
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN PARA EL DESARROLLO INTEGRAL
REGIONAL UNIDAD OAXACA**



**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS
NATURALES
Especialidad en Ingeniería de Procesos**

T E S I S

**“PROPIEDADES MECÁNICAS Y MICROESTRUCTURA DE CONCRETO
CONTENIENDO MUCÍLAGO DE NOPAL COMO ADITIVO NATURAL”.**

Para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS

Presenta:

SAMUEL RAMÍREZ ARELLANES

DIRECTORES DE TESIS:

DR. PRISCILIANO FELIPE DE JESÚS CANO BARRITA

DR. CARLOS GÓMEZ YÁÑEZ

Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca. Julio de 2008.



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 11 del mes de junio del 2008 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA) para examinar la tesis de grado titulada: Propiedades mecánicas y microestructura de concreto conteniendo mucilago de nopal como aditivo natural




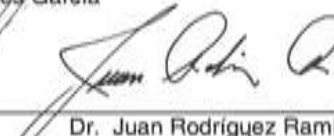
Presentada por el alumno:

Ramírez Apellido paterno	Arellanes materno	Samuel nombre(s)							
Con registro: <table border="1"><tr><td>A</td><td>0</td><td>6</td><td>0</td><td>1</td><td>6</td><td>9</td></tr></table>			A	0	6	0	1	6	9
A	0	6	0	1	6	9			

aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA Directores de tesis

 _____ Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita	 _____ Dr. Carlos Gómez Yáñez
 _____ Dr. Pedro Montes García	 _____ Dr. Andrés Pech Pérez
 _____ Dr. Juan Rodríguez Ramírez	
 _____ Dra. María del Rosario Arnaud Viñas	

LA PRESIDENTA DEL COLEGIO



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
CIIDIR-UNIDAD OAXACA



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESION DE DERECHOS

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día 11 del mes junio del año 2008, el (la) que suscribe **Ramírez Arellanes Samuel** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **A060169**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del : **Dr. Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita** y **Dr. Carlos Gómez Yáñez** y cede los derechos del trabajo titulado: "**Propiedades mecánicas y microestructura de concreto conteniendo mucilago de nopal como aditivo natural**", al **Instituto Politécnico Nacional** para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: posgradoax@ipn.mx ó sraforever_1881@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

RAMÍREZ-ARELLANES SAMUEL



INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL
CENTRO UNIDAD OAXACA

R E S U M E N

En este trabajo se evaluó la influencia del mucílago de nopal en la microestructura de pastas de cemento, así como la resistencia a la compresión y módulo de elasticidad en cilindros de concreto a diferentes edades. Los materiales utilizados fueron cemento portland blanco y mucílago de nopal (*opuntia ficus indica*). Los especímenes de pastas con relación agua/cemento (a/c) y mucílago/cemento (m/c) de 0.30, 0.45, y 0.60 se elaboraron de acuerdo a la norma ASTM C 305-99. Se midieron los tiempos de fraguado y extensibilidad utilizando las agujas de Vicat y mesa de fluidez, respectivamente. Los especímenes fueron caracterizados por medio de microscopia electrónica de barrido (MEB), difracción de rayos X (DRX) y espectroscopia infrarroja (IR). Las mezclas de concreto se diseñaron con relaciones a/c y m/c de 0.30, 0.45 y 0.60. En las mezclas de concreto se determinó su resistencia a la compresión y módulo de elasticidad. Los resultados de difracción de rayos X permitieron identificar las fases mineralógicas producidas por la hidratación del cemento, donde claramente se ve la influencia del mucílago de nopal en la hidratación. De acuerdo a los resultados de los difractogramas, la intensidad de los picos en las pastas conteniendo mucilago de nopal es mayor que las pastas conteniendo solo agua, indicando que el mucílago actúa como retardante de fraguado. En las imágenes de microscopio electrónico de barrido se observan las fases cristalinas y/o compuestos de las pastas que se originan al reaccionar el agua y mucílago con el cemento. Además, en el caso de pastas que contenían mucílago no se aprecian los cristales de CH en los compuestos originados por la reacción. Con relación a la resistencia a compresión axial y el módulo de elasticidad, se observó que los concretos con relación m/c de 0.45 y 0.60 desarrollan una menor resistencia que los concretos conteniendo solo agua. Estos resultados adversos pueden ser explicados en parte por el mayor contenido de aire en las mezclas conteniendo mucilago. Por el contrario, en el concreto con relación m/c de 0.30 el mucílago contribuye a incrementar la resistencia mecánica. Los resultados de tiempos de fraguado indican que el mucilago los incrementa hasta en un 100% con respecto las pastas que contienen solo agua. La extensibilidad de las pastas muestra que el mucílago actúa también como un agente viscoso.

A B S T R A C T

In this study the influence of cactus mucilage on the microstructure of cement pastes, and the compressive strength and modulus of elasticity of concrete specimens at different ages was evaluated. The materials used were white Portland cement and cactus mucilage (*Opuntia ficus indica*). Cement paste specimens with water/cement (w/c) and mucilage/cement (m/c) ratio of 0.30, 0.45, and 0.60 were prepared according to ASTM Standard C 305-99. The setting time and extensibility of the pastes were measured using the Vicat needle and the flow table, respectively. Scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (DRX) and infrared spectroscopy (IR) techniques were used to characterize the microstructure of the pastes. The concrete mixtures were designed with w/c and m/c ratios of 0.30, 0.45 and 0.60. The compressive strength and the modulus of elasticity was determined for the concrete mixtures. The X-ray diffraction results showed the mineralogical phases produced by hydration of cement, which clearly indicated the influence of the cactus mucilage. According to the X-ray diffraction results, the intensity of the peaks in pastes containing cactus mucilage is higher than the peaks obtained in pastes containing only water, which indicates that the mucilage acted as a set retarder. The scanning electron microscope images show the crystalline phases and/or paste compounds originated by the reaction of water and mucilage with the cement. Moreover, the calcium hydroxide crystals are not observed in the hydration products of pastes containing cactus mucilage. With respect to the compressive strength and modulus of elasticity, it was observed that the concrete specimens with m/c ratio of 0.45 and 0.60 develop a lower strength compared to those containing only water. These adverse results could be in part explained by the increased air content in the mixes containing mucilage. On the other hand, for the concrete with m/c ratio of 0.30, the mucilage contributes to an increase in strength. The setting time results indicate that the mucilage increases up to 100% the initial and final setting time, compared to the pastes containing only water. The extensibility of pastes showed that the mucilage acts also as a viscosity enhancing additive.

D E D I C A T O R I A

A DIOS

Por permitirme cumplir una meta más en mi vida y de estar con los seres que más quiero en mi vida.

A MIS PADRES

Por el apoyo incondicional brindado y por estar siempre a mi lado para compartir momentos de felicidad y tristeza, MIL GRACIAS.

A MIS HERMANOS

Por su apoyo demostrado, por lo momentos de alegría y tristeza que hemos pasado juntos y siempre formando una familia unida.

A YAZMÍN DEL MAR

Por tu tiempo, paciencia, por que tan sólo necesite un minuto para fijarme en ti, una hora para que me gustaras, un día para quererte. Gracias por estar conmigo.

A G R A D E C I M I E N T O S

Al Dr. **Prisciliano Felipe de Jesús Cano Barrita**, por todo el apoyo incondicional, paciencia, amistad brindada y por compartir sus conocimientos.

Al Dr. **Carlos Gómez Yáñez**, por recibirme en mi estancia de investigación, apoyo, proveerme de material, equipo para mis estudios y por su amistad.

A mis profesores de seminario de investigación: Dr. J. Rodríguez, M.A. J. Caballero, por sus comentarios y críticas para mejorar el trabajo.

A mi comisión revisora: Dr. P. Montes, Dr. A. Pech, por sus comentarios y críticas para mejorar el trabajo.

A mis tíos en la Cd. de México, por acogerme y brindarme su apoyo durante mi estancia de investigación, mil gracias.

A mis compañeros del CIIDIR, Roberto, Sildia, Fernando, Jacobo, Anita, Susy, Laura, Carlos, Omar, Ohmar, Alejandro y demás por el apoyo, amistad brindada, compañía y por sus comentarios.

A mis compañeros de Metalurgia del IPN, Iván, Ernesto, Roberto, Jorge, Yolis, Antonio y Rigo, por su amistad y apoyo.

Al Instituto Politécnico Nacional y al CIIDIR Unidad Oaxaca, por el apoyo y por ser mi casa de estudios.

Al Departamento de laboratorios pesados de la ESIQIE-IPN, por permitirme utilizar todo su equipo y llevar a un buen fin este trabajo de investigación

A la Dra. Ángeles Hernández, por su apoyo en el estudio de IR.

Al IPN, por otorgarme la beca institucional para llevar a cabo mi estancia de investigación.

Al Consejo nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada durante los estudios de maestría.

Al Programa Institucional de Formación de Investigadores, por la beca otorgada a través del proyecto: Polímeros naturales y adiciones minerales para mejorar las propiedades mecánicas y de durabilidad de materiales basados en cementos, con clave: SIP 20060430 Y 20070157.

ÍNDICE

Resumen.....	iii
Abstract.....	iv
Dedicatorias.....	v
Agradecimientos.....	vi

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN..... 1

1.1	Introducción.....	1
1.2	Planteamiento del problema.....	2
1.3	Antecedentes.....	4
1.4	Justificación.....	7
1.5	Objetivos.....	8
1.5.1	General.....	8
1.5.2	Específicos.....	8
1.6	Hipótesis.....	8

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL..... 9

2.1	Concreto hidráulico.....	9
2.2	Cemento.....	9
2.3	Hidratación del cemento.....	11
2.4	Compuestos producidos en el proceso de hidratación.....	13
2.4.1	Alita.....	14
2.4.2	Belita.....	14
2.4.3	Aluminato de calcio.....	15
2.4.4	Ferroaluminato tetracálcico C4AF.....	15
2.4.5	Silicato Hidratado de Calcio (C-S-H).....	15
2.4.6	Portlandita (hidróxido de calcio).....	16
2.4.7	Sulfato de calcio.....	17
2.4.8	Granos de clinker no hidratados.....	17
2.4.9	Etringita (trisulfoaluminato de calcio).....	18
2.5	Microscopio electrónico de barrido.....	18
2.6	Difracción de rayos X.....	20

2.7	Espectroscopia infrarroja.....	22
2.8	Tiempo de fraguado.....	23
2.9	Fluidez	23
2.10	Relación agua/cemento.....	23
2.11	Aditivos químicos.....	24
2.12	Resistencia a la compresión.....	27
2.13	Módulo de elasticidad.....	28
2.14	Mucílago de nopal	30
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS		33
3.1	Obtención y caracterización de agregados pétreos.....	33
3.2	Extracción y caracterización del mucílago de nopal	34
3.3	Elaboración de pastas de cemento	35
3.3.1	Tiempo de fraguado.....	36
3.3.2	Fluidez	36
3.4	Diseño y elaboración de mezclas de concreto.....	37
3.5	Elaboración y curado de especímenes de concreto	38
3.6	Pruebas en estado fresco a las mezclas de concreto	39
3.7	Caracterización del concreto endurecido.....	39
3.7.1	Resistencia a la compresión axial.....	39
3.7.2	Módulo de elasticidad.....	40
3.7.3	Análisis de microestructura	40
3.7.4	Difracción de rayos X.....	42
3.7.5	Espectroscopía infrarroja.....	43
CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		45
4.1	Pruebas al mucilago.....	45
4.2	Viscosidad	45
4.3	Tiempo de fraguado.....	46
4.4	Fluidez	47
4.5	Resistencia a la compresión.....	48
4.6	Módulo de elasticidad.....	51
4.7	Análisis microestructural.....	53

4.8	Difracción de rayos X.....	58
4.9	Espectroscopía infrarroja.....	64
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		71
	BIBLIOGRAFÍA.....	73
	ANEXOS.....	78

Índice de figuras

Figura 1. Causas que producen problemas en la durabilidad del concreto.....	3
Figura 2. Causas de deterioro del concreto.	3
Figura 3. Hidratación de los granos de cemento	12
Figura 4. Hidratación e identificación de cristales en la pasta.	20
Figura 5. Hidratación y compuestos de la pasta hidratada	20
Figura 6. Esquematación de rayos X incidiendo en un cristal.....	21
Figura 7. Haces incidentes reflejados en un cristal de hierro	22
Figura 8. Gráfica esfuerzo-deformación unitaria.	29
Figura 9. Cactus de nopal.	31
Figura 10. Medición de la viscosidad.....	35
Figura 11. Llenado y enrasado.	36
Figura 12. Medición con Vicat.....	36
Figura 13. Mesa de golpeo.	37
Figura 14. Medición de extensibilidad.	37
Figura 15. Elaboración de las pastillas para MEB.....	41
Figura 16. Microscopio electrónico de barrido.	41
Figura 17. Cortadora de pastillas.....	41
Figura 18. Evaporadora de oro paladio.	42
Figura 19. DRX D8 Focus.....	42
Figura 20. Preparación en el portamuestras.....	42
Figura 21. Colocación en el DRX.	43
Figura 22. Obtención del difractograma.....	43
Figura 23. Equipo IR.	43
Figura 24. Pastillas para IR.	44
Figura 25. Espectro de KBr.	44
Figura 26. Viscosidad del Mucílago de Nopal con escalde (<i>Opuntia ficus-indica</i>) de 5 a 6 meses de edad con 48 hrs de maceración	46
Figura 27. Viscosidad del mucílago de nopal a diferentes edades	46
Figura 28. Tiempos de fraguado de las pastas a/c y m/c.	47
Figura 29. Prueba de Fluidez de las pastas a/c y m/c.	48
Figura 30. Resistencia a la compresión de concretos a/c y m/c 0.3	49
Figura 31. Resistencia concretos a/c y m/c 0.45.....	50
Figura 32. Resistencia concretos a/c y m/c 0.6.....	50
Figura 33. Módulo de elasticidad de los concretos a/c y m/c 0.3.....	52
Figura 34. Módulo de elasticidad de los concretos a/c y m/c 0.45.....	52
Figura 35. Módulo de elasticidad de los concretos a/c y m/c 0.6.....	53
Figura 36. Microanálisis del cemento blanco.	53
Figura 37. Fotos del MEB de cemento blanco.	54
Figura 38. Microfotografía de la pasta de a/c (a) y m/c (b) de la relación 0.3 a 28 días.	54
Figura 39. Microfotografía de la pasta de a/c (a) y m/c (b) de la relación 0.45 a 28 días.	55
Figura 40. Microfotografía de la pasta a/c (a) y m/c (b) de la relación 0.6 a 28 días.....	55
Figura 41. Microfotografía de la pasta a/c (a) con relación 0.6 y m/c (b) de la relación 0.45 a 56 días.....	56
Figura 42. Microfotografía de la pasta a/c (a) y m/c (b) de relación 0.3 a 120 días.....	56

Figura 43. Microfotografía de la pasta a/c (a) y m/c (b) de relación 0.45 a 120 días.....	57
Figura 44. Microfotografía de la pasta a/c (a) y m/c (b) de relación 0.6 a 120 días.....	57
Figura 45. DRX del cemento blanco.	58
Figura 46. DRX de las pastas a/c 0.3 a 3,7 y 28 días.	59
Figura 47. DRX de las pastas m/c 0.3 a 3, 7 y 28 días.	60
Figura 48. DRX de las pastas a/c 0.45 a 3, 7 y 28 días.	61
Figura 49. DRX de las pastas m/c 0.45 a 3, 7 y 28 días.	62
Figura 50. DRX de las pastas a/c 0.6 a 3, 7 y 28 días.	63
Figura 51. DRX de las pastas m/c 0.6 a 3, 7 y 28 días.	64
Figura 52. Espectro infrarrojo del mucílago en pastillas de KBr.	65
Figura 53. Espectro infrarrojo del cemento en pastillas de KBr.	66
Figura 54. Espectros infrarrojo de las pastas AC y MC registrados a diferentes tiempos después de la preparación: a: I, el mismo día, II un día, III dos días y IV tres días.	68
Figura 55. FTIR de las pastas a/c y m/c registrados: II) un día después de la preparación, y V) un mes después.....	70

Índice de tablas

Tabla 1. Composición típica del Cemento Portland tipo 1	10
Tabla 2. Ecuaciones para determinar el Módulo de Elasticidad del Concreto.	30
Tabla 3. Caracterización de los agregados pétreos.....	34
Tabla 4. Determinación de número de pastas de cemento.	36
Tabla 5. Cantidad de material a emplear para elaborar 1m ³ de concreto.	38
Tabla 6. Determinación del número de especímenes de concreto.....	38
Tabla 7. Resultados de pruebas de laboratorio al concreto en estado fresco.....	39
Tabla 8. % de volumen de poros de las mezclas de concreto a/c y m/c.....	51
Tabla 9. Asignación de bandas de vibración del espectro IR del cemento.	67

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

El concreto hidráulico es uno de los materiales de construcción más utilizados a nivel mundial debido a su versatilidad para adoptar prácticamente cualquier forma y además de su fabricación simple. Desde la aparición del concreto elaborado con cemento Portland (1824), este ha evolucionado con los avances tecnológicos para satisfacer las crecientes necesidades demandantes en la construcción, como el desarrollo de concretos especiales para aplicaciones específicas utilizando adiciones minerales y aditivos (Neville, 1992). Una selección inadecuada de materiales aunada a prácticas de construcción deficientes dan como resultado un concreto muy poroso y permeable, el cual permite la entrada de agentes agresivos presentes en el medio ambiente donde las estructuras se encuentran expuestas y causan su deterioro (Helene y Grochoski, 2005).

Por otra parte, los aditivos han sido componentes importantes e integrales del concreto, y se les ha utilizado para mejorar su comportamiento mecánico y físico. Se sabe que con frecuencia se aplicaba cemento mezclado con materia orgánica como capa superficial con el propósito de lograr resistencia contra el agua. Los materiales que se han usado como aditivos naturales incluyen leche y manteca por los romanos; huevos durante la edad media en Europa; una pasta glutinosa y pulida hecha de arroz, laca, melaza negra de gram (una variedad de garbanzo) y extractos de olmo empapados de agua y plátanos hervidos, por los chinos; y en Mesoamérica y Perú, jugo de cactus y látex de plantas de caucho. Los mayas también usaban extractos de corteza de raíces y otras sustancias como retardadores de fraguado para mantener el concreto trabajable durante un largo periodo de tiempo (IMCYC, 2002).

Entre los avances recientes en la tecnología del concreto, podemos mencionar el desarrollo de mezclas de concreto autoconsolidable (Okamura, 1997), con contenidos de agua relativamente bajos. Con la introducción de nuevos aditivos y materiales

suplementarios (naturales o industriales), se han obtenido concretos altamente trabajables, con mejores propiedades mecánicas y de durabilidad. Estos concretos han sido llamados concretos de alto comportamiento (HPC). Entre sus propiedades comprende el mejoramiento en la trabajabilidad y compactación evitando la segregación, mejorando a largo plazo las propiedades mecánicas, alta resistencia a edad temprana, estabilidad de volumen y vida útil de servicio en condiciones ambientales agresivas (Carino y Chipton, 1991).

En la presente investigación se evalúa el efecto del mucílago de nopal como aditivo natural en las propiedades mecánicas del concreto endurecido, así como los cambios microestructurales en pastas de cemento y concreto.

Este trabajo de investigación consta de cinco capítulos. El primer capítulo presenta el planteamiento del problema, el cual muestra al lector el problema en estudio, la justificación, los antecedentes sobre el uso de mucilago de nopal en cemento, los objetivos que se persiguen en la investigación, así como las hipótesis. En el capítulo dos se presentan los fundamentos teóricos, que sirven de sustento para el desarrollo de la investigación. En el capítulo tres se describe la metodología seguida durante el experimento y las variables que interviene en él. En el capítulo cuatro se presentan los resultados obtenidos y su discusión correspondiente. Por último se presentan las conclusiones de la investigación.

1.2 Planteamiento del problema

El concreto es uno de los materiales de mayor uso en la industria de la construcción, porque se le puede moldear en una gran variedad de formas, colores y texturas para ser utilizados en un número ilimitado de aplicaciones (Kosmatka, 2004).

Actualmente se fabrican concretos en los cuales existe una diversidad de los materiales y aditivos que se pueden utilizar para obtener un concreto que pueda soportar condiciones ambientales adversas. Algunos estudios realizados en los años de los 80 (Sanjuán, 2001) sobre las causas que producen problemas de durabilidad, se atribuye el

defecto en la calidad de los materiales en un 16.2%, siendo los errores de ejecución el 38.5% y más del 40% a errores de diseño y/o cálculo (Figura 1). Otros estudios realizados en los años 90 elevan al 30% la inadecuada selección de materiales que afectan su durabilidad. En la Figura 2, se pueden observar las principales causas de deterioro del concreto.

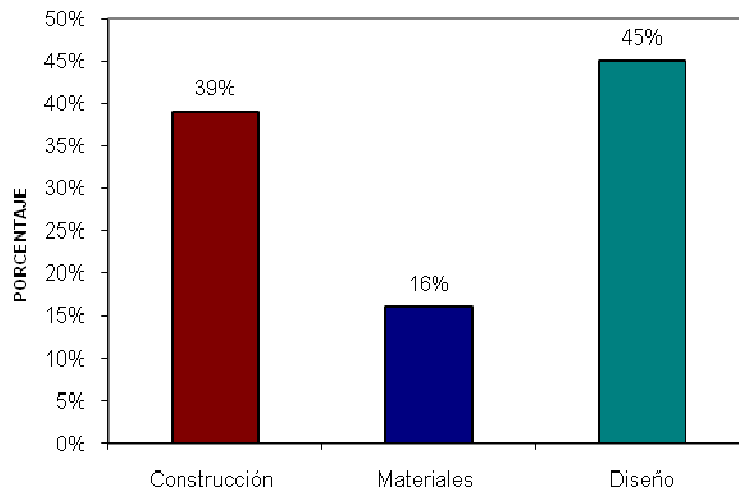


Figura 1. Causas que producen problemas en la durabilidad del concreto.

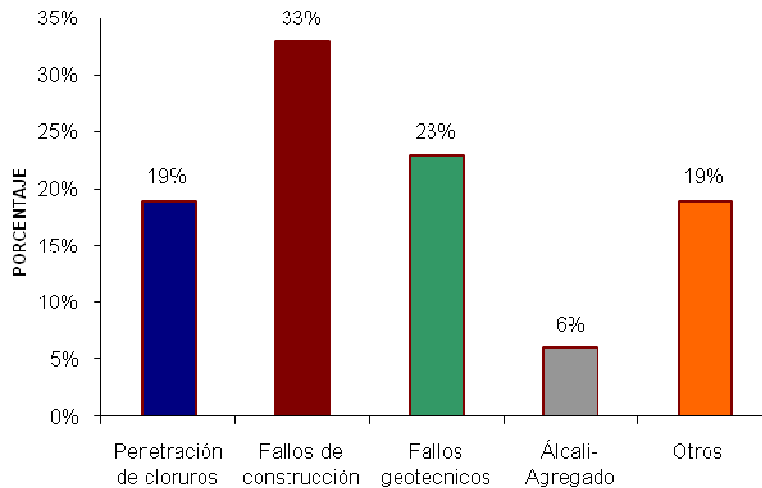


Figura 2. Causas de deterioro del concreto.

Por lo anterior, actualmente se incorporan en el concreto subproductos de origen natural o industrial como son: las cenizas volantes, escorias de alto horno, humo de sílice y puzolanas naturales para mejorar sus propiedades mecánicas y físicas, en estado fresco y endurecido (Neville, 1998; Aitcin, 2007). La necesidad de incorporar todo esto consiste en

el desarrollo de nuevas propiedades o el mejoramiento de las propiedades existentes en el concreto

En algunos países, se utilizan subproductos industriales y aditivos químicos para mejorar el desempeño del concreto como son: las cenizas volantes, escorias de alto horno, humo de sílice (Neville, 1998; Aitcin, 2007). Sin embargo, en México estos aditivos se importan y su alto costo reduce la competitividad del concreto. Es por esto que es necesario identificar aditivos naturales de alta disponibilidad en el medio que contribuyan a mejorar las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido. La mayor parte de las investigaciones se han centrado en el cemento portland ordinario y compuestos (cemento gris), investigándose las propiedades físico-mecánicas y microestructurales desarrolladas mediante la utilización de materiales suplementarios y aditivos químicos, con base en lo anterior, se pretende evaluar las características físico-mecánicas y microestructurales del cemento blanco con la incorporación de un polímero orgánico “mucilago de nopal”.

