



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ciencias (Construcción)

"Aditivos derivados del nopal para la modificación de las propiedades mecánicas de los morteros"

TESIS

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de:
Maestra en Ciencias

Presenta:

Ing. Aleyda Coronado Márquez

Dirigido por:

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza

SINODALES

Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza
Presidente

Dra. María de la Luz Pérez Rea
Secretario

Dra. Teresa López Lara
Vocal

M en C. Joaquín Noriega Montes
Suplente

M en C. Verónica Herrera Coronado
Suplente

Dr. Gilberto Herrera Ruiz
Director de la Facultad de Ingeniería

Dr. Luis Gerardo Hernández Sandoval
Director de Investigación y Posgrado

Firma
Firma
Firma
Firma
Firma

Centro Universitario
Querétaro, Qro.
Febrero de 2009
México

RESUMEN

Hoy en día es necesario el uso de nuevos aditivos que modifiquen el comportamiento de los cementantes de acuerdo al tipo de trabajo que se esté desarrollando; con lo que se puede mejorar las propiedades de las mezclas o bajar los costos de elaboración. Desde la época prehispánica fueron utilizadas mezclas de cal con mucílago de nopal para el recubrimiento de muros. Actualmente, el uso de este último como aditivo en mezclas con yeso, cal y cemento Portland, ha resultado benéfico. En esta investigación se identifican y seleccionan algunos de los componentes químicos del mucílago de nopal, usando técnicas de difracción de rayos X (Rx) y espectroscopía infrarroja (IR). Los aditivos arabinosa y xilosa se utilizaron en la elaboración de lechadas y se determinó la resistencia a compresión a tiempos de 3, 7, 14 y 28 días, para establecer el tiempo de fraguado y la consistencia de la pasta. Posteriormente, se realizaron morteros para conocer la resistencia a compresión y la fluidez de la mezcla. Con los resultados obtenidos se comprobó que la arabinosa y la xilosa son componentes del nopal que pueden ser utilizadas como aditivos. La adición en un 5% de estos componentes respecto a la masa de cemento aumenta la resistencia a compresión, mejora la fluidez y actúa como retardante en el fraguado.

Palabras clave: mucílago de nopal, cemento Portland, propiedades.

SUMMARY

The use of new additives to modify the behavior of cementing materials, according to the type of undergoing work, is a necessity in current days. This is useful for improving the properties of mixtures, as well as reducing production costs. Since pre-Hispanic times, lime and prickly pear mucilage mixtures were used as stucco for walls re-covering. Currently, the use of the latter in mixtures with lime, gypsum and Portland cement has been beneficial. In this study, some chemical components of the prickly pear mucilage were identified and selected using X-ray diffraction (Rx) and the infrared spectroscopy (IR) techniques. The additives arabinose and xylose were used in the elaboration of cement pastes and compressive strength at 3, 7, 14 and 28 days was determined to establish the hardening time and paste consistency. Later, mortar specimens were made to test the compressive strength and flow test. It was proved, with the obtained results, that arabinose and the xylose components of the prickly pear that can be used as additives. The addition of 5% of these components, with regard to the mass of cement, increases the resistance to compression, improves fluidity and works as a retardant in the hardening process.

Key words: prickly pear mucilage, Portland cement, properties.

DEDICATORIAS

A mi mamá:

Por ser mi Ángel de la Guarda, por ser para mi un ejemplo de amor, generosidad, fortaleza, esfuerzo, perseverancia, comprensión, fe y mucho más...
¡Te amo!

A mis papás, yeyos, tíos, hermano y primos:

Por estar siempre en los momentos más significativos de mi vida, por inculcar en mí el espíritu de superación y valores que he intentado convertir en virtudes.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios, por iluminar mi camino.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo brindado.

A la Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, División de Posgrado, por contribuir en mi formación profesional.

A mis Sinodales por compartir generosamente conmigo sus conocimientos, especialmente a mi Director de tesis Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza.

A la Dra. María de la Luz Pérez Rea, por su ayuda para realizar las pruebas de Difracción de Rayos X y Espectroscopía Infrarroja.

A la Coordinación de la Maestría en Ciencias (Construcción), dirigida por el M. en C. Joaquín Noriega Montes, por su apoyo.

A los laboratoristas Sr. Sergio Martínez y Sr. José Alejo por su colaboración para realizar los ensayos.

A mi compañera y amiga Ing. Elda Montes Zarazúa, por unirse a esta aventura.

Un agradecimiento muy especial, desde el fondo de mi corazón para el amigo, compañero, consejero: mi tío, M. en C. Arturo Coronado García.

Realmente agradezco a todas aquellas personas que se han cruzado en mi vida y han dejado algo trascendental en mi.

¡Gracias!

ÍNDICE GENERAL

Página

RESUMEN	I
SUMMARY	II
DEDICATORIAS	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE CUADROS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICAS	IX
I. INTRODUCCIÓN.....	1
<i>I.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....</i>	<i>1</i>
<i>I.2 ANTECEDENTES</i>	<i>2</i>
<i>I.3 HIPÓTESIS</i>	<i>3</i>
<i>I.4 OBJETIVOS</i>	<i>3</i>
<i>I.4.1 Objetivo General.....</i>	<i>3</i>
<i>I.4.2 Objetivos Específicos</i>	<i>3</i>
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
<i>II.1 NUEVOS MATERIALES</i>	<i>4</i>
<i>II.2 NOPAL</i>	<i>5</i>
<i>II.2.1 Especies de nopal.....</i>	<i>6</i>
<i>II.2.2 Producción de nopal en México.....</i>	<i>6</i>
<i>II.2.3 Usos del nopal.....</i>	<i>8</i>
<i>II.2.4 Siembra.....</i>	<i>10</i>
<i>II.2.5 Poda</i>	<i>10</i>
<i>II.2.6 Cosecha.....</i>	<i>10</i>
<i>II.3 LECHADAS</i>	<i>11</i>
<i>II.4 MORTEROS.....</i>	<i>11</i>
<i>II.5 ADITIVOS</i>	<i>12</i>
<i>II.5.1 Aditivos reductores de agua</i>	<i>13</i>
<i>II.5.2 Aditivos retardantes</i>	<i>13</i>
<i>II.5.3 Aditivos acelerantes.....</i>	<i>14</i>
<i>II.5.4 Superfluidificantes.....</i>	<i>14</i>
<i>II.6 INVESTIGACIONES NACIONALES E INTERNACIONALES</i>	<i>14</i>
<i>II.6.1 Cactáceas.....</i>	<i>15</i>
<i>II.6.2 Uso del cactus en morteros y concretos.....</i>	<i>15</i>
<i>II.6.3 Protección de edificios históricos.....</i>	<i>16</i>
<i>II.6.4 Uso del mucílago de nopal en la elaboración de morteros.....</i>	<i>17</i>
<i>II.6.5 Modificación de morteros de cemento Portland con goma de cactus.....</i>	<i>18</i>
<i>II.6.6 Uso del nopal en la industria de la construcción</i>	<i>18</i>
<i>II.6.7 Elaboración de nopal liofilizado.....</i>	<i>19</i>
<i>II.6.8 Pectinas de Opuntia spp.....</i>	<i>21</i>
<i>II.6.9 El nopal salva la ganadería</i>	<i>21</i>
<i>II.6.10 Extracción y caracterización del mucílago en Opuntia spp.....</i>	<i>22</i>
<i>II.6.11 Aprovechamiento total del nopal en cemento Portland.....</i>	<i>23</i>
<i>II.6.12 Caracterización de morteros históricos</i>	<i>24</i>

II.6.13 Cactus como aditivo de argamasas antiguas.....	24
II.6.14 Opuntia ficus indica como inhibidor de la corrosión en el acero.....	25
II.6.15 Morteros con adición de cactáceas.....	26
II.6.16 Enriquecen el concreto con nopal.....	26
II.6.17 Actualidad de las investigaciones en el uso del nopal como aditivo.....	28
III. METODOLOGÍA.....	29
III.1 MATERIALES.....	29
III.1.1 Cemento Portland.....	29
III.1.2 Polvo de nopal.....	30
III.1.3 Azúcares derivados del nopal.....	30
III.1.4 Arena.....	31
III.1.5 Agua.....	33
III.2 EQUIPO.....	33
III.2.1 Moldes para cubos.....	33
III.2.2 Máquina universal.....	34
III.2.3 Aparato de Vicat.....	35
III.3 ENSAYOS.....	36
III.3.1 Difracción de rayos X.....	36
III.3.2 Determinación de la consistencia normal.....	41
III.3.3 Prueba para determinar la fluidez en morteros de cemento hidráulico.....	42
III.3.4 Determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos.....	43
III.3.5 Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos.....	44
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
IV.1 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL NOPAL.....	46
IV.2 CONSISTENCIA DE LA PASTA MEDIANTE EL APARATO DE VICAT.....	48
IV.3 PRUEBA DE FRAGUADO INICIAL Y FRAGUADO FINAL MEDIANTE EL APARATO DE VICAT.....	50
IV.4 RESULTADOS A COMPRESIÓN EN PASTAS CON ADITIVOS DERIVADOS DEL NOPAL.....	51
IV.5 RESISTENCIA A COMPRESIÓN EN MORTEROS CON ADITIVOS DERIVADOS DEL NOPAL.....	53
IV.6 FLUIDEZ EN LOS MORTEROS CON DERIVADOS DEL NOPAL.....	55
V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	57
V.1 CONCLUSIONES.....	57
V.2 DISCUSIÓN DE CONCLUSIONES.....	58
V.3 RECOMENDACIONES.....	59
BIBLIOGRAFÍA.....	61
APÉNDICE.....	65

ÍNDICE DE CUADROS

Página

Cuadro 1 "Porcentaje de viviendas por calidad de sus materiales." (INEGI, 1950-2005)	5
Cuadro 2 "Nombres científicos y vulgares de los nopales en México." (Granados, 1996)	6
Cuadro 3 "Avances de siembras y cosechas." (SAGARPA, 2007)	7
Cuadro 4 "Resultado de los dos diferentes compuestos de cemento Portland." (Hernández, 2000)	17
Cuadro 5 "Variación estacional de los minerales en Opuntia ficus-indica." (Fuentes, 2003)	21
Cuadro 6 "Observaciones de las mezclas agua-cemento Portland-nopal" (Noriega, 2005)	23
Cuadro 7 "Granulometría de la arena"	32
Cuadro 8 "Lechadas"	49
Cuadro 9 "Fraguado inicial y fraguado final"	51
Cuadro 10 "Morteros"	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

Figura 1 "Nopal"	6
Figura 2 "Configuración de célula electroquímica." (Torres, 2007)	25
Figura 3 "Saco de cemento (50kg)"	29
Figura 4 "Arena y cemento".....	31
Figura 5 "Moldes para cubos"	34
Figura 6 "Máquina universal".....	34
Figura 7 "Aparato de Vicat"	35
Figura 8 "Método de reflexión de Bragg." (Brauns, 1961)	37
Figura 9 "Esquema de ángulo de incidencia del rayo Röntgen." (Brauns, 1961)	38
Figura 10 "(a) Esquema mostrando las partes de un difractómetro. (b) Ejemplo de difractograma de una muestra de polvo, mostrando los elementos principales del mismo. Destaca la presencia de picos de difracción que se desarrollan sobre una línea de fondo o línea base. En la horizontal se recogen valores del ángulo 2θ y en la vertical la intensidad del pico." (Pozo Rodríguez, 2004).....	39
Figura 11 "Metodología de identificación de un mineral. (a) Numeración de picos y medida de su ángulo 2θ . (b) Determinación de los espaciados y de la intensidad relativa de los diferentes picos (I/I_0). (c) Comparación de los resultados obtenidos con los espaciados e intensidades del mineral magnesita (MAG). Se observa una total coincidencia en los espaciados, pero diferencias en los valores de las intensidades. Este hecho no es infrecuente en carbonatos y sales, debido a la factibilidad con la que se desarrollan orientaciones preferentes durante la molienda de la muestra. " (Pozo, 2004).....	41
Figura 12 "Mesa de fluidez".....	43
Figura 13 "Difractograma del polvo de nopal"	46
Figura 14 "Verificación de azúcares en el nopal"	48
Figura 15 "Prueba para determinar el fraguado inicial y final"	50
Figura 16 "Probetas"	51

ÍNDICE DE GRÁFICAS

	Página
Gráfica 1 "Granulometría para arena"	32
Gráfica 2 "Consistencia de la pasta"	49
Gráfica 3 "Comparación de los esfuerzos a compresión en pastas"	52
Gráfica 4 "Comparación de esfuerzos a compresión en pastas por edad"	53
Gráfica 5 "Comparación de esfuerzos a compresión en morteros"	54
Gráfica 6 "Comparación de esfuerzos a compresión en morteros por edad"	55
Gráfica 7 "Comparación de la fluidez en morteros"	56

I. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del Problema y Justificación

En gran parte el desarrollo de la Ingeniería Civil, se ve involucrado con los procesos de transformación de materiales para implementar nuevas propuestas para el perfeccionamiento de los procedimientos constructivos. Por lo cual, es de gran importancia contribuir al impulso de nuevos materiales que ayuden a un mejoramiento y progreso en la industria de la construcción.

Hoy en día se requiere de la implementación de nuevos aditivos que modifiquen el comportamiento de los morteros de acuerdo a las necesidades requeridas para el tipo de trabajo que se esté desarrollando. Algunas de las veces el utilizar aditivos trae consigo beneficios en las propiedades de las mezclas o nos ayudan también a bajar los costos de elaboración.

La cuestión ambiental ha tenido crecientes trastornos ecológicos generados, entre otros factores, por la acumulación de desechos industriales originando que se desarrollen con urgencia investigaciones que lleven a definir la utilización de recursos renovables. Es por ello que con el tema motivo del presente trabajo se pretende contribuir de una manera directa al incremento de las cualidades de los morteros, pero siempre y cuando se cuide también el ambiente ecológico y económico para la obtención de los aditivos derivados del nopal posibles a utilizar en los procesos de construcción.

Por lo antes expuesto, es recomendable realizar las investigaciones necesarias para encontrar las sustancias químicas activas del nopal que ayuden a incrementar las propiedades de los morteros, así como también en el aspecto social contribuir con quienes se dedican a la producción de esta hortaliza, siendo que podemos encontrarla en gran parte del territorio mexicano; su consumo podría verse

incrementado, el costo se mantendría, siempre y cuando se analicen los efectos positivos y negativos que resulten de su aplicación generalizada.

1.2 Antecedentes

Se han desarrollado algunas investigaciones relacionadas ampliamente con el uso del nopal como aditivo para el mejoramiento de los morteros y concretos; algunas de ellas han sido a nivel internacional y otras solamente a nivel nacional.

“Los indígenas además de utilizar el nopal como ornamento o alimento, aprovecharon de éste la baba, para pegar adobes.” (Granados, 1997)

En la construcción, es práctica común mezclar la baba de nopal con cal viva para recubrir muros de adobes, también es usado como fijador para las pinturas a base de agua, lo cual hacía que aumentara su durabilidad.

“Se han utilizado polímeros naturales (material orgánico) para aumentar la durabilidad en los concretos y morteros. De este modo, se ha visto que el extracto de cactus originario de México en morteros con cemento Portland, incrementa la plasticidad, mejora la absorción del agua y hace que se desarrolle una mayor 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.” (Chandra, 1998)

Hernández, en 1997 dio inicio a las investigaciones sobre el uso del mucílago de nopal en la elaboración de morteros, debido a los resultados anteriores Luna (1999) recomienda el uso de morteros de yeso + arena sílice + mucílago de nopal liofilizado en la fabricación de paneles estilo tabla roca.

Las investigaciones realizadas a la fecha señalan que la adición del nopal a morteros y concretos permite mejorar las cualidades de estos materiales en los procesos de construcción, por lo que resulta factible profundizar en la investigación al respecto.

1.3 Hipótesis

La sustancia activa del nopal agregada a los morteros incrementará la resistencia a compresión, permitirá una mejor fluidez y rápido fraguado.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Determinar la sustancia activa derivada del nopal, que permita mejorar las propiedades físicas y mecánicas del mortero.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Encontrar una fluidez que nos ayude a mejorar la trabajabilidad del mortero.
- Verificar su tiempo de fraguado, indicando su fraguado inicial y final.
- Incrementar su resistencia a compresión.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

II.1 Nuevos Materiales

La construcción del entorno humano se da prácticamente en correlación con la evolución de la especie humana. Muy tempranamente, el ser que daría origen a lo que hoy somos empezó a buscar formas de dónde y cómo habitar.

Esto se debe a la práctica cognoscitiva del hombre, que va aprendiendo de la naturaleza sus leyes y empieza a aplicarlas, a ponerlas en práctica, para la construcción de su hábitat. Así, las pieles de animales, el lodo, la madera, fueron algunos de los materiales utilizados por el hombre para la construcción de su vivienda cuando aparecieron las primeras aglomeraciones humanas.

El entorno urbano del hombre, diferenciado por las viviendas, las calles, las áreas de esparcimiento, los más distintos medios de transportación de gente, energía y comunicación, ha demandado el desarrollo cada vez más acelerado de técnicas constructivas que a su vez requieren la utilización de nuevos materiales.

El surgimiento de nuevos materiales para la construcción es cada vez mayor, existe el problema de la falta de investigación para los aspectos de cimentación, pisos, muros, techos y recubrimientos, para luego convencer así a la población de que esos materiales funcionan, al igual que otros de uso común. (Sepúlveda, 2002)

Los morteros, son materiales compuestos, ya que para su elaboración se requiere de la combinación de dos o más elementos. Es aquí donde se ve la relevancia de utilizar un aditivo, que al incluirlo en la elaboración de la mezcla ayude a optimizar sus propiedades tanto físicas como mecánicas. En ocasiones los aditivos no son siempre económicos, pero su uso conlleva a bajar costos en la mano de obra necesaria en la compactación, así como también puede bajar el contenido de cemento en la mezcla.

