



UNIVERSIDAD MICHUACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

TESIS PROFESIONAL

**ANÁLISIS FÍSICO-MECÁNICO DE MORTEROS DE CEMENTO
PORTLAND CON ADICIONES DE BAGAZO DE CAÑA Y ADITIVO
REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

PRESENTA:

YESENIA RODRÍGUEZ MÉNDEZ

ASESOR:

M.I. CIVIL CINDY LARA GÓMEZ



MORELIA, MICHOACÁN, JUNIO DE 2013.

RESUMEN

Debido a la condición ambiental en que se vive, vale la pena indagar en los posibles materiales de construcción sustitutos del cemento ya que la elaboración de este tiene impactos ambientales negativos, por ello la necesidad de disminuir el uso del cemento.

La presente investigación se centra en la evaluación de morteros de cemento Portland con adiciones de ceniza de bagazo de caña de azúcar (CBC) y de un aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante (Sika ViscoCrete PC 2500), con la finalidad de aumentar las propiedades físicas y mecánicas del concreto, principalmente su resistencia y durabilidad, así como economizarlo sin dejar de lado la protección del medio ambiente. Cada una de las adiciones se hace en tres porcentajes diferentes.

La ceniza empleada en el presente proyecto es un desecho agroindustrial resultante de la combustión del bagazo de caña, esta se obtiene en los procesos de generación de energía en las centrales azucareras. De bibliografía estudiada se sabe que esta ceniza actúa como puzolana, aditivo mineral –que puede ser natural o sintético– generalmente silíceo o aluminoso que presenta en sí mismo poco o nulo valor cementante, pero con presencia de humedad ese valor se eleva de manera considerable.

El aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante se analizó con la finalidad de comprobar que su adición al concreto es benéfica ya que por medio de este es posible obtener concretos de muy alto desempeño para la construcción de obras de gran envergadura.

Se elaboraron especímenes con cada uno de los porcentajes para someterlos a pruebas no destructivas (velocidad de pulso ultrasónico, resistividad, densidad y gravedad específica) y destructivas (resistencia a la compresión, flexión, tensión, adherencia y resistencia a los sulfatos). De la experimentación se obtendrá el valor óptimo de cada una de las adiciones.

Palabras Clave: cemento, mortero, ceniza, CBC, adición, aditivo.

DEDICATORIA

A mis padres Amparo Méndez y Eloy Rodríguez por siempre estar en cada etapa de mi vida, por su apoyo incondicional, por cada regaño que me hizo crecer, por cada esfuerzo realizado para llevarnos adelante a cada uno de mis hermanos y a mí.

A mis hermanos Elvia, Roberto, Javier, Gonzalo, Rosalba, Elva, Apolinar, Dalia, Homero, Carlos y Jaime por ser mi mayor motor, por su infinita paciencia, por cada cuidado, cada regaño, por compartir momentos maravillosos conmigo, porque son mi ejemplo a seguir, por siempre estar ahí en el momento preciso, por darme la oportunidad de triunfar, porque gracias a ustedes mi sueño es real. Los amo 😊

AGRADECIMIENTOS

A Dios por el regalo más maravilloso que es la vida, por siempre estar a mi lado acompañándome en cada viaje y mostrarme el camino adecuado, por permitirme ser quien soy.

A mi familia por darme la oportunidad y confianza de cumplir mis metas, por ser mi mayor motor, por siempre estar ahí en el momento preciso, sobre todo a mis hermanos por el esfuerzo que han hecho para culminar mis estudios, por su motivación y dedicación.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo en especial a la Facultad de Ingeniería Civil por ser mi segundo hogar, por la educación brindada a través de cada uno de los profesores con los que tuve la oportunidad de asistir a clase, por hacerme crecer como persona y profesionalmente. Al Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Rúelas”, Sección de Resistencia de Materiales.

A mi asesora de tesis M.I. Cindy Lara Gómez, a la Dra. Elia Mercedes Alonso Guzmán, al M.A. Wilfrido Martínez Molina, al Dr. Hugo Luis Chávez García, al Ing. Mauricio Arreola, a la M.I. Sandra Arguello, por su apoyo para sacar adelante el este proyecto, por la confianza y la motivación, que a pesar de las adversidades y faltan de tiempo siempre buscaron el espacio para transmitir sus conocimientos.

A mis compañeros de proyecto por su apoyo, paciencia y dedicación puesta en el mismo, porque no solo somos compañeros de equipo sino que se consolido una bonita amistad. Al personal de laboratorio que nos asesoraron para la realización de pruebas.

A cada persona que aportó para el desarrollo del proyecto, el Ing. José M. Martínez Ponce coordinador de capacitación del Ingenio Lázaro Cárdenas, Dra. Angélica.

A mis amigos por ser parte esencial de mi vida, por cada experiencia compartida, por cada consejo y apoyo brindado, por cada lección de vida que me han dado, cada sonrisa, cada detalle, agradezco a Dios infinitamente los haya cruzado en mi camino.