1.3 Antecedentes

Para el soporte del presente estudio de investigación, se efectuó una revisión de temas relacionados al cemento con la incorporación de aditivos minerales, sintéticos y naturales, observando que el actual interés experimental consiste en el desarrollo de aditivos naturales que mejoren la durabilidad del concreto permitiendo el desarrollo de una homogeneidad en la microestructura entre los que podemos destacar:

Chandra *et al.* (1982), investigaron la influencia de la adición de un material orgánico “Black gram” en mezclas de mortero. Elaboraron prismas de mortero de 4x4x16 cms y 4x4x8 cms con una relación cemento-arena de 1:3 y relación agua- cemento de 0.50. Se determinó la absorción de agua por capilaridad secando los especímenes a 105°C. Los autores sugieren que la adición orgánica puede ser utilizada como un agente introductor de aire en morteros debido a que interactúa como un polímero dispersante pero que en presencia de aceite se reduce el contenido de aire. La incorporación del material orgánico incrementó las propiedades hidrofóbicas en los morteros, lo cual se explica debido a que las

biomoléculas contienen tanto grupos polares (o cargados iónicamente) como regiones no polares, por lo tanto son simultáneamente hidrofílicas e hidrofóbicas. Esto le atribuye a las proteínas presentes en el material orgánico “black gram” una interrelación en la hidratación de las pastas de cemento expuestas en una interface y capilaridad estructural incrementando su reactividad con los iones de Ca^{+2} y los carboxilatos presentes en la proteína.

Cárdenas *et al.* (1997), evaluaron la preparación del mortero de cal con la incorporación del extracto del nopal. El mortero de cal preparado de esta manera se ha utilizado durante muchos siglos para restaurar y proteger edificios históricos contra la penetración del agua. La incorporación del extracto de nopal se redujo la absorción de agua y se incrementó considerablemente la permeabilidad de los muros de los edificios históricos.

Chandra *et al.* (1998) investigaron el efecto que tiene el uso del extracto de nopal en las propiedades de mortero y concreto ordinario. La relación agua/cemento fue de 0.50 constante para todas las mezclas y se utilizó una solución de mucílago de nopal para reemplazar el 0%, 50% y 100% del agua de mezclado. Los resultados indicaron que la trabajabilidad del mortero mezclado con 50% de solución de mucílago fue mejor que la mezcla de referencia (a/c), pero fue mejor aún en la mezcla que se le adicionó solución de mucílago de nopal al 100%, esto debido al efecto que proporcionan los polisacáridos del nopal que reducen la fricción. Además demostraron que el mucílago de nopal interacciona con los productos de la hidratación del cemento, reduce el tamaño y cantidad de los cristales de hidróxido de calcio. El mucílago de nopal posee propiedades retardantes, lo cual retrasó el desarrollo de la resistencia a edad temprana, ya que la resistencia a la compresión a los 28 días fue mayor en los especímenes de referencia, después, la resistencia mejoró y a los 90 días los especímenes con solución de nopal al 100% sobrepasaron notablemente la resistencia alcanzada por los especímenes de referencia.

La absorción de agua, disminuyó en los especímenes que tenían 50% de solución de mucílago, pero a mayor proporción de mucilago se redujo más la absorción. Los autores atribuyen esto a la capa que forma el mucílago de nopal y debido a los complejos de calcio

formados durante la interacción del mucílago con los iones divalentes de calcio, de la misma forma que pasa en los polímeros sintéticos, se sellan los poros y de ésta manera hace una estructura más compacta.

Cano *et al.* (2005), realizaron un estudio para utilizar el mucílago de nopal como agente modificador de viscosidad aplicado en la elaboración de concreto autoconsolidable. El mucílago fue efectivo para incrementar la viscosidad de la pasta de cemento, con lo que se incrementa la resistencia a la segregación del concreto, además el mucílago se incrementó la resistencia en un 16% y se redujo la absorción de agua capilar.

Por su parte Mattone (2005), realizó un estudio donde incorporó extracto de nopal y otros materiales tales como: suelo de planta, fibra de sisal (agave) y fibra de polipropileno para estabilizar de suelo y utilizarlo en la fabricación de bajareque. Los resultados obtenidos indicaron que las piezas con cactus de nopal tienen menor erosión y absorción, respecto a piezas elaboradas con fibras y otros materiales que utiliza, además en la prueba de abrasión tiene un buen comportamiento, por otro lado y de acuerdo a los resultados obtenidos, menciona que la durabilidad de los edificios aumenta con la incorporación de cactus de nopal.

Además Levi M., *et al* (2002), realizaron una evaluación de los métodos aplicados para tratar superficie de concreto de alto comportamiento con polímeros. En el estudio se utilizaron polímeros constituido por SiH_4 y R_2SiO en relación agua/cemento de 0.33 con dos diferentes tiempos de curado. A los especímenes se les efectuó pruebas de absorción de agua y penetración de cloruros. Los resultados permitieron identificar que los especímenes con R_2SiO presentan un 0.05% de iones cloruros en comparación al 0.00% con SiH_4 lo cual permitió concluir que los SiH_4 y R_2SiO aseguran una buena protección con respecto a la penetración de iones cloruros. Además se observó que los concretos tratados con siloxane (SiH_4) presentan valores de absorción bajos 3.2 % con base al peso en comparación al 3.69% del R_2SiO .

Asimismo Sofi M. *et al* (2007), estudiaron las propiedades ingenieriles de concretos con incorporación de polímeros inorgánicos y ceniza volátil(IPC), con solución de silicato de sodio Na₂O (14.7%), SiO₂ (29.4%) y H₂O (55.9%) en 90 cilindros y 24 vigas, curadas a 23°C, con una relación agua/cemento de 0.34. Observándose que la resistencia a compresión en concreto normal es del orden de 50MPa en comparación al 52.4 MPa presentado en el IPC, el cual es atribuido por la activación e interacción que tiene la composición de la solución con respecto a la ceniza volátil.

1.4 Justificación

El concreto de cemento Portland es actualmente uno de los materiales más utilizados a nivel mundial. Los tiempos modernos demandan que la producción de cemento y de algunos aditivos químicos se efectúen con el consumo mínimo de energía y que sus subproductos no sean agresivos al medio ambiente. Sin embargo, en México estos aditivos son importados y su alto costo los hace antieconómicos para su uso de rutina en nuestro medio.

Por lo anterior, en la actualidad es necesario sustituir los aditivos químicos producidos sintéticamente por aditivos naturales, con el objeto de minimizar los contaminantes y costos de producción. Una opción es utilizar polímeros naturales como lo es el mucílago de nopal, el cual puede contribuir a mejorar las propiedades del concreto en estado fresco y endurecido.

Y es que el nopal está disponible en muchas regiones áridas y semiáridas de nuestro país. México produce **874,000 toneladas de nopal al año** con un rendimiento promedio de **67 ton/ha**. Además, el uso del mucílago de nopal en materiales basados en cemento puede tener un impacto social, ya que de esta manera se le proporciona un valor agregado a la producción de esta planta y mejorar su rentabilidad (CGCSD, 2006). Debe mencionarse que no todas las especies de nopal se utilizan como alimento, de tal forma que se pueden utilizar para aplicaciones industriales aquellas que no sean aprovechadas para consumo humano o animal.

1.5 Objetivos

1.5.1 General

Utilizar el mucílago de nopal como un aditivo natural en la elaboración de concreto hidráulico, con el objeto de mejorar sus propiedades mecánicas y microestructurales en estado endurecido.

1.5.2 Específicos

- Determinar la forma más adecuada de extracción y preservación del mucílago de nopal y caracterizar su viscosidad.
- Evaluar la resistencia a la compresión axial y módulo de elasticidad en mezclas de concreto con diferentes proporciones de mucílago de nopal.
- Determinar el efecto del mucílago de nopal en la deformabilidad, el fraguado y la hidratación de pastas de cemento.
- Analizar la microestructura de pastas con la adición de mucílago de nopal a edades de 28, 56 y 120 días.

1.6 Hipótesis

1. El uso del mucílago de nopal en pastas de cemento produce un refinamiento de la microestructura y por lo tanto disminuye la porosidad e incrementa la resistencia a la compresión axial y el módulo de elasticidad.
2. El mucílago de nopal disminuye la deformabilidad de las pastas de cemento.
3. El mucílago de nopal incrementa el tiempo de fraguado de la pasta de cemento.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Concreto hidráulico

El concreto es el material estructural fabricado por el hombre más empleado en términos de cantidad. Éste se produce esencialmente mezclando agregados pétreos con agua y cemento. El agregado pétreo, que consiste de partículas grandes y finas, puede constituir hasta tres cuartas partes del volumen del concreto. El resto del volumen está formado por la pasta de cemento hidratada, que se obtiene por reacción del agua con el cemento, y cavidades que contienen aire. Al concreto se le puede considerar como un material compuesto, ya que la pasta de cemento es la matriz y el agregado es el material de relleno. Las propiedades mecánicas y físicas del concreto dependen de la mezcla (arena, cemento, agregados, agua y aditivos) así como del tiempo y temperatura de curado (Anderson, 1998).

La adherencia entre el agregado y la pasta de cemento es un factor importante para la resistencia del concreto, debido a la rugosidad de la superficie del primero, a su composición mineralógica, a las condiciones electrostáticas de la superficie de la partícula. La porosidad de los agregados, su permeabilidad y absorción influyen en las propiedades de los agregados tales como la adherencia entre éste y la pasta de cemento hidratada (Neville, 1999).

2.2 Cemento

El cemento es uno de los principales actores en la elaboración del concreto. La palabra cemento deriva del latín “caementum”, porque los romanos llamaban opus caementitum (obra cementicia) a la grava y a diversos materiales parecidos al concreto que usaban en sus morteros, aunque no eran la sustancia que los unía. Actualmente, se le conoce como cemento Portland para describir un cemento que se obtiene de la mezcla adecuada de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxido de hierro, calentando la mezcla a altas temperaturas (1400-1600°C) y después moliendo el material resultante, llamado clinker, con una pequeña cantidad de yeso para controlar el tiempo de fraguado (Neville, 1995).

El proceso de fabricación del cemento consiste en moler finamente la materia prima, mezclarla minuciosamente en ciertas proporciones y calcinarla en un horno rotatorio de gran dimensión a una temperatura de aproximadamente 1450 °C, donde el material se sintetiza y se funde parcialmente, formando esferas conocidas como clinker. El clinker se enfría y se tritura hasta obtener un polvo fino al cual se le agrega yeso sin calcinar, así como materiales que no excedan del 1% del peso total, y que no sean nocivos para el comportamiento posterior del cemento. El clinker, consiste principalmente en silicatos de calcio, aluminatos de calcio, aluminoferrito de calcio y sulfato de calcio (yeso), como adición en la molienda. Los principales óxidos presentes en la materia prima son: óxido de calcio (CaO), sílice (SiO₂), alúmina (Al₂O₃) y óxido de hierro (Fe₂O₃) (Kosmatka, 1992).

Tabla 1. Composición típica del Cemento Portland tipo 1

Constituyentes	Símbolo	% en peso
Silicato dicálcico (2 CaO.SiO ₂)	C ₂ S	28
Silicato tricálcico (3CaO.SiO ₃)	C ₃ S	46
Aluminato tricálcico (3Ca.Al ₂ O ₃)	C ₃ A	11
Aluminato ferrita tetracálcica (4CaO.Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃)	C ₄ AF	8
Yeso (CaSO ₄)	-----	3
Óxido de magnesio	M	3
Óxido de calcio	C	0.5
Óxido de sodio	N	0.5
Óxido de potasio	K	-----

Fuente: Anderson, 1998

Al mezclar cemento con agua se produce una pasta plástica que puede trabajarse. Durante cierto tiempo sus características no cambian, y este período se denomina de inducción latente. En determinado momento la pasta comienza a endurecerse a un grado tal que aunque sigue estando blanda ya no puede trabajarse. Esto se conoce como fraguado inicial. A continuación sigue el período de fraguado en el cual la pasta continúa endureciéndose hasta que queda como sólido rígido, lo cual constituye el fraguado final. El fraguado y el endurecimiento se deben a la hidratación de los constituyentes del cemento. Al añadir agua hay una reacción inicial rápida con el aluminato tricálcico de la cual se desprende un calor de hidratación considerable, en el cemento Portland se controla esta reacción añadiendo yeso. En presencia del yeso, el C₃A y retarda la hidratación para formar

un sulfoaluminato de calcio con alto contenido de sulfatos que se denomina etringita cuya función es recubrir los granos de C_3A y retarda la hidratación, y de este modo regula el fraguado rápido (Anderson, 1998).

El conocimiento actual de la química del cemento nos indica que estos compuestos tienen las siguientes propiedades:

a) El silicato tricálcico, C_3S , se hidrata, endurece rápidamente y es responsable en gran medida del fraguado inicial y de la resistencia temprana. En general la resistencia temprana del concreto de cemento Portland es mayor con porcentajes superiores de C_3S .

b) El silicato dicálcico, C_2S , se hidrata, endurece lentamente y contribuyen en gran parte al incremento de resistencia a edades mayores a una semana.

c) El aluminato tricálcico, C_3A , libera una gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye levemente al desarrollo de resistencia temprana. El yeso, que se agrega al cemento durante la molienda final, retrasa la velocidad de hidratación del C_3A . Sin el yeso un cemento que contuviera C_3A fraguaría rápidamente. Los cementos con bajos porcentajes de C_3A son particularmente resistentes a los suelos y aguas que contienen sulfatos. Cuando la pasta de cemento endurecida es atacada por sulfatos, la formación de sulfoaluminato de calcio (etringita) puede causar resquebrajamientos. Sin embargo, el C_3A es benéfico durante la elaboración del cemento porque favorece la combinación de cal y sílice.

d) El aluminoferrito tetracálcico, C_4AF , reduce la temperatura de formación del clinker, ayudando por tanto a la manufactura del cemento. Se hidrata con cierta rapidez pero contribuye mínimamente a la resistencia. La mayoría de efectos del color gris se debe al C_4AF y sus hidratos.

2.3 Hidratación del cemento

La composición teórica o potencial de los compuestos del cemento Portland o fases minerales se puede estimar a través de las ecuaciones de Bogue. Dichas ecuaciones están

incluidas en norma ASTM C 150 y suponen que las reacciones químicas de la formación de los compuestos del clinker, han avanzado hasta su equilibrio termodinámico, y que la presencia de impurezas tales como el MgO y los álcalis puede ser ignorada. (Mehta y Monteiro, 1998).

Los cementos hidráulicos fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua (Figura 3). Durante esta reacción, llamada “hidratación”, el cemento se combina con el agua para formar una pasta de aspecto similar a una roca (Kosmatka, 1992). La reacción mediante la cual el cemento Portland se transforma en un agente de enlace, se produce en una pasta de cemento, que está compuesta por agua, polvo de cemento y aire atrapado o incluido. La propiedad de liga de las pastas de cemento Portland se debe a la reacción química entre el polvo de cemento y el agua llamada “hidratación”.

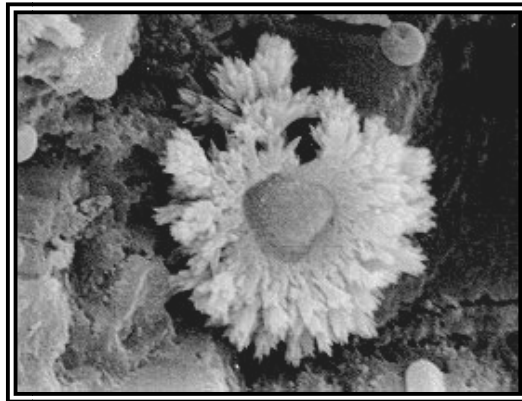


Figura 3. Hidratación de los granos de cemento
Fuente: University of Aberdeen, Dept. of Chemistry

En presencia del agua, los cuatro compuestos se hidratan para formar nuevos compuestos que constituyen la infraestructura de la pasta de cemento endurecida. Los silicatos de calcio, C_3S y C_2S , que constituyen cerca del 75% del peso del cemento, se hidratan para formar los compuestos de hidróxido de calcio e hidrato de silicato de calcio (gel de tobermorita). La resistencia y otras propiedades del cemento hidratado se deben principalmente a este gel. Este último es con mucho el componente cementante más importante en el concreto.

Las cuatro fases sólidas principales, presentes generalmente en una pasta de cemento hidratado son los siguientes (Mehta, 1998):

a) Hidrato de silicato de calcio. La fase hidrato de silicato de calcio H-S-C, representa de 50 a 60 % del volumen de sólidos en una pasta de cemento. La resistencia del material es atribuida principalmente a las fuerzas de Van der Waals.

b) Hidróxido de calcio. Los cristales de hidróxidos de calcio llamados portlandita constituyen de 20 a 25% de los sólidos en la pasta hidratada

c) Sulfoaluminatos de calcio. Ocupan de 15 a 20% del volumen de los sólidos en la pasta hidratada y juegan por lo tanto solamente un papel menor en las relaciones estructura-propiedades.

d) Granos de clinker no hidratados. Dependiendo de la distribución de partículas del cemento anhídrido, estos pueden encontrarse en la microestructura de las pastas de cemento hidratadas, a un tiempo largo después de la hidratación, y las partículas de clinker se hallan en el rango de 1 a 50 μm .

2.4 Compuestos producidos en el proceso de hidratación

Las relaciones de estructura-propiedades se encuentran intrínsecamente relacionadas con los materiales que conforman en el concreto. La estructura del material se puede considerar en diferentes niveles: estructura atómica, cristalina, granular, estructura multifásica.

El concreto tiene una estructura altamente heterogénea y compleja (Metha, 1998). Básicamente es una mezcla de dos componentes: agregados y pasta. La pasta, compuesta de cemento Portland y agua, une a los agregados, normalmente arena y grava, creando una masa (Kosmatka, 1992).

El tipo, cantidad, dimensión, forma y distribución de las fases presentes en un sólido constituyen su estructura desde la perspectiva de la macroestructura o microestructura. Son

tres componentes que conforman la estructura del concreto: la pasta de cemento hidratado, el agregado y la zona de transición entre la pasta y el agregado.

En el nivel macroscópico el concreto se puede considerar un material de dos fases, consistentes en partículas de agregados dispersas en una matriz de pasta de cemento. En el nivel microscópico comienzan a mostrarse las complejidades de la estructura del concreto (Metha y Monteiro, 1998).

2.4.1 Alita

La alita es una solución sólida de silicato tricálcico (C_3S) dopado con impurezas iónicas. La alita constituye entre un 40% al 70% del clinker (Stutzman, 2004).

Es la fase principal y más importante del cemento Portland, controla el fraguado y el endurecimiento. Su hidratación es rápida pero varía en función de la cantidad de iones en solución (Kosmatka, 1992).

El C_3S (alita) es el silicato cálcico más inestable de los presentes en el cemento, al reaccionar con el agua se convierte en silicato de calcio hidratado, conocido como tobermorita gel, y en hidróxido de calcio. (Giraldo, 2006).

2.4.2 Belita

La belita es una solución sólida de silicatos dicálcico (C_2S) dopado con impurezas iónicas. La belita constituye entre un 15% al 45% del clinker (Stutzman, 2004)

Existen cinco formas estructurales, la forma más importante en la química del cemento es la $\beta-C_2S$ la cual se hidrata mucho más lentamente que la alita (Valdez, 2002).

El silicato dicálcico (C_2S - belita) al hidratarse también se convierte en tobermorita gel, y en hidróxido de calcio, pero a diferencia de alita se produce menos hidróxido de calcio: (Giraldo, 2006).

2.4.3 Aluminato de calcio

Tiene una estructura cúbica, en presencia de cantidades de álcalis puede tener modificaciones a ortorrómbica o monoclinica. Genera mayor calor de hidratación y está depende también de la cantidad y calidad de los iones alcalinos (Valdez, 2002). La reacción del C_3A puro con agua es muy violenta y lleva a un inmediato endurecimiento de la pasta, conocido como fraguado relámpago. (Neville, 1999). La hidratación de esta fase es afectada por la disolución de los sulfatos. Contribuye un poco el desarrollo de la resistencia temprana. Un efecto positivo del C_3A es su capacidad de adherencia de cloruros.

La solución sólida de aluminato tricálcico (C_3A) se encuentra presente entre un 5% al 10% en el clinker.

El aluminato de calcio (C_3A - celita) al combinarse con yeso y agua produce la etringita: (Giraldo, 2006). Con la etringita y agua se convierte en monosulfato. Con el hidróxido de calcio y con agua se convierte en aluminato de calcio hidratado: (Giraldo, 2006).

2.4.4 Ferroaluminato tetracálcico C_4AF

Forma productos similares a los del C_3A , donde el hierro sustituye parcialmente al aluminio en la estructura del cristal de etringita y monosulfoaluminato hidratado en la cocción del cemento a menor temperatura. Contribuye muy poco a la resistencia, el principal efecto es el de color para la producción del cemento gris (Kosmatka, 1992).

2.4.5 Silicato Hidratado de Calcio (C-S-H)

Representa un 50 a 60% del volumen de sólido, su morfología varía desde fibras pobremente cristalinas a una red reticular. Las propiedades físicas de los hidratos de calcio revisten interés en relación con las propiedades de fraguado y endurecimiento del cemento (Neville, 1999). En su estructura pueden quedar embebidos iones como Mg^{2+} , Al^{3+} , K^+ , Na^+ o SO_4^{2-} (Valdez, 2002).

El silicato hidratado de calcio (gel Tobermorita), es el responsable de la armazón interna de la pasta de cemento, de la adherencia de ésta con los áridos en los morteros y concretos y, en definitiva, de la resistencia mecánica de estos conglomerados (Calleja, 2001) por lo que resulta un constituyente de la pasta indispensable y siempre positivo. (Giraldo, 2006).

2.4.6 Portlandita (hidróxido de calcio)

En conjunto la alita como la belita producen los mismos tipos de silicatos de calcio hidratado (H-S-C, gel tobermorita) y son las principales fases generadoras de la portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), la cual es la base de la reacción puzolánica. Los hidróxidos de calcio (portlandita) constituyen 20 a 25% de los sólidos en la pasta, formando grandes cristales con una morfología hexagonal. La portlandita no aporta ningún beneficio a la resistencia mecánica de la pasta de cemento y puede producir espacios porosos pudiéndose lixiviar y salir del concreto, por esta razón se busca hacerla reaccionar con la puzolana y convertirla en un producto más resistente.

La portlandita tiene efectos positivos en tanto que es el encargado de mantener el pH de la pasta en valores altos (12-13) pues actúa como una “reserva alcalina”, mantiene a los concretos armados protegidos contra la corrosión electroquímica. También es positiva en el caso de concretos y morteros con áridos calizos, ya que en ellos la adherencia árido-pasta es mayor que en el caso de los áridos silíceos, (Giraldo, 2006).

La presencia de una cantidad considerable de hidróxido de calcio en el cemento hidratado tiene un efecto adverso en la durabilidad química frente a soluciones ácidas, debido a que la solubilidad del hidróxido de calcio es mayor que la del H-S-C (Metha, 1998). Además de la solubilidad en agua y ser fácilmente lixiviable por disolución, puede reaccionar con sulfatos y cristalizar en forma de dihidrato dando lugar a procesos de expansión y ruptura y posteriormente a la formación de etringita; es el primer material en descomponerse a altas temperaturas (600°C) en caso de incendio generando el desplome de la estructura (Calleja, 2001). Varios de estos aspectos negativos pueden controlarse con el uso de adiciones minerales tales como la ceniza volante, el humo de sílice y la escoria de alto horno (Giraldo, 2006).

La disolución del hidróxido de calcio ocurre cuando el agua fluye por las grietas y por el sistema capilar del concreto. Durante su proceso de hidratación los cementos Portland liberan del 15 al 30 % de hidróxido de calcio del peso del cemento original. Usualmente esto resulta suficiente para mantener una solución en un valor de pH de aproximadamente 13 en el hormigón, independientemente del contenido de humedad. El cemento Portland de escoria, o cementos puzolánicos no pueden recomendarse generalmente para este tipo de condiciones de servicio de estructuras reforzadas debido a la escasez de hidróxido de calcio liberado y a una alcalinidad insuficiente en el concreto endurecido que provoca a menudo solo un valor de pH por debajo de 8. A pesar de estos hechos a veces existen tendencias al uso de cementos Portland puzolánicos también para estructuras de concreto armado expuesta al agua de mar, debido a su alta resistencia química a la solución de cloruros y sulfatos en el estado endurecido (O' Reilly, 1998).