En la actualidad el Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI, 1950-2005), cuenta con una estadística acerca del “Porcentaje de viviendas por calidad de sus materiales” en los Estados Unidos Mexicanos. Los datos correspondientes se presentan en el Cuadro 1

Cuadro 1 "Porcentaje de viviendas por calidad de sus materiales." (INEGI, 1950-2005)

Indicador	1950	1960	1970	1990 ^a	2000 ^a	2005 ^a
Porcentaje de viviendas con:						
Materiales durables en los techos ^b	ND	ND	34.2	51.7	64.2	ND
Materiales durables en los muros ^c	13.7	27.8	44.1	69.9	79.3	ND
Recubrimiento en los pisos ^d	ND	ND	58.9	80.4	86.7	89.7

NOTA: En la distribución se excluyó el rubro de No especificado.
^aLa información corresponde al total de viviendas particulares habitadas excepto los refugios y viviendas sin información de ocupantes. Para 2000 y 2005, excluye a las viviendas del personal del Servicio Exterior Mexicano y también para este último año excluye a las viviendas móviles y a los locales no construidos para habitación.
^bSe consideran materiales durables en los techos: losa de concreto, tabique, ladrillo y terrazo con viguería.
^cSe consideran materiales durables en los muros: tabique, ladrillo, block, piedra, cantera o cemento.
^dEl recubrimiento en los pisos puede ser: firme o cemento, mosaico, madera u otro.
 ND No disponible.

Del cuadro anterior se deduce que hay un considerable aumento en el porcentaje de la utilización de materiales con mayor durabilidad al transcurso de los años; dentro de estos materiales, se destacan algunos que tiene como base en su composición al cemento Portland.

II.2 Nopal

“Nopal” es el nombre común que reciben las cactáceas del género Opuntia; este género y su familia son originarios de América. (Figura 1)

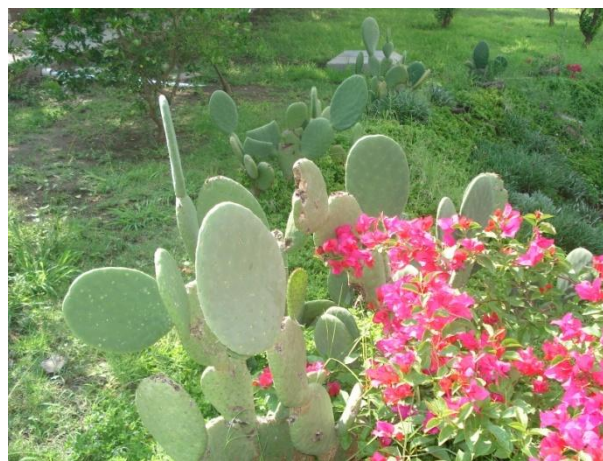


Figura 1 "Nopal"

II.2.1 Especies de nopal

Se dice que existen alrededor de 377 especies de nopales, 104 se encuentran silvestres en México, de éstas 60 son especies mexicanas. En el siguiente cuadro (Cuadro 2) se muestran algunos de los nombres científicos y vulgares de los diferentes nopales encontrados en México.

Cuadro 2 "Nombres científicos y vulgares de los nopales en México." (Granados, 1996)

Nombre científico	Nombre vulgar
Opuntia amyacleae	Nopal de alfajayucan
Opuntia ficus-indica	Nopal memelo
Opuntia robusta	Nopal tapón o bartolona
Opuntia streptacantha	Nopal cardón

II.2.2 Producción de nopal en México

La información contenida en los datos de Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (ASERCA, 2007) señala que el kilogramo de nopal en el Estado de Querétaro tiene un costo de \$8.00 según el reporte de precios diarios de hortalizas, observados en diferentes centrales de abastos.

Como se puede ver en el Cuadro 3, el “Avance de Siembras y Cosechas” que reporta la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA, 2007) nuestro país es gran productor de ésta hortaliza. Los tres principales productores son: Distrito Federal 185, 924 toneladas, Morelos 164, 345 toneladas y el Estado de México 20, 217 toneladas. Cabe destacar que la producción de nopal en el Distrito Federal, se ve incrementada porque ahí se encuentra el mayor productor, Milpa Alta.

Por su parte el Estado de Querétaro tiene una producción de 165, 000 toneladas de nopal.

Cuadro 3 "Avances de siembras y cosechas." (SAGARPA, 2007)

**RESUMEN NACIONAL POR PRODUCTO
PERENNES 2007
RIEGO+TEMPORAL**

Situación al 31 de Julio de 2007.

Nopal

Estado	Superficie (hectáreas)				Producción (toneladas)		
	Programada	Sembrada	Cosechada	Sinies-trada	Programada	Expecta-tiva	Obtenida
Aguascalientes	232	227			10,204	10,442	
Baja California	667	642	40		26,461	25,120	423
Baja California Sur	17	23			131	177	
Chihuahua		12				288	
Distrito Federal	4,337	4,337	4,337		318,274	316,671	185,924
Durango	52	85			1,250	775	
Guanajuato	160	213	201	2	3,320	3,444	2,297
Guerrero		24	10			246	48
Hidalgo	46	49	10		3,683	3,698	94

Estado	Superficie (hectáreas)				Producción (toneladas)		
	Programada	Sembrada	Cosechada	Sinies-trada	Programada	Expecta-tiva	Obtenida
Jalisco	488	495	477	1	7,439	7,474	2,999
México	760	676	612		39,396	34,427	20,217
Michoacán	301	302	174		7,537	7,583	4,461
Morelos	2,425	2,530	2,505		237,896	298,308	164,345
Nayarit	68	42			539	263	
Oaxaca	42	126	121		1,048	1,458	1,000
Puebla	113	134	6		8,172	8,647	450
Querétaro	30	30	30		356	356	165
San Luis Potosí	437	437	428		1,282	1,312	744
Sinaloa		12				48	
Sonora	84	112	53		1,075	1,003	328
Tamaulipas	590	612	226		7,331	7,433	1,808
Veracruz	61				1,772		
Zacatecas	279	397	103		19,453	8,062	1,030
TOTAL	11,189	11,517	9,333	3	696,619	737,236	386,332

II.2.3 Usos del nopal

El boletín (162) de servicios agrícolas de la FAO (por sus siglas en inglés Food and Agriculture Organization), referente a la “Utilización agroindustrial del nopal.” (Sáenz et. al., 2006) declara que son muchos los sectores industriales que se

pueden beneficiar con la explotación de los nopales, desde la industria alimentaria y sus industrias asociadas, hasta la industria de la construcción, pasando por la farmacéutica y la de los cosméticos. A continuación se mencionan una serie de sectores industriales que pueden obtener y/o beneficiarse con productos obtenidos a partir de los nopales:

- Agroindustria de alimentos y bebidas para consumo humano (producción de diversos alimentos, bebidas alcohólicas y analcohólicas de tuna y nopalitos).
- Agroindustria de alimentos para animales.
- Industria farmacéutica (protectores gástricos de extractos de mucílagos, cápsulas y tabletas de polvo de nopal).
- Industria cosmética (cremas, champú).
- Industria de suplementos alimenticios (fibras y harinas).
- Sector de la construcción.

La Comisión Coordinadora para el Desarrollo Agrícola y Ganadero del Estado de México (CODAGEM, 1982), indica que el nopal no solamente tiene importancia en los aspectos económicos, sino también en la conservación del suelo, pues protege la capa fértil de éste contra la erosión debido al tipo de sistema radicular que posee; así mismo los cladodios (tallos), retienen partículas orgánicas que mueve el aire, las cuales resbalan por su superficie tersa hasta el suelo o bien se quedan en las conjunciones de las ramificaciones, de donde el agua de lluvia las arrastra para depositarlas en el pie de las plantas, para formar así una capa de materia orgánica que aumenta constantemente de espesor y mejora la calidad del suelo.

Por lo tanto se ha constatado que el nopal puede tener aplicación en distintos tipos de industrias, su uso se ha vuelto muy variado. También se ha visto que su utilización es benévola para la conservación del suelo.

II.2.4 Siembra

La siembra se debe realizar durante la época del año en que las lluvias son nulas o escasas. En el terreno preparado, se plantan los propágulos separados por cuatro metros. Según el boletín informativo “Nopal verdura” del Instituto Nacional de Ecología (INE) se recomienda plantar en agosto, ya que es temporada de sequía.

La plantación en épocas de lluvia no se recomienda debido que al aumentar la humedad y la temperatura del suelo, se presentan condiciones favorables para el desarrollo de hongos y bacterias que penetran en las heridas que sufren las pencas durante el transporte, ocasionando pudriciones.

II.2.5 Poda

Se realizan con la finalidad de dar a la planta una buena forma para facilitar el manejo, además con las prácticas de poda se estimula la brotación de renuevos. Es aconsejable eliminar aquellos cladodios que se localizan en posición y ángulos inadecuados a la iluminación solar, que se encuentren muy juntos o en la base del tallo. (INE, 1994)

Con la poda se evita que haya demasiados cladodios, que se rebase una altura de 1.60 m para facilitar la cosecha. Los cladodios podados pueden servir como materia orgánica, que se reintegre al suelo como forraje, o para nuevas plantaciones. (Granados, 1998).

II.2.6 Cosecha

El nopal es una planta que sobrevive tan sólo con el agua de lluvia, pero cuando se somete a cultivo, es necesaria una mayor cantidad de agua, para una mayor producción.

La mayor cantidad de producción, se obtiene durante la época de mayor humedad y temperatura (mayo a septiembre). La cosecha se lleva a cabo cuando los brotes alcanzan un peso aproximado de 100 a 120 gr. o que midan de 10 a 15 cm. de largo; aunque no siempre se sigue ese patrón de cosecha, pues el tamaño puede variar. (INE, 1994)

II.3 Lechadas

A continuación se da una breve explicación acerca de la definición que manejan algunos autores.

Para el Manual Técnico de Construcción (APASCO, 2006), una lechada es una mezcla elaborada a base de aglutinantes como el cemento Portland o el cemento blanco, se obtiene una pasta que al aplicarse sobre la superficie, forma una película con propiedades ligantes y puede funcionar también como sello.

Por su parte la Norma Mexicana NMX.C-085 “Método estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulicos”, define una Pasta como la mezcla de un cementante hidráulico, normalmente presente en un polvo fino y agua.

Una lechada y una pasta pueden ser consideradas de la misma manera, pues su composición es la misma.

II.4 Morteros

El concepto de mortero, para la Norma Oficial Mexicana NMX-C-021 “Especificaciones y métodos de prueba”, nos define Mortero Portland como el material formado por un cementante hidráulico finamente pulverizado, que al agregarle agua y arena, tiene la propiedad de fraguar tanto en el aire como en el

agua y forma una masa endurecida que adquiere resistencia mecánica con el paso del tiempo hasta un punto máximo.

En la industria de la construcción se utiliza la palabra mortero para referirse a la mezcla de conglomerados inorgánicos, ya sea arena, cal, yeso, cemento Portland, y agua. De igual manera se utiliza comúnmente el término concreto, pero éste hace referencia a la mezcla de agua, cemento Portland y agregados (tanto finos como gruesos).

Desde la antigüedad el uso de morteros ha sido importante para el desarrollo de los procesos constructivos en nuestro país, los mayas hicieron uso de ellos; los morteros se utilizaban como material de liga en las mamposterías para construir muros en los edificios y para revestir cisternas, caminos, arcos y bóvedas. (Ramírez, 1999)

II.5 Aditivos

La Cement Concrete Terminology, (American Concrete Institute) ACI SP-19 define un aditivo como un material diferente del agua, de los agregados y del cemento hidráulico, que se emplea como componente del concreto o mortero agregándose a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado.

Un aditivo es una sustancia que se utiliza en pequeñas cantidades para cambiar las propiedades de otra. Se agregan a las mezclas en cantidades no mayores del 5% por masa de cemento antes o durante el mezclado.

Los aditivos pueden ser orgánicos e inorgánicos en cuanto a la composición. Los aditivos se clasifican comúnmente por su función en la mezcla, pues con frecuencia exhiben alguna acción adicional.

La norma C-494-92 de la ASTM (American Standard Test of Materials) considera siete tipos de aditivos con propósitos diferentes:

Tipo A. Aditivos reductores de agua.

Tipo B. Aditivos retardantes.

Tipo C. Aditivos acelerantes.

Tipo D. Aditivos reductores de agua y retardantes.

Tipo E. Aditivos reductores de agua y acelerantes.

Tipo F. Aditivos reductores de agua de alto rango o superfluidificantes.

Tipo G. Aditivos reductores de agua de alto rango (superfluidificantes) y retardantes.

Los aditivos pueden ser utilizados en estado sólido o líquido. El último es el que se acostumbra porque un líquido se puede dispersar más rápidamente de una manera uniforme durante el mezclado.

II.5.1 Aditivos reductores de agua

Su función es reducir el contenido de agua de la mezcla, usualmente del 5 al 10%, algunas veces hasta el 15%. El propósito de utilizar un aditivo reductor de agua en una mezcla, es permitir una reducción en la relación agua/cemento mientras se conserva la trabajabilidad deseada, o en forma alterna, mejorar su trabajabilidad a una relación dada de agua/cemento. La mezcla con éste tipo de aditivo muestra una segregación baja y buena “plasticidad”.

II.5.2 Aditivos retardantes

Se puede lograr un fraguado de la pasta de cemento con la adición de la mezcla de un aditivo retardante. Generalmente hacen lento el endurecimiento de la pasta; son útiles en la elaboración de mezclas en clima cálido. En general, prolongan el tiempo durante el cual el concreto se puede transportar, colocar y curar.

II.5.3 Aditivos acelerantes.

Su función es primordialmente acelerar el desarrollo temprano de resistencia del mortero, también pueden acelerar coincidentemente el fraguado. Este tipo de aditivos se pueden emplear cuando el colado se hace a bajas temperaturas. Otro beneficio es que permite un acabado más temprano.

El acelerante más común utilizado durante muchas décadas fue el cloruro de calcio; es un aditivo efectivo y barato, pero tiene un gran defecto favorece en alto grado a la corrosión del acero embebido en el concreto. El nitrito de calcio y el nitrato de sodio, son acelerantes posibles.

II.5.4 Superfluidificantes

Son aditivos reductores de agua, pero significa y claramente, lo son más que los del tipo A. A una relación agua/cemento y contenido de agua en la mezcla dados, la acción de dispersión de los superfluidificantes incrementa la trabajabilidad de la mezcla. Otro uso de estos aditivos es la producción de mezclas con trabajabilidad normal, pero con una resistencia extremadamente alta debido a una reducción muy considerable de la relación agua/cemento.

II.6 Investigaciones nacionales e internacionales

La inquietud por dar uso a nuevos aditivos que nos ayuden a mejorar las condiciones de los materiales utilizados en la construcción, ha llevado a algunos investigadores a buscar los beneficios del nopal (nombre común que reciben las cactáceas del género opuntia) que mejoren las propiedades físicas y mecánicas de los materiales para la construcción, específicamente para distintas mezclas.

Para llegar a los fines deseados por cada uno de los investigadores, en sus trabajos realizados desde hace varios años a la fecha, se han buscado todas las

publicaciones posibles que puedan contribuir en el desarrollo del tema: “Aditivos derivados del nopal para la modificación de las propiedades mecánicas de los morteros”.

II.6.1 Cactáceas

En estudios realizados por Toledo (1987), nos dice que las cactáceas están distribuidas desde la provincia de Alberta en Canadá, hasta la fría Patagonia, en Argentina. La mayoría se dan en suelos secos y escasamente húmedos, muchas veces en suelos pedregosos o arenosos.

Toledo (1987) en las investigaciones que desarrolla deduce que las cactáceas incluyen en sus tejidos, algunas sustancias muy peculiares, como mucílagos, ácidos orgánicos, cristales de sílice y alcaloides.

II.6.2 Uso del cactus en morteros y concretos

Chandra et. al. (1998) realizaron pruebas con solución de extracto de nopal, nombre que dio a la sustancia obtenida del nopal sin espinas, cortado en pequeños trozos y mezclado con agua, en una proporción de 1:3. La sustancia se dejó por dos días en un contenedor de plástico en un cuarto a la temperatura ambiente. Después de dos días el gel fue extraído, éste tenía consistencia pegajosa.

Los especímenes ensayados fueron de 40 x 40 x 160 mm con una mezcla de cemento-arena 1:3. La relación agua/cemento, se conservó constante a 0.50, los especímenes fueron curados por cinco días. Las pruebas fueron hechas sin extracto de nopal, con extracto de nopal al 50% y 50% de agua, por último, 100% de extracto de nopal.

Las mezclas con extracto de cactus incrementaron la plasticidad de los morteros, y sustancialmente mejoraron la resistencia a la absorción del agua, así

como la resistencia al congelamiento. También significativamente disminuyó la absorción del agua en muestras de concreto que fueron impregnadas con dicho extracto. Los efectos fueron más pronunciados con el 100% de solución de cactus que con el 50%. El hidróxido de calcio producido durante la hidratación del cemento Portland, interactúa con los componentes del extracto de cactus.

Los trabajos realizados por Chandra han sido un parte aguas para dar continuación a los estudios de morteros con la inclusión del nopal, en distintas modalidades, ya sea el aprovechamiento total del mismo o procesándolo mediante liofilización.

II.6.3 Protección de edificios históricos

Es sabido que el uso de cemento para la restauración de edificios históricos ha tenido efectos perjudiciales, porque es demasiado duro e incompatible con el adobe, no permite la transpiración e incrementa el riesgo por daños causados por la humedad.

En México, a los morteros de cal se les adiciona jugo de nopal para restaurar y proteger edificios históricos, para mejorar la penetración del agua y el agrietamiento; por ello Cárdenas et. al. (1998) utilizaron el mucílago de nopal en morteros de cal. Las pastas fueron preparadas con diferentes proporciones de mucílago (1%, 2%, 3%), la cal se conservó constante.

Los efectos presentados en las propiedades mecánicas de los morteros, muestran un incremento en los esfuerzos mecánicos.

Las investigaciones realizadas por Cárdenas, sólo reafirman de manera científica, lo que nuestros antepasados empíricamente habían realizado con el uso del nopal para el recubrimiento de muros.