A mis compañeros de la maravillosa quinta sección como siempre la llame, por su apoyo incondicional, por formar parte de mi vida, por su tolerancia, por ser tan unidos y compartidos, por cada divertida sesión de estudio realizada, por esas travesuras durante clase dignas de una buena sonrisa, por ser tan maravillosas personas.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	I
DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	III
TABLA DE CONTENIDO	IV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
OBJETIVOS.....	XII
1 MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Cemento.....	2
1.2.1 Nota Histórica	3
1.2.3 Fabricación del Cemento	4
1.2.4 Tipos de Cemento	6
1.3 Mortero.....	8
1.3.1 Composición de un Mortero	10
1.3.2 Clasificación de los Morteros	11
1.3.3 Características de los Morteros	12
1.4 Puzolanas	13
1.4.1 Historia de las Puzolanas	13
1.4.2 Principales Tipos de Puzolanas	14
1.4.3 La Reacción Puzolánica	16
2 MATERIALES EN ESTUDIO	17
2.1 Aditivo	17
2.1.1 Beneficios del Uso de Aditivos.....	17
2.1.2 Tipos de Aditivos	18
2.2 Ceniza de Bagazo de Caña.....	21
2.2.1 Caracterización de la Ceniza de Bagazo de Caña	24
2.3 Cemento Portland CPC 30R RS.....	26
2.4 Material Inerte	27

2.4.1	Caracterización del Material Inerte	28
2.5	Agua	35
3	PRUEBAS DE LABORATORIO.....	36
3.1	Pruebas No Destructivas	36
3.1.1	Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	38
3.1.2	Resistividad Eléctrica.....	42
3.1.3	Densidad	45
3.1.4	Gravedad Específica	46
3.2	Pruebas Destructivas.....	46
3.2.1	Resistencia a la Compresión Simple.....	46
3.2.2	Resistencia a la Flexión	47
3.2.3	Tensión en Briquetas.....	50
3.2.4	Resistencia a los Sulfatos	50
3.2.5	Prueba de Adherencia.....	51
4	DISEÑO DE ESPECIMENES DE PRUEBA	54
4.1	Prueba de Fluides.....	54
4.2	Elaboración de Especímenes de Mortero	57
4.2.1	Elaboración de Cubos.....	59
4.2.2	Elaboración de Prismas	63
4.2.3	Elaboración de Cilindros	64
4.2.4	Elaboración de Briquetas	65
4.3	Elaboración de las Losa para Prueba de Adherencia	67
4.3.1	Elaboración de Mezclas para Prueba de Adherencia.....	69
5	EXPERIMENTACIÓN	70
5.1	Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	70
5.2	Resistividad Eléctrica.....	72
5.3	Densidad	73
5.4	Gravedad Específica	74
5.5	Compresión Simple en Cubos	75
5.6	Flexión en Prismas.....	77
5.7	Tensión en Briquetas.....	79
5.8	Ataque por sulfatos.....	81

5.9	Prueba de Adherencia.....	86
6	RESULTADOS	88
6.1	Velocidad de Pulso Ultrasónico.....	89
6.2	Resistividad	91
6.3	Densidad	93
6.4	Gravedad Específica	94
6.5	Compresión Simple	95
6.6	Flexión en Prismas.....	96
6.7	Tensión en Briquetas.....	97
6.8	Adherencia	98
6.9	Resistencia a los Sulfatos	99
	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	100
	BIBLIOGRAFÍA.....	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Proceso de Fabricación del Cemento vía seca.....	5
Figura 1.2 Volúmenes Integrantes de un Mortero de Cemento Portland.....	9
Figura 4.1 Reacción Puzolanica.....	16
Figura 2.1 Ubicación satelital del Ingenio Lázaro Cárdenas.....	22
Figura 2.2 Procesamiento de la caña de azúcar.....	23
Figura 2.3 Cemento gris CPC 30R RS Utilizado para la elaboración de los morteros.....	26
Figura 2.4 Huajúmbaro, Michoacán.....	27
Figura 2.5 Recolección de arena.....	27
Figura 2.6 Prueba de porcentaje de humedad actual.....	28
Figura 2.7 Prueba de porcentaje de humedad de absorción.....	29
Figura 2.8 Equipo para realizar la prueba de MVSS.....	30
Figura 2.9 Varillado de la arena en la prueba de MVSV.....	31
Figura 2.10 Análisis colorimétrico.....	32
Figura 2.11 Análisis de contenido de finos.....	33
Figura 2.12 Máquina para prueba de Equivalente de arena.....	34
Figura 2.13 Lectura de Equivalente de arena.....	34
Figura 3 Diagrama simplificado del sistema de operación.....	40
Figura 3.1 Arreglos para la colocación de los transductores.....	41
Figura 3.2 Acomodo de los rodillos para aplicación de carga.....	48
Figura 3.3 Acomodo de los rodillos para aplicación de carga.....	48
Figura 3.4 Representación de la prueba de flexión estática en vigas, mediante un solo punto de carga.....	49
Figura 3.5 Expansión por ataque de sulfatos.....	51
Figura 3.6 Equipo Pull Off para prueba de Adherencia.....	52