2.4.7 Sulfato de calcio

Ocupa un 15% a un 20 % del volumen de los sólidos en la pasta hidratada (Metha, 1998). Se conoce como anhidrita (sulfato de calcio anhidro), yeso (sulfato de calcio dihidratado) o hemidrato, comúnmente llamado yeso de París (sulfato de calcio hemidrato), se adiciona durante la molienda final. Reacciona con el C_3A formando etringita controlando la hidratación del C_3A .

Si se excede de etringita puede causar expansión y agrietamientos en el concreto (Valdez, 2002). Sin el sulfato, el fraguado sería rápido, además ayuda a controlar la contracción (retracción) por secado y puede influenciar la resistencia a los 28 días (Kosmatka, 1992).

2.4.8 Granos de clinker no hidratados

Se pueden encontrar en la microestructura de la pasta de cemento hidratadas. Durante el avance del proceso de hidratación, las partículas más pequeñas se disuelven y después las partículas mayores parecen hacerse más pequeñas. Resultando un producto de hidratación denso.

2.4.9 Etringita (trisulfoaluminato de calcio)

Los cristales de etringita son de formas alargadas, generalmente en hábitos fibrosos o en forma de varillas alargadas que se encuentran formando estructuras que asemejan un enrejillado que le da al cemento mayor cohesión, ya que se trata de la etringita positiva, pues la que genera expansión se encuentra generalmente dentro de las fisuras y grietas y se produce en edades tardías (mayores a 28 días) según lo afirman Marusin et al (2000): "...la etringita se encuentra generalmente en las fisuras del concreto dañado, alrededor de las partículas de agregado o en microfisuras de la pasta del cemento". Autores como Enein et al. (1988) han sugerido que la formación de etringita conlleva a una expansión debido a su crecimiento orientado. Estos últimos autores plantean también que la expansión asociada a la formación de etringita depende de las condiciones de curado (Giraldo, 2006).

2.5 Microscopio electrónico de barrido

En la actualidad la ciencia de los materiales ha buscado entender las relaciones existentes entre microestructura, composición química y estructura cristalina de los materiales, con las propiedades físicas, químicas y mecánicas de los mismos. En este sentido técnicas de microscopía tales como: Microscopía Óptica, Electrónica de Barrido (MEB), Electrónica de Transmisión (MET), son herramientas muy útiles en el análisis de materiales.

El desarrollo de la Microscopía Óptica, desde su descubrimiento a finales del siglo XVI, marco una nueva era en la examinación instrumental científica. El desempeño de un microscopio, y, por consiguiente, la calidad de examinación, depende de su resolución y su habilidad para obtener una imagen que tenga suficiente contraste para distinguir las fases observadas.

La Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) y su aditamento de unidad microanalítica, comúnmente conocida como Analizador de Energía Dispersiva de Rayos X (EDXA), no caen bajo el dominio de un procedimiento estandarizado. Es una técnica que

está siendo aceptada universalmente como una herramienta para la investigación en la tecnología del cemento. Una de las primeras aplicaciones del MEB fue el estudio de la hidratación del cemento por Gupa, Chatterji, and Jeffery, en 1970. La utilidad funcional del MEB – EDXA, es necesaria para entender los principios importantes que gobiernan su combinación visual y técnica microanalítica.

El principio de funcionamiento

Un cañon de electrones provoca un haz, orientado sucesivamente por lentes proyectoras y lentes objetivo (magnéticas) a un punto cuyo diámetro puede variar de 5 – 100 nm en el plano del espécimen. El sistema completo está totalmente sellado, y la columna del microscopio puede ser evacuada a presiones de hasta 10^{-6} torr (1.33×10^{-4} Pa). Un generador de barrido conduce simultáneamente la bobina de barrido en los ejes XY en la columna del microscopio y en el tubo de rayos catódicos (TRC). Entre los diferentes tipos de respuesta producidos, los electrones secundarios (ES), electrones retrodispersados y los rayos X, son colectados por detectores para formar imágenes que proporcionan información sobre la topografía y sobre la composición química de la muestra bajo análisis.

Cuando un haz de electrones primario incide en un volumen sólido, los electrones son reflejados (dispersados) o absorbidos, produciendo varias señales. La región en la cual los electrones penetran el espécimen es conocido como “volumen de excitación”, este se incrementa con el aumento de la energía del haz de electrones y disminuye con el incremento en el número atómico de los elementos que constituyen al espécimen. Durante la interacción entre el haz primario de electrones y la superficie de la muestra se producen varios tipos de señales, las cuales pueden ser empleadas para la formación de imágenes y para la caracterización química y estructural del espécimen. Así, es posible disponer de diferentes modos de observación y/o microanálisis (puntual, área, lineal). Los modos más frecuentes en el MEB involucran la captura de electrones secundarios y retro dispersados, así como las técnicas microanalíticas más comúnmente utilizadas, basadas en la detección de rayos X que son análisis de espectroscopía por dispersión de energía (EDS) y por espectros de dispersión de longitud de onda (WDS).

El microscopio electrónico de barrido (MEB) tiene distintas ventajas en la caracterización de concreto, cemento y microestructura de agregados, en los cuales se pueden identificar los compuestos que se generan de la hidratación del cemento. En la Figura 4 se aprecian el hidróxido de calcio que tiene la forma de placas hexagonales y la etringita que tiene formas de agujas. En la Figura 5 se observan los compuestos de silicatos de calcio hidratado que tiene una estructura amorfa, los hidróxidos de calcio y la etringita.

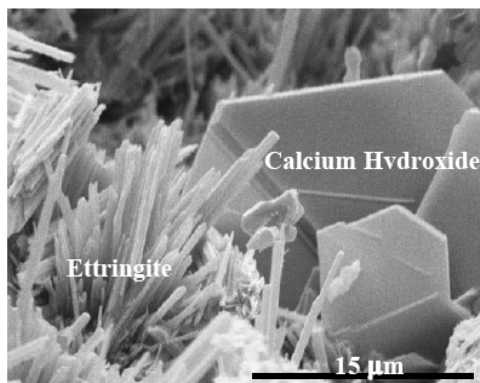


Figura 4. Hidratación e identificación de cristales en la pasta.
Fuente. Stutzman (2001)

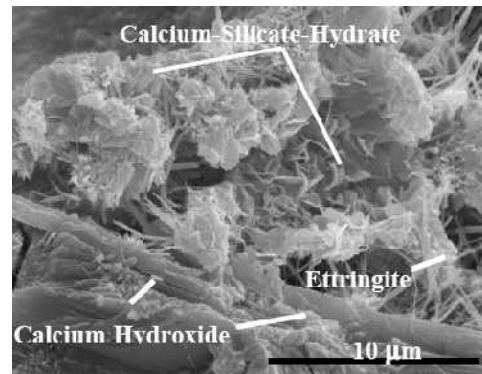


Figura 5. Hidratación y compuestos de la pasta hidratada
Fuente. Stutzman (2001)

2.6 Difracción de rayos X

La radiación es una emisión y propagación de diversas ondas electromagnéticas, las cuales son perturbaciones ondulatorias que se repiten en una distancia llamada longitud de onda.

La difracción de rayos X o cristalografía de rayos X es una técnica consistente en hacer pasar un haz de rayos X a través de un cristal de la sustancia sujeta a estudio y sirve para determinar las diferentes fases minerales. El haz se incide en varias direcciones debido a la simetría de la agrupación de átomos y por difracción da lugar a un patrón de intensidades que puede interpretarse según la ubicación de los átomos en el cristal, aplicando la ley de Bragg.

Ley de Bragg

Esta ley permite estudiar las direcciones en las que la difracción de rayos X sobre la superficie de un cristal produce interferencias constructivas, dado que permite predecir los ángulos en los que los rayos X son difractados por un material con estructura atómica periódica “materiales cristalinos.

Estableciendo la relación entre distancia entre planos cristalinos (d), la longitud de onda (λ) y el ángulo de incidencia (θ) del haz de rayos X.

Los puntos en los que la radiación se superpone constructivamente es la zona de intersección de los anillos (Figura 6).

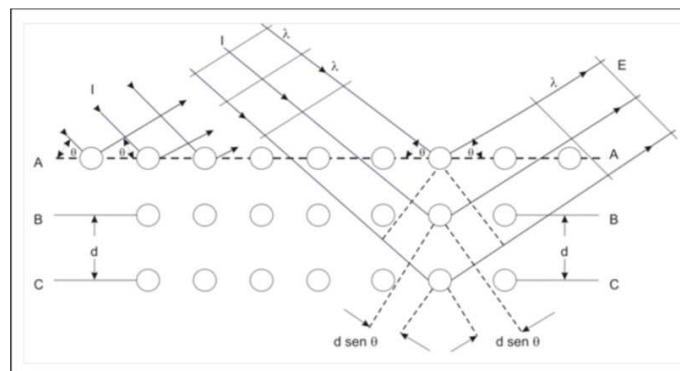


Figura 6. Esquematización de rayos X incidiendo en un cristal

Bragg presentó un modelo simple en el que supone que las ondas incidentes de rayos X se reflejan en forma especular de planos (hkl) paralelos sucesivos de átomos en el cristal, donde cada plano refleja una pequeña fracción de la radiación, este fenómeno se observa en la Figura 7.

Los haces difractados solo se encuentran cuando la reflexión de los planos paralelos interfieren en forma constructiva, es decir, con diferencias de fase $2\pi n$.

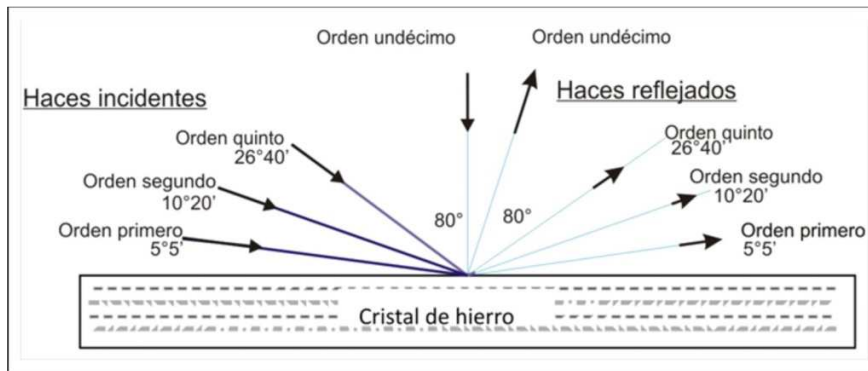


Figura 7. Haces incidentes reflejados en un cristal de hierro

Considerando planos paralelos con separación d , la diferencia de trayectoria para reflexiones sucesivas de planos adyacentes es $2d\sin\theta$, donde θ es el ángulo de incidencia medido a partir del plano. La interferencia constructiva se presenta cuando esta diferencia de trayectoria es igual a un número entero n de longitudes de onda λ :

$$n\lambda = 2d \sin(\theta) \dots\dots\dots (1)$$

donde

- n es un número entero.
- λ es la longitud de onda de los rayos X.
- d es la distancia entre los planos de la red cristalina y.
- θ es el ángulo entre los rayos incidentes y los planos de dispersión.

2.7 Espectroscopia infrarroja

La absorción del infrarrojo se basa en un mecanismo físico diferente de aquel en que está basada la absorción de longitudes de ondas más cortas. La absorción de la radiación infrarroja depende del aumento de la energía de vibración o rotación asociada a la unión covalente, siempre y cuando este aumento de energía dé como resultado un cambio en el momento bipolar de la molécula.

Los instrumentos infrarrojos miden el espectro vibratorio de una muestra pasando la radiación infrarroja con ella y registrando cuales se han absorbido y en qué medida. Puesto

que la cantidad de energía absorbida es una función del número de las moléculas presentes, el instrumento infrarrojo proporciona la información cualitativa y cuantitativa. El espectro registrado es un diagrama de transmitancia de la muestra contra la frecuencia (o la longitud de onda) de la radiación. El espectro es una propiedad fundamental de la molécula de la se puede caracterizar y determinar la concentración de la muestra.

2.8 Tiempo de fraguado

El objetivo de la prueba es la determinación del tiempo que pasa desde el momento de la adición del agua hasta que la pasta deja de tener fluidez y de ser plástica (fraguado inicial) y del tiempo requerido para que la pasta adquiriera un grado de endurecimiento (fraguado final). Esta prueba se realiza de acuerdo a lo que indica la norma ASTM C- 191.

2.9 Fluidez

La fluidez se refiere a la movilidad relativa de la mezcla fresca de pasta o mortero de cemento o su habilidad de fluir. La fluidez se determina en una mesa de fluidez (mesa de caídas, mesa de sacudidas) como se describe en la norma ASTM C-230.

2.10 Relación agua/cemento

En 1918, Duff Abrams encontró que existía una relación entre la relación agua/cemento y la resistencia del concreto, esta relación inversa se representa por la ecuación 2:

$$f_c = \frac{k_1}{k_2^{w/c}} \dots\dots\dots (2)$$

donde: w/c representa la relación agua/cemento de la mezcla de concreto, y k₁ y k₂ son constantes empíricas.

La relación agua/material cementante (ligante) es simplemente la masa de agua dividida por la masa del material cementante (cemento Portland, cemento adicionado, ceniza volante, escoria, humo de sílice y puzolanas naturales) (Kosmatka, 2004). La razón

entre la relación agua/cemento y la resistencia del concreto, puede explicarse como la consecuencia natural de un debilitamiento progresivo de la matriz, causada por el incremento de la porosidad al incrementar la relación agua/cemento (Mehta y Monteiro, 1998).

La relación agua/material cementante elegida para un diseño de mezcla debe ser el menor valor necesario para resistir a las condiciones de exposición, la elección de la relación agua/material cementante se debe basar en los requisitos de resistencia a compresión (Kosmatka, 2004).

2.11 Aditivos químicos

La norma ASTM C125 define a un aditivo como un material distinto del agua, los agregados, los cementos hidráulicos y el refuerzo de fibra, utilizado como un ingrediente del concreto o mortero y que se agrega a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado.

Los aditivos varían ampliamente en su composición química y muchos de ellos realizan más de una función. Algunos comienzan a actuar en el sistema agua-cemento instantáneamente, influyendo en la tensión superficial del agua y adsorbiéndose en la superficie de las partículas de cemento; otras se descomponen en sus componentes iónicos y afectan las reacciones químicas entre los componentes del cemento y el agua durante varios minutos o varias horas después de haber sido agregados.

Otros materiales finamente molidos e insolubles, ya sean provenientes de fuentes naturales o como subproductos de algunas industrias también se utilizan como aditivos. El efecto físico de la presencia de estos aditivos en el comportamiento reológico del concreto fresco se hace aparente inmediatamente, pero lleva varios días o varios meses el que los efectos químicos se manifiesten (Mehta y Monteiro, 1998).

Los aditivos se pueden clasificar según sus funciones, como sigue (Kosmatka, 2004):

1. Aditivos incorporadores de aire (incluidos de aire).

-
2. Aditivos reductores de agua.
 3. Plastificantes (fluidificantes).
 4. Aditivos aceleradores (acelerantes).
 5. Aditivos retardadores (retardantes).
 6. Aditivos de control de hidratación.
 7. Inhibidores de corrosión.
 8. Reductores de retracción.
 9. Inhibidores de reacción álcali-agregado.
 10. Aditivos colorantes.
 11. Aditivos diversos, tales como aditivos para mejorar la trabajabilidad (manejabilidad), para mejorar la adherencia, a prueba de humedad, impermeabilizantes, para lechadas, formadores de gas, anti-deslave, espumante y auxiliares de bombeo.

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

Las razones principales para el uso de aditivos son:

1. Reducción del costo de las construcciones de concreto.
2. Obtención de ciertas propiedades en el concreto de manera más efectiva que otras.
3. Supervisión de la calidad del concreto durante las etapas de mezclado, transporte, colado (colocación) y curado de condiciones de clima adverso.
4. Cuidado de ciertas emergencias durante las operaciones de mezclado, transporte, colocación y curado.

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

La eficiencia de un aditivo depende de factores tales como: tipo, marca y cantidad de material cementante; contenido de agua; forma, granulometría y proporción de los agregados, tiempo de mezclado y temperatura del concreto.

El uso de aditivos se justifica con relación a las funciones que pueden desarrollar (IMCYC, 2002).

- Incrementan la trabajabilidad sin incrementar el contenido de agua o disminuir el contenido de agua a la misma trabajabilidad.
- Retardar o acelerar el tiempo de fraguado inicial.
- Reducir o evitar el asentamiento, o crean una ligera expansión.
- Modificar la rapidez o la capacidad de sangrado.
- Reducir la segregación.
- Reducir la proporción de la pérdida de revenimiento.
- Modificar las propiedades del concreto endurecido, el mortero, y la lechada para:
 - ✓ Retardar o reducir la evolución de calor durante el endurecimiento temprano.
 - ✓ Acelerar la rapidez de desarrollo de resistencia a edades tempranas.
 - ✓ Incrementar la resistencia (a la compresión, tensión y flexión)
 - ✓ Incrementar la resistencia a severas condiciones de exposición, incluyendo la aplicación de sales descongelantes y otras sustancias químicas.
 - ✓ Disminuir la permeabilidad del concreto.
 - ✓ Controlar la expansión causada por la reacción de álcalis con constituyentes reactivos del agregado.
 - ✓ Incrementar la adherencia del concreto al acero de refuerzo.
 - ✓ Incrementar la adherencia entre concreto viejo y nuevo.
 - ✓ Mejorar la resistencia al impacto y la resistencia a la abrasión.
 - ✓ Inhibir la corrosión del metal ahogado.
 - ✓ Producir concreto y mortero coloreado.

2.12 Resistencia a la compresión

Algunas propiedades del concreto endurecido están relacionadas con esta resistencia, como son: densidad, impermeabilidad, durabilidad, resistencia a la abrasión, resistencia al impacto, resistencia a la tensión, resistencia a los sulfatos. Esto no quiere decir que estas propiedades sean una función simple y única de la resistencia a la compresión, sino que, un concreto de mayor resistencia a la compresión tendrá mejores propiedades (Neville, 1999).

Los principales factores que gobiernan la resistencia del concreto son los siguientes: relación agua/materiales cementantes, condiciones de curado (humedad y temperatura), edad, características y cantidad del material cementante, características y cantidad de los agregados, tiempo de mezclado, grado de compactación y el contenido de aire (Práctica estándar para el curado del concreto, ACI 308)

Cualquier tipo de vacíos llenos de aire reduce la resistencia del concreto en una proporción de 5% de reducción de resistencia por cada 1% de aumento en el volumen de los vacíos llenos de aire (Mather, 2004)

La resistencia del concreto es fundamentalmente una función de su volumen de vacíos. La influencia del volumen de poros sobre la resistencia puede expresarse por la ecuación exponencial del tipo (3) (Grudemo, 1975):

$$F_c = f'_{c,0}(1-p)^2 \dots\dots\dots(3)$$

donde:

p =porosidad, es decir, el volumen de huecos expresado como una fracción del volumen total del concreto.

F'_c =resistencia del concreto con porosidad p

$f'_{c,0}$ =resistencia a porosidad cero

Existe una relación inversa fundamental entre la porosidad y la resistencia de los sólidos que para los materiales homogéneos simples, puede expresarse por la fórmula: $S=S_0e^{-kp}$, en donde S es la resistencia del material que tiene una porosidad dada p; S_0 es la resistencia intrínseca a porosidad cero; y k es una constante (Mehta y Monteiro, 1998).

2.13 Módulo de elasticidad

La elasticidad, es la propiedad que permite que un cuerpo sea capaz de deformarse bajo la acción de fuerzas externas, de tal manera que se establece una relación entre las fuerzas y desplazamientos y cuando dejan de actuar las cargas, el cuerpo debe recuperar su forma inicial (Magdaleno, 1982).

El módulo de elasticidad es la relación entre esfuerzo y deformación unitaria en el rango elástico de la curva esfuerzo-deformación del concreto. El concreto de densidad normal tiene un módulo de elasticidad de 14 000 a 41 000 Mpa, dependiendo de factores, tales como resistencia a compresión y tipo de agregados (Kosmatka, 2004).

Fitzgerald (1990), señala que en el siglo diecisiete (1658), Robert Hooke publicó un artículo en el que estableció que el esfuerzo era directamente proporcional a la deformación. Este hecho se conoce como Ley de Hooke y matemáticamente puede expresarse como $\sigma, \alpha, \varepsilon$, que significa que si una barra está sujeta a una carga de tensión de 100 lb, se alargará una cierta cantidad y si la carga se incrementa a 200 lb, el alargamiento se duplicará.

Añade que la relación anterior puede convertirse en una ecuación introduciendo una constante de proporcionalidad E, que relaciona el esfuerzo y la deformación unitaria en un material, dentro de los límites elásticos de éste. Esta constante fue calculada al principio del siglo diecinueve (1802) por Thomas Young y se conoce como el *Módulo de Elasticidad* o *Módulo de Young*. Al incluir el módulo de elasticidad, la Ley de Hooke, $\sigma, \alpha, \varepsilon$, se convierte en una ecuación (4) importante y útil, que se expresa como:

$$\sigma = E \varepsilon \dots\dots\dots(4)$$

donde:

σ esfuerzo unitario, en kg/cm².

ε deformación unitaria en cm/cm.

E módulo de elasticidad, en kg/cm².

La misma referencia explica que el criterio que se aplica consiste en definir dos puntos (A y B) sobre la curva esfuerzo-deformación unitaria del concreto ensayado (Figura 8), a fin de calcular la pendiente de la cuerda AB. Siendo las coordenadas de A una abscisa fija (ε_A) igual a una deformación unitaria de 0.000050, y una ordenada (σ_A) determinada a partir de esa deformación. Las coordenadas del punto B son: una ordenada fija (σ_B) igual a un esfuerzo equivalente al 40% del esfuerzo de ruptura del concreto que se ensaya ($40\% \sigma_R$), y una abscisa (ε_B) determinada a partir de ese esfuerzo.

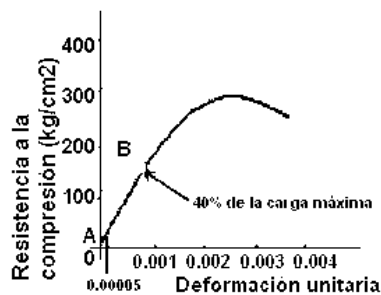


Figura 8. Gráfica esfuerzo-deformación unitaria.

El valor del 40% del esfuerzo de ruptura considerado en el punto B indica que en este rango al cesar el esfuerzo la deformación se recupera totalmente y el material tiene un comportamiento elástico. Una vez conocidas estas coordenadas, el módulo de elasticidad se determina calculando la tangente del ángulo que la cuerda AB forma con el eje horizontal.

$$E = \frac{(40\% \sigma_R) - \sigma_A}{\varepsilon_B - (0.000050)} \dots\dots\dots(5)$$

El módulo de elasticidad puede variar en función de factores como el estado de humedad y de compactación del concreto, la relación agua/cemento, edad de la pasta y características de los agregados.

Varias ecuaciones se emplean para el cálculo del módulo de elasticidad del concreto, las cuales se enumeran en la Tabla 2:

Tabla 2. Ecuaciones para determinar el Módulo de Elasticidad del Concreto.

Referencia	Ecuación para el módulo de elasticidad del concreto	Notación
ACI 318	$E_c = W_c^{1.5} 0.14 \sqrt{f'_c}$ $E_c = 15100 \sqrt{f'_c}$	<p>W_c, peso volumétrico del concreto, 1440 y 2480 kg/m³. f'_c, resistencia a la compresión de cilindros de concreto a los 28 días.</p> <p>W_c, peso volumétrico normal. f'_c, resistencia a la compresión de cilindros de concreto a los 28 días.</p>
ACI 363	$E_c = 10615 \sqrt{f'_c} + 70423$	Para concretos de altas resistencias mayores de 410 kg/cm ² .
NTC DF 2004	$E_c = 4400 \sqrt{f'_c}$ $E_c = 2500 \sqrt{f'_c}$	<p>Concreto Clase 1: Peso vol. en estado fresco > 2200 kg/m³. $f'_c \geq 250$ kg/cm².</p> <p>Concreto Clase 2: 1900 kg/m³ < Peso Vol. en estado fresco < 2200 kg/m³. $f'_c < 250$ kg/cm².</p>

2.14 Mucílago de nopal

El nopal (*Opuntia Ficus Indica*) (Figura 9), es una planta xerófila característica de las regiones subtropicales de clima seco, estas plantas tienen la capacidad de resistir temporadas prolongadas de sequía debido a la presencia de mucílago que al formar redes moleculares tridimensionales capaces de retener grandes cantidades de agua (Cárdenas *et al*, 1998). Por debajo de la cutícula que cubre una penca u hoja de nopal, se encuentra una

sustancia en forma de pulpa (gel), la cual está conformada de células que contienen mono- o di –sacáridos, los cuales interactúan y producen polisacáridos (Chandra et al., 1998).