II.6.4 Uso del mucílago de nopal en la elaboración de morteros

Para dar continuación a lo que de manera internacional se había demostrado. A nivel nacional y más específicamente en nuestra Facultad de Ingeniería, estudios realizados por Luna (1999) se enfocaron a la investigación dando uso al mucílago de nopal (comúnmente conocido como “baba de nopal”) liofilizado como aditivo en diferentes morteros. La liofilización se refiere al procedimiento de deshidratación del nopal. Las mezclas ensayadas han sido:

Cal + Arena Sílice + Mucílago de nopal

Yeso + Arena Sílice + Mucílago de nopal

Cemento Portland + Arena Sílice + Mucílago de nopal

En el Cuadro 4 se resumen los esfuerzos resistidos a la compresión por los cilindros de las mezclas de Cemento Portland + Arena Sílice + Mucílago de nopal y sin éste. Se tiene que las mezclas con el aditivo obtuvieron mejores resultados.

Cuadro 4 "Resultado de los dos diferentes compuestos de cemento Portland." (Hernández, 2000)

Mezcla	Esfuerzo a compresión (kg/cm ²)		
	3 días	7 días	28 días
1 sin mucílago	117.55	145.85	199.02
2 con mucílago	123.69	183.07	227.80

Estos morteros obtuvieron una mejor trabajabilidad, mayor resistencia y un potencial hidrógeno (pH) alcalino. (Hernández, 2000)

Son varias las mezclas que se han realizado para ver el comportamiento del nopal como aditivo, utilizando diversos cementantes.

II.6.5 Modificación de morteros de cemento Portland con goma de cactus

En el desarrollo de la modificación de morteros de cemento Portland con goma de cactus, se utilizó el mucílago de nopal liofilizado, las mezclas fueron hechas variando la cantidad de mucílago, se utilizó cemento de la marca Tolteca. Las pruebas se hicieron a 3, 7, 28 días

Hay al menos tres formas de extraer la goma de las hojas: Mucílago diluido en agua 10.6% de concentración. Primero se cortan o pelan las pencas y después se pelan para posteriormente extraer el mucílago dejando macerar las pencas en agua. Durante tres días. (Hernández et. al, 2000)

Mucílago concentrado, una vez que se han cortado las pencas del nopal, se pelan, cortando primeramente la orilla y después los lados de la penca, desprendiendo toda la estructura ósea de éste para evitar el vagazo, se troza en pedazos de no más de 10 x 10 cm y se trituran con un pisón en un recipiente de metal. Ya que se encuentra en un estado de machaca, se licúa y se cuela a través de varios tamices, obteniendo de esta forma el mucílago.

Mucílago liofilizado. Se realiza extrayendo el mucílago de nopal por cualquiera de los métodos anteriores y posteriormente se lleva a un proceso de desecación.

En estas pruebas los resultados demostraron un positivo incremento en el esfuerzo a compresión. Las mezclas resultaron con mejor trabajabilidad.

II.6.6 Uso del nopal en la industria de la construcción

Por ser el nopal una planta de gran abundancia en México, por ser renovable, de bajo costo y de sencilla producción se recomienda su uso en la fabricación de morteros o concretos con yeso o cemento Portland.

Se recomienda hacer uso del mortero yeso + arena sílice + mucílago de nopal liofilizado en la fabricación de paneles estilo tabla roca, ya que su alta resistencia, bajo costo y su uso modular permitirá hacer construcciones más durables y rápidas. (Hernández, 2003)

De acuerdo con los resultados obtenidos por Hernández, se puede decir que el uso del nopal puede tener aplicación en la industria de la construcción para innovar con materiales que proporcionen mejores propiedades mecánicas y que si se desarrolla un análisis económico podría deducirse un decremento en los costos.

II.6.7 Elaboración de nopal liofilizado

Al estar trabajando con el nopal liofilizado, no podemos dejar de lado este importante proceso. Por lo tanto tenemos que la deshidratación por liofilización es una buena alternativa para la mejor conservación y el almacenamiento del nopal, por mayor tiempo.

Los productos desecados bajo esta técnica son sumamente estables y pueden ser almacenados a temperatura ambiente por periodos prolongados, manteniendo la integridad de sus propiedades organolépticas, biológicas y nutricionales. (Larios et. al., 2003)

La metodología a seguir para la liofilización del nopal, según Larios consiste en lo siguiente:

- Selección del nopal fresco.
- Nopal fresco, desespinado, ribeteado y lavado.
- Cocimiento a ebullición en agua por 30 minutos y desbabado.
- Rebanado y acomodo en charolas.
- Congelado a -40°C por 24 horas y acomodo en cámara del liofilizador a -40°C .

- Cerrado y aplicación de vacío (>100 Pascales).
- Liofilizado entre 20 y 40 °C por 24 horas.
- Despresurizado y envasado a vacío en bolsa con película protectora.
- Etiquetado, embalaje y venta.

En los trabajos realizados por Luna (1999) y Hernández (2000). Se tiene que para la liofilización del nopal, se usaron diez piezas de éste, las cuales fueron limpiadas, dejando sólo el corazón de éstas; el peso de las diez piezas fue de 4.24 kg, se licuó todo el producto y se obtuvieron 1391.85 gr de mucílago, al poner el material en la liofilizadora se obtiene solamente 8.384 gr de polvo de nopal.

II.6.8 Determinación de minerales en el nopal forrajero

Por otra parte, es de suma importancia el conocimiento de la composición química de las cactáceas, la cual varía de acuerdo a la composición química del suelo. Sus principales componentes son calcio y potasio.

En estudios realizados en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ha analizado al nopal para la determinación de sus minerales. Las pruebas fueron realizadas con diversas muestras de nopal, cosechado en cada una de las estaciones del año, fue deshidratado, molido y homogeneizado en una mezcladora horizontal. La concentración de los minerales, calcio (Ca), sodio (Na), potasio (K) y magnesio (Mg), fue determinada por medio de espectrofotometría de absorción atómica. (Ver Cuadro 5) Por otra parte, la identificación de fósforo (P) se llevó a cabo utilizando un colorímetro. (Fuentes, 2003)

Los resultados de dichas pruebas se muestran en el Cuadro 5

Cuadro 5 "Variación estacional de los minerales en Opuntia ficus-indica." (Fuentes, 2003)

Mineral	Otoño	Invierno	Primavera	Verano
Ca %	2.6800	4.1800	4.1033	3.5400
Na %	0.5267	0.5030	0.8167	0.5800
K %	4.0433	5.7700	5.7367	6.6233
Mg %	0.6700	0.7867	0.7433	0.6567
P %	0.3037	0.1591	0.1021	0.0896

II.6.8 Pectinas de Opuntia spp.

Las pectinas son una mezcla de polímeros ácidos y neutros muy ramificados. Constituyen el 30% del peso seco de la pared celular primaria de células vegetales. En presencia de agua forman geles.†

Genéricamente el término pectina designa a la familia de polisacáridos estructurales constituyentes de la pared celular primaria de tejidos vegetales. Las pectinas tienen excelentes propiedades de gelificación, Goycolea et. al. (2003) aisló en la forma sódica a partir de pencas frescas de nopal (*Opuntia ficus indica*) mediante un proceso de extracción en medio alcalino con un rendimiento de 0.6% del peso fresco, obtuvo que la composición del extracto de pectina fue de ácidos urónicos 56%, galactosa 6.5%, arabinosa 5.6% y cantidades mínimas de raminosa y xilosa.

II.6.9 El nopal salva la ganadería

El nopal salva a la ganadería, Cerda (2004), publicó que el nopal es empleado como forraje para el ganado vacuno en innumerables ranchos de México. Por tal motivo la FAO (Organismo de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) envió a un grupo de mexicanos a África a principios del 2000, para que enseñaran a los ganaderos de aquél país las bondades del nopal como forraje.

† Definición tomada de la Enciclopedia Británica.

Para que el ganado pueda comer el nopal, hay que deshacerse de las espinas de éste, por medio de quemadores de gas, gasolina blanca o queroseno. (Cerde, 2004)

Cerde (2004), también relata que Opuntia es utilizada en África para detener la erosión del suelo. El éxito de las cactáceas en las tierras desérticas se debe a sus raíces extensas y someras (sólo penetran hasta 20 cm de profundidad, pero se pueden extender varios metros alrededor de la planta). Cuando llueve las raíces desarrollan velozmente vellos absorbentes para captar con facilidad el agua y almacenarla en las pencas de gruesa piel, para impedir la evaporación al cesar las lluvias.

II.6.10 Extracción y caracterización del mucílago en Opuntia spp.

El mucílago de nopal es un ingrediente interesante en la industria alimenticia por sus propiedades viscosas. Las condiciones para la extracción del mucílago se hicieron a una temperatura de 40 ± 2 y 16 ± 2 °C y en un tiempo de 6, 8 y 16 horas, en los estudios realizados por Sepúlveda et. al. (2007). El mucílago seco tiene en promedio 5.6% de humedad, 7.3% de proteínas, 37.3% de cenizas, 1.14% nitrógeno, 9.86% de calcio y 1.55% de potasio. (Sepúlveda et. al, 2007)

Haciendo una revisión en la literatura se ha encontrado que el mucílago o baba de nopal es un polisacárido complejo compuesto principalmente por arabinosa y xilosa. (Medina et. al., 2000)

Por su parte Arizmendi et al (2008) afirman que la composición del nopal es aproximadamente de 47% de arabinosa, 23 % de xilosa, 18% de galactosa, 7% raminosa y 5% de ácido galacturónico, respecto a su peso molecular.

II.6.11 Aprovechamiento total del nopal en cemento Portland

En los últimos años se utilizaron polvos de nopal que fueron producto de la deshidratación de la penca de nopal, los cuales se agregaron al concreto hidráulico a la hora de su elaboración, y lo que se observó fue que se aumentaba la resistencia a la compresión, mejoraba la manejabilidad y que sirve también como acelerante del concreto hidráulico. (Noriega, 2005)

La máxima resistencia a la compresión se encuentra cuando se adiciona el 0.35% en la relación polvo de nopal y cemento Portland, con este mismo porcentaje funciona como un fluidificante. (Noriega, 2005)

Las observaciones de las mezclas agua-cemento Portland-nopal se indican en el Cuadro 6 donde claramente nos damos cuenta que entre más polvo de nopal se adiciona en las mezclas, mayor es su fluidez.

Cuadro 6 "Observaciones de las mezclas agua-cemento Portland-nopal" (Noriega, 2005)

Mezcla	Cemento (gr)	Agua (ml)	Polvo de nopal (gr)	Observaciones
1	2000	800	0	Se observó una mezcla sólida y se requiere de un buen vibrado, para su acomodo en el molde.
2	2000	800	5	Se notó la presencia de sangrado en los moldes y se obtiene una mejor manejabilidad en la mezcla.
3	2000	800	10	La reacción provocó burbujas de aire y en el molde se observó sangrado de agua.
4	2000	800	15	Se observó mucho sangrado de agua y a la hora de sacar la probeta del molde se veía fresca.
5	2000	800	20	Se observó mucho sangrado de agua, y el proceso de fraguado se alargó mucho. Hay que esperar 48 horas para sacar la probeta del molde.

II.6.12 Caracterización de morteros históricos

En estudios realizados por Middendorf et. al. (2005), nos dice que la caracterización mineralógica de morteros históricos, se ha realizado por numerosas razones, relacionadas con la conservación y tradición de estructuras antiguas. Las razones para conservar y analizar la conservación, restauración o reparación de edificios antiguos, determinan los métodos de análisis que se escogerán. La Difracción de Rayos X es utilizada para caracterizar morteros.

La caracterización de morteros antiguos, aún es una materia que no está bien definida por reglas o normas nacionales, y su naturaleza de los materiales es ampliamente variable e inverosímil, incapaz de ser precisa. (Middendorf et. al., 2005)

II.6.13 Cactus como aditivo de argamasas antiguas

Argamasas es el tipo de mortero empleado como material de construcción en albañilería, formado de cal, que actúa como conglomerante, arena y agua, que al secarse adquiere una constitución muy dura, pero menor que la del concreto. Antiguamente fue muy empleada en la construcción de murallas y casas como mortero que unía piedras o ladrillos.†

Oliveira (2005), dice que las argamasas fueron utilizadas en gran parte de los edificios históricos, representando una solución para la incompatibilidad que existe entre la argamasa original y el material de restauración. En los estudios realizados se incorporó la adición de mucílago de nopal en argamasas de cal y arena; para la preparación del mucílago, el nopal, fue cortado en pequeños pedacitos y triturado, se licuó con agua a la velocidad más baja teniendo un mucílago fluido.

Los resultados obtenidos por Oliveira (2005) deducen que la argamasa con adición de mucílago de nopal tienen un estado más plastificante, presentan un buen

† Definición tomada de la Enciclopedia Británica.

comportamiento mecánico, las mezclas tienen una mayor compacidad, en la absorción por capilaridad se tiene menor velocidad en el ascenso del agua y un menor grado de saturación.

II.6.14 Opuntia ficus indica como inhibidor de la corrosión en el acero.

A nivel local, a partir de las investigaciones realizadas en 1999 y 2005, Torres (2007) hizo estudios en los cuales utilizó el mucílago de nopal deshidratado para inhibir la corrosión en el acero. Los resultados indicaron que el nopal deshidratado probado es un aditivo en uso potencial para mejorar la resistencia a la corrosión del acero de refuerzo en soluciones saturadas de hidróxido de calcio en porcentajes menores al 2%.

El acero usado en las pruebas fueron varillas de 9.5 mm de diámetro, antes de ser probadas fueron limpiadas con acetona.

En la siguiente Figura 2 se muestra la colocación de las varillas en una célula electroquímica, en la cual hay una solución de hidróxido de calcio, seis varillas. La figura muestra esquemáticamente la configuración de la célula. En la parte superior se colocó una capa de resina epóxica para evitar la corrosión de las varillas por diferencia de aireación.

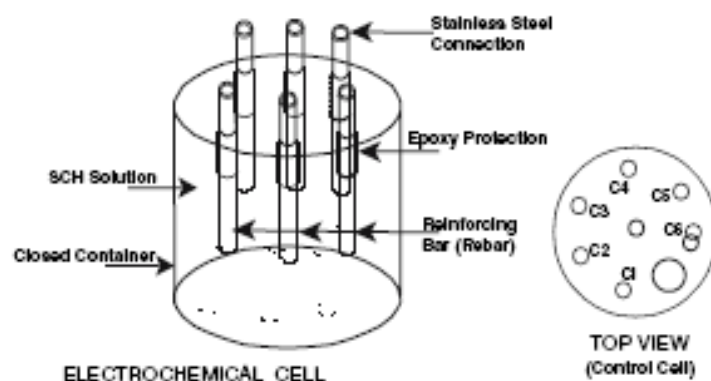


Figura 2 "Configuración de célula electroquímica." (Torres, 2007)

Las pruebas de laboratorio condujeron al investigador (Torres, 2007) a ver el comportamiento del nopal como inhibidor de la corrosión en varillas de refuerzo en soluciones contaminadas por cloruro.

II.6.15 Morteros con adición de cactáceas

También se ha hecho una investigación experimental con cubos de mortero estandarizados, en la que añadieron algunas cactáceas como lo son el nopal y aloe vera. Los ensayos realizados por Torres (2007) se hicieron con cemento tipo I, nopal y aloe vera deshidratado comercializado por Grupo Botánico NAYEC S. A. de C. V.

Las pruebas se hicieron adicionando el 1%, 2% y 4% de cada aditivo en las mezclas, cada combinación fue realizada con cantidades distintas de agua, para hacer las pruebas de consistencia según la norma ASTM C-187. Las probetas fueron cúbicas.

Se obtuvieron los siguientes resultados: el nopal como aditivo incrementa la durabilidad de materiales basados en cemento con porcentajes menores al 2%, caso contrario, el aloe vera no mejora las propiedades comparadas con un mortero base. (Torres, 2007)

II.6.16 Enriquecen el concreto con nopal

Para reducir los altos costos del concreto en México un investigador del Instituto Politécnico Nacional (IPN) ensayó la adición de extracto de nopal al material de construcción para incrementar su resistencia a la compresión y reducir la permeabilidad.

Recientes estudios realizados por Torres y Cano (2007) han probado que aunque el agua de mezclado se incremente en los morteros con adiciones de nopal

deshidratado, su resistencia no disminuye, siendo que ésta fue aumentando a edades mayores de 30 días a partir de la fabricación de los morteros.

Es interesante observar que las resistencias a la compresión de morteros con adiciones de nopal deshidratado se mantuvieron en valores similares a la mezcla control (sin adiciones) a pesar de que la relación agua/cemento fue incrementada para obtener la misma fluidez.

Las formas de obtención del extracto utilizado en los morteros, fue de la siguiente manera: primero se obtuvo simplemente cortando el nopal en pequeñas piezas que se mezclaron con agua potable en diferentes proporciones en peso, dejándolas reposar a temperatura ambiente durante algunos días. El segundo extracto se obtuvo mediante la cocción de las piezas cortadas de nopal para acelerar el proceso de extracción del mucílago. Una vez que la solución estuvo a temperatura ambiente, se monitoreó la viscosidad de la solución durante varios días empleando un viscosímetro. Entre el tercer y cuarto día la solución empezó a descomponerse y la viscosidad disminuyó aproximadamente hasta un 50%. A este tiempo la solución tuvo un olor desagradable. En caso de la extracción por medio de cocción, se observó que la viscosidad se conserva casi constante por lo menos durante cinco días.

Con respecto a la capacidad para absorber agua de los morteros, se observó que el curado húmedo de mortero conteniendo extracto de nopal por un día produce un mortero más impermeable comparado con la mezcla control. Esto explica que la capacidad del extracto para retener agua contribuye a lograr un mayor grado de hidratación del mortero aún con un periodo corto de curado.

Como conclusión se tiene que el extracto de nopal es efectivo para incrementar la viscosidad de la pasta de cemento en concretos y morteros fluidos. (Torres y Cano, 2007)

II.6.17 Actualidad de las investigaciones en el uso del nopal como aditivo

Recientemente (Hernández et. al, 2007, 2008) se han publicado artículos donde se da a conocer el uso de aditivos derivados de las cactáceas para morteros y concretos en la construcción. Se hace una reseña histórica sobre las investigaciones que se han realizado y los resultados obtenidos con el uso de estos aditivos.