Figura 3.7. Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off.....	53
Figura 4.1 Apisonado del molde tronconico para prueba de fluidez.....	55
Figura 4.2 Medición del diámetro en la prueba de fluidez.....	55
Figura 4.3 Recipiente para elaboración de mezcla de mortero.....	56
Figura 4.4 Elaboración de mezcla de mortero.....	56
Figura 4.5 Aplicación de desmoldante.....	59
Figura 4.6 Moldes para cubos con desmoldante.....	59
Figura 4.7 Sentido de los golpes en el llenado de los moldes para cubos.....	60
Figura 4.8 Llenado y apisonado de los moldes para la elaboración de cubos.....	60
Figura 4.9 Cubos llenos previos al enrase.....	61
Figura 4.10 Cubo ya fraguado y descimbrado.....	62
Figura 4.11 Cubos etiquetados.....	62
Figura 4.12 Llenado de moldes para elaboración de prismas.....	63
Figura 4.13 Llenado de moldes para elaboración de cilindros.....	64
Figura 4.14 Molde para elaboración de briquetas.....	65
Figura 4.15 Briquetas sobre base de cristal.....	65
Figura 4.16 Etiquetado de briquetas.....	66
Figura 4.17 Curado de especímenes.....	66
Figura 4.18 Cimbra para losas.....	67
Figura 4.19 Pesado y mezclado de los materiales para elaboración de losas.....	68
Figura 4.20 Colado y acabo de las losas de adherencia.....	69
Figura 5 Especímenes cúbicos marcados antes de ser probados.....	70
Figura 5.1 Equipo de velocidad de pulso ultrasónico.....	71
Figura 5.2 Equipo utilizado para determinar la resistividad eléctrica.....	72
Figura 5.3 Determinación de la densidad de especímenes cúbicos.....	74

Figura 5.4 Determinación de la gravedad específica.....	75
Figura 5.5 Máquina Universal de Pruebas Tinius Olsen.....	76
Figura 5.6 Prueba de compresión en espécimen cúbico.....	76
Figura 5.7 Especimen cúbico después de someterse a carga y llegar a la falla.....	77
Figura 5.8 Prisma para prueba a flexión.....	78
Figura 5.9 Prisma fallado al centro.....	78
Figura 5.10 Máquina Michaelis para pruebas de tensión en morteros.....	80
Figura 5.11 Briqueta después de la falla.....	80
Figura 5.12 Preparación de solución saturada de sulfato de sodio.....	82
Figura 5.13 Inmersión de los especímenes en la solución de sulfato de sodio.....	82
Figura 5.14 Especímenes cilíndricos con aditivo Sika Viscocrete PC 2500 después del primer ciclo de la prueba de ataque por sulfatos.....	83
Figura 5.15 Especímenes cilíndricos con aditivo Sika Viscocrete PC 2500 después del quinto ciclo de la prueba de ataque por sulfatos.....	84
Figura 5.16 Especímenes testigos después del primer ciclo.....	84
Figura 5.17 Especímenes CBC 7% después del primer ciclo.....	85
Figura 5.18 Especímenes de CBC 3 y 5% después del primer ciclo.....	85
Figura 8.19 Perforación de losas para prueba de adherencia.....	86
Figura 5.20 Dollys listos para realizar la prueba de adherencia.....	86
Figura 5.21 Perno con cabeza cilíndrica.....	87
Figura 5.22. Realización de la prueba de adherencia, mediante el equipo de Pull Off.....	87
Gráfica 6.1 Representación gráfica de la Velocidad de Pulso en cubos.....	90
Gráfica 6.1.1 Representación gráfica de la Velocidad de Pulso en Prismas.....	91
Gráfica 6.2 Representación gráfica de la Prueba de Resistividad en Cubos.....	92
Gráfica 6.2.2 Representación gráfica de la Prueba de Resistividad en Prismas.....	93
Gráfica 6.3 Representación gráfica de la Prueba de Densidad en Cubos.....	94