El mucílago es un polisacárido fibroso, de una forma altamente ramificada, compuesto por un contenido alto en azúcares. Derivado de la extracción el polisacárido es una sustancia pegajosa y por lo tanto poco manejable, cada molécula del mucílago puede contener más de 30,000 subunidades de azúcar, o residuos. Los azúcares más abundantes tienen cinco o seis átomos de carbono y poseen los siguientes: arabinosa, galactosa, ramnosa, y xilosa (Gybson et al, 1986). Se ha visto que los derivados del azúcar difieren mucho en el cactus y no muestran ningún orden sistemático de composición. También se encontró en el mucílago la presencia de fructosa, galactosa, sacáridos y maltosa. Así, de esta manera, el gel del cactus contiene polisacáridos de varios tipos y composición, así como proteínas (Chandra, 1998). El mucílago de nopal es un polisacárido compuesto por 20% de D-galactosa, 44% de L-arabinosa, 7% de L-ramnosa, 22% de D-xilosa y 7% de ácido galacturónico.



Figura 9. Cactus de nopal.

Se ha demostrado también que una solución acuosa de mucílagos provenientes de nopales tiernos tiene un comportamiento reológico No-newtoniano de tipo pseudoplástico. Tiene una gran elasticidad, similar a la que confieren polímeros sintéticos como el poliisobutileno. A concentraciones de 10%, el comportamiento reológico del mucílago es similar a la de una solución de goma de xantana al 3% (Medina, 2000).

Por otro lado Rodríguez *et al* (2007), estudiaron el nopal *Opuntia Ficus Indica* deshidratado para conocer sus propiedades fisicoquímicas, para ello evaluaron cuatro proporciones de nopal de 60, 100, 150 y 200 grs, obteniendo como resultado las siguientes características:

Características	Nopal 60	Nopal 100	Nopal 150	Nopal 200
<i>Humedad</i>	4.06±0.02	5.02±0.14	6.21±0.16	7.31±0.03
<i>Proteína</i>	14.22±1.23	13.10±1.11	12.87±1.10	11.39±1.24
<i>Grasa</i>	3.00±0.03	2.87±0.03	2.53±0.02	1.96±0.02
<i>Fibra soluble</i>	25.22±1.26	18.21±1.11	15.87±1.12	14.91±1.09
<i>Fibra insoluble</i>	29.87±1.35	33.21±1.24	37.15±1.23	41.65±1.32
<i>Ceniza</i>	18.41±1.64	19.61±1.34	22.40±1.23	23.24±1.17
<i>calcio</i>	1.35±0.04	1.76±0.05	2.71±0.06	3.30±0.08
<i>Fosforo</i>	0.38±0.01	0.34±0.01	0.33±0.01	0.29±0.01
<i>Sodio</i>	0.21±0.004	0.17±0.004	0.12±0.003	0.12±0.003
<i>Oxalato de calcio</i>	7.95±0.82	3.47±0.37	5.73±0.64	3.94±0.26
<i>Potasio</i>	5.52±0.14	6.84±0.15	6.46±0.14	6.02±0.13
<i>Relación Ca/P</i>	3.60	6.39	8.24	11.33
<i>Ph nopal fresco</i>	4.41±0.30	4.14±0.15	4.35±0.26	4.28±0.50
<i>Ph nopal deshi.</i>	4.26±0.14	4.07±0.30	4.31±0.35	4.35±0.20

CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS

Los agregados pétreos que se emplearon para la investigación consistieron en arena del río, extraída del río Atoyac y grava triturada de ¾". El cemento utilizado en las mezclas fue cemento blanco, que satisface ampliamente las especificaciones de la Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999 y la norma ASTM C-150, se determinó el empleo del cemento blanco con base a las necesidades de conocer sus propiedades mecánicas y microestructurales, debido a que en las investigaciones han trabajado con cemento gris (ordinario y compuesto), además, este no contiene Aluminato ferrita tetracálcica ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Se utilizó 100% de solución de mucílago de nopal de la especie *Opuntia-Ficus Indica* disponible en la región para sustituir el agua en las mezclas de concreto. El agua empleada en la preparación de las distintas mezclas fue agua bidestilada. Para lograr una trabajabilidad adecuada de las mezclas de concreto se utilizó un superplastificante basado en policarboxilatos.

3.1 Obtención y caracterización de agregados pétreos

El método para la obtención de muestras significativas de los agregados se presenta en la norma ASTM D 75-97 Standard Practice for Sampling Aggregates (NMX-C-030), donde se describe el proceso de muestreo del agregado.

Se caracterizó la granulometría de los agregados pétreos en base a la norma ASTM C136-01, (NMX-C-27) Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates), se determinó las impurezas orgánicas en los agregados finos de acuerdo a la norma ASTM C40-99 (NMX-C-088-1997) Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete. También se determinó la masa volumétrica, densidad específica y absorción de los agregados (ASTM C127-01 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate (NMX-C-165).

Tabla 3. Caracterización de los agregados pétreos.

Agregado	P.V.S.S (kg/m ³)	P.V.S.C (kg/m ³).	Absorción (%)	Densidad relativa	Modulo de Finura
Arena	1538	1609	1.29	2.57	2.88
Grava	1497	1601	0.68	2.66	-

P.V.S.S. Peso volumétrico seco suelto P.V.S.C. Peso volumétrico seco compacto

3.2 Extracción y caracterización del mucílago de nopal

El método empleado en la investigación para la extracción de mucílago fue el de *escaldado o de vapor* (Helen 2000), donde este método es utilizado para alimentos de gran superficie relativa, ya que las pérdidas por lavado son en ellos menores (pérdida de componentes hidrosolubles), y consistió en dejar el nopal por lapsos de 8 minutos hasta que este se tornara a un color amarillento.

Subsecuentemente al escaldado, se procedió con el proceso de molienda, en el cual se utilizó una licuadora comercial, se dejó en reposo a temperatura ambiente de 12 a 24 horas para el proceso de maceración.

Posteriormente a la maceración del nopal, se procedió a filtrar con la ayuda de una manta con el propósito de retener las partículas sólidas.

Separación de mucílago

Se aplicaron tres métodos para separar mucílago de materiales externos, los cuales se describen a continuación:

1) El mucílago filtrado se introdujo en una estufa a una temperatura de 50°C por un tiempo de 72 horas hasta eliminar completamente el agua.

2) El mucílago se precipitó empleando la metodología de Forni *et al.*, (1994); usando para ello alcohol de 96°GL en una relación 1:1 mucílago nativo a alcohol. Finalmente fue secado en una estufa convectiva a 50° C.

3) El mucílago se precipitó siguiendo la técnica de Medina *et al.*, (2000); en la cual se usa acetona en una relación 1:2 p/p, como solvente para la precipitación. Por último fue secado a 50° C.

El mucílago seco que fue extraído de la estufa convectiva, fue triturado en un mortero para reducir el tamaño de partícula y fue almacenado.

De acuerdo a los resultados obtenidos se optó por utilizar el mucílago de nopal, debido a que se obtiene muy poco rendimiento de los métodos utilizados antes mencionados. Por esto, en la investigación se utilizó el nopal *Opuntia Ficus-Indica* que se obtuvo del rancho “La Nopalera” ubicado en Matamoros No. 100 de San Bartolo Coyotepec. Cabe mencionar que al mucílago se le añadió el 1% de benzoato de sodio por cada litro de mucílago, con el fin de preservar durante un tiempo más largo al mucílago, ya que se descomponía a los 6 días y por otro lado el benzoato no perjudica a la viscosidad. Previamente se le midió la de viscosidad con un viscosímetro Brookfield; Aguja RV-1; Rango (100 a 20000 mPa*s) Figura 10.



Figura 10. Medición de la viscosidad

3.3 Elaboración de pastas de cemento

Se elaboraron 24 pastas de cemento de acuerdo a la norma ASTM C 305-99 (tabla 4), cabe mencionar que para la elaboración de dichas pastas se midió la viscosidad del mucílago de nopal, a las pastas se le midió la extensibilidad con la mesa de fluidez, el tiempo de fraguado con el equipo vicat, se analizó la microestructura (MEB) y su hidratación (DRX) a 28, 56 y 120 días.

Tabla 4. Determinación de número de pastas de cemento.

Factores	Niveles	Variables respuesta
a/c	0.3, 0.45 y 0.6	Tiempo de fraguado
m/c		Extensibilidad MEB DRX

3.3.1 Tiempo de fraguado

Para la prueba de tiempo de fraguado se elaboraron las mezclas de a/c y m/c de relación 0.3, 0.45 y 0.6, para ello se realizó el pesado de los materiales en una báscula digital, se mezcló por un tiempo de 4 minutos desde la hora de contacto del agua con el cemento, la mezcla se vertió en el cono truncado y se enrasó Figura 11, subsecuentemente se empezó a tomar lecturas con la ayuda de equipo vicat Figura 12.



Figura 11. Llenado y enrasado.



Figura 12. Medición con Vicat.

3.3.2 Fluidéz

En la prueba de fluidez se pesaron los materiales, estos se mezclaron durante 4 minutos de manera semejante en la prueba de tiempo de fraguado, se utilizó un cono

truncado, un apisonador y la mesa de fluidez, una vez hecha la mezcla está se vertió en dos capas apisonando 20 veces por capa y al final se enrasó, se levanto el cono y se le dio 25 golpes a la mesa en 15 segundo (Figura 13), al concluir con los golpes se midió la extensibilidad de la pasta Figura 14.



Figura 13. Mesa de golpeo.



Figura 14. Medición de extensibilidad.

3.4 Diseño y elaboración de mezclas de concreto

Las mezclas de concreto se diseñaron de acuerdo al método de ACI (ACI 211) para las relaciones agua/cemento de 0.45 y 0.6 respectivamente, para la relación agua/cemento de 0.3 se diseñó de acuerdo al método de HPC. Este diseño de mezclas se elaboró para conocer las cantidades de los materiales así como la cantidad de agua y de mucílago de nopal que se va a requerir para la elaboración de dichas mezclas (Tabla 5).

Tabla 5. Cantidad de material a emplear para elaborar 1m³ de concreto.

Relación a/c	HPC (0.3)	ORD (0.45)	ORD (0.6)
Materiales	(Kg.)	(Kg.)	(Kg.)
AGREGADO GRUESO	1007.52	997.06	993.63
AGREGADO FINO	660.72	712.61	785.99
CEMENTO	513.30	448.89	336.67
AGUA	166.96	172.45	203.24

Para la elaboración de las mezclas de concreto se utilizó una revolvedora Kohler (Magnum 8) con motor eléctrico de 12 hp y capacidad de un saco de cemento. Se agregó primeramente el agregado grueso y fino enseguida se le adicionó parte de agua necesaria, posteriormente se le incorporó el cemento y por último se le añadió lo faltante del agua con el superplastificante, dejándose mezclar de acuerdo al tiempo que señala norma ASTM C 192/C 192M-05.

3.5 Elaboración y curado de especímenes de concreto

Una vez que se realizaron las mezclas 0.3, 0.45 y 0.6 de m/c y a/c, se elaboraron 180 cilindros, considerando que la norma ASTM C39/C39M-04a y C469-02 indican que para cada relación (a/c y m/c) se deben hacer 5 cilindros para determinar f'_c y E , y tomando en cuenta también los factores y niveles mostrados en la Tabla 6.

Tabla 6. Determinación del número de especímenes de concreto.

Factores	Niveles	Variable respuesta
a/c	0.3, 0.45 y 0.6	f'_c E
Curado (días)	0, 7	
Edades (días)	28, 56 y 120	

Factores	Niveles	Variable respuesta
m/c	0.3, 0.45 y 0.6	f'_c E
Curado (días)	0, 7	
Edades (días)	28, 56 y 120	

$$2*3*2*3*5 \text{ especímenes} = 180 \text{ especímenes}$$

Los cilindros de concreto fueron de 100 mm de diámetro y 200 mm de altura, los cilindros tuvieron 0 y 7 días de curado, se mantuvieron a temperatura ambiente hasta que cumplieron la edad de ensaye, el vibrado que se le dio fue con la ayuda de una mesa vibratoria por un tiempo de 5 a 10 seg.

3.6 Pruebas en estado fresco a las mezclas de concreto

A continuación se presentan una tabla donde se reportan los resultados de las pruebas realizadas a las mezclas de concreto en estado fresco, como son: revenimiento, peso volumétrico, contenido de aire y temperatura, así también, se menciona la cantidad de superplastificante (plastol 4000) que se utilizó para cada mezcla.

Tabla 7. Resultados de pruebas de laboratorio al concreto en estado fresco.

Mezcla		Superplastificante (ml)	Revenimiento (cm)	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Contenido de aire (%)	Temperatura (° C)
a/c	0.3	400	5.5	2880	2	23
m/c		500	15	2650	1.9	23
a/c	0.45	175	8.8	2079	1.8	26
m/c		202	5.7	2620	5.5	27
a/c	0.6	150	8.2	2820	1.9	24
m/c		156	10.50	2530	6	24

3.7 Caracterización del concreto endurecido

3.7.1 Resistencia a la compresión axial

Cuando cumplieron la edad (28, 56 y 120 días) los especímenes de concreto de las relaciones 0.3, 0.45 y 0.6 tanto de las mezclas de a/c y m/c, se pesaron, midieron, y se llevaron a la prensa hidráulica marca Elvec de capacidad de 120 toneladas para su ensaye, con el propósito de analizar las resistencias a diferentes edades. El tiempo de curado del concreto se hizo en todas las edades, exponiéndolos por siete días a saturación por completo con hidróxido de calcio con el propósito que evitar el proceso de lixiviación o

inmigración del hidróxido de calcio contenido en los especímenes. Estos ensayos se realizaron de acuerdo a la norma ASTM C39/C39M-04a

3.7.2 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad se determinó con base a las resistencias obtenidas en los especímenes de concreto y en las ecuaciones que establece las Normas Técnicas Complementarias para el Distrito Federal, en donde se menciona que para concretos de resistencias altas que oscilan o varían entre 40 MPa < f'c < 70 MPa (aplicable para la relación 0.3), se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$E = 2700 * \sqrt{f'c} + 11,000 \dots \dots \dots (6)$$

Para el caso de los concretos de relación 0.45 y 0.6, el módulo de elasticidad se determinó con base en la ecuación que establece la NTCDF, la cual es:

$$E = 4400 * \sqrt{f'c} \dots \dots \dots (7)$$

3.7.3 Análisis de microestructura

Se elaboraron dos pastillas (Figura 15) por cada relación obteniendo así un total de 36 pastillas. La caracterización microestructural se realizó con el microscopio electrónico de barrido (JSM-6300) Figura 16, y el método que se utilizó fue de electrones secundarios, debido a que con este método se puede observar la morfología de los granos, rugosidad, porosidad y la composición química de la muestra a analizar.



Figura 15. Elaboración de las pastillas para MEB.



Figura 16. Microscopio electrónico de barrido.

Para poder identificar los compuestos, las pastillas se cortaron con una microcortadora Struers Minitom (Figura 17), posteriormente estas pastillas se introdujeron en un desecador por un tiempo de 24 horas, después fueron evaporadas con oro paladio con el equipo Denton Vacuum (DESK II) Figura 18 y el propósito de esto es que la muestra sea conductora al momento de hacerle pasar el haz de electrones y se puedan observar las imágenes.



Figura 17. Cortadora de pastillas.



Figura 18. Evaporadora de oro paladio.

3.7.4 Difracción de rayos X

El análisis de la hidratación se realizó con difractómetro de rayos X (D8 Focus) (Figura 19), primeramente se analizó el cemento blanco obteniendo su difractograma, posteriormente se elaboraron 6 pastas, tres de a/c y tres de m/c en la relación 0.3,0.45 y 0.6, el tiempo de mezclado fue de 5 minutos, después la mezcla se colocó en un portamuestras dejando la superficie lisa (Figura 20).



Figura 19. DRX D8 Focus.



Figura 20. Preparación en el portamuestras

Una vez preparada la muestra y haber puesto las condiciones de trabajo donde se utilizo 35 KVolts , 25 MAmpers, una radiación $\text{CuK}\alpha$ de longitud de onda de 1.54055Å

a un paso de 0.02 grados y un tiempo de incidencia de 2 segundos por paso, manteniendo un rango de barrido de 5 a $65^\circ 2\theta$, se procedió a colocar el portamuestras en el equipo (Figura 21) y esta se corrió para poder así obtener los difractogramas en la computadora (Figura 22).



Figura 21. Colocación en el DRX.



Figura 22. Obtención del difractograma.

3.7.5 Espectroscopía infrarroja

En el estudio de infrarrojo se elaboraron dos pastas (a/c y m/c) en relación 0.45 y se utilizó el equipo Perkin Elmer System 2000 FT-IR (Figura 23) para el análisis, el tiempo de mezclado fue de 5 minutos y se utilizó una prensa para la elaboración de pastillas Figura 24.



Figura 23. Equipo IR.



Figura 24. Pastillas para IR.

El análisis emplea la técnica en la que se incorpora Bromuro de Potasio (KBr) con el fin de que se observara una mejor señal de la muestra y un mejor espectro, este polvo se agregó a la mezclas de 0.45 de m/c y a/c, antes de hacer el análisis en la pasta de cemento, primero se realizó la corrida del KBr con el fin de conocer su espectro Figura 25.

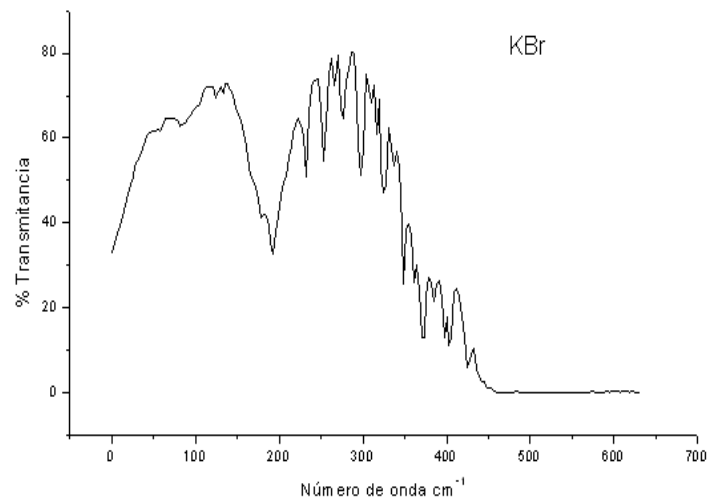


Figura 25. Espectro de KBr.

Una vez que se obtuvo el espectro del KBr se procedió al análisis de las pastas de cemento (m/c y a/c), y se realizó el análisis a uno, dos, tres y hasta un mes de haber preparado la mezcla.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Pruebas al mucilago

De los tres métodos que se utilizaron para la extracción de mucílago de nopal, con el que se obtuvo mejor rendimiento fue el de precipitado en acetona comparado con los dos restantes, además, este método es costoso debido al uso de acetona. Sin embargo, estos métodos son factibles para preservar el mucílago a comparación de extracción de mucílago puro, debido a que se descompone a la edad de 6 días.

Proceso	Nopal
Relación Agua Destilada	1 a 1
Escalde	Si
Especie	<i>Opuntia Ficus Indica</i>
Mucilago por Secado	4 g
Mucílago por Precipitación con Acetona 300 ml con 652 ml	6,5 g
Mucílago por Precipitación con Alcohol Relación	1 g

4.2 Viscosidad

De acuerdo a los resultados obtenidos se optó por utilizar *Opuntia Ficus Indica* con escalde al cual se le realizaron pruebas de viscosidad, en la Figura 26 se muestra la viscosidad de la muestra a un día y hasta 27 días tomándola con un viscosímetro de la marca Brookfield, donde se puede apreciar que no existe diferencia significativa, asimismo, se tomó la viscosidad del mucilago con un reómetro de la marca Anton Parr (Figura 27), donde se observa que no existe mucha diferencia a la edad de seis meses con respecto a la de año y 3 meses, además, en la gráfica se observa que la muestra medida al año 3 meses es mucho más estable, por otro lado, la muestra no presenta indicios de descomposición.

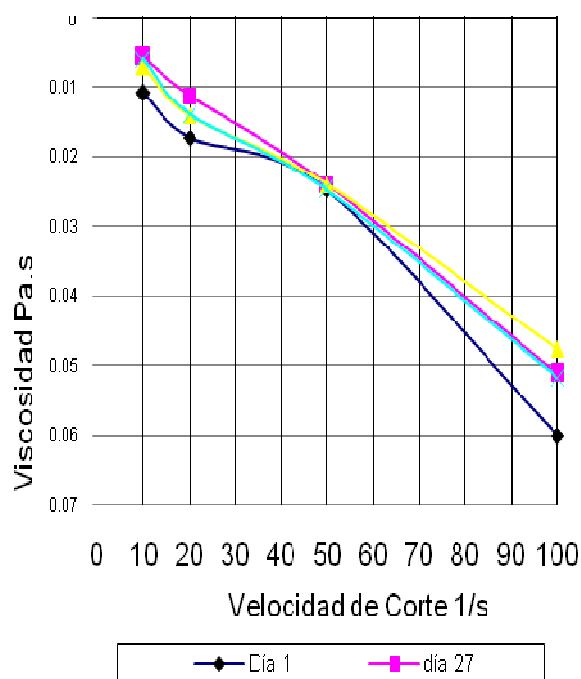


Figura 26. Viscosidad del Mucílago de Nopal con escalde (*Opuntia ficus-indica*) de 5 a 6 meses de edad con 48 hrs de maceración

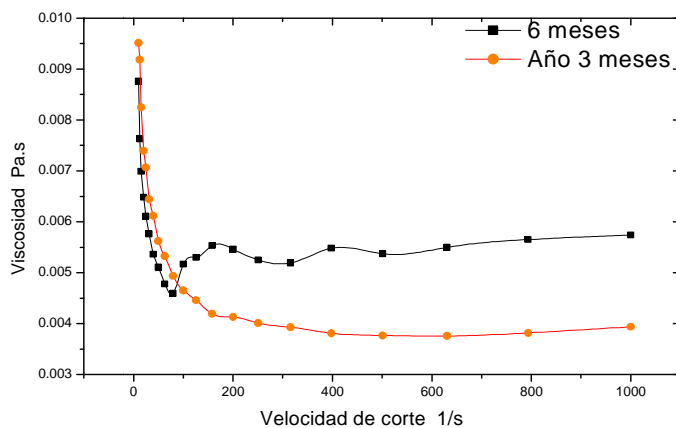


Figura 27. Viscosidad del mucílago de nopal a diferentes edades

4.3 Tiempo de fraguado

Una vez que se prepararon las pastas de a/c y m/c 0.3, 0.45 y 0.6 se midieron sus tiempos de fraguado, los cuales se pueden observar en la Figura 28.

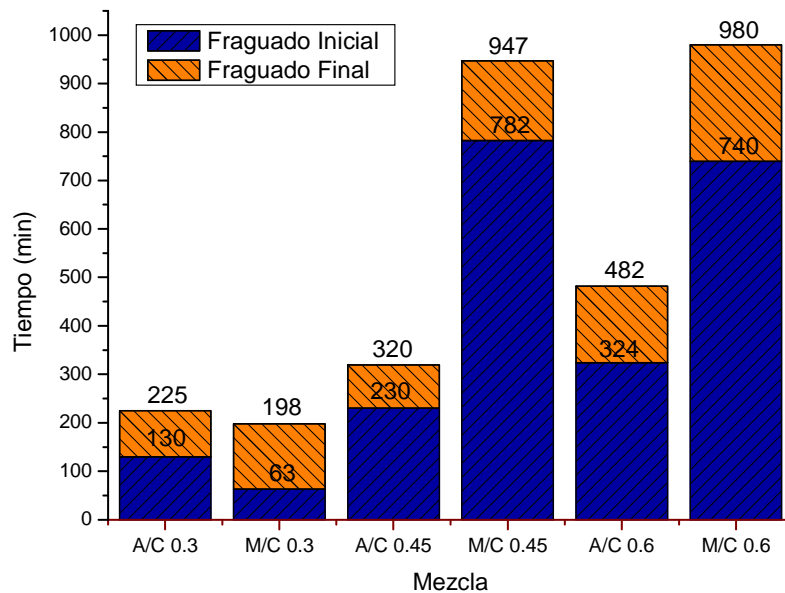


Figura 28. Tiempos de fraguado de las pastas a/c y m/c.