También hay una publicación que a su vez se presentó como ponencia en el 4^{to} Congreso Internacional de Ingeniería, en la Universidad Autónoma de Querétaro, en donde se expusieron algunas de las propiedades mecánicas del nopal-cemento; es relevante señalar que los resultados fueron obtenidos de los trabajos realizados en la presente investigación.

Se destaca significativamente que por primera vez en esta investigación, se está dando paso a utilizar derivados del nopal como aditivo en los morteros y lechadas, para así modificar las propiedades mecánicas de éstos.

La última publicación hace referencia al mejoramiento de los morteros a través del nopal, donde concluimos que “El nopal como un producto renovable y de fácil cultivo en lugares áridos, presenta un gran potencial en la industria de la construcción y de la restauración, como aditivo mejorador de propiedades mecánicas y retardante de mezclas.”

III. METODOLOGÍA

En este capítulo se presentan los materiales y equipos necesarios para la realización del trabajo de investigación. Así como también los procedimientos llevados a cabo para efectuar las pruebas físicas y mecánicas, que nos brindarán los resultados para dar una conclusión a la tesis. Las normas en las cuales se basa el procedimiento para los ensayos son las establecidas por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, S. C. (ONNCE).

III.1 Materiales

Los materiales a utilizar, más representativos son: cemento Portland, agua, arena y polvo de nopal. Del polvo de nopal se derivan los diferentes aditivos con los que se desarrollaron las pruebas experimentales.

III.1.1 Cemento Portland

El cemento utilizado para el desarrollo de las pruebas físicas y mecánicas es un Cemento Portland Compuesto (CPC 30 R), generalmente se encuentra en el mercado en sacos de 50 kg (Figura 3), es recomendado para cualquier tipo de obra o elementos como: pisos, losas, columnas, trabes, cimientos, vivienda en general, edificios de baja altura, prefabricados como bloques, tabicones y adoquines, cisternas, tanques y canales de agua no residual.



Figura 3 "Saco de cemento (50kg)"

Tiene un buen desempeño de fraguado y resistencia, adecuada para la construcción de edificación en general.

Producido bajo un estricto control de calidad utilizando equipos y tecnología de punta, garantizando una alta uniformidad del cemento.

III.1.2 Polvo de nopal

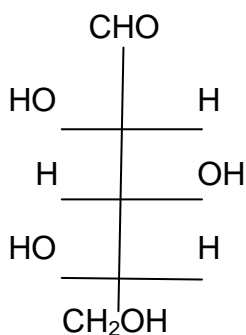
El polvo de nopal que se utiliza como recurso principal para la deducción de los azúcares que conforman a éste, fue utilizado con anterioridad en la investigación dirigida por el Dr. Juan Bosco Hernández Zaragoza, "Uso del mucílago de nopal en la elaboración de morteros".

III.1.3 Azúcares derivados del nopal

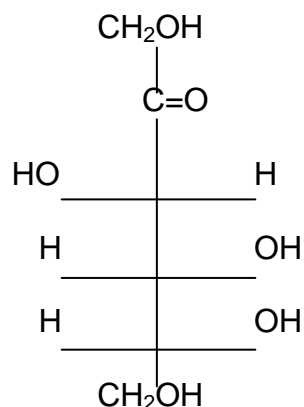
Los derivados del nopal encontrados, fueron azúcares (arabinosa, fructosa, glucosa y xilosa). Los polvos se consiguieron en el mercado en un Consorcio Químico de la localidad.

Según las revisiones literarias efectuadas (Carey, 1999) se encontró que la arabinosa es un azúcar que se halla en la naturaleza, se obtiene por hidrólisis ácida del polisacárido así como también la fructosa, glucosa y xilosa. A continuación se presenta la estructura química de cada uno de estos carbohidratos.

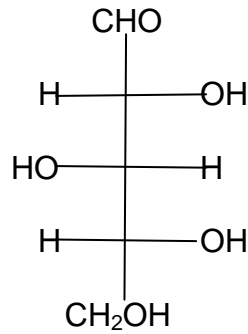
Arabinosa



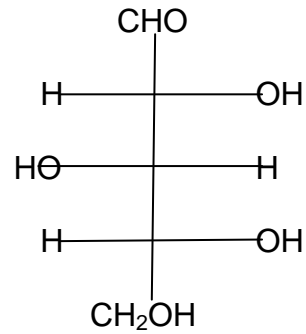
Fructosa



Glucosa



Xilosa



III.1.4 Arena

La arena utilizada para este trabajo se puede conseguir fácilmente en la localidad en el banco de Saldarriaga ubicado en la ciudad de Santiago de Querétaro, Querétaro.

La Norma Oficial Mexicana donde encontramos referencias para el uso de los agregados es la NMX-C-111-ONNCCE-2004 “Agregados para concreto hidráulico – Especificaciones y métodos de prueba.” La arena utilizada, fue totalmente seca, para así no incluir una variable más a la elaboración de las probetas. En la Figura 4 se muestra el material seco antes de su hidratación y en el Cuadro 7, se presenta la granulometría del material fino utilizado en los morteros.

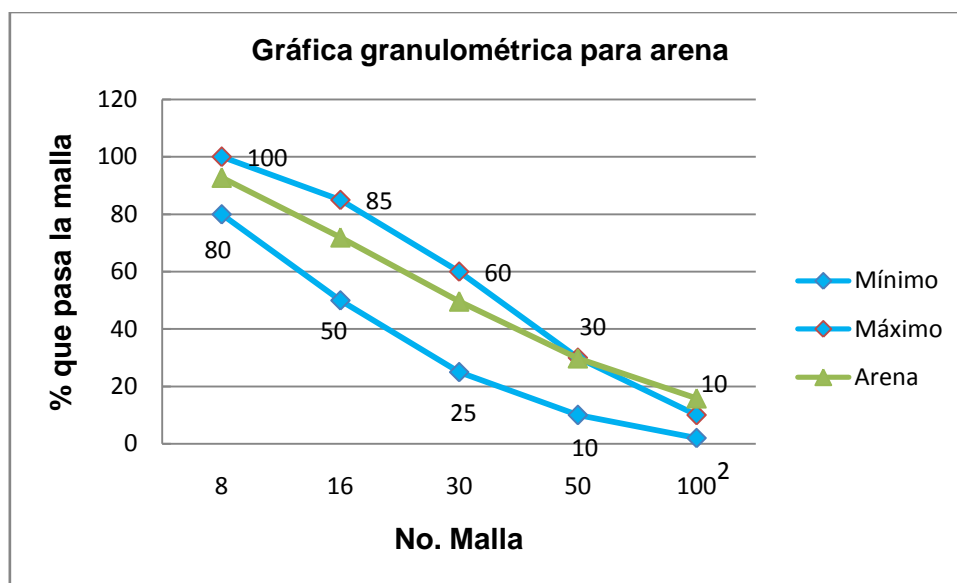


Figura 4 "Arena y cemento"

Cuadro 7 "Granulometría de la arena"

No. malla	Peso retenido parcial (gr)	% peso retenido parcial	% retenido acumulado	% que pasa la malla
8	34.10	7.27	7.27	92.73
16	97.60	20.80	28.06	71.94
30	104.90	22.35	50.42	49.58
50	92.80	19.77	70.19	29.81
100	65.70	14.00	84.19	15.81
200	28.40	6.05	90.24	9.76
suma	423.50	-----	-----	-----
charola	45.80	9.76	100.00	-----
suma	469.30	-----	-----	-----

La siguiente gráfica, ejemplifica la granulometría de diseño para el material fino en los morteros. Se graficó el número de malla en el eje de las abscisas y en el eje de las ordenadas, el porcentaje (%) de material que pasa por cada una de estas. El material fino que pasa por la malla 100 utilizado en esta investigación, ya no se encuentra dentro de los límites, pues sobrepasa un 5% del máximo requerido. Pero eso no causa gran problema, pues el equivalente de arena se encuentra en el 84% mayor al mínimo.



Gráfica 1 "Granulometría para arena"

III.1.5 Agua

La norma encargada de regular las características que debe de cumplir el agua a utilizar para la elaboración de morteros es la NMX-C-122 “Industria de la Construcción - Agua para concreto”.

El agua, un material indispensable para la elaboración de los morteros, ésta ayuda al mezclado del cementante. El agua potable es la comúnmente utilizada, pues se encuentra libre de contaminantes o impurezas que puedan afectar las propiedades del mortero.

III.2 *Equipo*

Los equipos más utilizados para el desarrollo de la investigación son: moldes para fabricar probetas cúbicas, máquina universal *Forney Testing Machine*, aparato de *Vicat Humboldt MFG, Co.*

III.2.1 Moldes para cubos

Los moldes para las probetas son de acero inoxidable tal y como lo marcan los requerimientos de la norma NMX-C-61 o de un metal duro, que no sea fácil de ser atacado por la pasta de cemento, la sección es cuadrada, con dimensiones de cada cubo de 5 cm. por lado. Sus paredes son lo suficientemente rígidas para que no se deformen en la operación de moldear. Los moldes deben sujetarse muy bien y sujetarse firmemente las piezas unas con otras al ser armados éstos. (Figura 5)

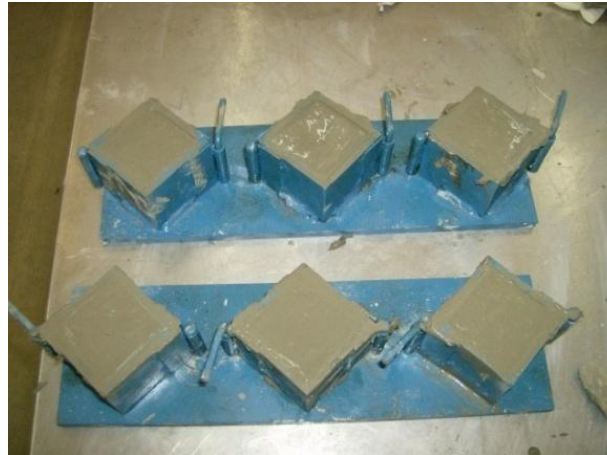


Figura 5 "Moldes para cubos"

III.2.2 Máquina universal

La máquina universal tiene una capacidad de 150 toneladas, es de la marca *Forney Testing Machines*. Se utilizó para las pruebas a compresión, cuenta con un régimen de aplicación de carga uniforme, debe estar provista de los dispositivos necesarios para la regulación de la carga. La máquina debe calibrarse frecuentemente para asegurar su exactitud. La última calibración se realizó el 14 de Septiembre de 2007. Por lo tanto, la máquina cumple con los requisitos indispensables que marca la norma NMX-C-061. (Figura 6)



Figura 6 "Máquina universal"

III.2.3 Aparato de Vicat

De acuerdo a lo estipulado por la norma NMX-C-057 "Determinación de la consistencia normal" el aparato de Vicat utilizado cumple con los siguientes requisitos: lleva una barra móvil, la cual tiene un extremo con diámetro de 10 mm. y una longitud mínima de 50 mm. En el otro extremo de la barra, lleva una aguja desmontable de 1 mm y 50 mm de longitud.

La barra se puede subir, bajar y fijar al soporte en la posición deseada, aflojando y apretando el tornillo. Montado sobre la barra, se encuentra un indicador, que se desplaza sobre ella, pudiéndose de esta manera ajustarlo y fijarlo a cero por medio del tornillo que el indicador tiene.

El aparato de Vicat también cuenta con un anillo tronco cónico, con 70 mm de diámetro inferior y 60 mm de diámetro superior, su altura es de 40 mm. El anillo se coloca en una base cuadrada de 100 mm por lado. (Figura 7)



Figura 7 "Aparato de Vicat"

III.3 Ensayos

Los ensayos llevados a cabo en la investigación, se desarrollan principalmente en el Laboratorio de Materiales y Mecánica de Suelos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). La caracterización química del polvo de nopal, por la complejidad para realizar dicha prueba, se cuenta con el apoyo del Centro de Física Aplicada y Tecnología Avanzada de la Universidad Nacional Autónoma de México (CFATA de la UNAM).

III.3.1 Difracción de rayos X

Para el desarrollo de esta investigación (en la determinación de los minerales del nopal) se utilizará el método röntgenográfico, para después así obtener un difractograma y finalmente identificar los minerales mediante difracción de rayos X.

Brauns (1961). La naturaleza de los rayos X descubiertos por C. W. Röntgen en el año de 1895 (y llamados más tarde rayos Röntgen en su honor), fue por mucho tiempo desconocida. Se presumía que eran rayos ondulatorios, pero faltaba una prueba segura de ello. Los rayos ondulatorios se caracterizan por el movimiento ondulatorio, este puede demostrarse por los “fenómenos de difracción” al pasar los rayos por las estrechas rendijas de una red, y para que la red de difracción manifieste su acción más completa en cada caso, la separación entre rayas o líneas de la red debe ser aproximadamente igual a la longitud de onda del rayo ondulatorio. Para comprobar la naturaleza ondulatoria de los rayos Röntgen vendría a ser del orden de la milésima o la diezmilésima parte de la más pequeña longitud de onda de la luz visible / la región violeta del espectro). Sólo cuando M v. Laue tuvo la originalísima idea (1912) de emplear como red de difracción para estos rayos los cristales que los mineralogistas consideraban como “redes espaciales”, logró en unión de sus colaboradores W. Friederich y P. Knipping, un éxito científico de importancia trascendental. No sólo demostró la naturaleza ondulatoria de la luz Röntgen, sino que también pudo comprobar la estructura de los cristales en forma de

redes espaciales y en el orden de magnitud esperado. Desde ese momento, la estructura discontinua de los cristales con partículas constitutivas separadas unas de otras (átomos iones, grupos atómicos o iónicos), tantas veces discutida, dejó de ser una ficción del pensamiento y se convirtió en un hecho real que podía determinarse y confirmarse por peso y medida.

Entre los métodos Röntgen desarrollados, tienen múltiples aplicaciones prácticas los de Laue, Braga y Debye-Scherrer. Particularmente claro e ilustrativo es el método de Braga, (Figura 8). En este método, se emplea un haz de rayos Röntgen paralelos, de la misma longitud de onda o sea luz Röntgen monocromática. Cuando este haz incide formando un ángulo con planos reticulares densamente espaciados (E, E', E''), una parte de la radiación Röntgen penetrante es reflejada por cada uno de los planos de la red; éstos actúan como espejos y pueden causar, en condiciones determinadas, interferencias como las que resultan al reflejarse la luz ordinaria en capas delgadas. (Brauns, 1961)

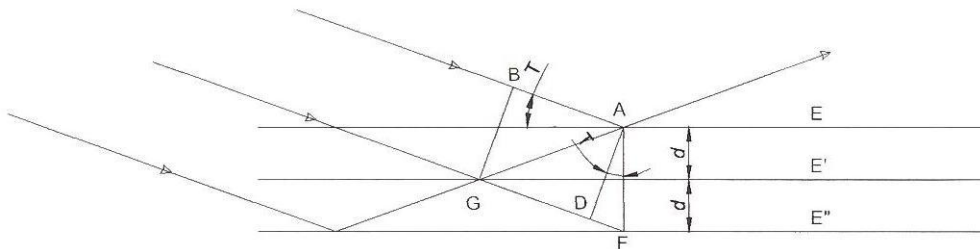


Figura 8 "Método de reflexión de Braga." (Brauns, 1961)

Por las condiciones de reflexión e interferencia de los rayos Röntgen, se puede deducir lo siguiente: el rayo reflejado en A sobre el plano E interfiere en el reflejado de G sobre el plano E' cuando la diferencia de trayecto es un múltiplo completo de la longitud de onda. La diferencia de trayecto corresponde a la longitud GA-GD, donde $DA \perp GF$. Como $GA=GF$, se calcula la diferencia calculada por la

relación $\text{sen } \theta = \frac{DF}{2d}$ de donde se deduce $DF = 2d \text{sen } \theta$; d es la distancia de los planos reticulares igualmente espaciados. Si $2d \text{sen } \theta = n\lambda$ (λ , longitud de onda; n , cualquier número entero), resulta una intensidad máxima de las ondas de reflexión que interfieren (ecuación de Bragg). Los valores $n=1, 2, 3\dots$ que corresponden a los distintos valores del ángulo θ (ángulo del rayo incidente con el plano de reflexión) designan el orden $1^\circ, 2^\circ, 3^\circ\dots$ de las interferencias; estas se señalan por una caída de intensidad característica; θ es el llamado ángulo de Bragg y aumenta con él. (Brauns, 1961)

Mediante la ecuación anterior se determinan, conociendo λ , las distancias de los planos reticulares (d) y con ello importantes magnitudes estructurales. En la ejecución de este método se varía el ángulo de incidencia del rayo Röntgen (R en la Figura 9) que incide sobre una placa cristalina K de orientación exactamente conocida; esto se efectúa sobre rotación de la placa cristalina montada sobre la platina de un goniómetro. Un brazo que gira en torno del mismo eje del goniómetro, lleva una cámara de ionización (Ik) que tiene una estrecha ranura dirigida hacia el cristal; cuando el rayo Röntgen reflejado entra en la cámara, se ioniza el gas de ésta con diferente fuerza según la intensidad de la reflexión y de este modo se hace conductor, lo que pueda detectarse en un electrómetro unido a la cámara de ionización. El ángulo R K Ik, se lee en un goniómetro, corresponde a $180^\circ - 2\theta$. Las interferencias resultantes pueden registrarse en una película fotográfica dispuesta en arco frente al goniómetro y se utilizan en los cálculos. (Brauns, 1961)

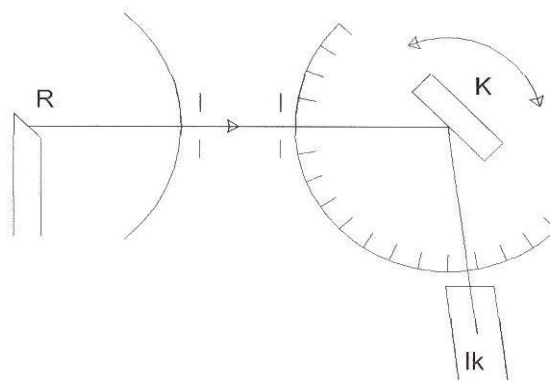


Figura 9 "Esquema de ángulo de incidencia del rayo Röntgen." (Brauns, 1961)

