redes cristalinas, que manifiestan la repetición periódica de la celda del mineral. Una celda es una unidad en forma de paralelepípedo que, repetida idénticamente, llena todo el espacio del cristal. La descripción de la celda proporciona toda la información sobre la estructura cristalina del mineral. (Morillo, 1999).

M2 – 200 Muestra de suelo Solana 2 que pasó por la malla No. 200.

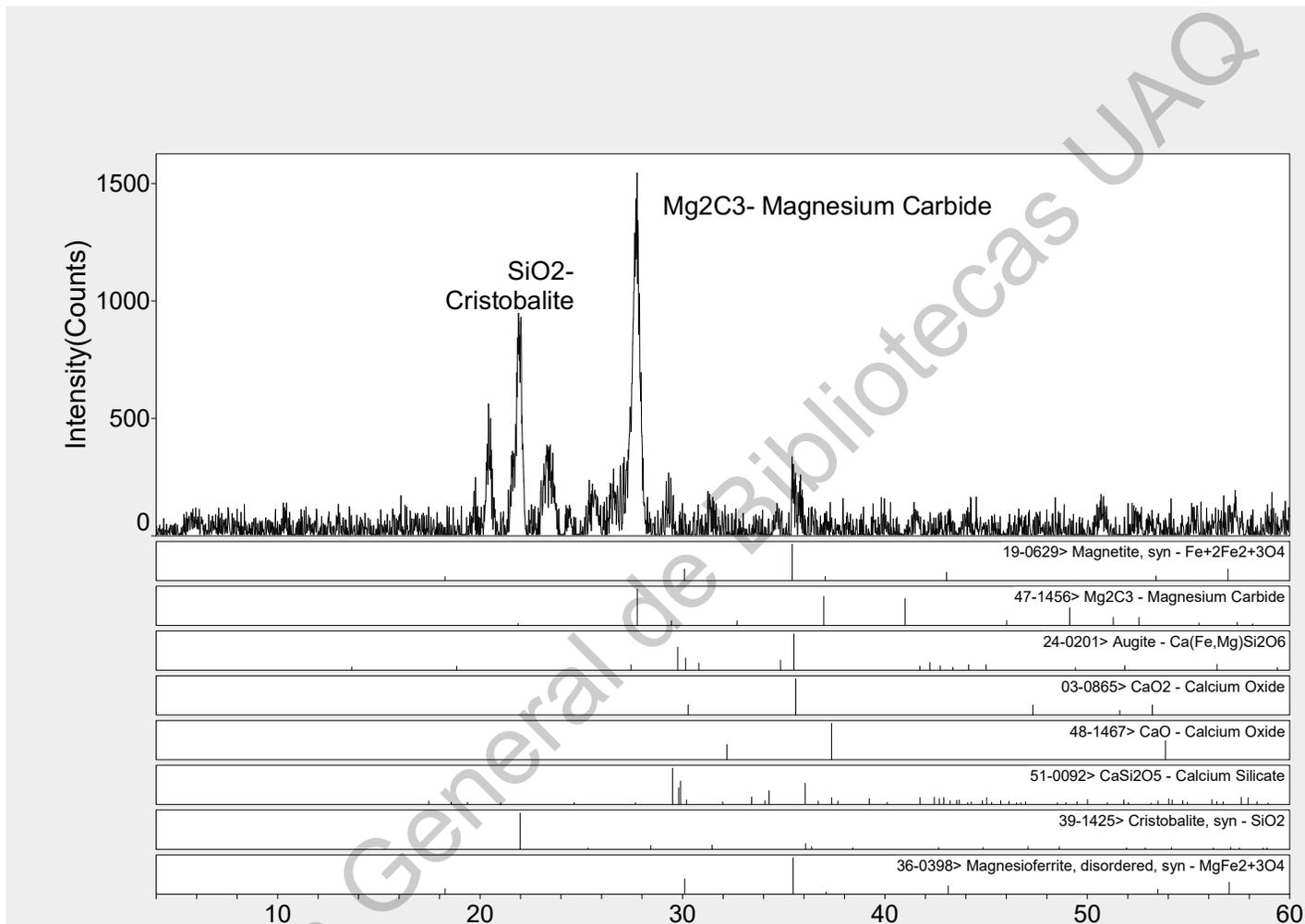


Tabla 9. Difracción de Rayos X de una muestra del Suelo 2 que pasó la malla No. 200.

M1 – 200 Muestra de suelo Solana 1 que pasó por la malla No. 200.