Gráfica 6.4 Representación gráfica de la Gravedad Específica en Cubos.....	95
Gráfica 6.5 Representación gráfica de la Prueba de Compresión en Cubos.....	96
Gráfica 6.6 Representación Gráfica de la Flexión en Prismas.....	97
Gráfica 6.7 Representación gráfica de la Prueba de Tensión en Briquetas.....	98
Gráfica 6.8 Representación gráfica de la Prueba de Adherencia.....	99
Gráfica 6.9 Representación gráfica de la Resistencia a la Compresión de Cilindros sometidos al Ataque de los Sulfatos.....	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Denominación del cemento por su composición.....	6
Tabla 1.2 Denominación del cemento de acuerdo a su resistencia.....	7
Tabla 1.3 Denominación del cemento por sus características especiales.....	7
Tabla 2.1 Datos del Ingenio.....	22
Tabla 2.2 Resultados de la Florescencia de Rayos X de la CBC.....	25
Tabla 2.3 Resultados de la prueba de porcentaje de humedad actual.....	28
Tabla 2.4 Porcentaje de Humedad de Absorción.....	29
Tabla 2.5 Promedio de la MVSS.....	30
Tabla 2.6 Promedio obtenido de la prueba MVSV.....	31
Tabla 2.7 Resultados de la prueba de colorimetría.....	32
Tabla 2.8 Resultado de la prueba de equivalente de arena.....	34
Tabla 3.1 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica.....	45
Tabla 4 Proporcionamiento de la mezcla.....	57
Tabla 4.1 Cantidad de especímenes elaborados.....	58
Tabla 4.2 Proporcionamiento de Sika ViscoCrete PC 2500 de acuerdo al porcentaje empleado.....	58
Tabla 4.3 Proporcionamiento para una losa por el método del ACI.....	68
Tabla 6.1 Datos de la Prueba de Velocidad de Pulso en Cubos.....	89
Tabla 6.1.1 Datos de la Prueba de Velocidad de Pulso en Prismas.....	90
Tabla 6.2 Datos de la Prueba de Resistividad en Cubos.....	91
Tabla 6.2.2 Datos de la Prueba de Resistividad en Prismas.....	92
Tabla 6.3 Datos de la Prueba de Densidad en Cubos.....	93
Tabla 6.4 Datos de Prueba de Gravedad Específica en Cubos.....	94
Tabla 6.5 Datos de la Prueba de Compresión en Cubos.....	95
Tabla 6.6 Datos de la Prueba de Flexión en Prismas.....	96
Tabla 6.7 Datos de la Prueba de Tensión en Briquetas.....	97
Tabla 6.8 Datos de prueba de Adherencia.....	98
Tabla 6.1 Datos de Prueba de Compresión en Cilindros.....	99

OBJETIVOS

Objetivo General:

Analizar el comportamiento físico-mecánico de morteros de cemento Portland con la adición de ceniza de bagazo de caña (CBC) y un aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante (Sika ViscoCrete PC2500) con la finalidad de obtener concretos con mejores propiedades físicas y mecánicas y de durabilidad.

Objetivos Particulares:

Identificar las propiedades físico-mecánicas de los especímenes de mortero con adición de CBC en los porcentajes de 3%, 5% y 7% para las edades de 14, 28, 45, 90 y 150 haciendo una comparación con los especímenes testigos y obtener como resultado el porcentaje óptimo de adición.

Encontrar un uso adecuado para el residuo agrícola (CBC) que es generado en una cantidad cada vez mayor, ya que el uso de este como un mineral mezclado en morteros y concretos, contribuye a disminuir el impacto ambiental de estos materiales relacionados con la producción de cemento.

Identificar las propiedades físico-mecánicas de los especímenes de mortero con el aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante (Sika ViscoCrete PC2500) en los porcentajes de 0.5%, 1% y 1.5% para las edades de 14, 28, 45, 90 y 150 haciendo una comparación con los especímenes testigos y obtener como resultado el porcentaje óptimo de adición.

Capítulo 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

La industria cementera siempre ha estado en medio del cambio climático. El cemento es un componente fundamental en la economía de muchos países en pleno crecimiento, elemento necesario para la construcción de edificios y carreteras. El 80% del cemento que se produce en la actualidad es utilizado en los países en desarrollo. Pero fabricar cemento supone emitir una gran cantidad de CO₂ a la atmósfera, las cementeras producen el cinco por ciento de las emisiones globales de dióxido de carbono, causa principal del calentamiento global.

Sin embargo, todo puede cambiar, diversas empresas en su apuesta por la sostenibilidad, han desarrollado una nueva generación de cementos respetuosos con el medio ambiente que permiten reducir casi por completo las emisiones directas de CO₂ a la atmósfera. Para conseguirlo, se ha sustituido la piedra caliza como materia prima por residuos sólidos de centrales térmicas.

Con esta nueva técnica de producción se ha alcanzado un triple objetivo: realizar una gestión eficaz de los residuos a través de su reciclaje, contribuir a la preservación de los recursos naturales del planeta y evitar la emisión directa de gases de efecto invernadero a la atmósfera, a través de la eliminación de la calcinación de la materia prima. Al mismo tiempo, la tecnología desarrollada permite reducir en aproximadamente la mitad la demanda energética en el proceso de síntesis del cemento.

De este modo, la nueva generación de cementos ecológicos supone una revolución en el modelo de producción actual, que contribuirá notablemente a paliar los efectos nocivos para el medio ambiente derivados de la actividad de la industria del cemento. ^[1]

El uso de aditivos para mejorar las propiedades del concreto viene usándose desde el siglo pasado como son; súper fluidificantes, retardadores y aceleradores de fraguado, impermeabilizantes, etc. En la década de los 60 se inició el uso masivo de los aditivos plastificantes, productos que hoy en día son los más utilizados en todo el mundo, debido a su

capacidad para reducir el agua de amasado y por ende obtener concretos más resistentes, económicos y durables.