De las diversas aplicaciones de la difracción de rayos X, la que se emplea con más frecuencia en la identificación de sustancias minerales, es el denominado método del polvo policristalino. En este método la muestra ha sido finamente pulverizada, por lo que en teoría, hay partículas cristalinas con sus planos reticulares en todas las direcciones posibles. En la práctica la muestra molida a tamaño fino (<0.02 mm), se coloca en un portamuestra y se introduce en un aparato denominado difractómetro de rayos X, donde la muestra se somete a la acción de la radiación que incide en forma continua en distintos ángulos. El esquema de un difractómetro con sus diversos elementos se muestra en la Figura 10a. El resultado es un espectro denominado difractograma (Figura 10b), donde se recogen una serie de picos que en la escala horizontal muestra el ángulo de 2θ y en la vertical la intensidad del pico difractado. Conociendo la longitud de onda de los rayos X (λ) y el valor del ángulo de difracción (θ), medido como 2θ en el difractograma, es muy fácil calcular el valor del espaciado (d); bien mediante la ecuación de Bragg o utilizando tablas de conversión de ángulo a espaciado ya preparadas a tal efecto. (Pozo, 2004)

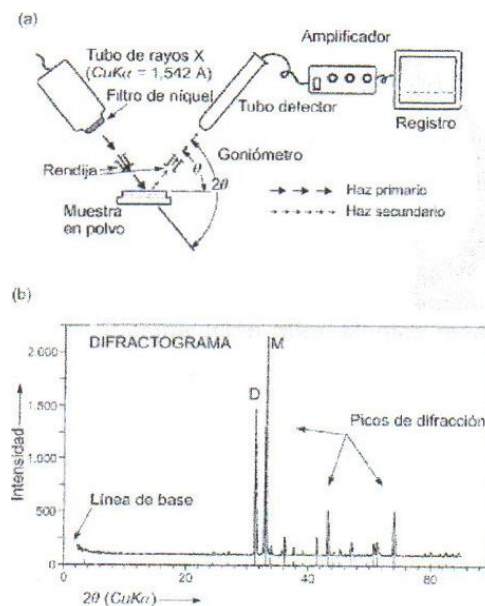


Figura 10 "(a) Esquema mostrando las partes de un difractómetro. (b) Ejemplo de difractograma de una muestra de polvo, mostrando los elementos principales del mismo. Destaca la presencia de picos de difracción que se desarrollan sobre una línea de fondo o línea base. En la horizontal se recogen valores del ángulo 2θ y en la vertical la intensidad del pico." (Pozo Rodríguez, 2004)

Aunque en la actualidad los distintos pasos que conducen a la identificación de los minerales de una muestra analizada por difracción de rayos X, se realizan de forma automática por ordenador mediante el empleo del software adecuado, es conveniente que se realice un procedimiento manual, con sus medidas y cálculos, los cuales ayudarán a entender mejor los fundamentos de ésta técnica analítica.

Una vez obtenido el difractograma (Figura 11), las diferentes etapas de caracterización de un mineral son las siguientes:

1. Diferenciar picos de la línea de base del diagrama de rayos X, y numerarlos.
2. Con una regla medir la posición de los picos en la escala horizontal (ángulo 2θ).
3. Con una tabla de conversión ángulo $2\theta/d$ (espaciado en A), convertir ángulos en espaciados o calculados aplicando la ley de Bragg.
4. Con una regla medir la altura de los picos utilizado como referencia de medida la línea de base del diagrama. Este valor representará la intensidad del pico (I). Para obtener la intensidad relativa (I/I₀), recalcular la altura de todos los picos, adjudicando al más intenso el valor 100.
5. Se ordenan los picos por intensidades y se comparan los espaciados con los registros en las bases de datos de minerales.
6. Este procedimiento es aplicable también a muestras poliminerale. En este caso hay que ir eliminando, con reservas, los espaciados pertenecientes a los minerales ya identificados. En esta situación al existir varios minerales que puedan interferir en sus reflexiones, la posición de los picos y especialmente las intensidades pueden sufrir variaciones. (Pozo, 2004)

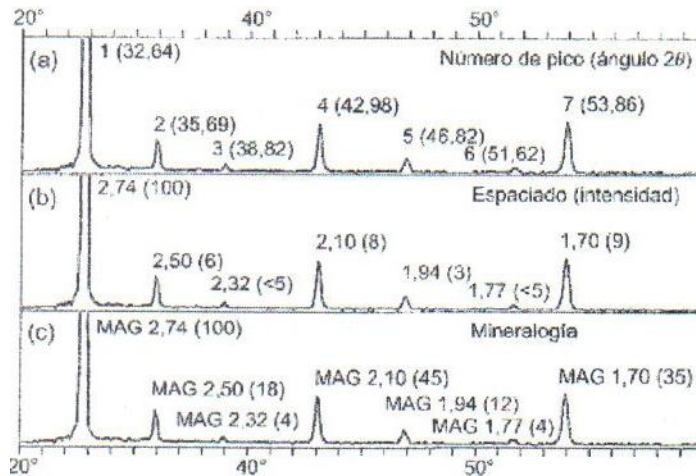


Figura 11 "Metodología de identificación de un mineral. (a) Numeración de picos y medida de su ángulo 2θ . (b) Determinación de los espaciados y de la intensidad relativa de los diferentes picos (I/I₀). (c) Comparación de los resultados obtenidos con los espaciados e intensidades del mineral magnesita (MAG). Se observa una total coincidencia en los espaciados, pero diferencias en los valores de las intensidades. Este hecho no es infrecuente en carbonatos y sales, debido a la factibilidad con la que se desarrollan orientaciones preferentes durante la molienda de la muestra." (Pozo, 2004)

Las intensidades relativas reflejan, de alguna manera, la proporción en que se encuentran los minerales en la muestra, lo que unido al poder reflectante (se calcula experimentalmente y es característico de cada mineral) permite establecer un orden de abundancia.

III.3.2 Determinación de la consistencia normal

La Norma NMX-C-057 es la encargada de regular los pasos para determinar la consistencia normal de una mezcla, mediante el aparato de Vicat.

Se mezclan 650 gr de cemento con una cantidad de agua que se ajusta hasta encontrar una relación agua/cemento (A/C) que nos de una consistencia deseada. La relación de A/C óptima será la que cumpla con esta prueba.

Rápidamente con las manos cubiertas con guantes de hule se forma con la pasta una bola y se completa la operación lanzándola de una mano a otra, seis veces, manteniendo las manos separadas por una distancia de 15 cm. Después de

esto, con la bola de pasta en la palma de una mano y el anillo troncocónico en la otra, se introduce la bola dentro del anillo por la base mayor, empujándola hasta llenarlo por completo.

El sobrante de la pasta sobre la base mayor se quita mediante un movimiento de la mano a 90° de la dirección del movimiento con el que se introdujo la bola de pasta en el anillo, enseguida se coloca el anillo por su base mayor sobre la placa, y el sobrante de la pasta se quita de la base menor mediante un corte oblicuo con el filo de la cuchara sin presionar la pasta.

Se considera que la pasta tiene una consistencia normal cuando la barra del aparato Vicat baja 10 mm \pm 1 mm a partir de la superficie original en un intervalo de 30 segundos contados desde el instante en que se soltó la barra.

III.3.3 Prueba para determinar la fluidez en morteros de cemento hidráulico

Esta prueba indica la trabajabilidad de pastas y morteros, mediante la medición del incremento de diámetro de la mezcla. La trabajabilidad determina la facilidad de colocación de la mezcla. La prueba consiste en lo siguiente:

El equipo a utilizar es la mesa de fluidez, la parte superior del platillo de la mesa debe limpiarse y secarse, al centro se coloca un molde troncocónico. Se pone en el molde una capa de mortero de aproximadamente 25 mm de espesor que se compacta 20 veces con el pisón. Se debe hacer un llenado uniforme del molde. A continuación el molde se llena totalmente y se compacta nuevamente como en la anterior capa. Se enrasa la superficie del mortero pasando el filo de una cuchara. Se limpia y se seca cuidadosamente la parte del platillo de la mesa de fluidez no cubierta por el molde, teniendo especial cuidado de hacerlo en la intersección de la base inferior del molde con la mesa de fluidez.

En la siguiente Figura 12 se observa la mesa de fluidez con el molde troncocónico.



Figura 12 "Mesa de fluidez"

Al transcurrir un minuto después de haber terminado el mezclado, se levanta el molde; el platillo se deja caer 25 veces en 15 segundos, de una altura de 12.7 mm. La fluidez es el incremento del diámetro de la base de la mesa del mortero, expresado como porcentaje del diámetro de la base original. El diámetro considerado del mortero debe ser el promedio de por lo menos 4 mediciones de diámetro de 45°.

Las Normas NMX-C-061 "Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos" y la Norma NMX-C-144 "Requisito para el aparato usado en la determinación de la fluidez de morteros con cementantes hidráulicos" especifican el procedimiento para la realización de los ensayos.

III.3.4 Determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos

Esta prueba se desarrolla conforme a la Norma NMX-C-059, los pasos a seguir son los siguientes: se hace una probeta, se coloca inmediatamente en el cuarto húmedo. Después de permanecer media hora en el cuarto húmedo, se determina la penetración de la aguja de 1 mm de diámetro del aparato de Vicat y posteriormente cada 15 min, hasta que se obtenga la penetración de 25 mm.

Para la determinación de la penetración se baja la barra hasta que la aguja quede en contacto con la superficie de la pasta. Se coloca el indicador de la lectura en cero, se afloja el tornillo, con lo que la barra queda suelta y cae sobre la superficie de la pasta en la cual penetra, a los 20 segundos de haber caído, se toma la lectura en la escala para determinar la penetración de la aguja.

La penetración no debe efectuarse a una distancia menor de 6 mm unas de otra y ninguna de ellas se hará a una distancia menor de 9 mm de la parte interior del molde. El tiempo de fraguado final, es cuando la aguja no penetra visiblemente en la pasta.

Neville (1999) utiliza el término fraguado para describir la rigidez de la pasta del cemento. En términos generales el fraguado se refiere a un cambio de estado físico: del estado de fluidez al estado rígido.

III.3.5 Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos

Esta prueba se lleva a cabo de acuerdo a la NMX-C-061. Lo primero que hay que hacer es tener todo el material y equipo necesario para la elaboración de la mezcla.

Antes de ensamblar el molde, habrá que cubrir sus superficies acoplantes con aceite mineral, y se deberá de aplicar una delgada capa de aceite similar en las superficies internas del molde a fin de prevenir el desarrollo de adherencias del mortero con el molde.

Se llena el molde en tres capas, y se compacta con no menos de 35 golpes con una varilla de acero cuadrada de 25 mm. El apisonado deberá continuarse hasta que el cubo esté completamente lleno.

Después la superficie superior del cubo se empareja con una llana, el cubo se almacena en reposo durante 24 horas a una temperatura de 20.5 °C y a una humedad relativa de no menos del 90%.

Al final del periodo de fraguado, se desmolda, se retira y se cura con agua a una temperatura de 20 ± 2 °C. Generalmente se ponen los cubos en un cuarto húmedo.

En la prueba de compresión, el cubo aún húmedo es colocado con las caras coladas en contacto con las placas de la máquina universal, es decir, la posición del cubo cuando se prueba es perpendicular a cuando se coló. La carga deberá aplicarse a una rapidez constante.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el desarrollo de la investigación.

IV.1 Caracterización química del nopal

La caracterización química del nopal se hizo mediante la Difracción de Rayos X (Rx) al nopal en polvo, tal y como se planteó desde un principio en el desarrollo de la investigación. De acuerdo con lo que la literatura cita, encontramos mediante este proceso, que el nopal contiene: Oxalato Hidratado de Calcio ($C_2CaO_4 \cdot H_2O$), Cloruro de Magnesio ($MgCl_2$) como se muestra en la Figura 13.

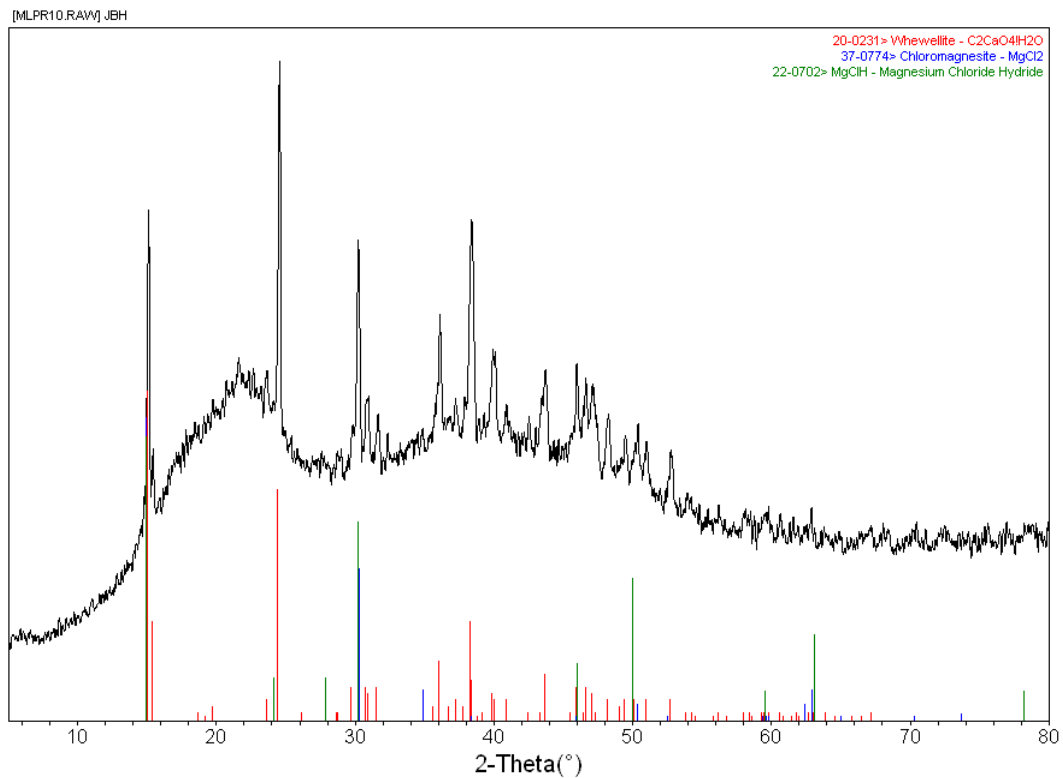


Figura 13 "Difractograma del polvo de nopal"

<c:\rww\data\LuzPR> \Vemes, May 23, 2008 02:13p (MDIKJADE5)

Después de haber obtenido la información del difractograma, se buscó la manera de utilizar otro método que nos auxiliara en la identificación de los componentes del nopal, para llegar a los resultados que reportaron autores como Goycolea (2003) y Arizmendi (2008), en donde detectaron la presencia de arabinosa y xilosa en el mucílago de nopal.

Logramos constatar que al utilizar el método de Rx, no se pudieron obtener los resultados esperados, pues éste tipo de técnicas sólo identifican estructuras cristalinas.

Por lo tanto, se utilizó otro método, así que decidimos optar por la espectroscopía infrarroja (IR) para hacer la verificación de los componentes del nopal. Este método se distingue porque con él se pueden identificar moléculas orgánicas e inorgánicas. El análisis de un espectro de infrarrojo consistió en la identificación de enlaces o grupos químicos. Para la interpretación de espectros de infrarrojo existen tablas, espectros o información acerca de la longitud o frecuencia característica de un enlace químico específico. (Hernández, 2005).

De esta manera se encontró en el espectro la presencia de arabinosa (A), fructosa (F), glucosa (G) y xilosa (X). En la Figura 14 se presentan los resultados.

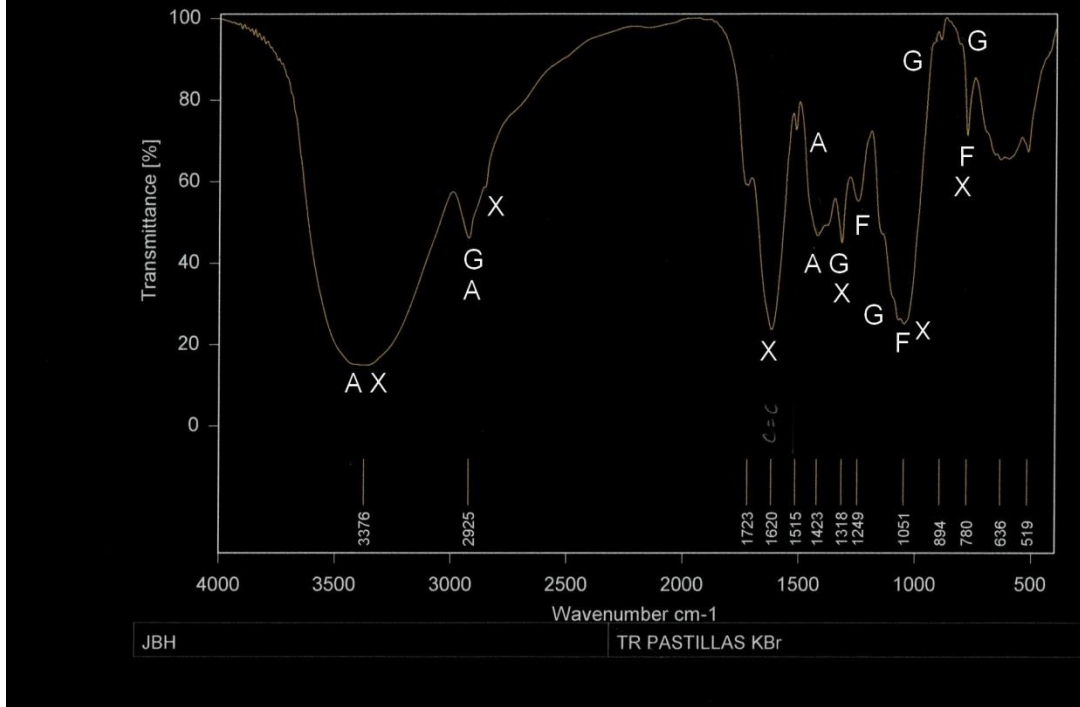


Figura 14 "Verificación de azúcares en el nopal"

Se consideraron como variables los azúcares que se encuentran en mayor cantidad, fueron utilizarlos como aditivos individuales en la mezcla porque se pueden encontrar en el mercado de forma sencilla y práctica sin tener que sintetizar cada uno de ellos del nopal.