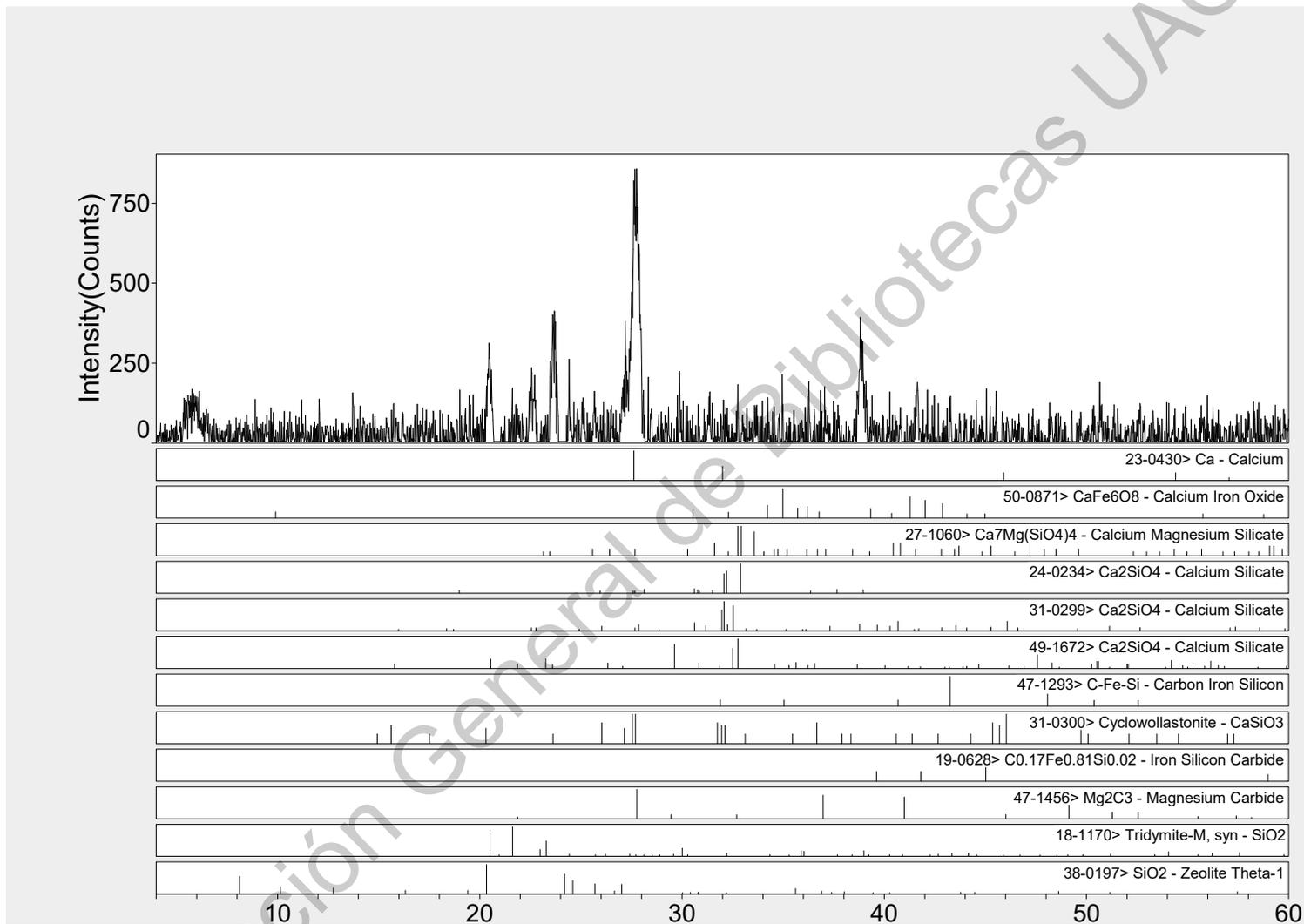


Tabla 10. Difracción de Rayos X de una muestra del Suelo 1 que pasó la malla No. 200.

ML – 1 Muestra de suelo de la Solana 1 que pasó por la malla No. 200 por método de lavado.

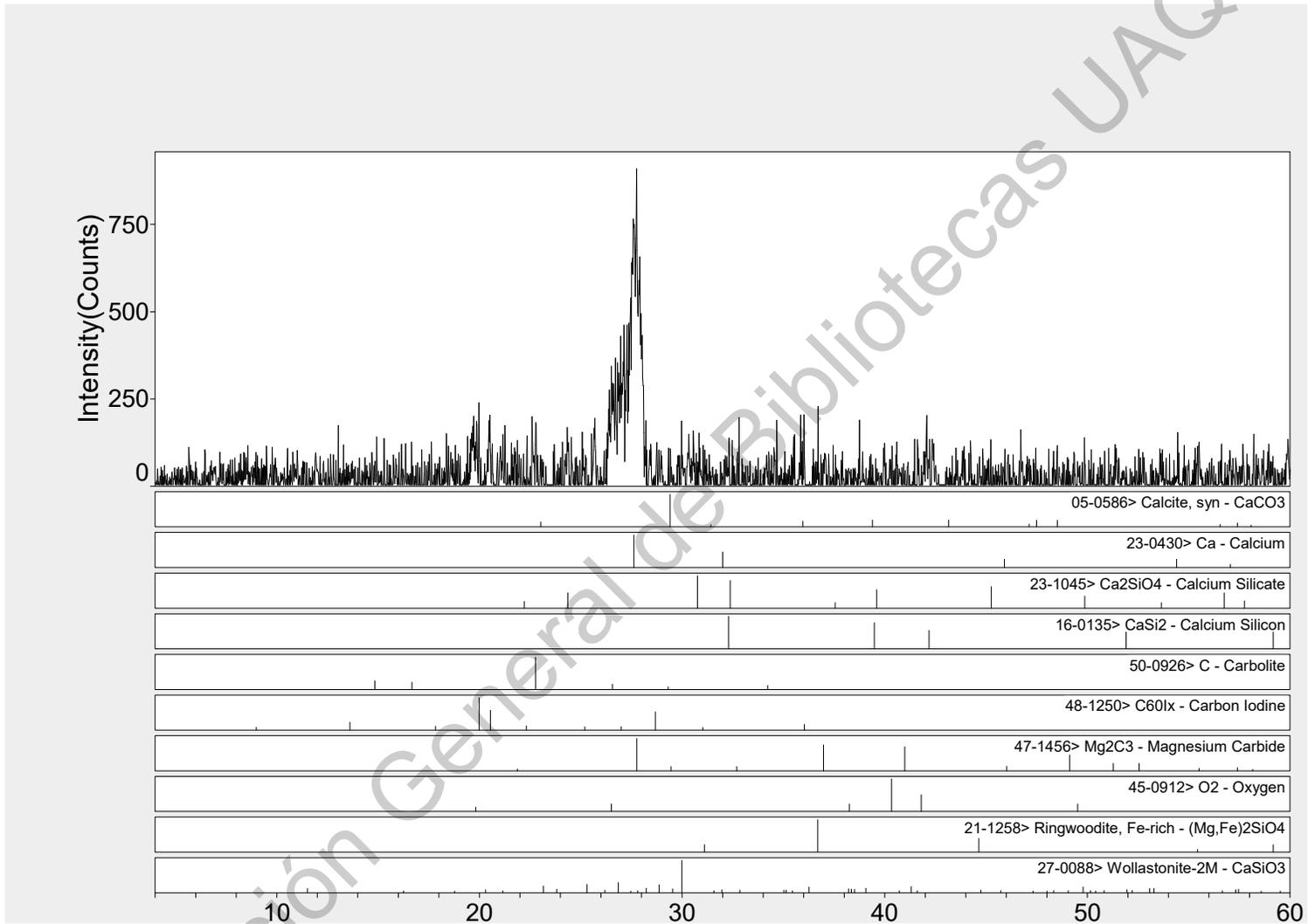


Tabla 11. Difracción de Rayos X de una muestra de suelo que se obtuvo por el método de lavado del Suelo 1.