Esta investigación se centra en la evaluación de los efectos de la adición de cenizas de bagazo de caña de azúcar (CBC) a morteros de cemento Portland. El objetivo principal es encontrar un uso adecuado para este residuo agrícola que es generado en una cantidad cada vez mayor, ya que el uso de CBC como un mineral mezclado en morteros y concretos, contribuye a disminuir el impacto ambiental de estos materiales relacionados con la producción de cemento, así mismo como mejorar las propiedades físicas y mecánicas del concreto, como son resistencia y durabilidad. Se realizó la experimentación de la CBC, como una mezcla de minerales en los morteros, basados en pruebas físicas y mecánicas. Se incluye además la experimentación de un aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante de alto desempeño para concreto con inclusión de aire controlado (SikaViscoCrete PC2500).

1.2 Cemento

En el sentido general de la palabra, el cemento puede describirse como cualquier material con propiedades tanto adhesivas como cohesivas, las cuales le dan la capacidad de aglutinar fragmentos minerales para formar un todo compacto. Esta definición comprende una gran variedad de materiales cementantes.

Para efectos de construcción, el significado del término cemento se restringe a materiales aglutinantes utilizados con piedras, arenas, ladrillos, bloques de construcción, etc. Los principales componentes de este tipo de cemento son compuestos de cal, de modo que en construcción e ingeniería civil se trabaja con cementos calcáreos. Los cementos que se utilizan en la fabricación del concreto tienen la propiedad de fraguar y endurecer bajo o sumergidos en agua, en virtud de que experimentan una reacción química con ésta y, por lo tanto, se denominan cementos hidráulicos. ^[2]

1.2.1 Nota Histórica

El empleo de materiales cementantes es muy antiguo. Los egipcios ya utilizaban yeso impuro calcinado. Los griegos y los romanos utilizaban caliza calcinada y, posteriormente, aprendieron a mezclar cal con agua, arena y piedra triturada o ladrillo y tejas quebradas. Este fue el primer concreto de la historia. Un mortero de cal no endurece bajo el agua; por lo tanto, para construcciones sumergidas en agua, los romanos mezclaban cal con ceniza volcánica o con tejas de arcilla quemada, finamente trituradas. La sílice activa y la alúmina que se encuentran en las cenizas y en las tejas se combinaban con la cal para producir lo que se le conoce como cemento puzolánico, proveniente del nombre del pueblo de Puzzuoli, cerca de Vesubio, donde se encontró por primera vez ceniza volcánica. El nombre de cemento puzolánico se utiliza hasta nuestros días para describir cementos obtenidos simplemente de moler materiales naturales a temperatura normal. Algunas de las estructuras romanas en las cuales la mampostería se unió con morteros, tales como el Coliseo en Roma y el Pont du Gard, cerca de Roma han sobrevivido hasta esta época, con su material cementante aún duro y firme.

En la Edad Media hubo una disminución general en la calidad y uso del cemento, y sólo en el siglo XVIII se observó un progreso en el conocimiento de los cementos. En 1756, Jonh Smeaton fue comisionado para reconstruir el faro de Eddystone, en la costa de Cornish, Inglaterra, y descubrió que el mejor mortero se obtenía cuando se mezclaba puzolana con caliza que contenía una alta cantidad de material arcilloso. Al darse cuenta del importante papel de la arcilla, que hasta entonces no se consideraba conveniente, Smeaton fue el primero en conocer las propiedades químicas de la cal hidráulica, un material que se obtiene al quemar una mezcla de cal y arcilla.

A partir de esto, se desarrollaron otros tipos de cementos hidráulicos, -tal como el "cemento romano" que obtuvo James Parker por calcinación de nódulos de caliza arcillosa-; que vinieron a culminar en la patente del "cemento portland" que obtuvo en 1824 Joseph Aspdin, un ladrillero, albañil y constructor de Leeds. Este cemento fue preparado calentando una mezcla de arcilla finamente triturada y caliza dura en un horno, hasta eliminar el CO_2 ; esta temperatura era mucho más baja que la necesaria para la formación de clinker. El prototipo del cemento moderno lo obtuvo en 1845 Isaac Johnson, quien quemó una mezcla de arcilla y caliza hasta formar clinker, con lo cual se produjo la reacción necesaria para la formación de un compuesto cementante.

El nombre cemento portland, concebido originalmente debido a la semejanza de color y calidad entre el cemento endurecido y la piedra de portland –una caliza obtenida en una cantera de Dorset-, se ha conservado en todo el mundo hasta nuestros días para describir un cemento que se obtiene al mezclar minuciosamente materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina, u óxidos de fierro, quemándolos a una temperatura de formación de clinker y por medio de la molienda el clinker resultante. La definición de cemento portland de varias normas después de quemar; en la actualidad, también se pueden agregar o mezclar otros materiales.^[2]