IV.2 Consistencia de la pasta mediante el aparato de Vicat

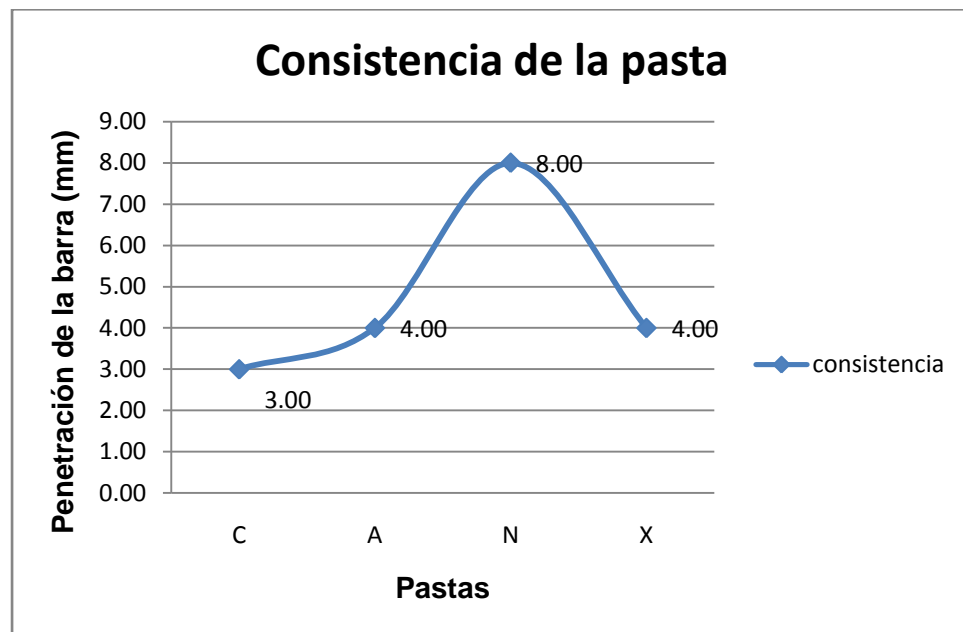
Para determinar la consistencia de la pasta, se elaboraron cuatro mezclas, haciéndose de la siguiente manera:

Usando una relación agua/cemento de 0.40 y debido a experimentos anteriores, se llegó a la conclusión de agregar un 5% de aditivo por masa de cemento. En el Cuadro 8 se presenta la nomenclatura de cada una de las mezclas, así como los ingredientes que la componen.

Cuadro 8 "Lechadas"

Lechadas			
Mezcla A	Cemento Portland	Arabinosa	Agua
Mezcla C Mezcla base	Cemento Portland		Agua
Mezcla N	Cemento Portland	Polvo de nopal	Agua
Mezcla X	Cemento Portland	Xilosa	Agua

Los resultados obtenidos presentan una consistencia normal en la pasta. En la Gráfica 2 se muestra el promedio de las penetraciones de la barra en cada una de las mezclas ensayadas. (Ver apéndice)



Gráfica 2 "Consistencia de la pasta"

De la gráfica anterior, se deduce que el polvo de nopal adicionado a la mezcla, presenta la mejor penetración de la barra, seguido de la xilosa y arabinosa, concluyendo, que todas las mezclas con aditivos obtuvieron una consistencia mejor que la pasta de cemento.

IV.3 Prueba de fraguado inicial y fraguado final mediante el aparato de Vicat

Al igual que en las pruebas de consistencia normal de la pasta, decidimos dar prioridad al uso de la arabinosa y xilosa. La prueba de fraguado inicial y final mediante el aparato de Vicat se realizó a las pastas C, A, N, X. El interés de conocer los fraguados ayudó para concluir si el uso del 5% del aditivo puede acelerar o retardar los tiempos de fraguado.

En la Figura 15 se aprecia la prueba de fraguado inicial y final realizada a una de las probetas. Se puede ver el aparato de Vicat y la penetración de la aguja en la probeta.



Figura 15 "Prueba para determinar el fraguado inicial y final"

En el Cuadro 3 se muestran los tiempos de fraguado inicial (fi) y final (ff). Las tablas con cada uno de los resultados, se presentan en el apéndice.

Cuadro 9 "Fraguado inicial y fraguado final"

Aditivos	Fraguado (min)	
	Inicial	Final
Cemento	330	390
Arabinosa	390	450
Nopal	435	495
Xilosa	390	495

Al analizar los datos, se concluye, que todos los aditivos seleccionados actuaron como retardantes, debido a que presentaron un mayor tiempo de fraguado respecto a la mezcla base. Los aditivos arabinosa y xilosa, tuvieron el mismo tiempo de fraguado inicial.

IV.4 Resultados a compresión en pastas con aditivos derivados del nopal

En el desarrollo de la investigación se partió de una mezcla base para con ella comparar los resultados obtenidos en las pruebas a compresión, realizadas a las probetas con aditivos derivados del nopal. Los ensayos se llevaron a cabo a 3, 7, 14 y 28 días de edad a las lechadas A, C, N y X.

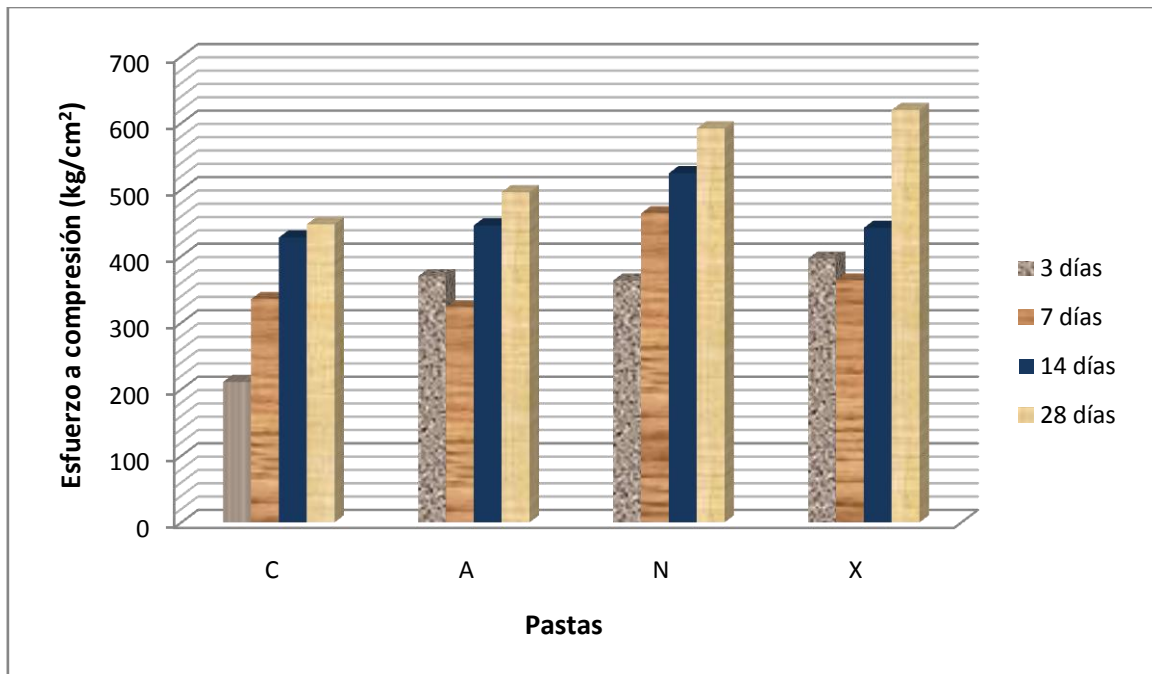
En la Figura 16 se muestran algunas de las probetas cúbicas a las que se les aplicó carga para conocer su resistencia a compresión.



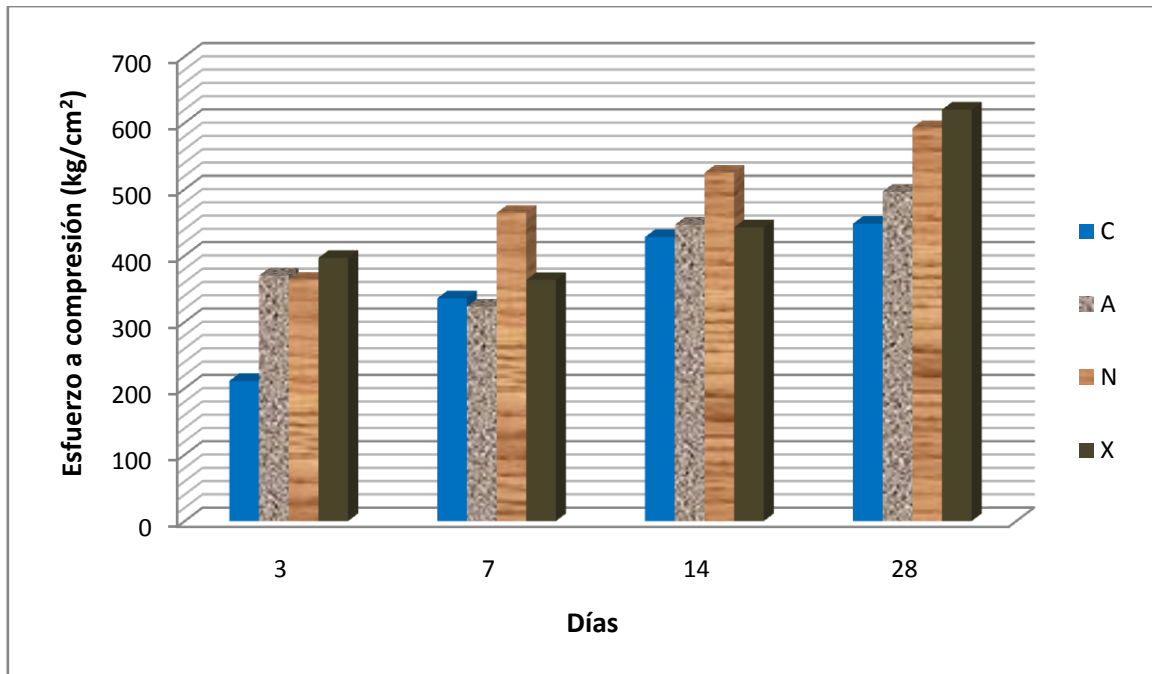
Figura 16 "Probetas"

En la Gráfica 3 y 4 se comparan los esfuerzos a compresión que tuvieron cada una de las probetas elaboradas a fin de conocer las propiedades mecánicas que refleja el uso de los aditivos derivados del nopal. (En el apéndice de este trabajo se encuentran las tablas con los datos que se utilizaron para realizar las gráficas).

El comportamiento de cada una de las lechadas en las cuales se utilizó un aditivo, comparadas con la mezcla base, presentaron incrementos en su resistencia a compresión, teniendo un desempeño muy similar al uso del nopal. Todas las probetas alcanzaron esfuerzos de más del 70% en los tres primeros días de edad.



Gráfica 3 "Comparación de los esfuerzos a compresión en pastas"



Gráfica 4 "Comparación de esfuerzos a compresión en pastas por edad"

En las lechadas, el uso de la xilosa fue quien tuvo el mejor comportamiento, con incrementos del 87.75% a los tres días, 8.30% a los siete días, 3.41% a los catorce días. Finalmente a los veintiocho días se incrementó en 38.39%. respecto a la mezcla base.

IV.5 Resistencia a compresión en morteros con aditivos derivados del nopal

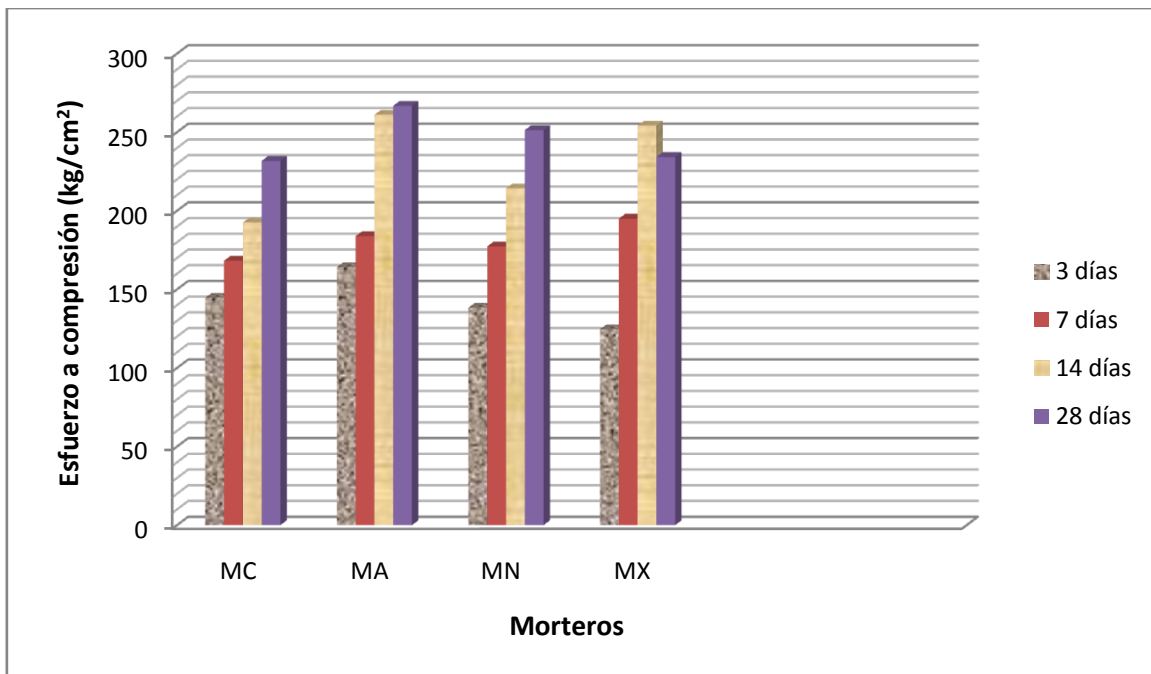
Como aditivos seleccionados para la realización de las pruebas de resistencia a compresión ($f'c$) en morteros, se utilizaron los mismos aditivos, agregando arena. Los morteros evaluados fueron los que se muestran en el Cuadro 10.

Las mezclas se realizaron de acuerdo a las Norma NMX-C-061, donde indica que por cada parte de cemento se pondrán 2.75 partes de arena granulada. La relación agua/cemento fue de 0.5 y el porcentaje de aditivo se conservó constante en 5% respecto a la masa de cemento.

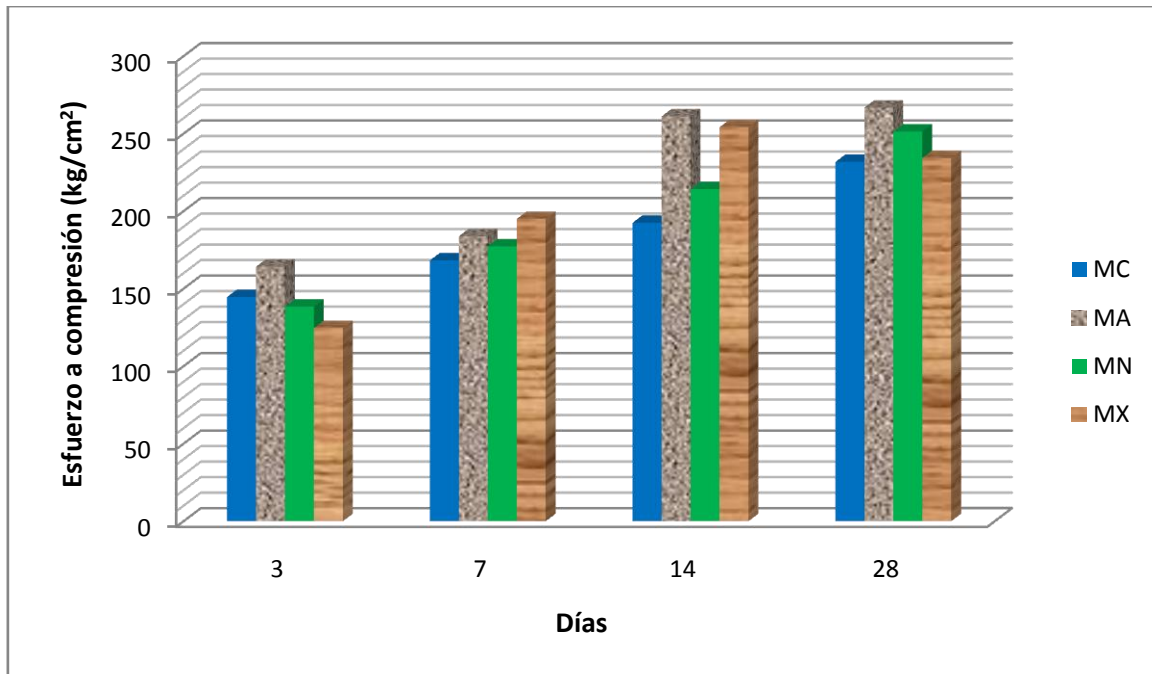
Cuadro 10 "Morteros"

Morteros				
Mezcla MA	Arena	Cemento Portland	Arabinosa	Agua
Mezcla MC Mezcla base	Arena	Cemento Portland		Agua
Mezcla MN	Arena	Cemento Portland	Polvo de nopal	Agua
Mezcla MX	Arena	Cemento Portland	Xilosa	Agua

La comparación de los resultados obtenidos se observan en la Gráfica 5 y 6, donde se aprecia que los morteros con aditivo alcanzaron resistencias a compresión mayores que los morteros base.