ML - 2 Muestra de suelo de la Solana 2 que pasó por la malla No. 200 por método

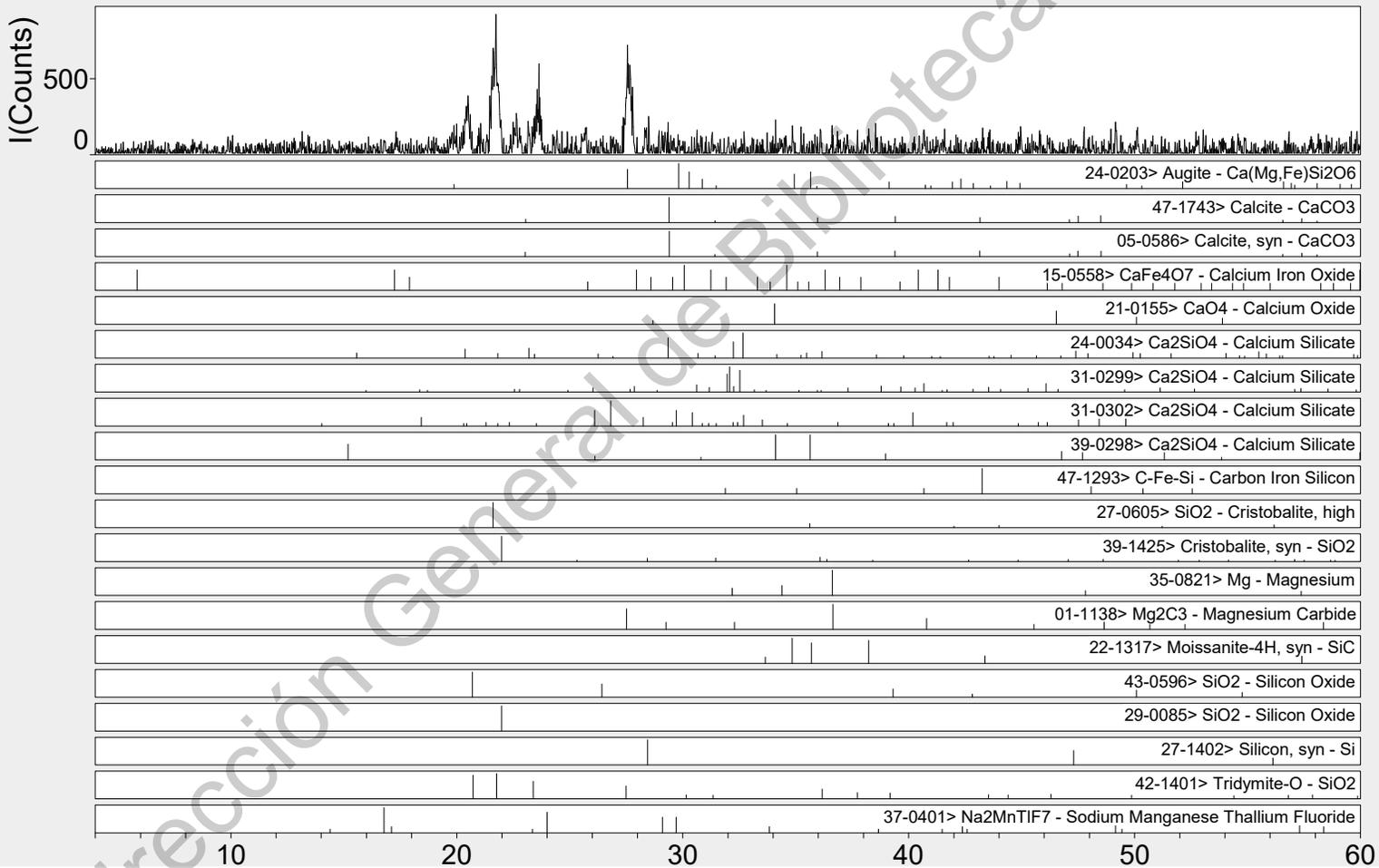


Tabla 12. Difracción de Rayos X de una muestra de suelo que se obtuvo por el método de lavado del Suelo 2.

de lavado.

MLCa Muestra de Caolinita.

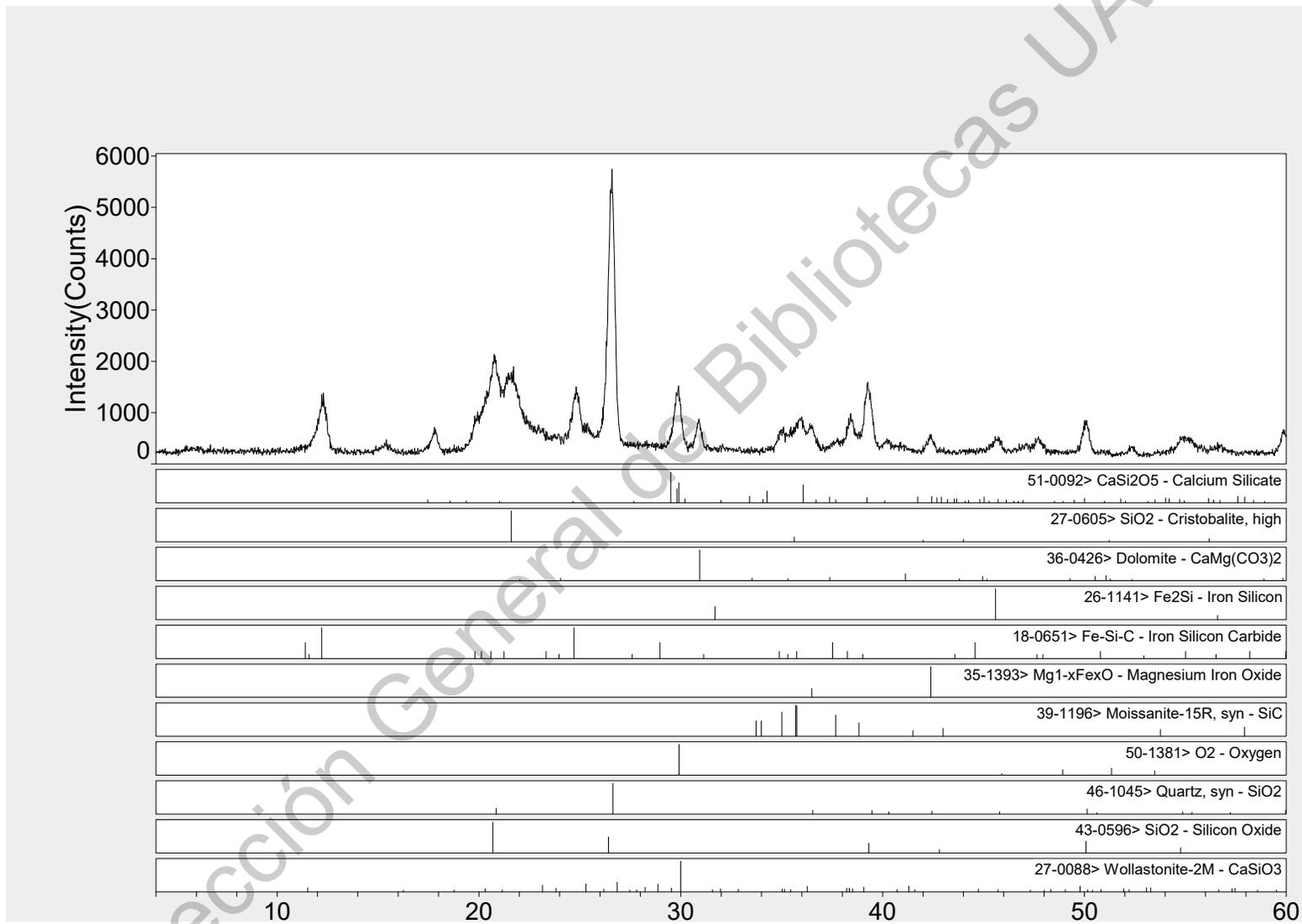


Tabla 13. Difracción de Rayos X de una muestra de caolín.

5.5 RESULTADOS DE MICROSCOPIA ELECTRONICA DE BARRIDO (SEM).

Se realizaron pruebas de microscopía electrónica de barrido a distintas muestras de suelo, cal, yeso combinados con mucílago de nopal.