Como se puede observar en la figura, el tiempo de fraguado de la mezcla 0.45 m/c está por encima de la mezcla a/c, es decir, el tiempo de la mezcla m/c se incrementó en un 195% con relación a la mezcla a/c, por otro lado, en la mezcla 0.6 m/c incrementa su tiempo en un 103 % con relación a la mezcla a/c, sin embargo, para la relación de 0.3 pasa lo contrario a las otras dos relaciones, es decir, la mezcla de mucílago fragua más rápido con respecto a la de a/c, indicando que para relaciones bajas de mucílago éste no actúa como retardante.

Estos resultados de tiempo de fraguado comprueban lo que es mencionado por Chandra *et al* (1998), en donde se sugiere que el mucílago actúa como retardador de la hidratación, pero esto solo pasa en las mezclas de relación 0.45 y 0.6 m/c, ya que estas dos relaciones están muy parecidas a la relación que ocupó en esa investigación (0.5).

4.4 Fluidez

Para la prueba de fluidez se tuvieron resultados buenos pudiéndolos observar en la (Figura 29), apreciando que para la pasta 0.3 m/c se tiene menor fluidez que la de a/c en un 20.8%, por otro lado, en la pasta 0.45 a/c su fluidez es menor que la de m/c en un 11%, asimismo, para la pasta 0.6 m/c su fluidez es menor respecto a la de a/c en un 11.5%, estos

resultados nos dan entender que el mucílago de nopal actúa como agente viscoso. Cabe recalcar que las pruebas se llevaron a cabo por duplicado para corroborar los resultados y más para la relación 0.45.

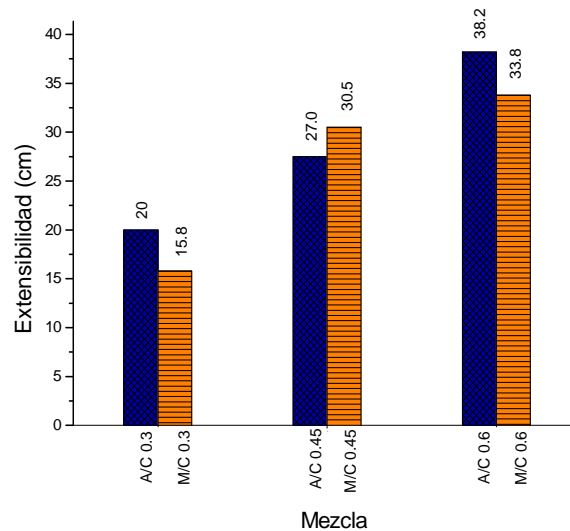


Figura 29. Prueba de Fluidez de las pastas a/c y m/c.

Además estos resultados confirman lo que menciona Cano *et al* (2005), que el mucílago actúa como agente modificador de la viscosidad en las pastas de mucílago/cemento con respecto a las pastas de agua/cemento.

4.5 Resistencia a la compresión

La prueba de resistencia a la compresión de los especímenes de concreto de los 28, 56 y 120 días de edad, de la relación 0.3 a/c y m/c de 0 y 7 días de curado se puede apreciar en la Figura 30, en donde se observa que la resistencia de los concretos con adición de mucílago de nopal a la edad de 28 días es mayor que los concretos de a/c. Para la edad de 56 días, se observa que la resistencia de los concretos con la adición de mucílago a cero días de curado son mayores con relación a los concretos de a/c, por otro lado, a los 7 días de curado el incremento de los especímenes de concreto a la edad de 56 días es mayor a la de 28 días, lo que indica que va incrementado su resistencia y finalmente a la edad de 120 días se observa

ya la influencia que tuvo el mucílago de nopal, teniendo mejores resistencia de las mezclas de concreto de m/c respecto a las control a/c de un 1.5 a 5%.

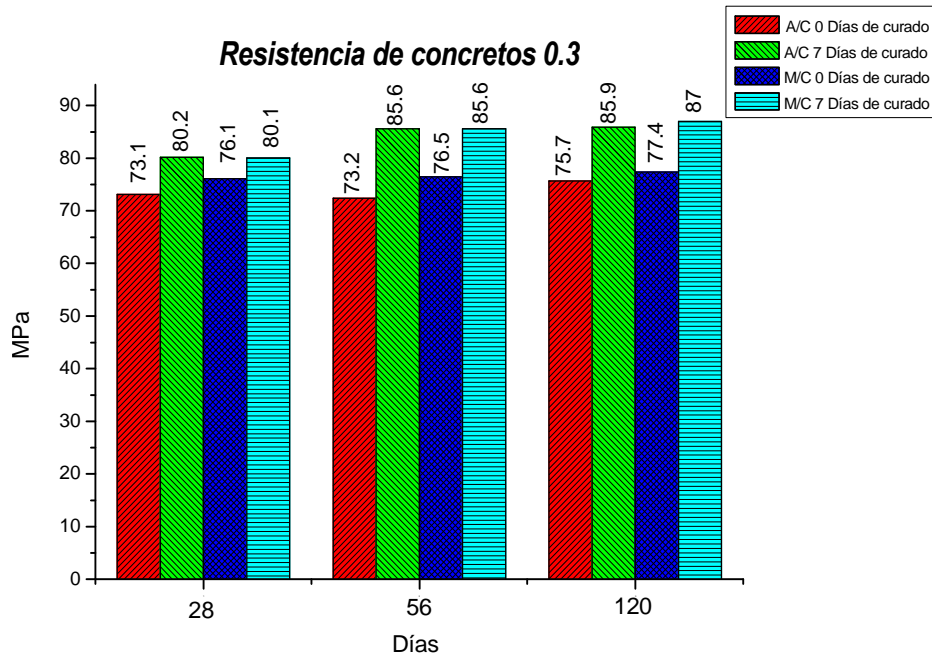


Figura 30. Resistencia a la compresión de concretos a/c y m/c 0.3

Los resultados de resistencia a la compresión en la relación 0.45 a edades de 28, 56 y 120 días de edad se presentan en la Figura 31, puede observarse en todas las edades que la resistencia de los concretos conteniendo solo agua, es mayor (39 a 50 %) que la resistencia de los que contienen mucílago de nopal. Esto indica que para esta relación no hubo influencia benéfica del uso de mucílago de nopal en el concreto.

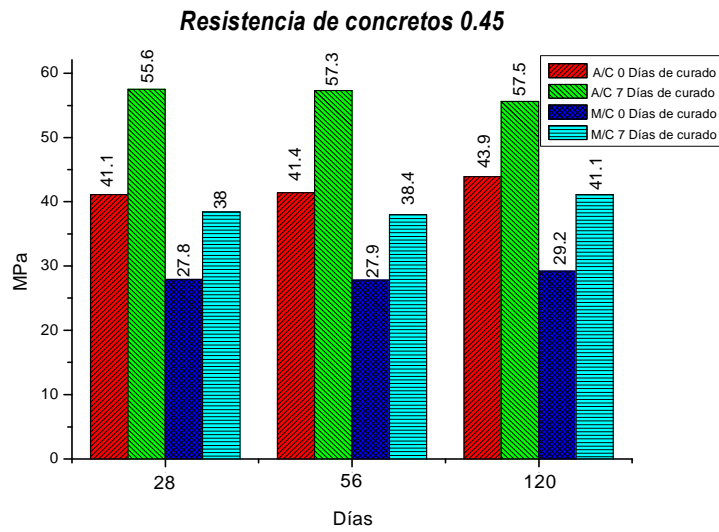


Figura 31. Resistencia concretos a/c y m/c 0.45.

La resistencia de los concretos a/c y m/c 0.6 de las edades de 28, 56 y 120 días se aprecia en la Figura 32, observando que al igual que en la relación 0.45 la resistencia de los concretos a/c está por encima de la de m/c y este incremento es muy notable ya que la resistencia de a/c es mayor del doble de la de m/c, indicando así que la adición del mucílago de nopal no tuvo influencia benéfica en la resistencia del concreto.

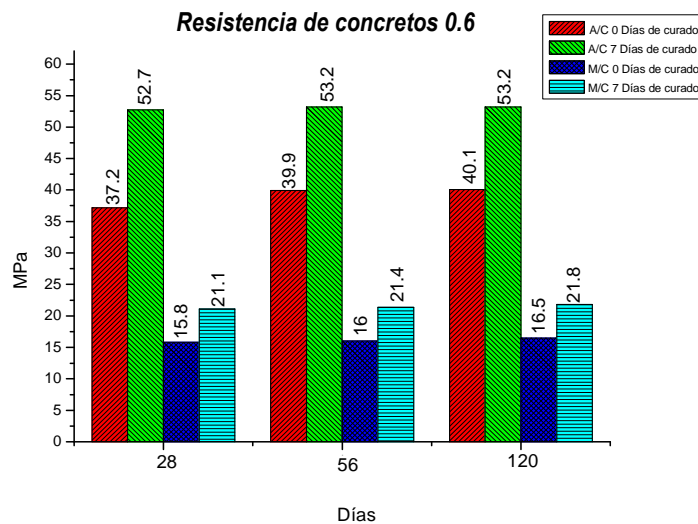


Figura 32. Resistencia concretos a/c y m/c 0.6.

Chandra (1998), *et al* menciona en su artículo, que el mucílago de nopal tiene efecto a edades avanzadas, es decir, a la edad de 90 días se ve reflejado el aumento de la resistencia de los concretos respecto a las muestras control (a/c), sin embargo, en la investigación realizada en los concretos de relaciones 0.45 y 0.6 de mezclas m/c la resistencia de los concretos es inferior respecto a las muestras control (a/c), indicando que el mucílago no tuvo influencia benéfica en este aspecto, aunque la edad de los cilindros de ensaye se realizó hasta 120 días y no se apreció que sobrepasaran las resistencias de las muestras control.

Los datos de la prueba de porosidad (Tabla 8), donde se muestra que el volumen de poros en la relaciones 0.45 y 0.6 m/c es mayor que las muestras de referencia a/c, es un indicio de disminución en las resistencias de los concretos. Aitcin (2007), concluyo que por cada 1% de aumento de contenido de aire en el concreto la resistencia se reduce hasta 10%.

Tabla 8. % de Volumen de poros de las mezclas de concreto a/c y m/c.

Prueba		Curado : 0 dias		Curado : 7 dias	
		a/c	m/c	a/c	m/c
Volumen de poros permeables	0.30, edad 28 días	8.46 ± 0.33	6.51 ± 0.37	6.51 ± 0.37	7.67 ± 0.41
	0.30, edad 56 días	9.45 ± 0.41	8.09 ± 0.56	9.12 ± 0.48	8.42 ± 0.45
	0.45, edad 28 días	10.33±1.02	11.94 ± 0.10	8.76 ± 0.51	11.97 ± 0.60
	0.45, edad 56 días.	11.48 ± 0.39	14.04 ± 0.47	11.39 ± 1.24	14.64 ± 0.59
	0.45, edad 120 días	10.27 ± 0.40	13.17 ± 0.57	10.61 ± 0.66	12.54 ± 0.83
	0.60, edad 28 días	10.41 ± 0.58	11.44 ± 0.91	10.17 ± 0.44	11.50 ± 1.01
	0.60, edad 56 días	12.33 ± 1.03	12.56 ± 1.02	11.06 ± 0.58	13.11 ± 0.78
	0.60, edad 120 días	13.32 ± 0.82	13.67 ± 1.06	13.01 ± 0.78	14.48 ± 1.05

4.6 Módulo de elasticidad

Una vez que se establecieron las ecuaciones a emplear para el cálculo del módulo de elasticidad se muestra la Figura 33, donde se puede observar que al igual que en las resistencias de los concretos 0.3, el mucílago tiene beneficio también en el módulo de elasticidad, por otro lado, se ve la influencia que tiene la edad de curado en los concretos, siendo éstos con mayor módulo de elasticidad y mayor resistencia.

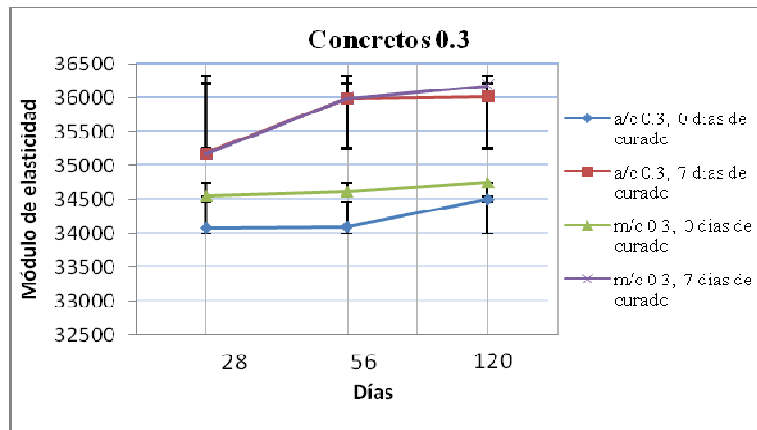


Figura 33. Módulo de elasticidad de los concretos a/c y m/c 0.3.

Para los concretos de relación 0.45 los módulos se aprecian en la Figura 34, observando que al igual que la resistencia a la compresión que el mucílago de nopal no tuvo influencia benéfica, ya que actúa como retardante de la hidratación.

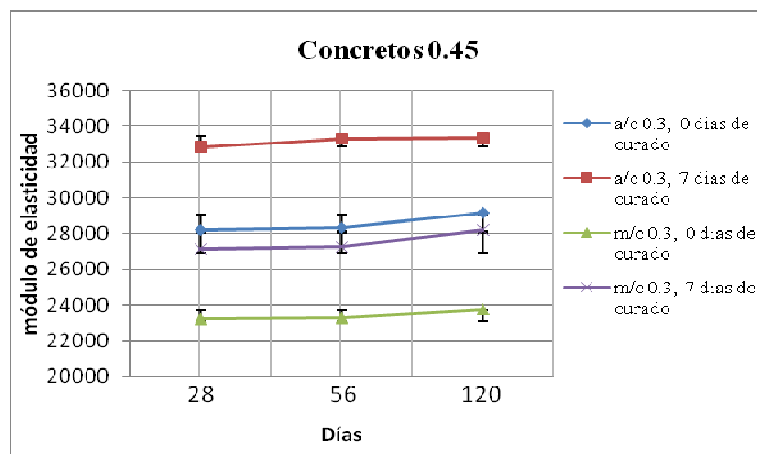


Figura 34. Módulo de elasticidad de los concretos a/c y m/c 0.45.

Subsecuentemente para los concretos de relación 0.6 se calcularon su módulos pudiéndolos observar en la Figura 35, se aprecia que al igual que en lo concretos de relación 0.45, el mucílago no tiene influencia benéfica, sin embargo, si se aprecia que el módulo de elasticidad va aumentando conforme a las edades de ensaye.

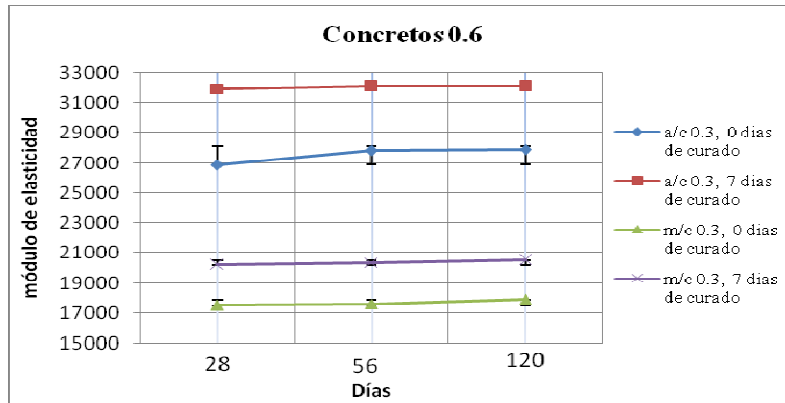


Figura 35. Módulo de elasticidad de los concretos a/c y m/c 0.6.

4.7 Análisis microestructural

En el microscopio electrónico de barrido (MEB) se analizó una muestra de cemento blanco, al cual se le bañó con oro paladio para que fuera conductora y así tomarse las imágenes (Figura 37), también se le realizó el estudio de microanálisis Figura 36 con el objeto de conocer las cantidades de cada uno de los elementos que conforman el cemento blanco, obteniendo como resultado que el cemento contiene un 73.8 % de Calcio, 18.06 % de Sílice, 4.99 % de Aluminio, un 2.36 % de Azufre y un 0.79 % de Mg.

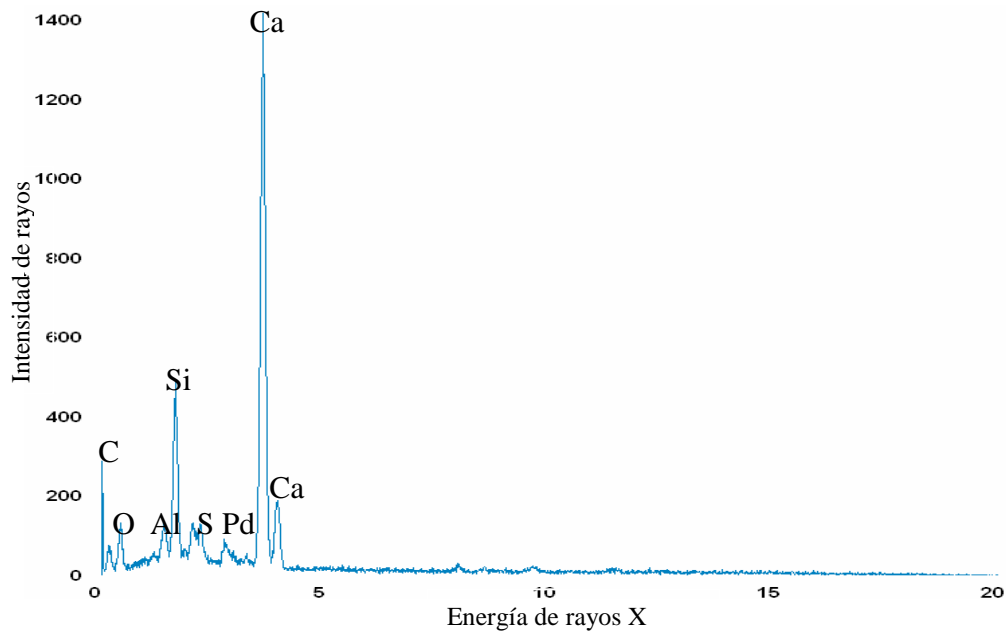


Figura 36. Microanálisis del cemento blanco.

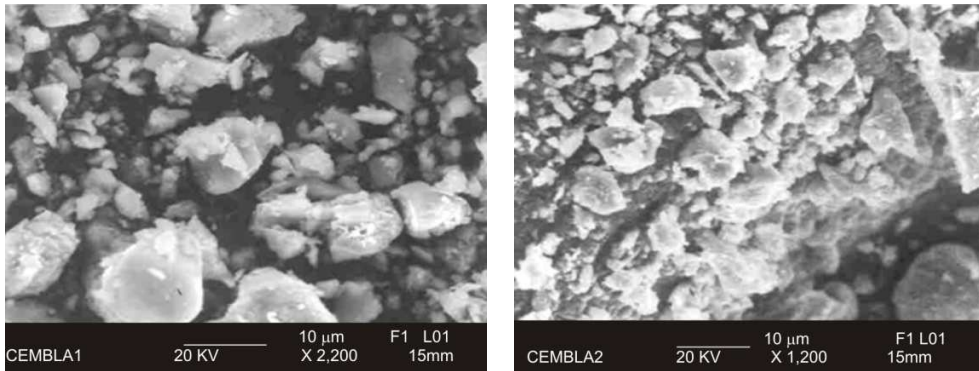


Figura 37. Fotos del MEB de cemento blanco.

Así mismo se realizó el análisis microestructural de las pastas de cemento (a/c y m/c) a la edad de 28 días, con la ayuda del microscopio electrónico de barrido como se pueden observar en la Figura 38-a (a/c) se aprecian microgrietas (m) y no hay indicios de formación de algún cristal. En la Figura 38-b (m/c) se observa que hay un mejor refinamiento en la estructura de la pasta, pero también se observan microgrietas.

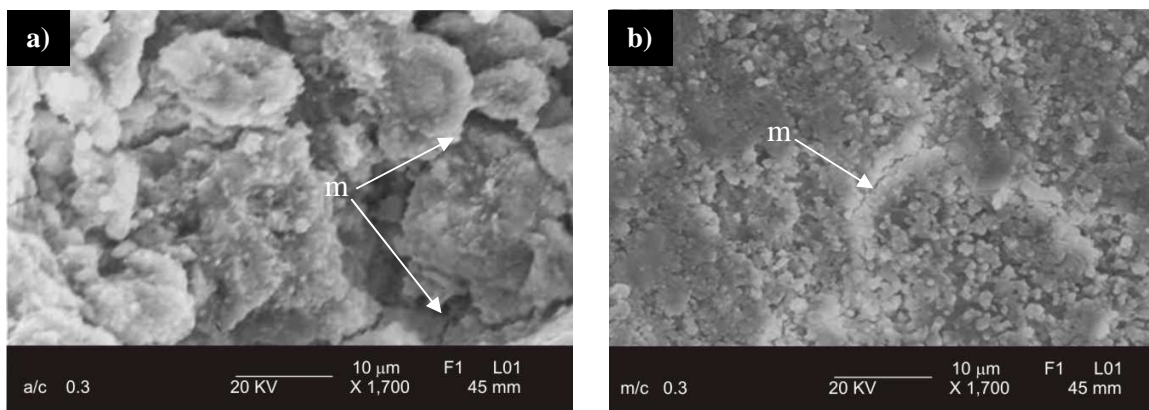


Figura 38. Microfotografía de la pasta de a/c (a) y m/c (b) de la relación 0.3 a 28 días.

En la pastas de relación 0.45 tanto de a/c y m/c se tomaron fotos de su microestructura a la edad de 28 días, donde en la Figura 39-a se aprecia la presencia de Silicato Hidratado de Calcio (CSH), de Etringita (E) alrededor del CSH y de microgrietas. En la Figura 39-b se tiene la pasta m/c donde no se distinguen las formaciones de etringita como en las pasta a/c, pudiendo ver solo las microgrietas.

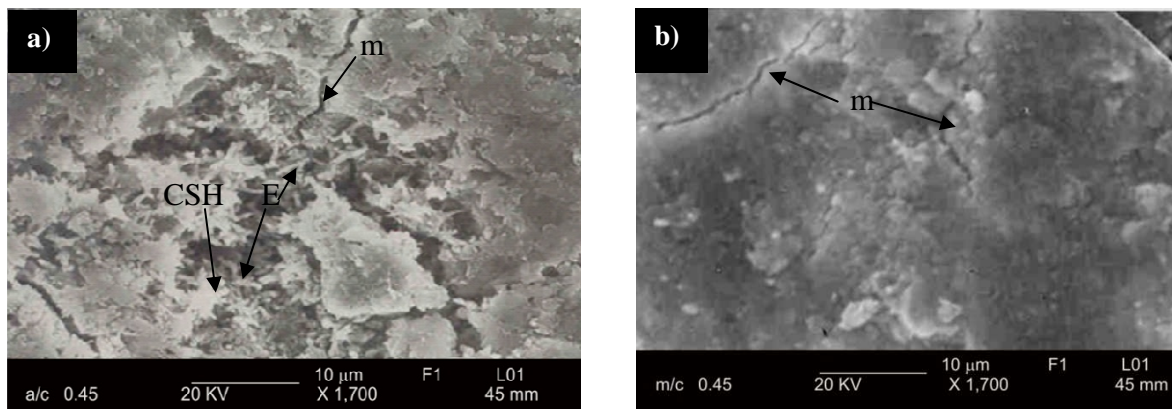


Figura 39. Microfotografía de la pasta de a/c (a) y m/c (b) de la relación 0.45 a 28 días.

En la pasta de relación 0.6 a/c y m/c, se tomaron microfotografías a la edad de 28 días para observar su microestructura. En la Figura 40-a se tiene la pasta a/c, observando la presencia etringita aunque poca, microgrietas y de porosidad (p). En la Figura 40-b se tiene la pasta m/c, donde no se ve la presencia de los cristales, si se ve porosidad en su microestructura al igual que microgrietas.