Gráfica 5 "Comparación de esfuerzos a compresión en morteros"



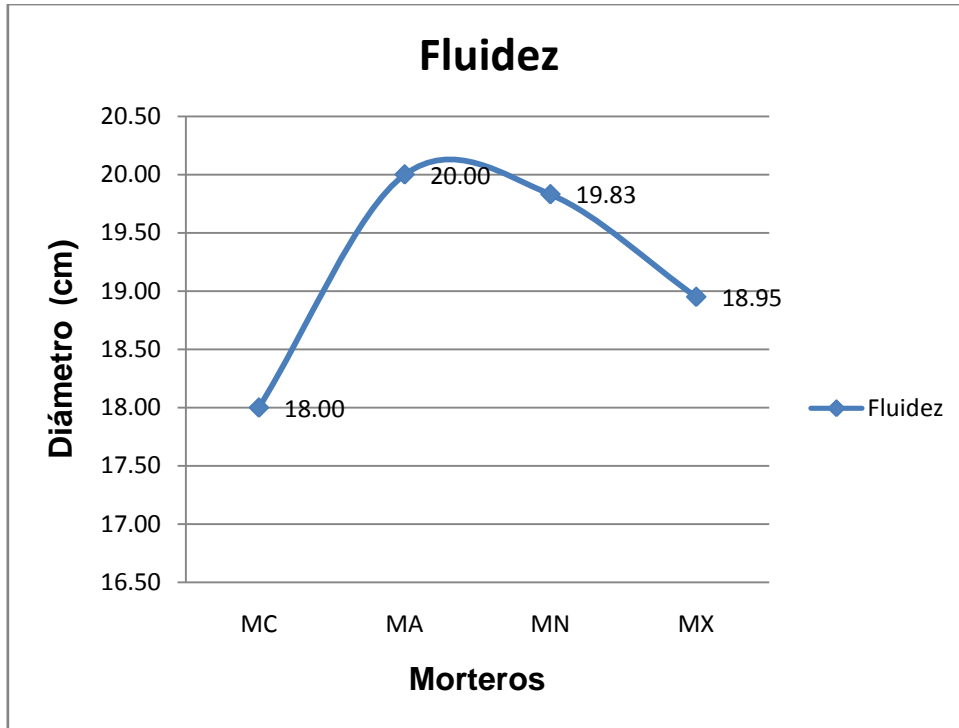
Gráfica 6 "Comparación de esfuerzos a compresión en morteros por edad"

En este caso, se tiene que la resistencia a compresión en los morteros empezó a distinguirse hasta los siete días de edad, pues hubo aumentos de más del 5% en los esfuerzos resistidos.

Los morteros con las más altas resistencia a compresión fueron los elaborados con arabinosa, dando incrementos respecto al mortero base correspondiente de 13.51% a los tres días, 9.27% a los siete días, 35.61% a los catorce días y finalmente un incremento de 15.12% a los 28 días de edad

IV.6 Fluidez en los morteros con derivados del nopal

En cuanto al ensayo para determinar la fluidez, se encontraron aumentos del 5.28% para los morteros con xilosa, el 10.17% para los adicionados con polvo de nopal y el 11.11 % para la mezcla con arabinosa, esto es respecto el diámetro base (mortero MC). En la Gráfica 7 se ven notoriamente los incrementos obtenidos en cada uno de los ensayos a las mezclas con aditivos. (Ver apéndice).



Gráfica 7 "Comparación de la fluidez en morteros"

Las características físicas de la mezcla, se ven afectadas con el uso de los aditivos propuestos, la consistencia, la fluidez y el fraguado se modifican.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 Conclusiones

El uso del nopal dentro de la industria de la construcción puede tener su aplicación como aditivo para la modificación de las propiedades mecánicas y físicas tanto en lechadas como en morteros.

- Mediante la espectroscopía infrarroja (IR) se comprobó la presencia de arabinosa y xilosa en el mucílago del nopal, de acuerdo a lo citado en la literatura.
- La resistencia a compresión en las lechadas cuando se utilizó la xilosa (X) como aditivo, dio como resultado incrementos a los, 3, 7, 14 y 28 días de aproximadamente 90%, 8%, 3% y 40%. respecto a la mezcla base (cemento Portland + agua).
- Al utilizar el polvo de nopal como aditivo se verifica que funciona como retardante, teniendo un fraguado inicial aproximadamente 30% más tarde que la mezcla base.
- El fraguado inicial para las mezclas de arabinosa y xilosa fue 20% aproximadamente después que la mezcla base.
- El uso de la arabinosa, polvo de nopal y xilosa adicionados al 5%, actúan como retardantes.
- Con todos los aditivos derivados del nopal las lechadas tienen mejor trabajabilidad en el momento del mezclado.
- La resistencia a compresión en los morteros utilizando arabinosa, dio incrementos respecto al mortero base (cemento Portland+arena+agua) de aproximadamente 15%, 10%, 35% y 15%, a las edades de 3, 7, 14 y 28 días.

- La fluidez en los morteros al utilizar la arabinosa incrementa en un 10% respecto a la mezcla de mortero base, el polvo de nopal aumenta en 10% y la xilosa solamente en un 5%.

Resumiendo: se comprobó que dentro de los componentes del nopal, se encuentran sustancias que pueden ser utilizadas como aditivos derivados de éste, tal es el caso de la arabinosa y la xilosa. Estos aditivos aumentan la resistencia a compresión, mejoran la fluidez y actúan como retardantes en el fraguado.

V.2 Discusión de conclusiones

En cuanto al uso del nopal como materia prima para la obtención de los aditivos, aún hay puntos clave que debemos tomar en cuenta, como el análisis de costos para producir los aditivos, para ello considero necesario: ver los costos de producción, tiempos de cosecha y técnicas para la separación de los azúcares, etc. Es notorio que el cultivo de ésta cactácea se da en nuestro país según lo citado por Toledo (1987) y de acuerdo a las toneladas cosechadas (SAGARPA, 2007) es un buen recurso que puede ser utilizado para la obtención de los aditivos.

Si bien es cierto, que el uso del nopal se ha propagado desde épocas prehispánicas, también se ha visto que en la actualidad su uso es cada vez más diverso (Sáenz, 2006). Por ello, en la industria de la construcción al observar los resultados obtenidos por Chandra et. al. (1998), Luna (1999), Hernández (2003), Noriega (2005), Torres (2007), quienes afirman que el uso del mucílago de nopal aumenta la resistencia a compresión en morteros y concretos, tomando también en cuenta que el uso del nopal en contacto con el acero, inhibe la corrosión (Torres, 2007). Todas estas investigaciones llegaron a ser sugestivas para identificar la sustancia activa derivada del nopal que modificara las propiedades de lechadas y morteros.

Como se ha podido constatar a lo largo de esta investigación, se deduce que el uso de los aditivos como la arabinosa y xilosa tienen un comportamiento muy similar al uso del mucílago, los resultados de la consistencia de la pasta y el fraguado nos llevan a interpretar una relación en la cual se puede pensar que entre mayor sea la consistencia, mayor será el tiempo inicial de fraguado, esto es, tardará más la pasta en empezar su proceso de endurecimiento. Se cree que es debido a la reacción química ocurrida al adicionar cada sustancia, pues lo que se logra detectar, es que los aluminatos tricálcicos formados al hidratarse la pasta han sido afectados por los aditivos, esto es, retrasan la hidratación de los mismos.

Por otra parte, si relacionamos la fluidez con la resistencia a compresión en los morteros estudiados, encontramos que entre mayor es la fluidez, mayor la resistencia a compresión. Aquí se necesitan analizar la formación de silicatos hidratados de calcio que se producen al hidratar la pasta, ya que también habrá cierta influencia de los aditivos sobre esta reacción.

Analizando cada uno de los resultados en los diferentes ensayos efectuados, se distingue que el uso de la xilosa y arabinosa pueden explotarse aún más, pues los esfuerzos alcanzados a los 28 días indican que hay posibilidades de incrementar la resistencia a compresión, hacer más fluida la mezcla o retrasar el fraguado. Otro de los aspectos a analizar son los esfuerzos a compresión, ya que se obtuvieron resultados mayores a los tres días y a los siete días bajan las resistencias, esto se debe a la presencia de silicatos tricálcicos, que son los que ayudan a obtener resistencias mayores a corto plazo.

V.3 Recomendaciones

De acuerdo con todos los datos alcanzados se recomienda seguir profundizando en el tema del nopal en la construcción; ya se ha dado un gran paso al intentar detectar las sustancias que son activas para incrementar la resistencia a compresión y la fluidez en las mezclas, pero continúa habiendo más material que necesita ser investigado. Por ejemplo:

- Identificar diferentes tipos de nopal que puedan ser procesados para obtener el polvo de éste o mucílago, analizando costos y cantidad de producto obtenido.
- Analizar las reacciones físico-químicas entre el cemento Portland y los aditivos.
- Analizar las reacciones físico-químicas entre el cemento Portland, la arena y el aditivo.
- Hacer distintas combinaciones de arabinosa y xilosa, para ver los efectos que produce su utilización.
- Realizar pruebas a compresión a probetas cúbicas después de los 28 días de edad.
- Someter a pruebas de durabilidad las probetas que fueron adicionadas con polvo de nopal y las diferentes sustancias.

BIBLIOGRAFÍA

APASCO Holcim. Febrero 2006. Manual Técnico de Construcción.

Apoyos y Servicios a la Comercialización Agropecuaria (ASERCA) 2007. El reporte de precios diarios de hortalizas, observados en diferentes centrales de abastos.

Arizmendi Cotero, D. Domínguez López, A. 2008. "Optimización de dos compuestos plastificantes (glicerol y polietilenglicol) en la elaboración de una película plástica comestible obtenida a partir del mucílago de nopal de la especie *Opuntia tomentosa* Salm-Dyck" XXXII Premio Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos.

Cárdenas, A., Arguelles, M., Goycolea, F. 1998. "On the Possible Role of *Opuntia ficus-indica* Mucilage in Lime Mortar Performance in the Protection of Historical Buildings." *Journal of Professional Association for Cactus Development*. Vol. 5. pp. 17-29

Carey, Francis A. 1999. *Química Orgánica*. (3^{er} edición) McGraw-Hill.

Cement and Concrete Terminology - SP-19(00) / ACI (American Concrete Institute) 116R-00 (Reapproved 2005)

Cerda, Adrián. Abril 2004. "El nopal salva la ganadería.... en África." *Journal Contenido*. Issue 490 pp. 106-107

Comisión Coordinadora para el Desarrollo Agrícola y Ganadero del Estado de México (CODAGEM), 1982. "Cultivo, explotación y aprovechamiento del nopal en el Estado de México.", folleto informativo núm. 12, México.

Chandra S., Eklund L. and Villarreal R. R., Noviembre de 1998, "Use of cactus in mortars and concrete.", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 1, USA. pp. 41-51

Fuentes Rodríguez, J. M., Rosquero, P. E., Suárez García, L., López González, J. J., Torres Hernández, M., Murillo Soto, M. E., Ortiz De la Rosa, R. 2003. "Determinación de minerales en nopal forrajero (*Opuntia* spp.)." *Memoria IX Congreso Nacional, VII Congreso Internacional, Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal*, Zacatecas, México. pp.49-53

Goycolea, F., Cárdenas A. 2003. "Pectins from *Opuntia* spp:." A short Review. *Journal of Professional Association for Cactus Development*. Vol. 5. pp. 17-29

Granados Sánchez, D. y Castañeda Pérez, A. D. Septiembre de 1997. *El nopal*. (2^a ed), Ed. Trillas, México.

- Hernández Padrón, Genoveva. 2005. "Interpretación de espectros de infrarrojo: Un manual introductorio" Universidad Nacional Autónoma de México, campus Juriquilla.
- Hernández Zaragoza, J. B. Julio de 2000. Uso de concretos y morteros fibratados en la industria de la construcción. Cuaderno de trabajo, Sistema de Investigación Miguel Hidalgo, México. pp. 286-289
- Hernández Zaragoza, J. B. y Serrano Gutiérrez G. R. 2003. "Uso del nopal en la industria de la construcción." Memoria IX Congreso Nacional, VII Congreso Internacional, Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Zacatecas, México. pp. 286-289
- Hernández Zaragoza, J. B., Caballero Badillo, C. E., Rosas Juárez, A., López Lara, T., Hinojosa Torres, J., Castaño, V. M. 2007. "Modification of Portland Cement Mortars with Cactus Gum." Chemistry and Chemical Technology. Vol. 1 No. 3. pp. 175-177
- Hernández Zaragoza, J. B., Coronado Márquez, A., Noriega Montes, J., López Lara, T., Horta Rangel, J. 2007. "Aditivos derivados de cactáceas para morteros y concretos hidráulicos en la construcción." Extensión Nuevos Tiempos. Año 1. No. 4. pp. 11-13
- Hernández Zaragoza, J. B. Coronado Márquez, A., López Lara, T., Horta Rangel, J. 2008. Propiedades mecánicas del nopal-cemento. 4^{to}. Congreso Internacional de Ingeniería, Querétaro, México.
- Hernández Zaragoza, J. B., Coronado Márquez, A., López Lara T., Horta Rangel J. Septiembre 2008. "Mortar improvement using nopal additive." Journal of Professional Association for Cactus Development. Vol. 10. pp. 120-125
- Hernández Zaragoza, J. B., Coronado Márquez, A., López Lara, T., Horta Rangel J. Septiembre 2008. "Mejoramiento de morteros a través de nopal." Journal of Professional Association for Cactus Development. Vol. 10. pp. 126-131
- Hernández Zaragoza, J. B., Coronado Márquez A., López Lara T., Horta Rangel, J. 2008. "Mejoramiento de las propiedades mecánicas de lechadas mediante derivados del nopal". Extensión Nuevos Tiempos. Año 2. No. 10. pp. 38-40
- Instituto Nacional de Ecología. 1994. Folleto informativo Nopal verdura. 1^a ed. México, D. F.
- Instituto Nacional de Estadística Geográfica e Informática (INEGI) II Censo de Población y Vivienda 2005.
- Jones Edwin, Childers Richard. 2001. Física Contemporánea. (3^{er} edición) McGraw-Hill.

- Juárez, C., Rodríguez, P., Rivera R., Rechy M. A. 2003. "Uso de las fibras naturales de lechuguilla como refuerzo en el concreto." *Ciencia UANL*. Vol. VI. No. 4. pp. 465-476
- Juárez, C., Durán, A., Valdez, P., Fajardo. G. Diciembre de 2005. "Performance of "Agave lechuguilla" natural fiber in portland cement composites exposed to sever environments conditions." *Building and environment*. Vol. 42 pp. 1151-1157
- Larios Medrano, I. y Parra Rodríguez, F. J. 2003. "Elaboración de nopal liofilizado." Memoria IX Congreso Nacional, VII Congreso Internacional, Conocimiento y Aprovechamiento del Nopal, Zacatecas, México. pp. 303-306
- Luna González, Juan. 1999. "Uso del mucílago de nopal en la elaboración de morteros." Tesis de licenciatura en Ingeniería Civil (Director M en I. Juan Bosco Hernández Zaragoza) Universidad Autónoma de Querétaro.
- Medina Torres, L. Brito De La Fuente, E. Torrestiana Sánchez B. y Katthain, R. 2000. "Rheological properties of the mucilage gum (*Opuntia ficus indica*)." *Food Hydrocolloids*. No. 14. Pp. 417-424
- Middendorf, B., Hughes, J. J., Callebaut, K., Baronio, G., Papayianni I., Octubre 2005. "Investigative methods for the characterization of historic mortars.- Part 1: Mineralogical characterization." *Material and Structures*. No. 38. pp. 761-769
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-021-ONNCCE-2004 "Cemento para albañilería (mortero), especificaciones y métodos de prueba."
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-057-ONNCCE-1997 "Determinación de la consistencia normal."
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-059-ONNCCE-1997 "Determinación del tiempo de fraguado de cementantes hidráulicos (método de Vicat)."
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-061-ONNCCE-2001 "Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos."
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-085-ONNCCE-2002 "Método estándar para el mezclado de pastas y morteros de cementantes hidráulicos."
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-111-ONNCCE-2004 "Agregados para concreto hidráulico – Especificaciones y métodos de prueba."
- Norma Oficial Mexicana NMX-C-144-ONNCCE-2002 "Requisitos para el aparato usado en la determinación de la fluidez de morteros con cementantes hidráulicos."

- Neville M., Adam. 1999. Tecnología del concreto. IMCyC, México.
- Noriega Montes, J. 2005. "Aprovechamiento del nopal en cemento Pórtland." 1^{er} Congreso Internacional de Ingeniería, Querétaro, México.
- Oliveira Mario, Sawitzki Roberto Luiz, Fonseca, Tatiana. Mayo de 2005. "A seiva de cactus como aditivo de argamassas antigas." VI Simpósio Brasileiro de Tecnología de Argamassas. Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.
- Ramírez De Alba, H., Pérez Campos, R., Díaz Coutiño, H. Noviembre de 1999. "El cemento y el concreto de los mayas." Ciencia Ergo Sum. Vol. 6, No. 3, pp. 275-284
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. (SAGARPA). 2007. Avances de siembras y cosechas.
- Sáenz, Carmen, Berger, Horts, Corrales García, Joel. 2006. Utilización agroindustrial del nopal. Boletín de Servicios Agrícolas de la FAO 162. Roma, Italia.
- Sepúlveda E., Sáenz C., Aliaga E., Aceituno C. Marzo 2007. "Extraction and characterization of mucilage in Opuntia spp." Journal of Arid Enviroments. Vol. 68. Issue 4. pp. 534-545
- Sepúlveda Velásquez, L. Marzo de 2002. "Los nuevos materiales de construcción no se utilizan de forma conveniente." Gaceta Universitaria. Universidad de Guadalajara, México. pp 10
- Toledo Rizzini, Carlos. Abril 1987. "Cactáceas os segredos da sobrevivência." Ciencia Hoje. Vol. 5. No. 30. pp. 30-41
- Torres Acosta, A. Octubre 2007. "Las bondades del nopal." Revista Construcción y Tecnología. IMCyC
- Torres Acosta, A. Mayo de 2007. "Opuntia-Ficus-Indica (Nopal) mucilage as a steel corrosion inhibitor in alkaline media." Journal of Applied Electrochemistry Vol. 37. pp. 835-841
- Torres Acosta, A. 2007. "Physical properties of cement-based paste or mortar whit cacti additions." Aceptado en Journal of ACI.