1.2.3 Fabricación del Cemento

El proceso básico de fabricación del cemento es relativamente simple, existen dos métodos para su elaboración, ellos son el método vía húmeda y el método vía seca. En el método vía húmeda se forma una suspensión con los materiales calcáreo-arcillosos previamente molidos, la suspensión es transportada por todo el sistema como un fluido por medio de tuberías. En el método por vía seca la mezcla íntima de los materiales calcáreo-arcillosos se transporta por corrientes de aire, para algunos productores de cemento la diferencia más notable entre los dos métodos se encuentra en que en el método vía húmeda se consume más energía en el proceso de cocción debido a que primero se debe evaporar el exceso de agua antes de iniciar la fusión de los materiales con las altas temperaturas. La figura 1.1 muestra el método vía seca para el caso en que la arcilla proviene de una roca, de acuerdo con esta figura las etapas más importantes en la producción del cemento Portland son las siguientes: explotación de las canteras de arcilla y caliza, triturado, molienda y obtención de la harina cruda, calcinación, adición del yeso y molienda del clinker, finalmente almacenamiento y envasado.

Una etapa muy importante en el proceso de fabricación del cemento es la calcinación y obtención del clinker.

La harina cruda obtenida en la etapa de molienda de los ingredientes en bruto es transportada hacia el horno giratorio, el cual se calienta hasta 1500°C por medio de una flama localizada en la parte baja del horno, el horno presenta una ligera inclinación para que el material alimentado por

la parte superior (harina cruda) se desliza lentamente durante la cocción hacia la parte inferior. La harina cruda al entrar en el horno sufre una serie de cambios importantes, inicialmente se seca y al llegar a unos 600°C el carbonato de calcio (CaCO_3) que proviene de la roca caliza pierde el bióxido de carbono, convirtiéndose en cal viva (CaO).

Posteriormente cerca de los 1200°C se produce una fusión de ingredientes que da como resultados la formación de silicatos de calcio y aluminatos de calcio, así como otros compuestos secundarios. Debido al movimiento de los ingredientes durante la calcinación se van formando unas pequeñas bolas en el horno, estas bolas de material cocido se llaman clinker. El clinker es ya el cemento Portland, con el único defecto de que requiere de la adición del yeso y de la molienda, sin la presencia del yeso el clinker molido fraguaría muy rápidamente entorpeciendo el proceso normal de fraguado.^[3]

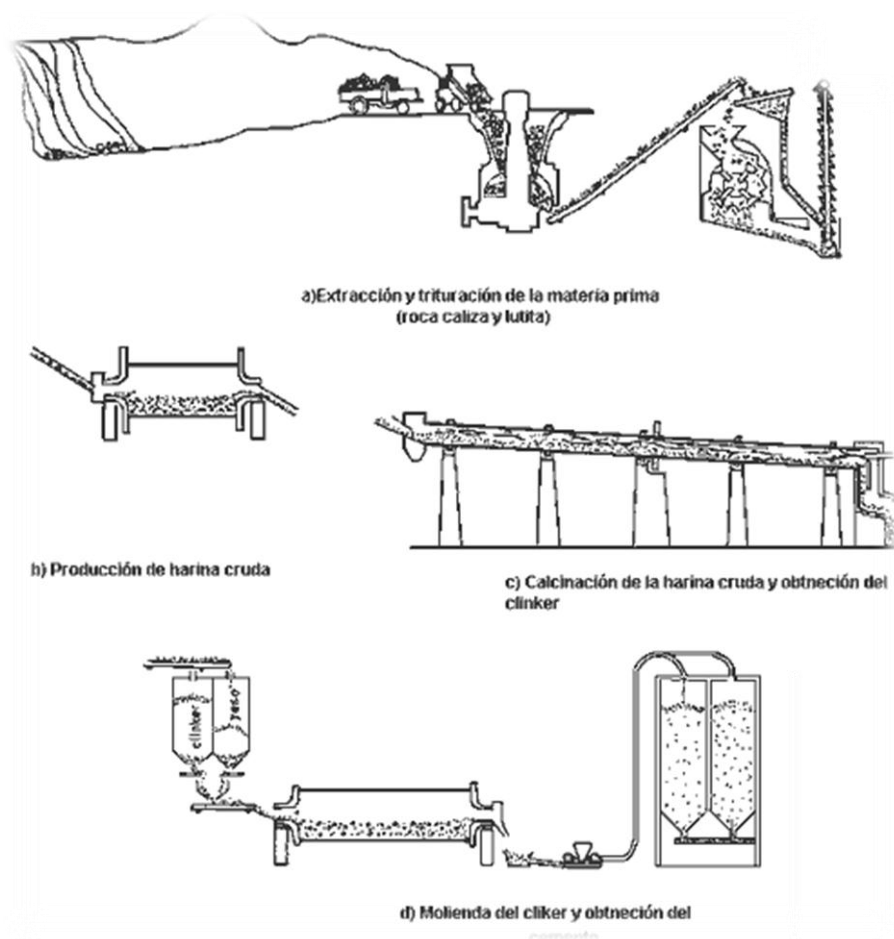


Figura 1.1 Proceso de Fabricación del Cemento vía seca.^[3]

1.2.4 Tipos de Cemento

Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos. La clasificación de los tipos de cemento esta proporcionada por la Norma Mexicana NMX-C-414 ONNCE-199 como se muestra en la tabla 1.1.