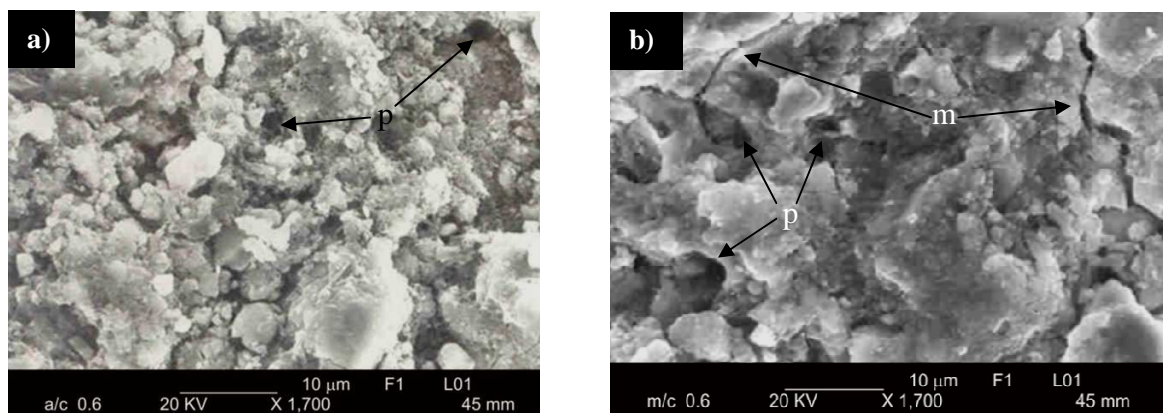


Figura 40. Microfotografía de la pasta a/c (a) y m/c (b) de la relación 0.6 a 28 días.

Una vez que se culminaron las pruebas de microestructura a 28 días de edad de las pastas a/c y m/c, se esperó a que las otras pastillas cumplieran la edad de 56 días para proceder a hacer su análisis microestructural.

Transcurrido la edad de 56 días de las pasta a/c y m/c, se procedió a su análisis microestructural, en esta etapa se analizaron solo la mezcla de a/c 0.6 y la m/c 0.45 que es

donde se aprecian algunos cristales derivados de la hidratación. La mezcla 0.6 se aprecia en la Figura 41-a, donde se observan los cristales de etringita en abundancia, silicato hidratado de calcio (CSH), y algunos cristales de Hidróxido de Calcio. En la mezcla m/c 0.45, Figura 41-b se observan tan solo unos cristales de etringita y de CSH.

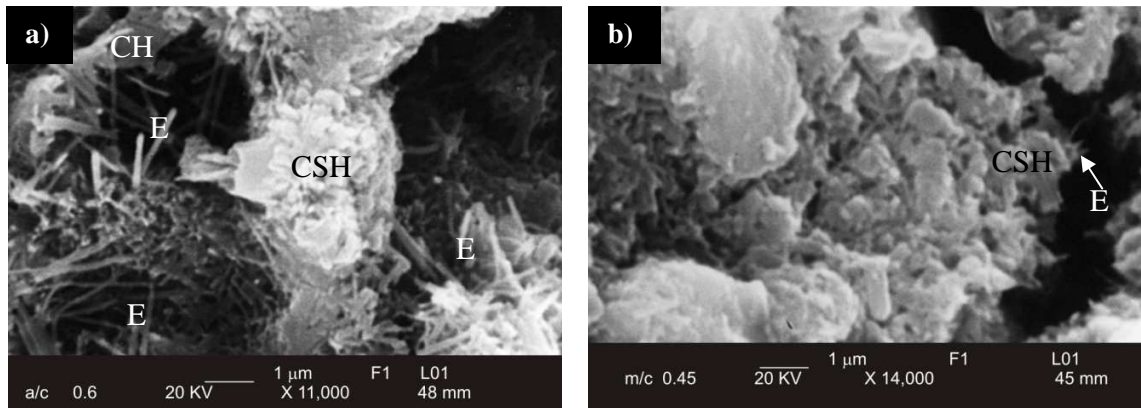


Figura 41. Microfotografía de la pasta a/c (a) con relación 0.6 y m/c (b) de la relación 0.45 a 56 días.

A la edad de 120 días de las pastas a/c y m/c se les realizó el análisis microestructural. En la Figura 42-a se aprecia la estructura de la pasta a/c 0.3, en donde se observan claramente los cristales de Hidróxido de Calcio, el Silicato Hidratado de Calcio (CSH) y las agujas de etringita. En la Figura 42-b se tiene la pasta m/c 0.3, donde tan solo se observa unas pequeñas agujas de etringita y de CSH. Una observación importante es que ambas fotos fueron tomadas a 18,000 aumentos para hacer la comparación.

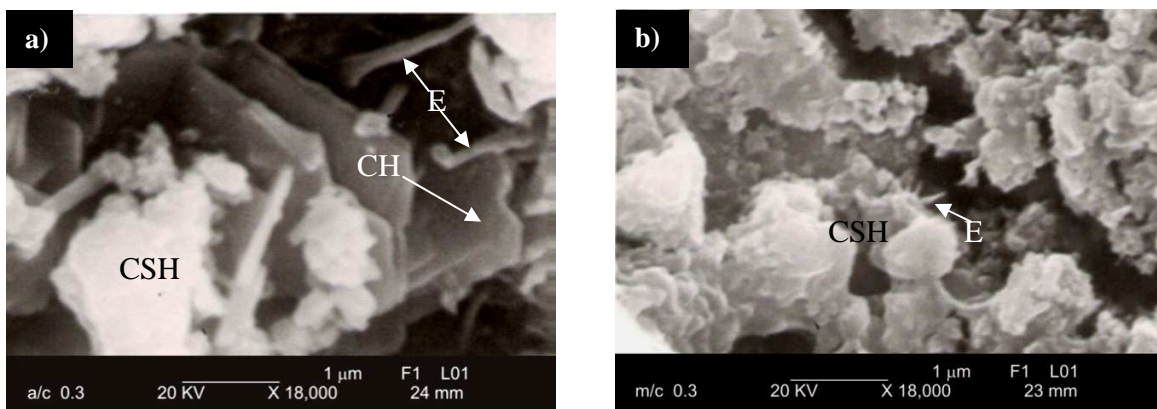


Figura 42. Microfotografía de la pasta a/c (a) y m/c (b) de relación 0.3 a 120 días.

Así mismo se tomaron fotos de la relación a/c y m/c 0.45, en la Figura 43-a se tiene la estructura de la pasta a/c, observando formaciones de etringita y de CSH, en la Figura 43-b se tiene las agujas de etringita y CSH, también se observa en la pasta de m/c algunos poros.

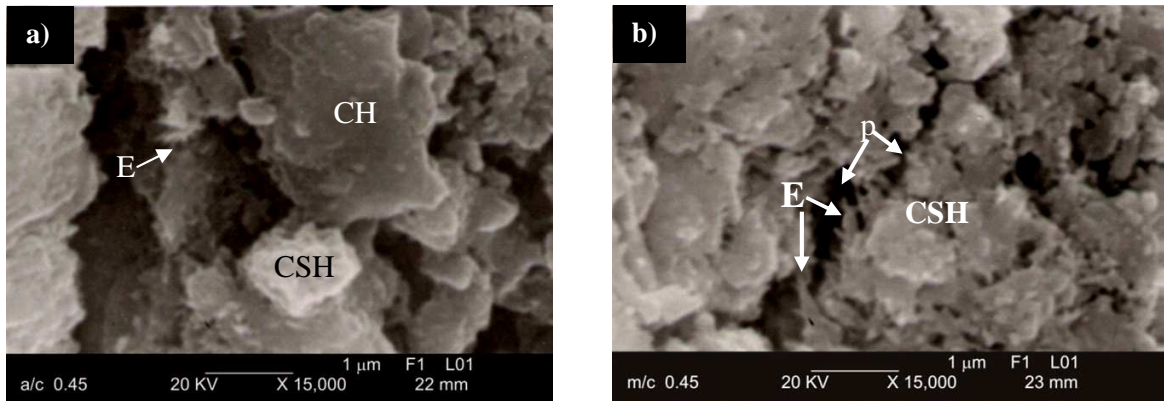


Figura 43. Microfotografía de la pasta a/c (a) y m/c (b) de relación 0.45 a 120 días.

En la Figura 44-a se observa la pasta a/c 0.6, apreciando los cristales de hidróxido de calcio, el silicato hidratado de calcio y las agujas de etringita, por otro lado, en la Figura 44-b se tiene la pasta a/c donde se observan las agujas de etringita y de silicato hidratado de calcio

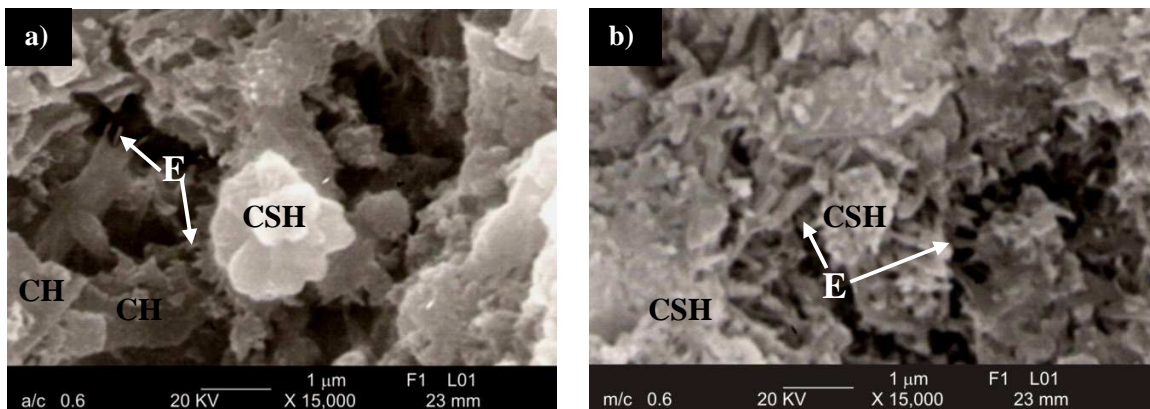


Figura 44. Microfotografía de la pasta a/c (a) y m/c (b) de relación 0.6 a 120 días.

Con base en la observación de las figuras de MEB se corrobora la disminución de los cristales de hidróxido de calcio debido a la utilización de mucílago de nopal Chandra *et al*(1998), asimismo, menciona que el mucílago de nopal actúa como agente retardador de la hidratación, lo cual se corrobora de acuerdo a las pruebas que se realizaron de MEB y de

Tiempo de fraguado, donde la pastas de m/c tiene un mayor tiempo en su fraguado inicial así como el final a comparación de las muestras control (a/c).

4.8 Difracción de rayos X

Se realizó el análisis del cemento blanco pudiendo lograr obtener las principales fases mineralógicas del cemento (Figura 45), donde se puede observar que a $11^\circ \sim 2\theta$ se tiene el pico de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), a $20^\circ \sim 2\theta$ se tiene el pico de dióxido de silicio “cuarzo” (SiO_2), a 29 y $39^\circ \sim 2\theta$ se tienen los picos de carbonato de calcio “calcita” (CaCO_3), a 32 , 41 y $51^\circ \sim 2\theta$ se tienen los picos de silicato dicálcico “Iarnita” (C_2S), a 30 y $33^\circ \sim 2\theta$ se tienen los picos de silicato tricálcico (C_3S).

Este difractograma se comparó con otro (anexo 1) y el resultado que se obtuvo fue parecido al que él presenta, éste análisis se hizo con el equipo de difracción de rayos X y se corroboró calculando la intensidad de los picos con la ley de Bragg.

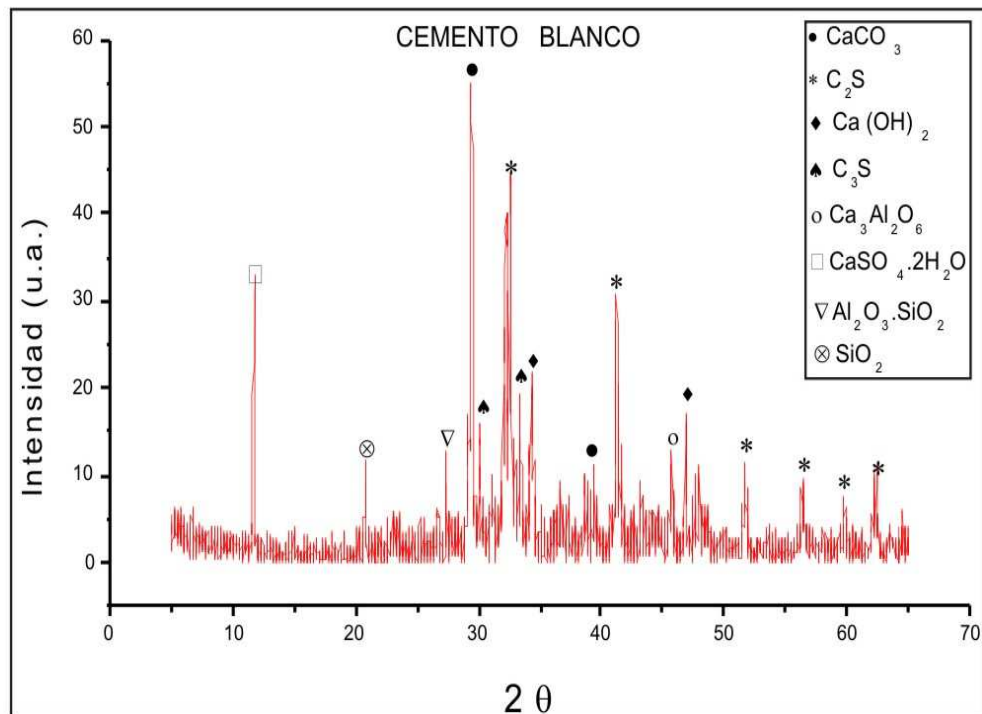


Figura 45. DRX del cemento blanco.

Posteriormente se analizaron las pastas de a/c 0.3 a las edades de 3, 7 y 28 días, pudiéndose ver en la Figura 46. En estos difractogramas se observan algunas diferencias en cuanto a la hidratación de las fases cristalinas, se aprecia que hay un mayor consumo en los cristales de C_2S y C_3S en la pasta, lo que va generando la portlandita que viene siendo el CH, además, de que a los 28 días se tiene silicato hidratado de aluminio, por otro lado se observa el consumo de CH, lo cual haría que al haber consumo de éste, se está formando el CSH, lo cual beneficia en la resistencia del concreto.

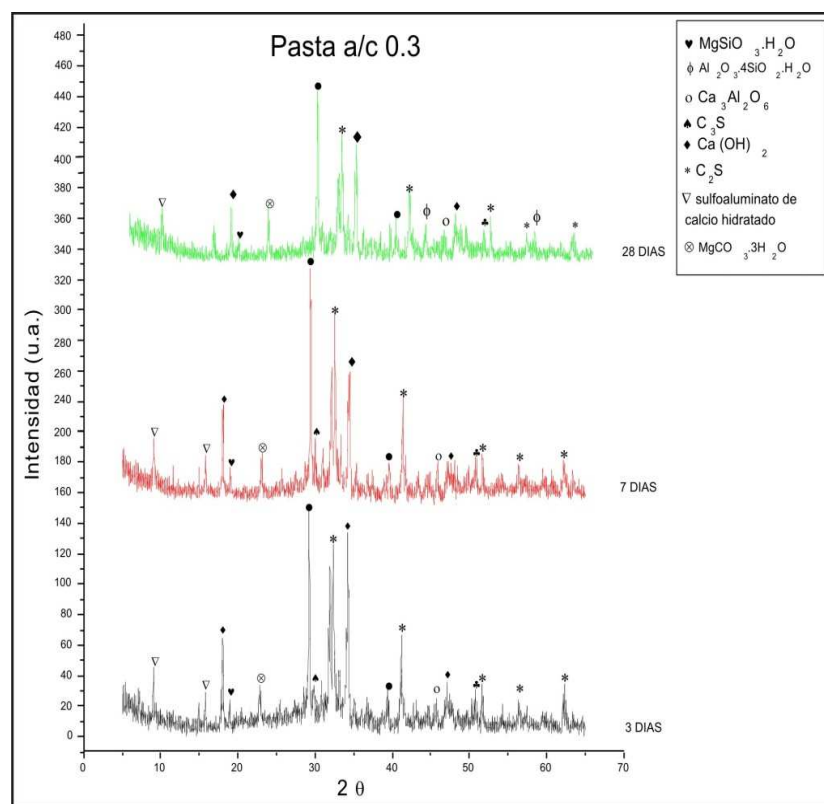


Figura 46. DRX de las pastas a/c 0.3 a 3,7 y 28 días.

En la siguiente Figura 47 se puede apreciar el difractograma de las pastas m/c 0.3 a las edades de 3, 7 y 28 días, observando las fases cristalinas que se originan debido a la hidratación. En estos difractogramas se observan que hay consumo en los cristales de C_2S y C_3S en la pasta, lo que va generando la portlandita CH, además, conforme al paso de los días el hidróxido de calcio (CH) va disminuyendo y formándose a la vez el CSH (gel de tobermorita) que es lo que le da mayor resistencia al concreto, por otro lado, se aprecia que

el consumo de CH es mayor que en la pasta a/c, lo cual esto se refleja en la resistencia del concreto, ya que hay mayor formación de CSH.

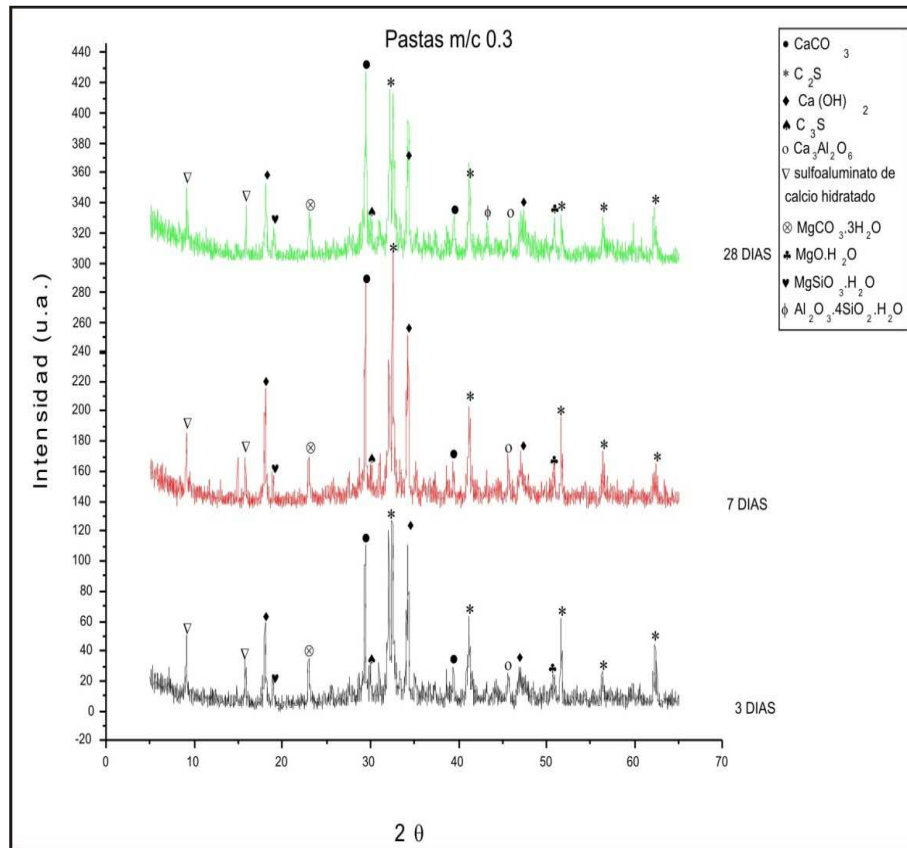


Figura 47. DRX de las pastas m/c 0.3 a 3, 7 y 28 días.

En la Figura 48 se tiene el difractograma de las pastas a/c 0.45 a las edades de 3, 7 y 28 días, observando las fases cristalinas que se derivan de la hidratación. En estos difractogramas se observan que hay consumo en los cristales de C_3S y C_2S en la pasta, lo que hace que se forme la portlandita (CSH), además, conforme el paso de los días el CH va disminuyendo y formándose a la vez el CSH el cual le da resistencia al concreto, subsecuentemente, se aprecia que el consumo de CH es mayor que en la pasta m/c, lo cual esto se refleja en la resistencia del concreto, ya que hay mayor formación de CSH. Además hay formaciones de aluminato tricálcico, aluminosilicatos hidratados, que no se presentan en los primeros días, sino a edades avanzadas.

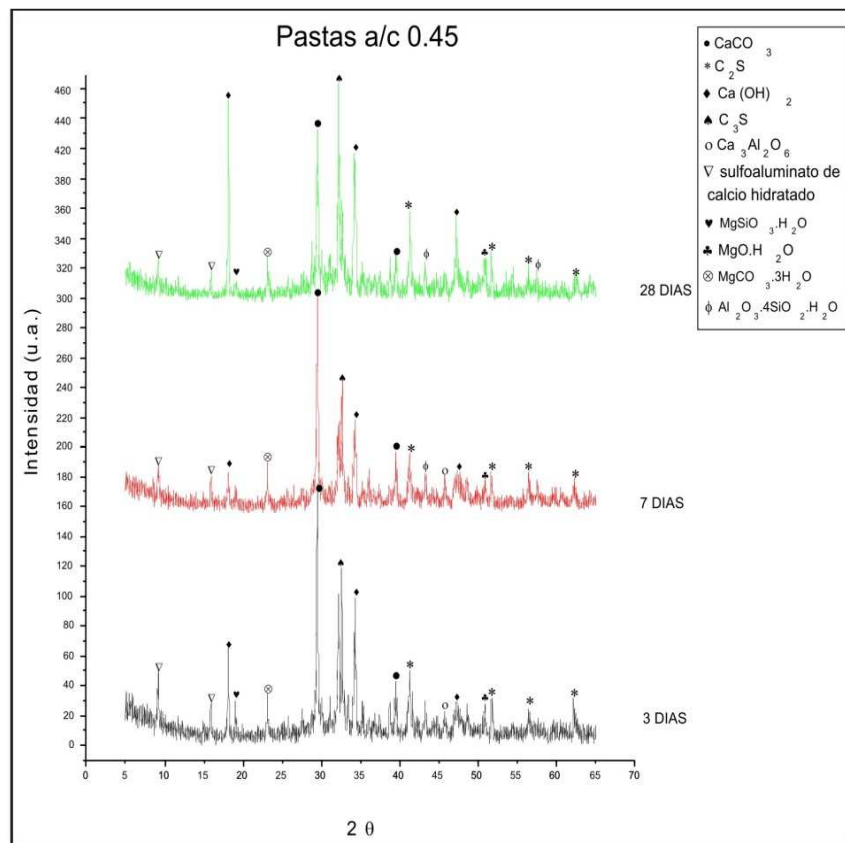


Figura 48. DRX de las pastas a/c 0.45 a 3, 7 y 28 días.

En la Figura 49 se tiene el difractograma de la pasta m/c 0.45 a las edades de 3, 7 y 28 días donde se identifican las fases cristalinas debido a la hidratación del cemento. En estos difractogramas se aprecia el consumo de CH, pero menor con respecto a la mezcla a/c, lo que nos indica que el CHS se está formando pero más lentamente, por otro lado, el C₂S y C₃S se van consumiendo o hidratando para la formación de CSH (gel de tobermorita). Este proceso lento de hidratación se ve reflejado en la resistencia de los concretos de m/c, es decir, que la resistencia de estas mezclas están por debajo de la mezclas de a/c en todas las edades de prueba de los especímenes. De acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas micro (MEB y DRX) de las pastas a/c y m/c 0.45, se ve reflejado en las pruebas macro (f'c y E), donde se obtienen mejores resistencias en los concretos a/c.