APÉNDICE

Consistencia de la pasta C Cemento Portland-Agua

Nomenclatura	Penetración de la barra mm	Promedio mm
C	2	3
	2	
	3	
	5	

Consistencia de la pasta A Cemento Portland-Arabinosa-Agua

Nomenclatura	Penetración de la barra mm	Promedio mm
A	2	4
	3	
	4	
	6	

Consistencia de la pasta N Cemento Portland-Arabinosa-Agua

Nomenclatura	Penetración de la barra mm	Promedio mm
N	6	8
	8	
	9	
	9	

Consistencia de la pasta X Cemento Portland-Xilosa-Agua

Nomenclatura	Penetración de la barra mm	Promedio mm
X	3	4
	4	
	4	
	5	

Fluidez Mezcla MC Cemento Portland-Arena-Agua

Fluidez Mezcla MA Cemento Portland-Arena-Arabinosa-Agua

Fluidez Mezcla MN Cemento Portland-Arena-Polvo de nopal-Agua

Fluidez Mezcla MX Cemento Portland-Arena-Xilosa-Agua

Diámetro (cm)			
MC	MA	MN	MX
17.10	20.50	19.30	18.40
19.10	20.20	20.20	18.90
17.50	19.50	19.50	18.90
18.50	20.10	20.30	19.60
Promedios			
18.05	20.08	19.83	18.95

Fraguado Mezcla C Cemento Portland-Agua

Fraguado Mezcla A Cemento Portland-Arabinosa-Agua

Fraguado Mezcla N Cemento Portland-Polvo de nopal-Agua

Fraguado Mezcla X Cemento Portland-Xilosa-Agua

Fraguado

Inicial

Final

Tiempo (min)	Penetración de la aguja (mm)			
	Cemento (C)	Arabinosa (A)	Nopal (N)	Xilosa (X)
0	0	0	0	0
15	0	0	0	0
30	0	0	0	0
45	0	1	0	0
60	1	1	1	0
75	1	1	1	0
90	2	1	2	0
105	2	1	2	0
120	2	1	2	1
135	2	1	2	1
150	2	1	2	1
165	2	1	2	1
180	2	2	2	1
195	3	2	2	1
210	3	2	2	1
225	4	2	2	1
240	6	3	2	1
255	10	3	2	1
270	10	3	2	1
285	12	3	2	2
300	17	4	2	2
315	20	14	3	2
330	26	17	5	7
345	30	23	7	9
360	40	23	13	15
375	40	23	13	23
390	45	25	14	26
405		40	22	32
420		40	22	33
435		43	26	33
450		45	27	33
465			30	34
480			37	34
495			45	35

Mezcla C1 Cemento Portland-Agua**Resistencia a compresión 3 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
C1 a	4.79	4.85	23.47	5200	221.52
	5.01				
	4.57				
	5.01				
C1 b	5.13	5.08	25.81	5400	209.25
	5.06				
	5.12				
	5.01				
C1 c	5.13	5.10	26.01	5300	203.77
	5.08				
	5.08				
	5.11				
	Promedio	5.01	25.10	5300	211.18

Mezcla C2 Cemento Portland-Agua**Resistencia a compresión 7 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
C2 a	4.97	5.08	25.76	9400	364.97
	5.15				
	5.04				
	5.14				
C2 b	5.08	5.10	26.04	6650	255.42
	5.13				
	5.08				
	5.12				
C2 c	5.14	5.13	26.32	10150	385.68
	5.08				
	5.19				
	5.11				
	Promedio	5.10	26.04	8733	335.43

Mezcla C3 Cemento Portland-Agua**Resistencia a compresión 14 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
C3 a	5.00	5.01	25.13	9100	362.19
	5.02				
	5.02				
	5.01				
C3 b	5.00	5.00	25.00	12100	484.00
	5.00				
	5.00				
	5.00				
C3 c	5.02	5.01	25.10	11000	438.25
	5.02				
	5.00				
	5.00				
	Promedio	5.01	25.08	10733	428.05

Mezcla C4 Cemento Portland-Agua**Resistencia a compresión 28 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
C4 a	5.01	5.00	25.00	10400	416.00
	5.00				
	4.99				
	5.00				
C4 b	4.98	4.99	24.90	10900	437.75
	5.01				
	4.98				
	4.99				
C4 c	5.00	5.00	25.00	12250	490.00
	4.99				
	5.00				
	5.01				
	Promedio	5.00	24.97	11183	447.93

Mezcla A1 Cemento Portland-Arabinosa-Agua**Resistencia a compresión 3 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
A1 a	5.01	5.00	25.00	9650	386.00
	4.97				
	5.01				
	5.01				
A1 b	5.01	5.00	25.03	8850	353.65
	5.00				
	5.00				
	5.00				
A1 c	5.01	5.01	25.10	9000	358.56
	5.01				
	5.02				
	5.00				
	Promedio	5.00	25.01	9250	369.82

Mezcla A2 Cemento Portland-Arabinosa-Agua**Resistencia a compresión 7 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
A2 a	4.99	5.00	24.95	7700	308.62
	5.01				
	4.97				
	5.01				
A2 b	5.02	5.02	25.15	9900	393.63
	5.01				
	5.01				
	5.02				
A2 c	5.02	5.01	25.08	6700	267.20
	5.00				
	5.01				
	5.00				
	Promedio	5.01	25.06	8100	323.24

Mezcla A3 Cemento Portland-Arabinosa-Agua**Resistencia a compresión 14 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
A3 a	4.97	4.97	24.70	9500	384.60
	4.96				
	4.99				
	4.96				
A3 b	4.99	4.98	24.75	12750	515.14
	4.97				
	4.97				
	4.97				
A3 c	5.00	4.99	24.93	10950	439.32
	4.98				
	4.97				
	5.02				
	Promedio	4.98	24.79	11067	446.38

Mezcla A4 Cemento Portland-Arabinosa-Agua**Resistencia a compresión 28 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
A4 a	5.09	5.05	25.53	12750	499.46
	5.01				
	5.08				
	5.03				
A4 b	5.08	5.06	25.58	12550	490.65
	5.06				
	5.08				
	5.01				
A4 c	5.10	5.07	25.65	12800	498.94
	5.03				
	5.10				
	5.03				
	Promedio	5.06	25.59	12700	496.35

Mezcla N1 Cemento Portland-Polvo de nopal-Agua**Resistencia a compresión 3 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
N1 a	5.10	5.08	25.76	9650	374.68
	5.10				
	5.00				
	5.10				
N1 b	5.20	5.15	26.52	8900	335.56
	5.10				
	5.10				
	5.20				
N1 c	5.00	5.10	26.01	9900	380.62
	5.20				
	5.20				
	5.00				
	Promedio	5.11	26.10	9483	363.40

Mezcla N2 Cemento Portland-Polvo de nopal-Agua**Resistencia a compresión 7 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
N2 a	4.99	5.06	25.60	11400	445.25
	5.11				
	5.01				
	5.13				
N2 b	5.07	5.09	25.93	12650	487.79
	5.11				
	5.08				
	5.11				
N2 c	5.15	5.11	26.11	12000	459.56
	5.09				
	5.13				
	5.07				
	Promedio	5.09	25.88	12017	464.27

Mezcla N3 Cemento Portland-Polvo de nopal-Agua**Resistencia a compresión 14 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
N3 a	4.95	5.06	25.55	13700	536.14
	5.13				
	5.01				
	5.13				
N3 b	5.12	5.10	25.98	13650	525.31
	5.07				
	5.12				
	5.08				
N3 c	5.13	5.12	26.21	13450	513.08
	5.12				
	5.11				
	5.12				
	Promedio	5.09	25.92	13600	524.75

Mezcla N4 Cemento Portland-Polvo de nopal-Agua**Resistencia a compresión 28 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
N4 a	5.17	5.10	25.96	15900	612.50
	5.03				
	5.16				
	5.02				
N4 b	5.17	5.10	25.98	13650	525.31
	5.05				
	5.17				
	5.00				
N4 c	5.00	5.09	25.93	16550	638.17
	5.18				
	5.01				
	5.18				
	Promedio	5.10	25.96	15367	591.96

Mezcla X1 Cemento Portland-Xilosa-Agua**Resistencia a compresión 3 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
X1 a	5.00	4.99	24.92	10150	407.26
	4.98				
	4.99				
	5.00				
X1 b	5.03	5.01	25.15	9900	393.71
	5.01				
	5.02				
	5.00				
X1 c	5.00	5.00	24.97	9700	388.54
	5.01				
	4.98				
	4.99				
	Promedio	5.00	25.01	9917	396.49

Mezcla X2 Cemento Portland-Xilosa-Agua**Resistencia a compresión 7 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
X2 a	5.08	5.06	25.62	8850	345.48
	5.03				
	5.08				
	5.05				
X2 b	5.07	5.04	25.40	8600	338.63
	5.01				
	5.04				
	5.04				
X2 c	5.04	5.05	25.52	10350	405.64
	5.07				
	5.02				
	5.07				
	Promedio	5.05	25.51	9267	363.27

Mezcla X3 Cemento Portland-Xilosa-Agua**Resistencia a compresión 14 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
X3 a	4.99	5.04	25.38	9800	386.19
	5.10				
	4.99				
	5.07				
X3 b	4.99	5.05	25.45	11800	463.62
	5.11				
	4.98				
	5.10				
X3 c	5.11	5.05	25.53	12200	477.91
	5.01				
	5.08				
	5.01				
	Promedio	5.05	25.45	11267	442.66

Mezcla X4 Cemento Portland-Xilosa-Agua**Resistencia a compresión 28 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
X4 a	5.00	5.03	25.28	17400	688.41
	5.08				
	5.03				
	5.00				
X4 b	5.00	5.03	25.30	15900	628.44
	5.03				
	5.05				
	5.04				
X4 c	5.03	5.04	25.40	13800	543.27
	5.04				
	5.05				
	5.04				
	Promedio	5.03	25.33	15700	619.91

Mezcla MC1 Cemento Portland-Arena-Agua**Resistencia a compresión 3 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MC1 a	5.04	5.02	25.23	3700	146.68
	4.98				
	5.05				
	5.02				
MC1 b	5.01	5.03	25.25	3600	142.57
	5.01				
	5.04				
	5.04				
MC1 c	5.05	5.02	25.23	3800	150.64
	5.00				
	5.03				
	5.01				
	Promedio	5.02	25.24	3650	144.62

Mezcla MC2 Cemento Portland-Arena-Agua**Resistencia a compresión 7 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MC2 a	5.01	5.02	25.18	4500	178.75
	5.02				
	5.02				
	5.02				
MC2 b	5.02	5.02	25.15	4150	165.01
	5.01				
	5.02				
	5.01				
MC2 c	5.00	4.99	24.88	4000	160.80
	4.99				
	4.96				
	5.00				
	Promedio	5.01	25.07	4217	168.22

Mezcla MC3 Cemento Portland-Arena-Agua**Resistencia a compresión 14 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MC3 a	4.97	5.00	25.00	4750	190.00
	5.00				
	5.03				
	5.00				
MC3 b	5.00	5.00	24.98	4850	194.19
	4.98				
	4.99				
	5.02				
MC3 c	5.01	5.01	25.08	4850	193.42
	5.02				
	5.00				
	5.00				
	Promedio	5.00	25.02	4817	192.54

Mezcla MC4 Cemento Portland-Arena-Agua**Resistencia a compresión 28 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MC4 a	5.04	5.07	25.73	6600	256.51
	5.10				
	5.05				
	5.10				
MC4 b	5.04	5.07	25.70	5850	227.58
	5.10				
	5.04				
	5.10				
MC4 c	5.10	5.08	25.81	5450	211.19
	5.05				
	5.12				
	5.05				
	Promedio	5.07	25.75	5967	231.74

Mezcla MA1 Cemento Portland-Arena-Arabinosa-Agua**Resistencia a compresión 3 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MA1 a	4.99	5.00	25.00	4150	166.00
	5.00				
	5.00				
	5.01				
MA1 b	4.98	5.00	24.95	4050	162.32
	5.00				
	5.01				
	4.99				
MA1 c	5.01	5.00	25.03	4150	165.83
	5.00				
	4.97				
	5.03				
	Promedio	5.00	24.98	4100	164.16

Mezcla MA2 Cemento Portland-Arena-Arabinosa-Agua**Resistencia a compresión 7 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MA2 a	5.00	5.01	25.05	4350	173.65
	5.01				
	5.00				
	5.01				
MA2 b	4.99	5.00	25.00	4650	186.00
	5.01				
	5.00				
	5.00				
MA2 c	5.00	5.00	25.03	4800	191.81
	5.00				
	5.01				
	5.00				
	Promedio	5.00	25.03	4600	183.82

Mezcla MA3 Cemento Portland-Arena-Arabinosa-Agua**Resistencia a compresión 14 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MA3 a	5.01	5.01	25.13	6650	264.67
	5.02				
	5.01				
	5.01				
MA3 b	5.03	5.02	25.15	6200	246.52
	5.00				
	5.02				
	5.01				
M3 c	5.01	5.02	25.18	6850	272.09
	5.02				
	5.02				
	5.02				
Promedio		5.02	25.15	6567	261.10

Mezcla MA4 Cemento Portland-Arena-Arabinosa-Agua**Resistencia a compresión 28 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MA4 a	5.10	5.07	25.70	6600	256.76
	5.04				
	5.10				
	5.04				
MA4 b	5.10	5.08	25.76	7000	271.79
	5.04				
	5.11				
	5.05				
MA4 c	5.09	5.08	25.76	7000	271.79
	5.05				
	5.09				
	5.07				
Promedio		5.07	25.74	6867	266.78

Mezcla MN1 Cemento Portland-Arena-Polvo de nopal-Agua**Resistencia a compresión 3 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MN1 a	5.03	5.02	25.23	3700	146.68
	5.03				
	5.02				
	5.01				
MN1 b	5.02	5.01	25.13	3450	137.31
	5.01				
	5.01				
	5.01				
MN1 c	5.09	5.03	25.28	3300	130.56
	5.00				
	5.03				
	4.99				
	Promedio	5.02	25.18	3483	138.36

Mezcla MN2 Cemento Portland-Arena-Polvo de nopal-Agua**Resistencia a compresión 7 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MN2 a	5.00	4.98	24.78	4200	169.52
	5.00				
	5.03				
	4.88				
MN2 b	5.02	5.00	25.00	4850	194.00
	4.99				
	4.99				
	5.00				
MN2 c	5.00	5.00	24.95	4200	168.34
	4.95				
	5.01				
	5.02				
	Promedio	4.99	24.91	4417	177.32

Mezcla MN3 Cemento Portland-Arena-Polvo de nopal-Agua**Resistencia a compresión 14 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm²
MN3 a	4.98	5.00	25.03	5400	215.78
	5.01				
	5.02				
	5.00				
MN3 b	5.00	4.99	24.93	5100	204.61
	5.00				
	5.00				
	4.97				
MN3 c	5.01	5.02	25.20	5600	222.22
	5.01				
	5.01				
	5.05				
	Promedio	5.01	25.05	5367	214.24

Mezcla MN4 Cemento Portland-Arena-Polvo de nopal-Agua**Resistencia a compresión 28 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm²
MN4 a	5.02	5.09	25.91	6300	243.17
	5.16				
	5.01				
	5.17				
MN4 b	5.01	5.07	25.65	6100	237.78
	5.16				
	4.98				
	5.11				
MN4 c	5.18	5.08	25.83	7050	272.92
	4.99				
	5.16				
	5.00				
	Promedio	5.08	25.80	6483	251.31

Mezcla MX1 Cemento Portland-Arena-Xilosa-Agua**Resistencia a compresión 3 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MX1 a	5.01	5.00	24.95	3000	120.24
	5.00				
	5.00				
	4.97				
MX1 b	5.02	5.01	25.08	3100	123.63
	5.01				
	5.01				
	4.99				
MX1 c	5.00	5.02	25.20	3250	128.97
	5.02				
	5.01				
	5.05				
	Promedio	5.01	25.01	3117	124.60

Mezcla MX2 Cemento Portland-Arena-Xilosa-Agua**Resistencia a compresión 7 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MX2 a	5.01	5.02	25.18	4750	188.68
	5.01				
	5.01				
	5.04				
MX2 b	5.02	5.03	25.25	5050	200.00
	5.04				
	5.02				
	5.02				
MX2 c	4.98	5.02	25.23	4950	196.23
	5.02				
	5.02				
	5.07				
	Promedio	5.02	25.22	4917	194.97

Mezcla MX3 Cemento Portland-Arena-Xilosa-Agua**Resistencia a compresión 14 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MX3 a	5.00	5.01	25.05	6300	251.50
	5.01				
	5.02				
	4.99				
MX3 b	5.00	5.01	25.05	6750	269.46
	5.01				
	5.00				
	5.01				
MX3 c	5.02	5.03	25.25	6100	241.58
	5.05				
	5.02				
	5.01				
	Promedio	5.01	25.12	6383	254.15

Mezcla MX4 Cemento Portland-Arena-Xilosa-Agua**Resistencia a compresión 28 días**

Nomenclatura	Dimensiones cm	Promedio cm	Área cm ²	Carga kg	Esfuerzo kg/cm ²
MX4 a	5.14	5.08	25.76	5850	227.13
	5.00				
	5.14				
	5.02				
MX4 b	4.99	5.08	25.81	6150	238.31
	5.16				
	5.00				
	5.17				
MX4 c	5.02	5.09	25.93	6150	237.14
	5.17				
	5.00				
	5.18				
	Promedio	5.08	25.83	6050	234.21