Se pueden establecer dos tipos de cementos:

- De origen arcilloso: obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza en proporción 1 a 4 aproximadamente.
- De origen porcelánico: la porcelana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico.

Desde el punto de vista químico se trata en general de una mezcla de silicatos y aluminatos de calcio, obtenidos a través del cocido de calcáreo, arcilla y arena. El material obtenido, molido muy finamente, una vez que se mezcla con agua se hidrata y solidifica progresivamente.^[4]

En la tabla 2.1 se muestra la denominación del cemento de acuerdo a su composición.

Tabla 1.1 Denominación del cemento por su composición.^[5]

Clase (Denominación)	Nomenclatura
Cemento portland ordinario	CPO
Cemento portland puzolánico	CPP
Cemento portland con escoria granulada de alto horno	CPEG
Cemento portland compuesto	CPC
Cemento portland con humo de sílice	CPS
Cemento con escoria granulada de alto horno	CEG

La resistencia normal de un cemento es la resistencia mínima mecánica a la compresión a los 28 días y se indica como 20, 30 ó 40 en Newtons por milímetro cuadrado (N/mm²).

En la tabla 1.2 se muestra la denominación del cemento de acuerdo a su resistencia.

Tabla 1.2 Denominación del cemento de acuerdo a su resistencia.^[5]

Categorías	Resistencia a compresión N/mm²		
	A 3 días	A 28	Días
	Min.	Min.	Máx.
Resistencia normal:			
20	-	20	40
30	-	30	50
40	-	40	-
Resistencia rápida:			
30R	20	30	50
40R	30	40	-

En la siguiente tabla 1.3 se muestra la denominación del cemento de acuerdo a sus características especiales.

Tabla 1.3 Denominación del cemento por sus características especiales.^[5]

Requisito especial (optativo)	Nomenclatura
Resistencia a los sulfatos	RS
Baja reactividad álcali-agregado	BRA
Bajo calor de hidratación	BCH
Blanco	B

En un saco de cemento, la clasificación del cemento estará integrada por lo siguiente:

Composición + Resistencia + Característica especial

Ejemplo 1: Cemento CPO 40R

Esta clasificación indica que se trata de un cemento portland ordinario, con alta resistencia inicial.

Cemento TPEG 30 RS

Esta clasificación indica un cemento con adición de escoria, con una resistencia normal y resistente a los sulfatos.

Cemento CPP 30 BRA / BCH

Esta clasificación indica un cemento portland puzolánico, con una resistencia normal, de baja reactividad alcalina agregado y de bajo calor de hidratación.^[6]

1.3 Mortero

Los morteros son mezclas plásticas aglomerantes, que resultan de la combinación de arena y agua con un cementante que puede ser cemento, cal, yeso, o una mezcla de estos materiales.

La dosificación de los morteros varía según los materiales y el destino de la mezcla. Se elaboran comúnmente en forma manual, mecánicamente o bien, premezclados.

Es amplia la utilización de morteros, de cemento, de cal o mixtos; destacando su empleo en mamposterías, aplanados, recubrimientos y pegado de piezas diversas.^[7]

Los morteros de cemento Portland se elaboran con arena, agua y cemento Portland. Los morteros se han empleado tradicionalmente para pegar tabiques y en todo tipo de aplanados en muros y techos, sin embargo existen muchas otras aplicaciones en la ingeniería civil que tienen que ver con la necesidad de colocar un material de textura lo suficientemente fina para poder penetrar en pequeños resquicios ya sea para sellar, resanar o nivelar con mucha mayor facilidad de lo que es posible de hacer con los concretos. Debido a que los morteros no llevan grava son más fáciles de manejar y se consume menos energía en su mezclado y colocación, ya sea manual o por medios mecánicos.

Como se ha mencionado, para hacer un mortero se requiere cemento, arena y agua, estos ingredientes básicos se manejan en proporciones adecuadas según las necesidades de fluidez y resistencia. Los parámetros anteriores pueden ser evaluados mediante pruebas, de manera que es relativamente sencillo controlar la calidad del mortero. Sin embargo en muchos trabajos el control se deja al albañil, el albañil controla de una manera empírica la calidad de la mezcla, casi siempre atendiendo exclusivamente a la facilidad de colocación del mortero y sin ninguna prueba extra. Esto es un grave error, pues origina una gran variabilidad en el material. Además, contrario a la creencia de que el costo de los morteros es bajo, debe considerarse que en ellos se consume más cemento por unidad de volumen de lo que se puede consumir en muchos concretos de uso común, ya que por el simple hecho de emplearse exclusivamente arena como agregado, es necesario consumir altos volúmenes de pasta (cemento + agua) para rodear las partículas, esto debido a la gran superficie específica que ofrecen las arenas.