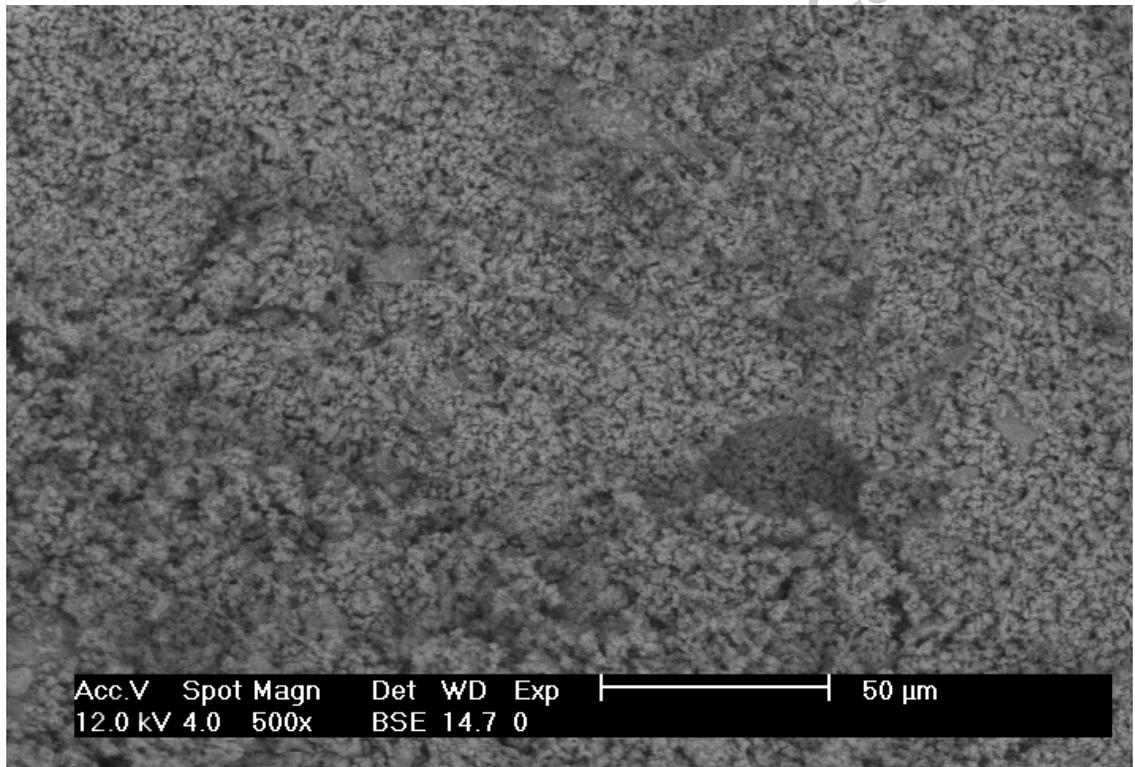


Ilustración 27. SEM de Cal con Mucílago de Nopal.

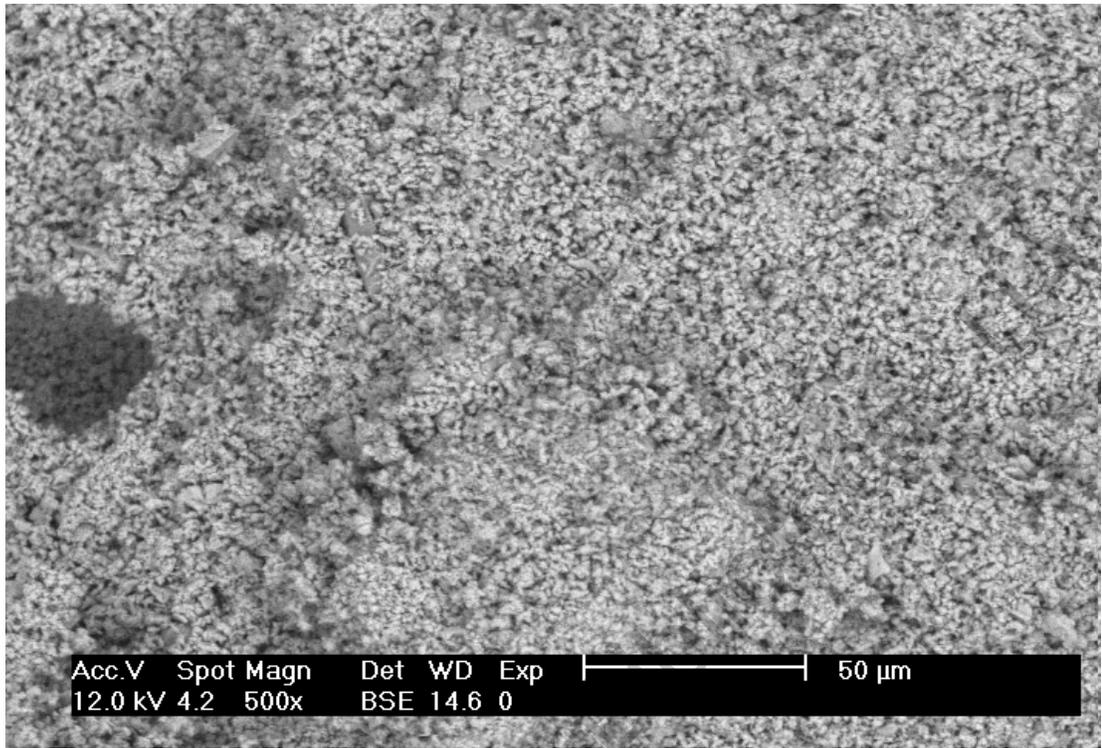


Ilustración 29. SEM de muestra de Cal con Mucílago de Nopal.

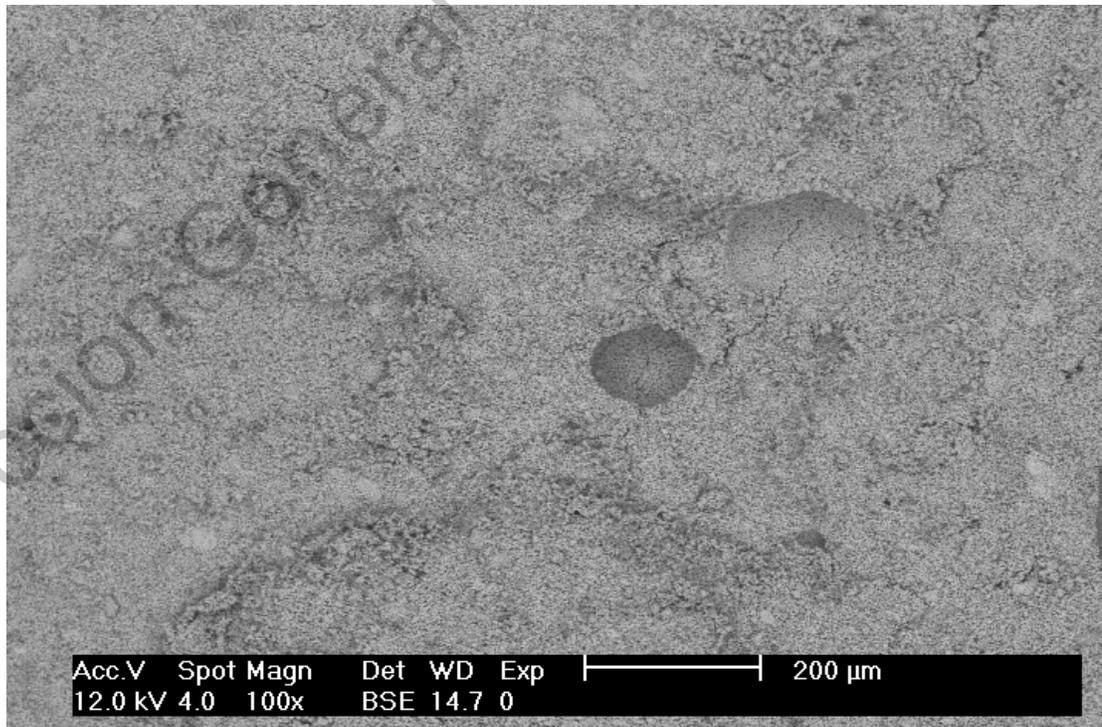


Ilustración 28. SEM de muestra de Cal con Mucílago de Nopal.