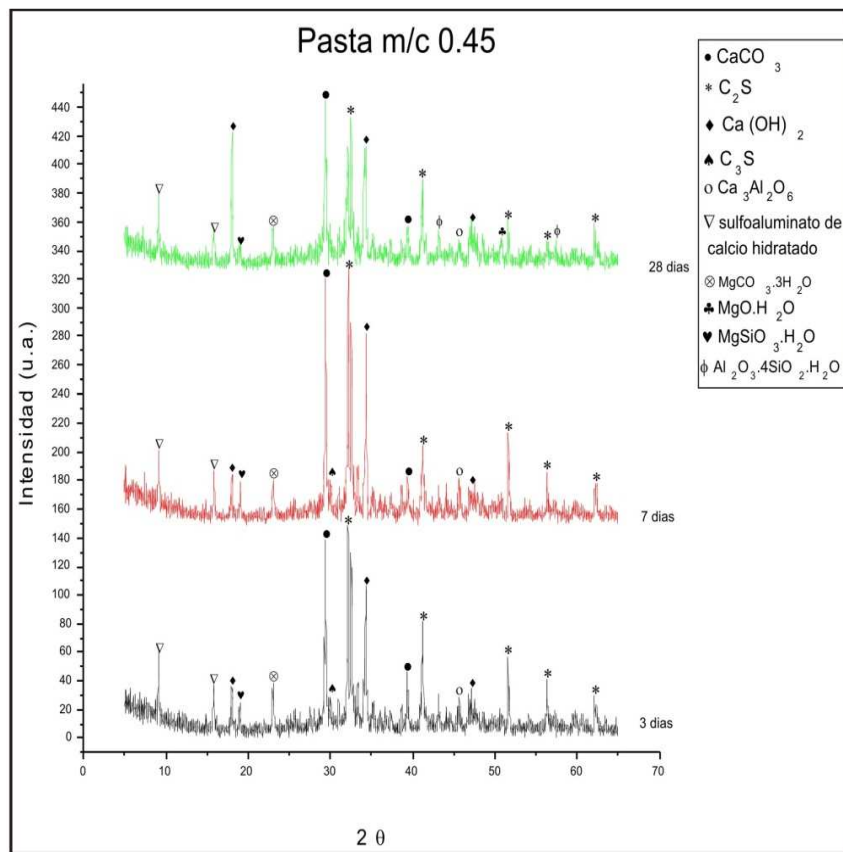


Figura 49. DRX de las pastas m/c 0.45 a 3, 7 y 28 días.

En la Figura 50 se tiene el difractograma de las pasta a/c 0.6 a las edades de 3, 7 y 28 días, donde se identificaron sus fases cristalinas producidos por la hidratación del cemento. En los difractogramas mostrados se observa que hay consumo en el CH, C₂S y C₃S, que son los que generan el CSH y le da la resistencia al concreto. Además, hay formaciones de aluminato tricálcico, aluminosilicatos hidratados, así como de otros productos de hidratación, pero estas formaciones ocurren un poco más lento a las relaciones anteriores debido a que la relación a/c es muy alta, y por otro lado, la resistencia también es baja en comparación a las resistencias de las relaciones 0.3 y 0.45 de a/c.

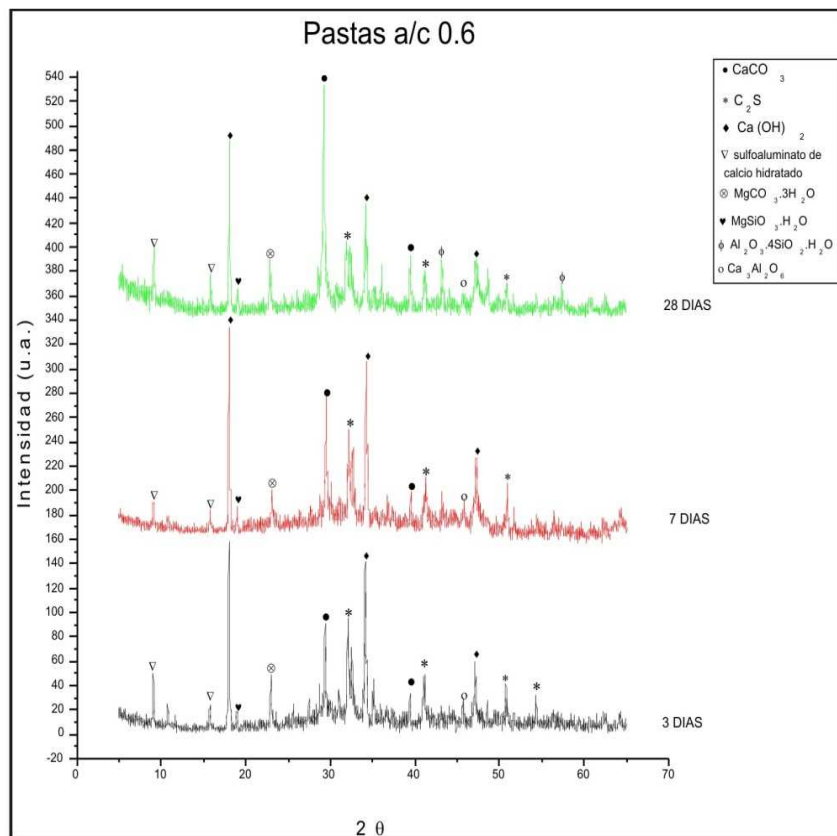


Figura 50. DRX de las pastas a/c 0.6 a 3, 7 y 28 días.

En la Figura 51 se aprecia el difractograma de la pasta m/c 0.6 a las edades de 3, 7 y 28 días, con la identificación de las fases cristalinas producidas por la hidratación del cemento. En estos difractogramas se aprecia el consumo de CH, pero menor con respecto a la mezcla a/c, indicando que el CHS se está formando pero lentamente, por otro lado, el C_2S y C_3S se van consumiendo o hidratando para la formación de CSH. Este proceso lento de hidratación se ve reflejado en la resistencia de los concretos de m/c, es decir, que la resistencia de estas mezclas están por debajo de la mezclas a/c en todas las edades de prueba de los especímenes. Además, hay formaciones de aluminato tricálcico, aluminosilicatos hidratados, así como de otros productos de hidratación, pero estas formaciones ocurren más lento debido a que la relación m/c es muy alta.

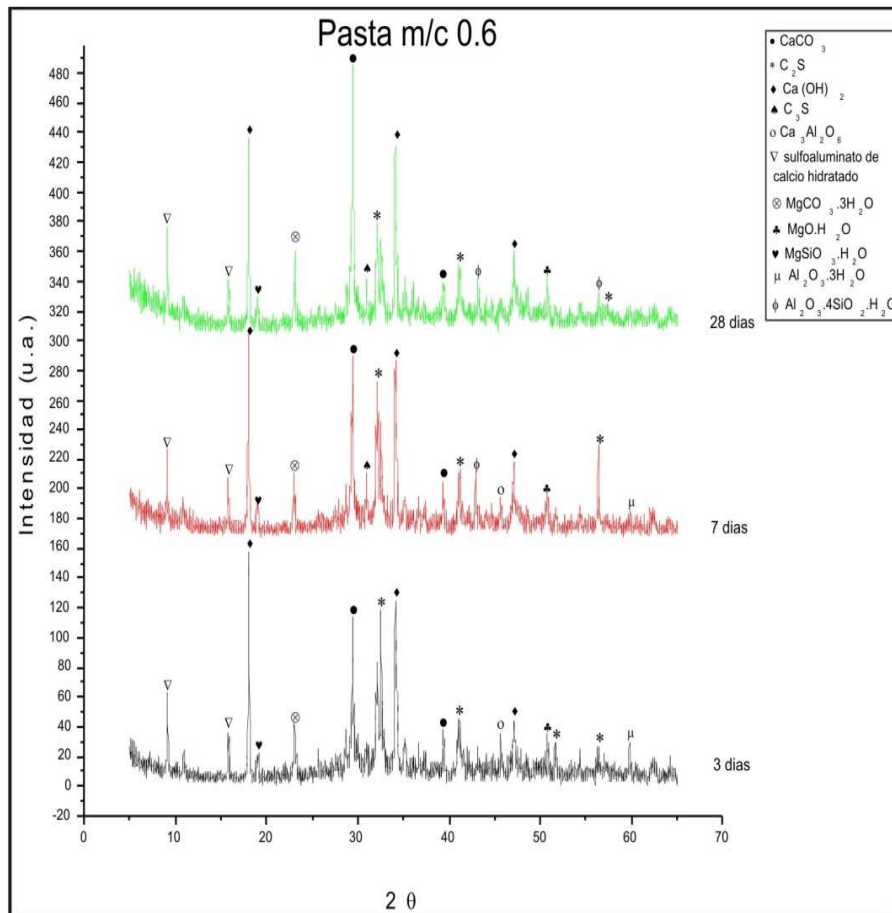


Figura 51. DRX de las pastas m/c 0.6 a 3, 7 y 28 días.

4.9 Espectroscopía infrarroja

El mucílago de nopal fue analizado con la técnica de FTIR (Figura 52), esto mezclado con KBr (Bromuro de Potasio) para lograr la difracción de los rayos y se pudiera observar el espectro del mucílago de nopal, se tomaron las consideraciones de hacerle 16 escaneos en un intervalo de 370 a 4000 en número de onda cm^{-1} .

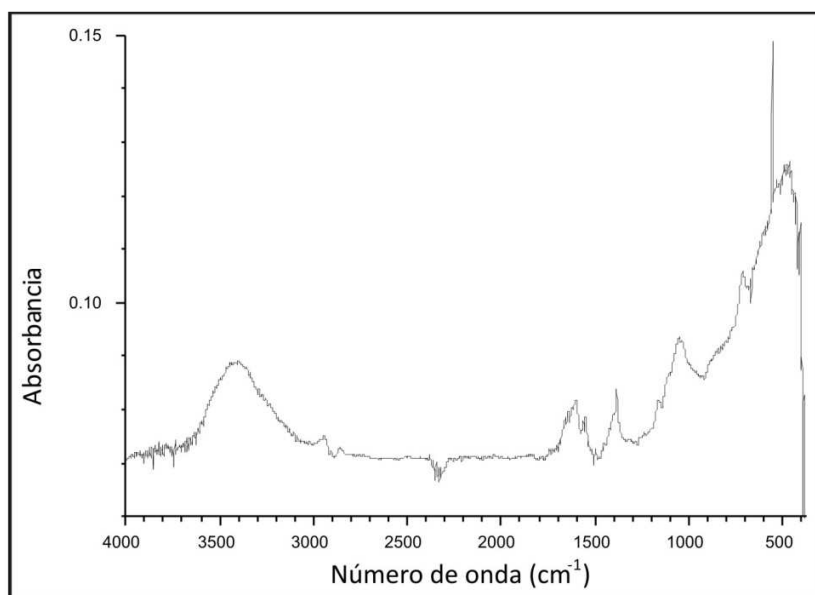


Figura 52. Espectro infrarrojo del mucílago en pastillas de KBr.

1. El espectro muestra las bandas características de las proteínas y la vibración del polisacárido. La banda ancha que va desde 3000 hasta 3600 cm^{-1} , es el acoplamiento de las vibraciones de elongación de los enlaces N-H (Proteína) y O-H del agua y de los polisacáridos.

2. La banda ancha cuyo máximo se observa alrededor de 1600 corresponde a la vibración Amida I, que se compone de las vibraciones acopladas de los enlaces C=O (elongación), N-H (deformación) y C-N (deformación). Las bandas que se observan a aproximadamente 1650 corresponden a la vibración de deformación del O-H del agua principalmente. La banda Amida II se encuentra a 1550 cm^{-1} , esta corresponde a la deformación N-H acoplada con la deformación C-N. Cabe mencionar que Chandra et al observan esta banda alrededor de 1400 cm^{-1} , ya que en su espectro, a mayores números de onda solo aparece una banda bien definida que designan a la Amida I. En el espectro la banda situada a 1380 cm^{-1} se encuentra muy alejada de las posiciones conocidas de la banda Amida II de 1500 a 1600 cm^{-1} , además, la intensidad de la Amida II es generalmente menor a la de la Amida I. Por estas razones se considera que la banda en cuestión no pertenece a la Amida II, sin embargo y bajo reserva, puede asignarse a vibraciones de deformación C-H de los polisacáridos.

3. La banda cuyo máximo se sitúa a $\sim 1050\text{ cm}^{-1}$, corresponde a los polisacáridos.

El espectro IR del cemento se presenta en la Figura 53. El cemento muestra la presencia de silicatos cálcicos, yeso y calcita, sin embargo las vibraciones correspondientes a los aluminatos no se observan claramente. En la Tabla 9 se enlistan las principales bandas del espectro así como su asignación. La asignación de las vibraciones se realizó en base a la observación de los espectros de los diferentes compuestos presentes en el cemento y de los datos obtenidos de la bibliografía. Cabe mencionar que dada la complejidad en la composición del cemento las bandas de la región entre $500\text{ y }1500\text{ cm}^{-1}$ son diferentes vibraciones traslapadas.

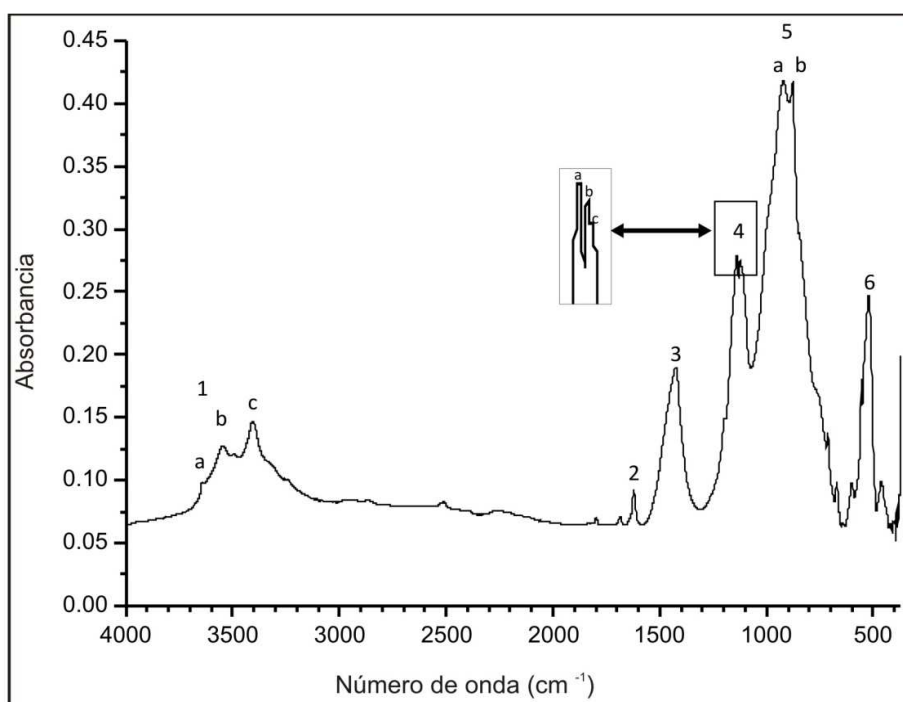


Figura 53. Espectro infrarrojo del cemento en pastillas de KBr.

Tabla 9. Asignación de bandas de vibración del espectro IR del cemento.

Banda	Posición (cm ⁻¹)	Asignación
1	3100-3700	Esta banda está compuesta por vibraciones de elongación de diferentes compuestos. Las vibraciones Si-O, S-O, Ca-O (alita y calcita) y O-H (yeso) generan vibraciones débiles y anchas en esta zona.
1,a	3643	Corresponde a la vibración de elongación Ca-O que es aguda
1,b	3544	Vibración S-O (yeso)
1,c	3404	Vibración S-O (yeso)
2	1622	Doblete con banda a 1685 correspondientes al yeso.
3	1427	Esta banda ancha corresponde al traslapamiento de las vibraciones: 1. C=O y C-O de la calcita cuyo máximo se encuentra en 1425 y 2. Ca-O de la alita cuyo máximo se encuentra en 1450
4	1050-1230	Es el traslapamiento de vibraciones de la sílice (alita y el yeso)
4,a y b	1139, 1124	Vibración de elongación S-O del yeso, generalmente se presenta como un doblete
4,c	1115	Vibración Si-O de la alita, el hombro presente a 1200 cm ⁻¹ corresponde a la misma vibración
5,a	921	Junto con el hombro en 994 cm ⁻¹ y corresponde a la alita.
5,b	877	Es el resultado de la vibración Ca-O de la alita y C-O del carbonato
Los hombros y picos de baja intensidad entre 600 y 850 cm ⁻¹ corresponden a la sílice ~800, alita (Ca-O) ~800, calcita ~700 y yeso 670 y 600 cm ⁻¹ .		
6	520	Corresponde a la alita, principalmente Ca-O

En la Figura 54 se muestra el espectro IR de las pastas a/c y m/c 0.45 registrados inmediatamente después de la preparación (I) y durante los 3 días posteriores a la misma (II, III y IV).

El espectro I, que corresponde a las pastas recién preparadas, fue obtenido solo para la pasta a/c en pastilla de KBr varias horas después de la preparación. Cabe mencionar que la pasta a/c fue analizada utilizando un aditamento para líquidos (ZnSe) inmediatamente después de la preparación y a diferentes intervalos de tiempo, primero cada 5 minutos y después cada hora. Los espectros obtenidos no muestran ninguna diferencia en función del tiempo pero dada la absorción del ZnSe, las bandas de la etringita ubicadas alrededor de 1000 cm⁻¹ no se pueden observar correctamente. Por esta razón se decidió analizar las pastas en pastillas de KBr.

Ante la falta del espectro de la pasta inicial (I) m/c, la comparación de ésta con la pasta a/c se efectuó para los espectros obtenidos en los diferentes tiempos. En los espectros registrados durante los primeros días, no se observa ninguna diferencia entre las pastas a/c y m/c. Es por esta razón que solo se presentan los espectros de la pasta a/c. Sin, embargo, para ejemplificar la similitud entre las pastas a/c y m/c se muestra el espectro II obtenido un día después de la preparación de ambas pastas. Como se puede observar no hay diferencia notable entre las pastas a/c y m/c, solo un pico apenas visible a 1600 cm^{-1} en la pasta m/c puede ser asignado a la banda Amida I de las proteínas. La banda amida I desaparece en el espectro registrado tres días después de la preparación de la pasta. Por otro lado, ningún rastro de polisacáridos se encontró en las pastas m/c.

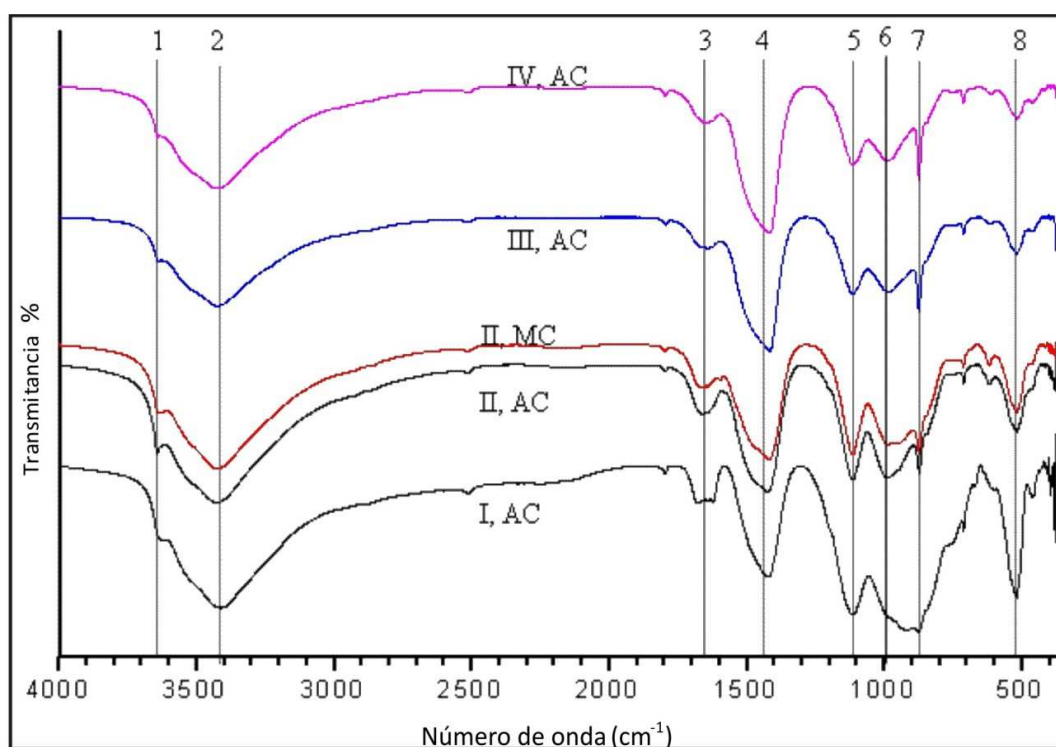


Figura 54. Espectros infrarrojo de las pastas AC y MC registrados a diferentes tiempos después de la preparación: a: I, el mismo día, II un día, III dos días y IV tres días.

A continuación se enlistan las bandas de las pastas hidratadas.

1. La banda 1, 3530 cm^{-1} , es asignada a la vibración O-H de la Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$)

-
2. La banda numero 2, $3100-3700\text{ cm}^{-1}$, corresponde al traslapamiento de varios enlaces: O-H del agua, de la portlandita y de la etringita así como S-O.
 3. La banda 3, 1650 cm^{-1} , está constituida por vibraciones de deformación O-H característica del agua. Con respecto al espectro I-AC, obtenido unas horas después de la preparación de las mezclas, éste presenta un doblete, cuyos máximos son similares a las posiciones encontradas en el yeso y que corresponden al agua contenida en el mismo.
 4. El pico 4 con un máximo en 1425 cm^{-1} y un hombro en 1485 cm^{-1} , corresponde a la calcita y a la portlandita.
 5. La banda número 5, 1120 cm^{-1} , corresponde a la vibración S-O de la etringita.
 6. Las vibraciones de elongación Si-O se observan en la banda 6, cuyo máximo se encuentran en 985 cm^{-1} . En las primeras horas esta banda se presenta traslapada con una vibración situada en 930 cm^{-1} y con la banda 7. Con el paso del tiempo la vibración observada en 930 cm^{-1} disminuye su intensidad hasta presentarse como un hombro en los espectros III y IV. No hay reportes de este hombro, sin embargo por su posición puede corresponder a la misma vibración S-O.
 7. La banda 7 es asignada a la calcita.
 8. La vibración 8, situada en 525 cm^{-1} corresponde a la deformación del enlace Si-O.

Para observar los cambios de las pastas a tiempos largos se registraron los espectros un mes después de la preparación, los espectros se muestran en la Figura 55. Los espectros nombrados II corresponden a las pastas analizadas un día después de la preparación mientras que los espectros denotados V se registraron en el plazo de un mes.

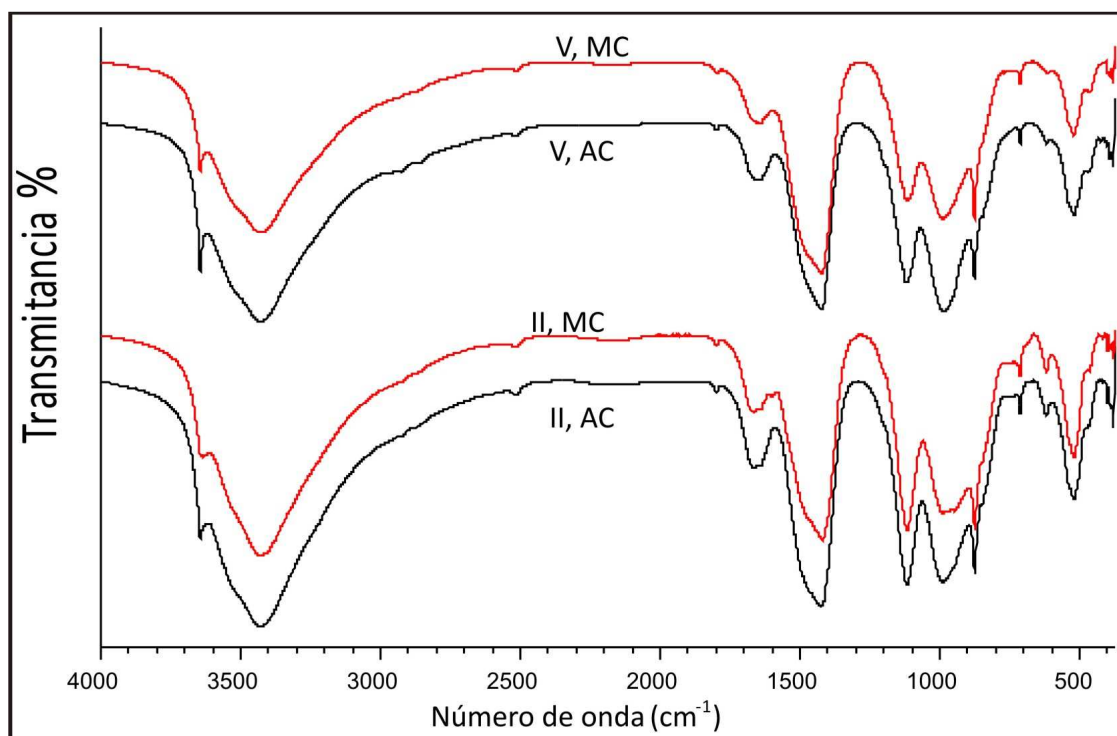


Figura 55. FTIR de las pastas a/c y m/c registrados: II) un día después de la preparación, y V) un mes después.