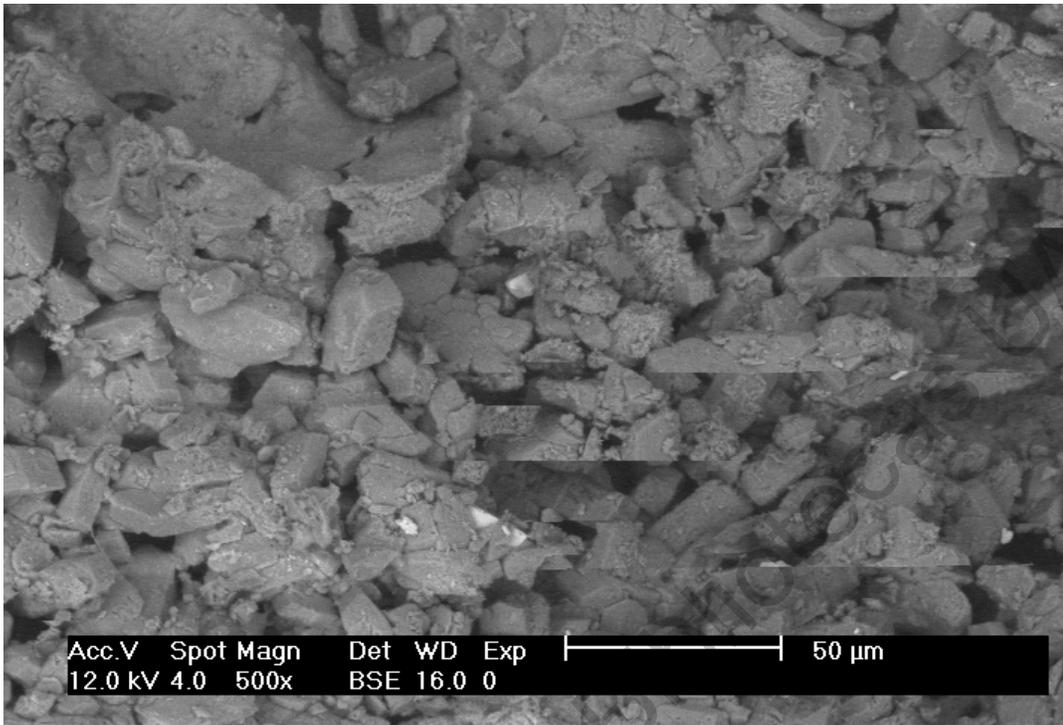


Ilustración 31. SEM de Yeso con Mucilago de Nopal.

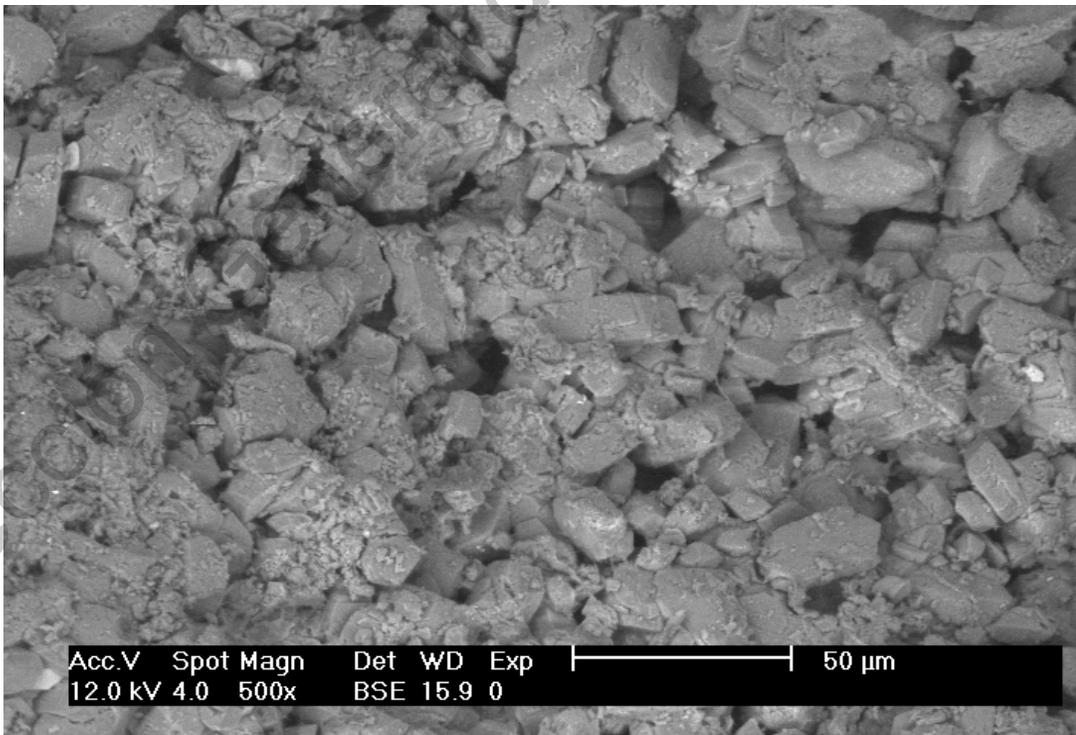


Ilustración 30. SEM de Yeso con Mucilago de Nopal.

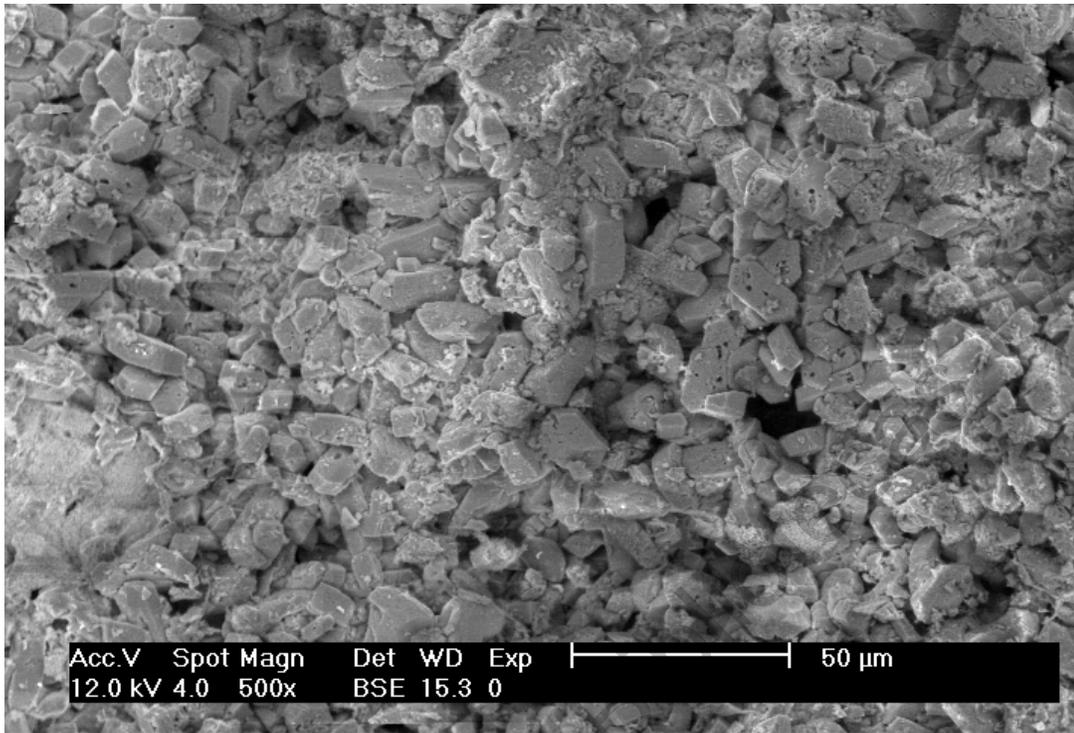


Ilustración 33. SEM de Yeso con Mucílago de Nopal.

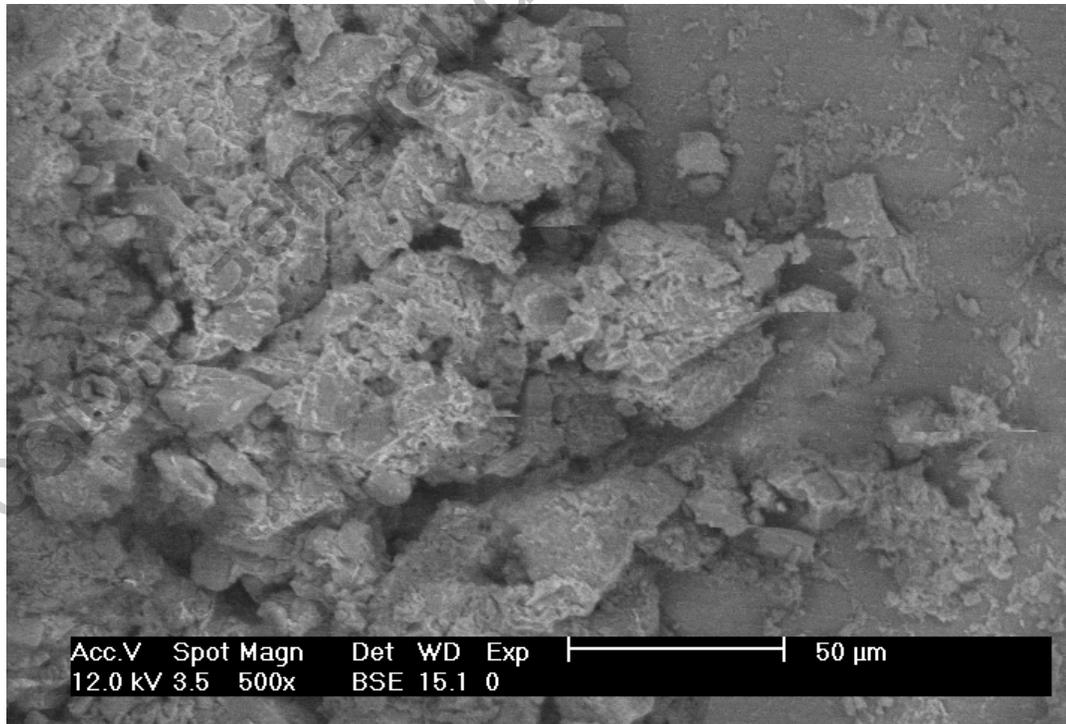


Ilustración 32. SEM de Suelo con Mucílago de Nopal.

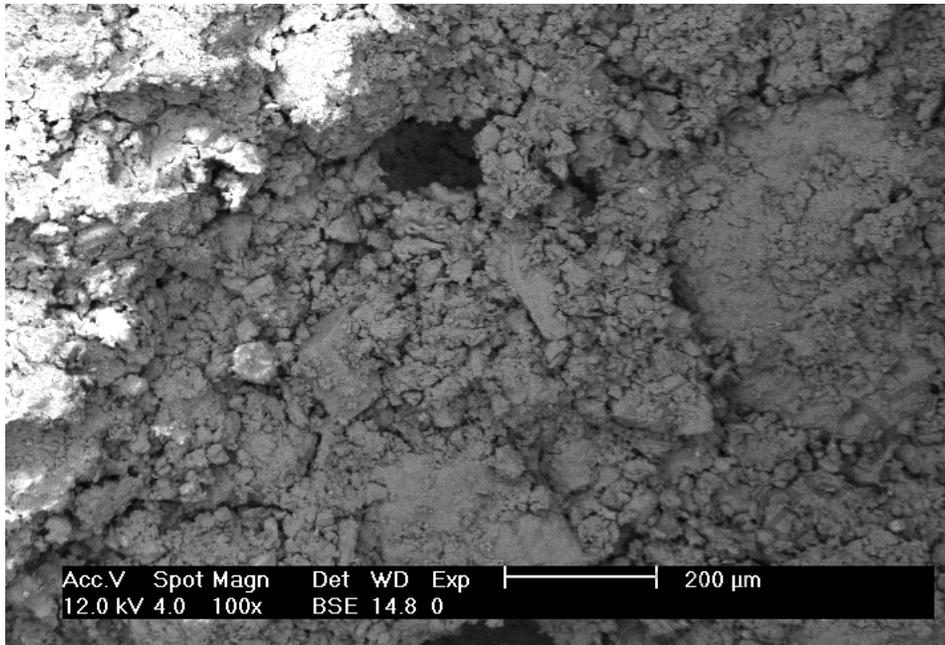


Ilustración 34. SEM de Suelo con Mucílago de Nopal.

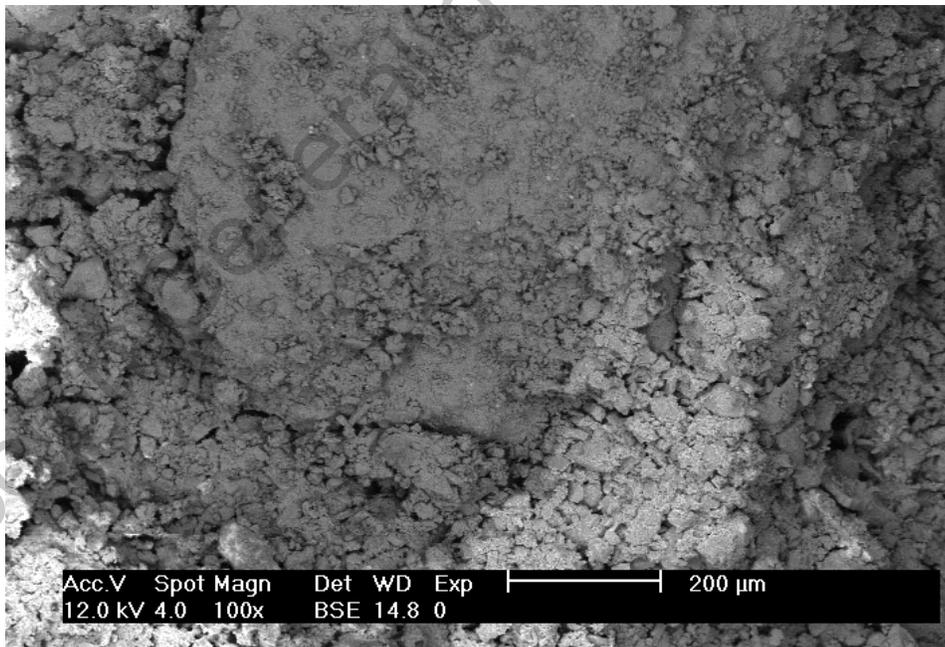


Ilustración 35. SEM de Suelo con Mucílago de Nopal.