La comparación entre los espectros de las pastas recién preparadas (II) y envejecidas (v) arroja pocas diferencias.

Primero, la pequeña banda presente en la pasta II m/c a 1600 cm^{-1} y asignada a la banda amida I no se observa en la pasta envejecida V, m/c, la desaparición de esta banda se observó ya en el espectro IV m/c. Esto puede ser un indicativo de la degradación de la proteína contenida en el mucílago.

En segundo lugar las pastas envejecidas muestran una mayor intensidad de la banda situada a 980 cm^{-1} (vibración de elongación Si-O) con respecto a la banda nombrada 5 en la Figura 54 y que corresponde a la vibración S-O de la etringita. Esto concuerda con lo reportado en la literatura (Galen, G, Hidalgo 1978) donde se menciona que las vibraciones Si-O pueden oscurecer las bandas S-O (SO^{2-}).

Finalmente, en los espectros IR no se encuentran elementos que permitan distinguir entre la cantidad de agua presente en las pastas m/c con respecto a las pastas a/c, por lo que

no se puede concluir al respecto de la influencia del mucílago en la hidratación del cemento.

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. El mucílago incrementa la viscosidad y disminuye la extensibilidad de las pastas de cemento.
2. El mucílago de nopal actúa como retardante al incrementar el tiempo de fraguado en las pasta.
3. El mucílago de nopal en las mezclas de 0.45 y 0.6 (m/c), disminuye la resistencia a la compresión axial y módulo de elasticidad, sin embargo, en la relación 0.3 se tiene incremento de la resistencia y módulo de elasticidad con respecto a las muestras control.
4. En la microestructura de las pastas elaboradas con a/c se observan los cristales de hidróxido de calcio, el silicato hidratado de calcio y la etringita, sin embargo, en las pastas de m/c solo se aprecia etringita y de silicato hidratado de calcio.
5. En la pruebas realizadas de difracción de rayos X de las pastas de m/c 0.45 y 0.6 la intensidad de los picos son mayores con respecto a los de a/c, es decir, no se produce tan rápido la hidratación o el cambio de fase en m/c como en las pastas de a/c.
6. En el estudio de espectroscopia infrarroja realizado en pasta de cemento, no se aprecia diferencia significativa en el uso del mucílago de nopal con respecto a las muestras control de a/c.

RECOMENDACIONES

1. Analizar las características fisicoquímicas del nopal *Opuntia Ficus Indica* para conocer sus propiedades.
2. Probar y determinar las mejores condiciones de extracción del mucílago de nopal para su uso en el concreto.

-
3. Analizar a edades tempranas, resistencia a la compresión y microestructura de pastas y concretos con la adición de mucílago.
 4. Estudiar y analizar la adición de mucílago de nopal en cemento portland ordinario y compuesto.
 5. Estudiar y determinar las nanopartículas y nanominerales que intervienen en la matriz del cemento con la incorporación del mucílago de nopal.

BIBLIOGRAFÍA

ACI, (2001). Manual of concrete practice 2001, ed. ACI International.

Claude, A. P. (2007). Curso “Los cementantes hidráulicos”, Monterrey, NL, México.

American Concrete Institute. *Práctica estándar para el curado del concreto*. ACI- 308. IMCYC

Leaver, A., Rawlings, A., (1998). Ciencia de los materiales serie colección de los materiales colección textos politecnicos. México, Limusa.

Donald, A. R., (2005). Ciencia e Ingeniería de los materiales, EU.

Cullity B. D., (1997). Elements of X-Ray Diffraction, second edition. Addison-Wesley. E.U.

Calleja J. (2001). Caracterización de cenizas volantes para cemento y hormigón. Revista Cemento-Hormigón, pp.1351-1370.

Cano Barrita, P. F de J., Alcántara Hernández, R. M., Chávez Valenzuela, D., Ruiz García, S., Álvarez Soto, H., (2005). Cactus extract as a low-cost viscosity enhancing admixtures for self-consolidating concrete, en proceso.

Carino, N. J., and Clifton, J. R., (1991). Prediction of cracking in reinforced concrete structures High-Performance Concrete: Research Needs to Enhance its Use, Concrete International, September. Vol. 2, pp. 25-36

Cárdenas, A., Arguelles, W. M. y Goycoolea, F. M. (1998). On the Possible Role of Opuntia ficus-indica Mucilage in lime Mortar Performance in the Protection of Historical Buildings, Journal of the Professional Association for Cactus Development, Vol 3.

Cardenas, A., I. Higuera-Ciapara, and Goycoolea, F. M. (1997). Rheology and aggregation of cactus (Opuntia ficus-indica) mucilage in solution, Journal of the Professional Association for Cactus Development, Vol 3., pp. 152-159

Coordinación General de comunicación social y divulgación, *comunicado de prensa*, IPN, (2006).

Chandra, S., Eklund, L., and Villarreal R. R., (1998). Use of Cactus in Mortars and Concrete, Cement and Concrete Research, Vol.28, No.1., pp. 41-51.

Chandra, S. and Aavik, J. (1983). Influence of Black Gram (natural organic material) additions as admixture in cement mortar and concrete, Cement and Concrete Research, Vol.13, pp. 423-430.

Chandra, S. and Flodin, P. (1987). Interaction of polymers and organic admixtures on Portland cement hydration, *Cement and Concrete Research*, Vol.17, pp. 875-890.

C. F. E. (1994). *Manual de tecnología del concreto. Sección 3: Concreto en estado endurecido*. 1ª. Preedición. ed. Limusa: México, D. F.

Espect. Espectros IR obtenidos de diversas fuentes electrónicas, NIST, SDBS, FDM referente spectra Hidalgo. A. Hidalgo, S. Petit, C. Domingo, C. Alonso, C. Andrade, *Cement and Concrete Research* 37 (2007). pp. 63-70

Fitzgerald Robert W. (1990). *Mecánica de los materiales*. Ed.Alfaomega: México, D. F.

Galen W. Ewing, (1978). *Métodos Instrumentales de Análisis Químicos*. McGraw-Hill., pp. 118 -153

Garboczi, E.J., (1990). Permeability, diffusivity, and microstructural parameters: a critical review. *Cement and Concrete Research*, Vol.20, No.4. pp. 591-601.

Geankopolis C.J., *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*, 3º edición, México, CECSA , México (1991).

George Sócrates, Wiley and Sons, tercera edición, (2001). *Soc. Infrared and Raman Characteristic Group Frequencies*, England.

Giraldo Manuel Alejandro y Tobón Jorge Iván (2006). Evolución Mineralógica del Cemento Portland Durante el Proceso de Hidratación. *Dyna*, ISSN 0012-7353, marzo, año/vol. 73, número 148 Universidad Nacional de Colombia Medellín, Colombia pp. 69-81.

Goldstein, Newbury, Echin, (1981). *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*. Plenum press, N. York.

Gybson, A. C., and Nobel, P. S., (1986). *The Cactus Primar*, press: Harvard University Cambridge Massachusetts London, England.

Grudemo A. (1975). Development of strength properties of hydrating cement pastes and their relation to structural features, *Proc.Symp.on Some Recent Research on Cement Hydration*, Cembereu., p. 8.

Harold F. W. Taylor (1990). *Cement Chemistry*. Academic Press, London.

Helene, P., and Grochoski, M., (2005). Evolution on the criteria of introduction of durability concepts in the design of structures, proceedings of the Raymundo Rivera International Symposium on Durability de concrete, Monterrey, México, pp. 17-50.

Helen C. (2000). Tecnología de alimentos. Procesos químicos y físicos en la preparación de alimentos. Limusa. Noriega editores.

IMCYC traducción, (2002). Aditivos químicos e inclusores de aire para el concreto, comité ACI 701.

Kosmatka, S. H., y Panarese, W. C. (1992). Diseño y Control de Mezclas de Concreto, Instituto Mexicano del Cemento y del concreto, A. C., ed. IMCYC, México.

Kosmatka H. (2004). Diseño y Control de Mezclas de Concreto, EU, Pórtland Cement Association.

Leiv M., Ferro C., Regazzoli D., Dotelli G. (2002). Comparative evaluation method of polymer surface treatments applied on high performance concrete, Journal of materials science Vol. 37, pp. 4881 – 4888.

L. Chia and S Ricketts, (1988). Basic Techniques and Experiments in Infrared and FTIR Spectroscopy. Perkin Elmer. E.U.

Mather, B. y Celik O. (2004). *Cartilla del concreto*. IMCYC A.C.

Magdaleno, Carlos. (1982). *Análisis matricial de estructuras reticulares*. Unidad Profesional de Zacatenco: México, D. F.

Medina-Torres, L, Brito de la Fuente. (2000). Rheological Properties of the Mucilage Gum (*Opuntia ficus-indica*). Food Hydrocollois. Vol. 14, pp. 417-424.

Metha Kumar, Monteiro Paulo. (1998). Estructura, propiedades y materiales, México, IMCYC

Neville M. Adams, (1999). Tecnología del Concreto, México, IMCYC.

Neville, A. M., (1995). Properties of concrete, ed. Longman Group Limited, England.

Okamura, H. (1997). Self-Compacting High Performance Concrete, Concrete International, American Concrete Institute, Vol. 19, No. 7, pp. 50-54.

O' Reilly Vitervo A. (1998). Influencia de la porosidad y la permeabilidad en la durabilidad del hormigón nuevo y reparado. Rehabilitation of Corrosión Damaged Infraestructura,

Chapter V: Cement, mortar, concrete, pp.326-336. NACE International, ISBN-970-92095-0-7 Edited by P. Castro, O. Tronconis, C. Andrade.

Q. B. Mireya, L. Díaz Félix, (2004). El nopal una alternativa más de diversificación. Obtenida el 11 de Marzo de 2006. <http://www.patrocipes.org.mx/revistaranchos/revistaranchos2004/Nopal.htm>.

Rodríguez, J. A. (2003). Concreto autocompactable, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A. C., Construcción y Tecnología, Vol. XV, Núm.177, México, pp. 14-21.

Rodríguez-García M. E., et al. (2007). Physicochemical Characterization of Nopal Pads (*Opuntia ficus indica*) and Dry Vacuum Nopal Powders as a Function of the Maturation. *Plant Foods Hum Nutr* Vol. 62, pp. 107–112.

Sanjuán Barbudo, Miguel y Castro Borges, Pedro (2001). Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. IMCYC.

Sofi M., Deventer J.S.J. van, Mendis P.A., Lukey G.C. (2007). Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs), *Cement and Concrete Research*. Vol. 37, pp. 251–257.

Stutzman, Paul, (2004). Scanning electron microscopy imaging of hydraulic cement Microstructure. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, No. 8, pp. 957-966.

Stutzman, Paul and Clifton R, James, (1999). Specimen preparation for scanning electron microscopy. *Proceedings of the Twenty-First International Conference on Cement Microscopy*, L. Jany and A. Nisperos, Eds., April 25-29, 1999, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 10-22

Paul E. Stutzman, (2001). *Scanning Electron Microscopy in concrete Petrography*, Reprinted from *Materials Science of Concrete Special Volume: Calcium Hydroxide in Concrete (Workshop on the Role of Calcium Hydroxide in Concrete)*. *Proceedings*. J. Skalny, J. Gebauer and I. Odler, eds. The American Ceramic Society. November 1-3, 2000, Anna Maria Island, Florida, 59-72 pp, 2001.

Teller L. W., *Elastic properties ASTM Sp. Tech* (1956). public, num. 169., pp. 94-103

Valdez Tamez Pedro Leobardo (2002). Desarrollo de un Método para Evaluar Materiales Naturales con Potencial Puzolánico para su uso en Cemento. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Nuevo León. Facultad de Ingeniería Mecánica y eléctrica. México. p 18.

Varas. M.J. Varas, M. Alvarez de Buergo, R. Fort, (2005). *Cement and Concrete Research* 35, 2055-2065.

NORMAS

ASTM C 150 – 05 Standard Specification for Portland Cement

ASTM C 39/C 39 M – 04a Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

ASTM C 136-05 Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates

ASTM C 127-04 Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate

ASTM C 266-04 Standard Test Method for Time of Setting of Hydraulic-Cement Paste by Gillmore Needles

ASTM C 305-99 Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency

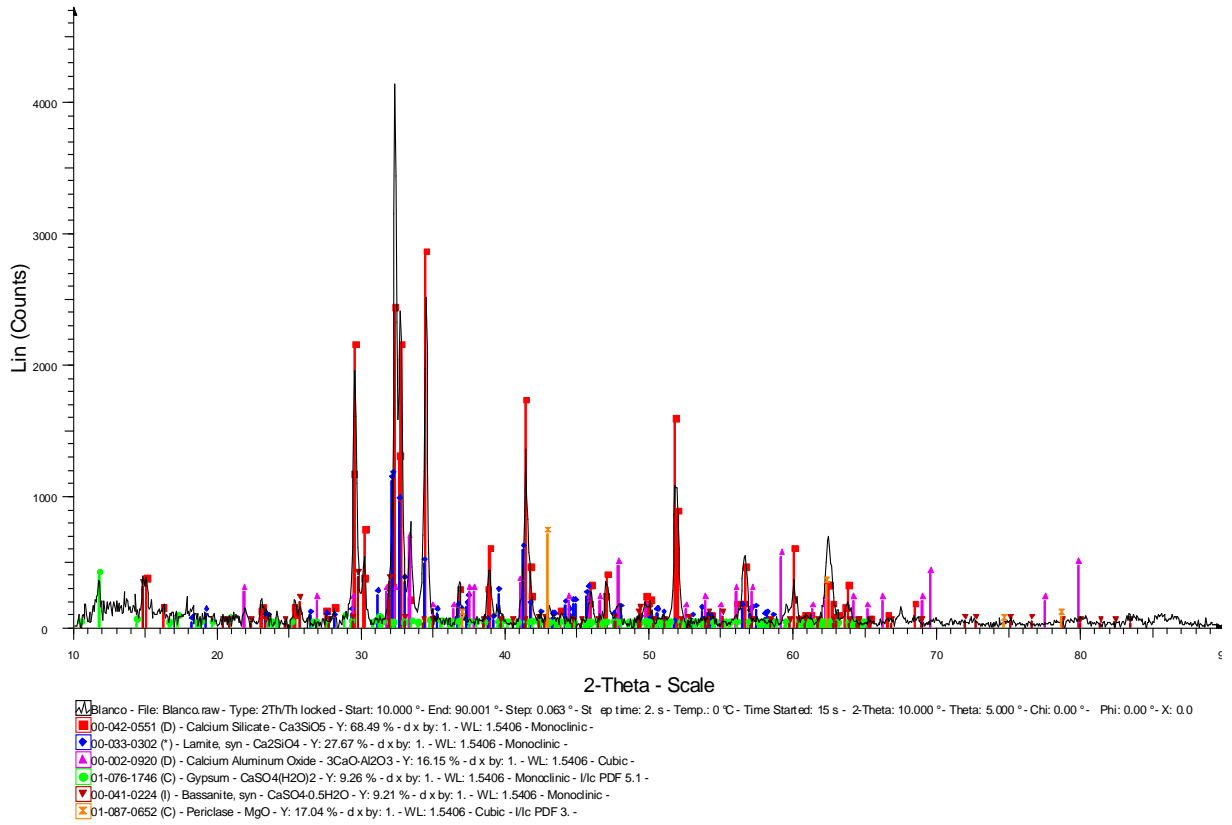
ASTM C 192/C 192M – 05 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory

ASTM C 469 – 02 Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression

ANEXOS

Anexo 1

Blanco



Difractograma de Cemento Blanco (UANL)

Anexo 2

CÁLCULO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DEL ACI							
MATERIAL	PVSS (kg/m ³)	PVSC (kg/m ³)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1497	1601.6	2.6	0.7	0.41		3/4"
ARENA	1583	1609	2.57	1.29	6.12	2.88	
CEMENTO			2.9				
DISEÑO DE MEZCLAS POR EL MÉTODO DEL ACI							
f'c =	375	kg/cm ²					
Rev =	75	mm	revenimiento deseado				
rel A/C =	0.46		Valor interpolado tabla 3				
REL A/C =	0.45		relación agua/cemeto correspondiente a diseño por durabilidad para una zona agresiva Tabla 9.1				
Agua=	202	kg/m ³	Para agregado de 3/4" y rev de 75 mm sin aire incluido				
No es grava redondeada por lo tanto no se disminuye en un 10% el contenido de agua							
Cemento =	449	kg/m ³	> a 335 kg/m ³ de cemento necesario para una zona agresiva				
Grava =	0.620	993.0	kg/m ³				
superplastificante =		1.3	kg/m ³				
AGUA =	0.202						
CEMENTO =	0.155						
GRAVA =	0.382						
AIRE=	0.000	7% para una zona agresiva, sin embargo no se cuenta con aditivo inductor de aire, por lo tanto no se va incorporar aire					
TOTAL =	0.739						
Diferencia =	0.261						
ARENA =	671.52	kg/m ³					
corrección por humedad							
GRAVA =	997.1	kg					
ARENA =	712.6	kg					
Total de agua a adicionarse para 1 m ³ de concreto =				172.4	kg/m ³		
RESUMEN TOTAL DE MATERIALES PARA 1 m ³ DE CONCRETO							
Kg/m ³							
	agua	cemento	grava	arena	superplast.		
	172.45	448.89	997.06	712.61	1.35		
PARA 20 LITROS							
agua	cemento	grava	arena	superplast. (ml)			
3.45	8.98	19.94	14.25	26.9			
correccion de agua por adición de superplastificante PLASTOL 4000							
agua	cemento	grava	arena	superplast. (ml)	70% Liquido		
3.43	8.98	19.94	14.25	26.93	30% solido		

Anexo 3

CÁLCULO DE MEZCLA POR EL MÉTODO DEL ACI							
MATERIAL	PVSS (kg/m ³)	PVSC (kg/m ³)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA
GRAVA	1497	1601.6	2.6	0.7	0.064		3/4"
ARENA	1583	1609	2.57	1.29	6.30	2.88	
CEMENTO			2.9				
DISEÑO DE MEZCLAS POR EL MÉTODO DEL ACI							
f'c =	265	kg/cm ²					
Rev =	75	mm	revenimiento deseado				
rel A/C =	0.59		Valor interpolado tabla 3				
REL A/C =	0.60		relación agua/cemeto correspondiente a diseño por durabilidad para una zona agresiva Tabla 9.1				
Agua=	202	kg/m ³	Para agregado de 3/4" y rev de 75 mm sin aire incluido				
No es grava redondeada por lo tanto no se disminuye en un 10% el contenido de agua							
Cemento =	337	kg/m ³	> a 335 kg/m ³ de cemento necesario para una zona agresiva				
Grava =	0.620	993.0	kg/m ³				
superplastificante =		1.0	kg/m ³				
AGUA =	0.202						
CEMENTO =	0.116						
GRAVA =	0.382						
AIRE=	0.000	7% para una zona agresiva, sin embargo no se cuenta con aditivo inclusor de aire, por lo tanto no se va incorporar aire					
TOTAL =	0.700						
Diferencia =	0.300						
ARENA =	770.97	kg/m ³					
corrección por humedad							
GRAVA =	993.6	kg					
ARENA =	819.5	kg					
Total de agua a adicionarse para 1 m ³ de concreto =				169.7	kg/m ³		
RESUMEN TOTAL DE MATERIALES PARA 1 m ³ DE CONCRETO							
Kg/m ³							
	agua	cemento	grava	arena	superplast.		
	169.69	336.67	993.63	819.54	1.01		
PARA 20 LITROS							
agua	cemento	grava	arena	superplast. (ml)			
3.39	6.73	19.87	16.39	20.2			
correccion de agua por adición de superplastificante PLASTOL 4000							
agua	cemento	grava	arena	superplast. (ml)	70% Liquido		
3.38	6.73	19.87	16.39	20.20	30% solido		

Anexo 4

DISEÑO DE CONCRETO HPC									
PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL CONCRETO DE ALTO COMPORTAMIENTO (AITCIN Y METHA, 1990)									
MATERIAL	PVSS (kg/m3)	PVSC (kg/m3)	G.E	% ABS	% HUM	M.F	TMA		
GRAVA	1497	1601.6	2.6	0.7	4.151		3/4"		
ARENA	1583	1609	2.57	1.29	0.064	2.88			
CEMENTO			2.9						
CV			2.6						
PASO 1 DETERMINACION DE LA RESISTENCIA									
La resistencia que se quiere obtener se escoge de la tabla 1									
						65	Mpa		
El contenido de agua lo proporciona el método de diseño para diferentes resistencias:									
						153	kg/m3		
El contenido de aire también es proporcionada por el método, donde esta cantidad es la que se atrapa durante el mezclado del concreto									
Contenido de aire =						0.02	m3		
PASO 2 VOLUMEN TOTAL DE MATERIAL CEMENTANTE									
El valor recomendado y para tener una resistencia óptima es de									
						0.35	%		
y el valor recomendado para la porcion de agregados es de									
						0.65	%		
total de material cementante es =									
						0.177			
PASO 3 PORCION DE AGREGADOS									
De acuerdo al método la porcion de agregados varían de acuerdo a la resistencia del concreto a calcularse, y para la resistencia selecciona la poporcion es de:									
		arena	grava						
		2	3						
PASO 4 PESO DE LOS AGREGADOS PARA 1 m3 DE CONCRETO									
Contenido de arena =						668.2	kg/m3		
contenido de grava=						1014	kg/m3		
PASO 5 CALCULO DE CONTENIDO DE CEMENTO									
Existen 2 opciones para adicionar cemento en el concreto:									
opción 1 concreto sin adiciones minerales = 100 % de cemento									
opción 2 reemplazo parcial de cemento por algun material cementante suplementario, en este caso por ceniza volante y la relacion es de:									
		cemento	C.V						
		1	0						
RELACION OPTIMA POR EL MÉTODO=									
		es de 60:40 (CP +CV)							
		cemento	C.V						
		1	0						
		0.18	0						
contenido de cemento por 1m3 de concreto es=						513.3	513.3 kg/m3		
contenido de ceniza volante por 1m3 de concreto es=						0	0 kg/m3		
relación real de C.V por peso de cemento									
PASO 6 CORRECCIÓN POR HUMEDAD DE LOS MATERIALES									
Se toman en cuenta el porcentaje de absorción y humedad de los materiales									
		Arena	-8.192132	kg/m3					
		Grava	34.99314	kg/m3					
En donde la catidad total de los materiales en estado SSS para 1m3 es:									
		ARENA	660.007868	kg/m3					
		GRAVA	1048.99314	kg/m3					
PASO 7 CORRECCIÓN DEL AGUA PARA 1m3 DE CONCRETO									
			26.801008	Lts/m3					
		cantidad total de agua por 1m3 de concreto es:	126.198992	Lts/m3					
Ajuste de agua por la adición de superplastificante de alto rango PLASTOL 4000									
Donde el fabricante recomienda una adición inicial mínima igual a:									
						2	ml/kg de cemento		
Así mismo la cantidad de sólido que contiene el superplastificante es de 30%									
y está compuesto por otro 70% de agua ==						0.7	% de liquido		
RESUMEN TOTAL DE MATERIALES									
para 1m ³					para 20 lts				
Arena (kg)	Grava (kg)	Cemento (kg)	Agua (kg)	Ceniza volante	arena	grava	cemento	agua	ceniza volante
660.01	1048.99	513.30	126.20	0.00	13.20	20.98	10.27	2.52	0.00
superplastificante mínimo adicionada =			20.532	mililitros					
Agua aportada por el superplastificante =			0.0143724	litros					
RESUMEN TOTAL DE MATERIAL PARA 105 LTS									
Arena (kg)	Grava (kg)	Cemento (kg)	Agua (kg)	Ceniza volante	super (ml)				
13.20	20.98	10.27	2.51	0.00	20.53				
RELACION AGUA/CEMENTO=			0.30						

Anexo fotográfico



Figura1. Proceso de triturado



Figura2. Macerado del nopal



Figura3. Proceso de filtración de mucílago de nopal



(a)



(b)

Figura 4. (a) Estufa convectiva, (b) Mucílago puro secado en el horno a 50°C



Figura 5. Mucílago precipitado en alcohol



Figura 5. Mucílago precipitado en acetona