5.6 RESULTADOS DEL ESPECTRO REALIZADO AL MUCILAGO DE NOPAL.

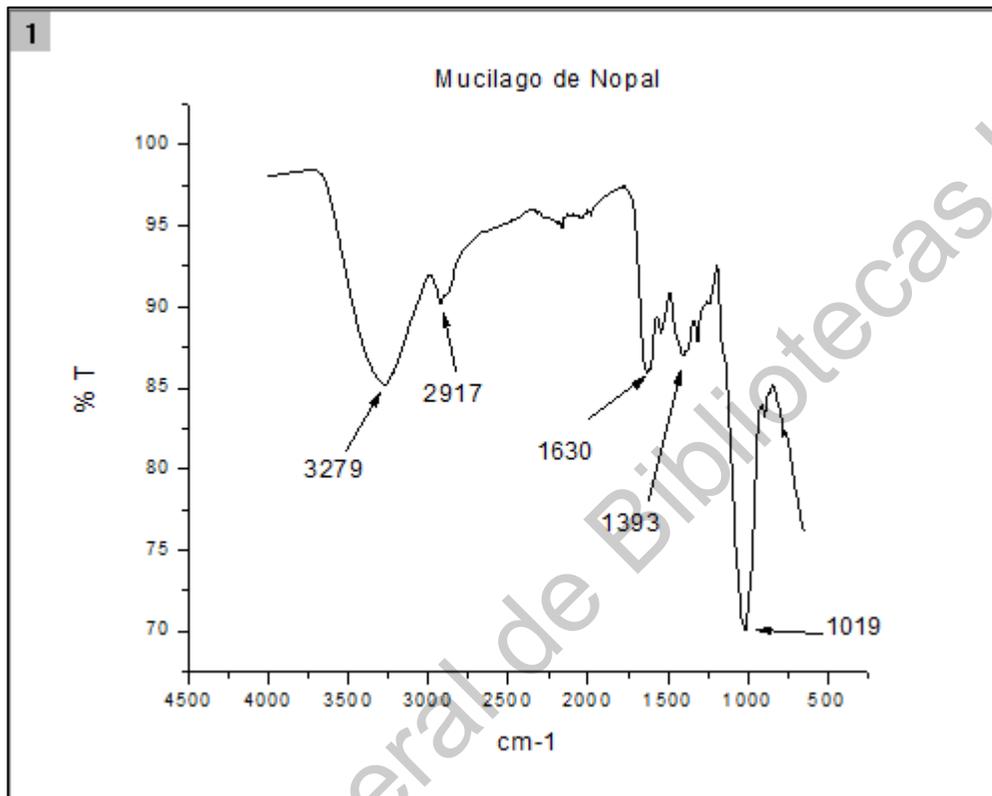


Ilustración 36. Espectro del mucílago de nopal.

El espectro de mucílago de nopal muestra las bandas de 1019 y 1393 cm^{-1} , los cuales pertenecen a estiramientos vibracionales de anillos de piranosa.

La banda 3279 cm^{-1} , indica la presencia de grupos amino y carboxilo, mientras que la banda a 2917 cm^{-1} puede ser asignada a vibraciones asimétricas de C-H.

El pico a 1578 cm^{-1} , se debe a estiramientos asimétricos en el doble enlace C=O de grupos funcionales carboxilados deprotonados

VI. CONCLUSIONES

El propósito de esta tesis ha sido demostrar como funciona del uso de mucilago de nopal como aditivo orgánico en mezclas de mortero en combinación con suelos.

Los recubrimientos en la construcción han sido utilizados para proteger los edificios y darles un acabado ya sea con el fin de proteger o de ser un elemento de decorativo de la construcción con la posibilidad de que en futuro se pueda recuperar la integridad del edificio y algunos de sus elementos ornamentales. Los morteros de cal-yeso es un recubrimiento que ha sido utilizado desde el neolítico hasta nuestros tiempos siendo modificado dependiendo la época, el origen de los materiales, sus técnicas de aplicación y usos.

En los morteros la cal ofrece propiedades mecánicas y químicas, además que es posible encontrar edificios cuyo revestimiento principal son los morteros de cal. Entre las ventajas de su uso encontramos que es un mortero de lento fraguado, trabajable, no es agresivo con el medio ambiente, etc.

En esta investigación se utilizo como aditivo el mucílago de nopal en una mezcla de mortero de cal y yeso; se analizaron diferentes proporciones de mezclas y cantidad de aditivo, lo cual nos mostro que el mucílago de nopal retarda el fraguado en la mezcla, reduce la aparición de grietas y se obtiene una mezcla trabajable.

Además de estudiar el efecto del mucílago de nopal, también se presto atención a las propiedades mecánicas que aportaron los dos tipos de suelos con los que se elaboraron los morteros. El primer tipo de suelo fue recolectado de un banco de material que se encuentra en el interior de una tabiquera y lo usan como materia prima para la elaboración de estos. Por otro lado, el segundo tipo de suelo fue un suelo caolínico, siendo un suelo muy fino y de color claro. Por lo cual se obtuvieron

resultados diferentes para cada caso de suelo y combinaciones entre cementantes y aditivo.

Los ensayos realizados nos mostraron que la resistencia a compresión de morteros a temprana edad con mucílago de nopal y combinación de yeso-cal como cementante, es mayor, a la de los morteros que solo consideran un solo cementante. Sin embargo, los morteros con suelos caoliniticos que tienen solo yeso y un 100% de mucílago mostraron mayor resistencia a la compresión. Estos resultados pueden ser producto a que la relación agua – cementante es menor con solo incluir el mucílago, además, es posible que a temprana edad no han concluido el proceso de formación de microestructuras cristalinas.

Durante la extracción del mucílago de la penca de nopal se obtuvo una mejoría al hervir dos veces más el mucílago de nopal para tratar de eliminar la mayor cantidad de agua, obteniendo un aditivo con mayor viscosidad.

Para finalizar es importante difundir este tipo de morteros y de aditivos orgánicos y dar a conocer las ventajas que tiene el uso de este tipo de técnicas y que por sus características naturales tienen un amplio campo de su aplicación.

VII.REFERENCIAS.

A. Coronado Márquez. (2009). Aditivos derivados del nopal para la modificación de las propiedades mecánicas de los morteros (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro.

A. Villaseñor, M. A. (2008). *Efecto del método de extracción en las características químicas y físicas del mucílago del nopal (Opuntia ficus-índica) y estudio de su aplicación como recubrimiento comestible* (Doctoral dissertation).

Alejandro, F. J. (2002). Historia, caracterización y restauración de morteros. *Univ. Sevilla. Insto. Universitario de Ciencias de la Construcción. Sevilla, España*, 67-70.

Aleyda Coronado Márquez. (2009). Aditivos derivados del nopal para la modificación de las propiedades mecánicas de los morteros (Tesis de Maestría). Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro.

Alvarez, J. I., Martín, A., & García Casado, P. J. (1995). Historia de los morteros. *Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 13, 52-59.

ASTM C 109.

Blanco-Varela, M. T., Aguilera, J., Martínez-Ramírez, S., Puertas, F., Palomo, A., Sabbioni, C., ... & Toumbakari, E. E. (2003). Thaumaside formation due to atmospheric SO₂-hydraulic mortar interaction. *Cement and Concrete Composites*, 25(8), 983-990.

Bores, F. (1998). Historia de la construcción: Actas del Segundo Congreso Nacional de Historia de la Construcción. *Roma: Reverte*.

Caballero Zoreda, L., Mateos Cruz, P., & Garcia de Castro Valdes, C. (2012). *Asturias entre visigodos y mozarabes:(Visigodos y omeyas, VI-Madrid, 2010)* (No. 946.0 940.1). e-libro, Corp..

Cañón Bermúdez, J. D. (2012). *Caracterización físico-química y mineralógica de morteros de cal empleados en puentes históricos de arco de ladrillo en la región del alto Cauca (Colombia)= Physical, chemical and mineralogical characterization of lime mortars used in historic bridges of brick arch in the region of the upper Cauca (Colombia)* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales).

Cárdenas, A., Arguelles, M., Goycolea, F. 1998. "On the possible role of opuntia ficus-inidica mucilage in lime mortar performance in the protection of historical buildings ". *Journal of Professional Association for Cactus Development*. Vol.5 pp. 17-29.

Cazalla Vázquez, O. (2002). Morteros de cal: aplicación en el patrimonio histórico. *Cement and Concrete Terminology – SP-19(00) / ACI (American Concrete Institute) 116R-00 (Reapproved 2005)*.

Chandra, S., Eklund, L., & Villarreal, R. R. (1998). Use of cactus in mortars and concrete. *Cement and concrete research*, 28(1), 41-51.

Cobrerros, C., Reyes-Araiza, J. L., Manzano-Ramírez, A., Nava, R., Rodríguez, M., Mondragón-Figueroa, M., ... & Rivera-Muñoz, E. M. (2015). Barley straw ash: pozzolanic activity and comparison with other natural and artificial pozzolans from Mexico. *BioResources*, 10(2), 3757-3774.

D. Sanz Arauz, (2009). *Análisis del yeso empleado en revestimientos exteriores mediante técnicas geológicas*(Doctoral dissertation, Arquitectura).

De Jesús, Á. M., Olivares Ramírez, J. M., Reyes-Araiza, J. L., Manzano-Ramirez, A., Apatiga Castro, L. M., Eleazar, U. A., ... & Arroyo Contreras, M. (2014). Tensile and Flexural Strength of Untreated Woven Henequen-Glass Fabric Reinforced Epoxy Hybrid Composites. In *Key Engineering Materials* (Vol. 600, pp. 569-575). Trans Tech Publications Ltd.

DE LOS MORTEROS, T. Y. U. CAPÍTULO 3 MORTEROS

Díaz Calderón, M. G. (2016). Aditivos orgánicos e inorgánicos en morteros de cal: revisión histórica para su aplicación en intervenciones actuales

Escandón, C. E. G., Velasco, D. V. V., López, C. M., & Agredo, J. T. (2012). Ceniza de bagazo de caña como aditivo al cemento Portland para la fabricación de elementos de construcción. *Acta Agronómica*, 61(5), 77-78.

FURBAN, B. (1975). V. FURBAN, P. BISSEGER. *Les mortiers anciens, Histoire et essai d'analyse scientifique*, 166-178.

Gárate Rojas, I. (2002). Artes de la cal. *Madrid: Ed. Munilla-Leira*.

García-Portillo, C., Bastida, J., Pardo, P., Rodríguez-López, G., Lacruz, M. J., Vilar, M. L., & Lázaro, A. (2005). Influencia de características microestructurales de caolinita en las propiedades de sus pastas de colaje. *Bol. Soc. Esp. Ceram*, 44(3), 239-244.

García, J. C. L., & Loredó, Á. J. (2019). MORTERO COMPUESTO CON MATERIAL DE CAMBIO DE FASE (PCM) PARA PANELES PREFABRICADOS LIGEROS.

Genestar, C., & Pons, C. (2003). Ancient covering plaster mortars from several convents and Islamic and Gothic palaces in Palma de Mallorca (Spain). Analytical characterisation. *Journal of Cultural Heritage*, 4(4), 291-298.

González Willianson, R. *Incidencia del material cementante (cemento-cal) en el reemplado de un mortero hidráulico* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín).

GONZALEZ, J. R. L. (2019). Caracterización y actividad puzolánica de la ceniza de corteza de bambú.

Igea, J. (2011). *Caracterización de los materiales de construcción del Mudéjar aragonés. Diseño de nuevos morteros para su aplicación en restauración* (Doctoral dissertation, Universidad de Zaragoza).

J. Alvarado, C. A. (2002). Concretos base cemento Portland reforzados con fibras naturales (Agave Lechugilla), como materiales para construcción en México (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).

J. Hernandez-Zaragoza, Caballero-Badillo, C. E., Rosas-Juarez, A., Lopez-Lara, T., Hinojosa-Torres, J., & Castano, V. M. (2007). "Modification of Portland cement mortars with cactus gum", *Chemistry & Chemical Technology*, vol. 01 no. 3, pp 175-177, 2007.

Justo, Á., & Morillo González, E. (1999). Técnicas de difracción de rayos X para la identificación cualitativa y cuantitativa de minerales de la arcilla.

Luxán, M. P., Dorrego, F., & Sotolongo, R. (2000). Investigación sobre morteros y sus tratamientos para su restauración en el Retablo del Altar mayor de la Basílica del Pilar. *Materiales de construcción*, (258), 27-36

Mattone, R. (2005). Sisal fibre reinforced soil with cement or cactus pulp in bahareque technique. *Cement and Concrete Composites*, vol.27(5), pp.611-616. May 2005.

NMX-C-486-ONNCE-2014.

Ontiveros, E. O. (2001). Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: morteros empleados en construcciones históricas. *PH: Boletín del Instituto Andaluz del Patrimonio Histórico*, 9(34), 78-89

R., R., Rajesh, M., & Thirumalini, S. . “Mechanical and physical properties of natural additive dispersed lime”. *Journal of Building Engineering*, vol. 15, pp. 70-77. 2018

Ramírez-Arellanes, S., Cano-Barrita, P. D. J., Julián-Caballero, F., & Gómez-Yañez, C. (2012). Concrete durability properties and microstructural analysis of cement pastes with nopal cactus mucilage as a natural additive. *Materiales de Construcción*, 62(307), 327-341.

Rodríguez-Rubio, P., Valero, A., & Maqueda Porras, C. (1996). Presencia de caolinita en la sierra de Huelva.

Royo Álvarez, A. (2015). El análisis de morteros históricos como herramienta de datación e interpretación de técnicas y fases constructivas.

S.Ramírez-Arellanes, Cano-Barrita, P. D. J., Julián-Caballero, F., & Gómez-Yañez, C. . “Concrete durability properties and microstructural analysis of cement pastes with nopal cactus mucilage as a natural additive”. *Materiales de Construcción*, Vol. 62 no. 307, pp. 327-341. 2012.

U. de Granada. (2007). *Alteracion Quimica* . Obtenido de <http://www.ugr.es/~agcasco/personal/restauracion/teoria/Tema09.htm>