Los principios básicos de comportamiento de los morteros se derivan de la estructura que presenta este material, todo mortero está formado por un volumen de pasta, un volumen de sólidos (arena), y un volumen de aire. La figura 1.2 muestra dicha composición.^[3]

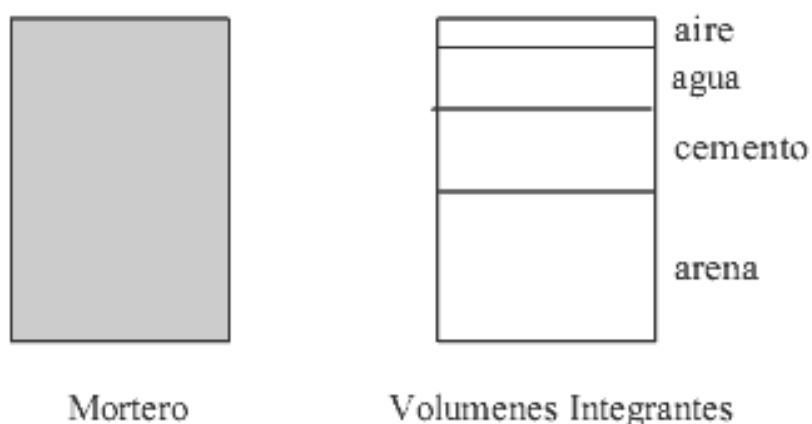


Figura 1.2 Volúmenes Integrantes de un Mortero de Cemento Portland.

1.3.1 Composición de un Mortero

La composición más común de un mortero:

Aglutinante + Material Inerte + Líquido de Amasado

Y en casos especiales se le agrega algún aditivo cuando se busca alguna propiedad en específico, como en la experimentación realizada se le agregó CBC y el aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante.

Aglutinantes

Los aglutinantes son materiales capaces de unir fragmentos de uno o más materiales para formar un conjunto compacto.

Según la forma en que llevan a cabo a la unión, se denominan aglomerantes o conglomerantes.

- En los aglomerantes la unión tiene lugar por procesos físicos.
- En los conglomerantes la unión ocurre mediante transformaciones químicas. Ejemplos: el yeso, la cal y el cemento.^[8]

Material Inerte

El material inerte más comúnmente utilizado es la arena de origen volcánico, arena negra triturada proveniente del basalto y la arena de río. Esta debe estar libre de materiales contaminantes o deleznales, impurezas orgánicas o arcilla; además de ser bien graduada, ya que de esto depende, en buena medida, que el mortero sea trabajable y adherente.^[9]

El trabajo del material inerte en el mortero es realizar la función del soporte y evitar el agrietamiento que se produciría si solo se empleara aglomerante, el uso de este también reduce la cantidad de aglomerante empleada y por ende se economiza el mortero.

La arena de Sílice es un compuesto resultante de la combinación del Sílice con el Oxígeno. Es decir, está formado por un átomo de Sílice y dos átomos de Oxígeno, convirtiéndose en una molécula muy estable, Si O₂.^[10]

Líquido de Amasado

El líquido de amasado es el agua potable. Libre de materiales que afecten desfavorablemente cualquiera de las propiedades del mortero, incluyendo su color, y debe cumplir con la NTC 3459.

- * Participa en las reacciones de hidratación del cemento
- * Confiere la trabajabilidad necesaria.
- * La cantidad de agua de amasado debe limitarse al mínimo estrictamente necesario.
 - El agua en exceso se evapora y crea una serie de huecos, disminuyendo la resistencia.
 - Un déficit de agua de amasado origina masas pocos trabajables y de difícil colocación en obra.
- * Cada litro de agua de amasado añadido de más equivale a una disminución de 2 kg de cemento.^[11]

1.3.2 Clasificación de los Morteros

Los morteros se clasifican de acuerdo al tipo de fraguado o según su tipo de composición

Mortero físico. El paso del estado pastoso o semilíquido a sólido se presenta mediante el secado o fraguado que se da sin recursos químicos, esto puede aplicarse a los morteros de barro, morteros de suelo refractario, morteros de asfalto y los modernos morteros con adhesivos a base de materiales sintéticos.

Mortero químico. El fraguado se lleva a cabo por medio de una reacción química, por ejemplo en este tipo de mortero contamos con los morteros de cal, cemento, yeso y mortero comercial. Las mezclas entre estos tipos de morteros y el empleo de distintos aditivos también se hacen frecuentes.

Mortero aéreo. Es aquel que fragua al contacto con el aire, como los morteros de arcilla, yeso y cal hidratada.

Mortero bituminoso. Son los morteros en los cuales se emplean emulsiones asfálticas o cemento asfáltico para su elaboración.

Mortero hidráulico. Tiene la propiedad de endurecer rápidamente, además tiene las propiedades de fraguar en contacto con el agua o en presencia de humedad como el yeso hidráulico, cal hidráulica, mortero comercial y de cemento.^[12]

1.3.3 Características de los Morteros

a) Plasticidad

Propiedad del mortero fresco de la que depende la mayor o menor aptitud para poder tenderlos y rellenar completamente las juntas. De la plasticidad depende lograr buena unión entre los elementos constructivos cuando se colocan mampuestos así como disminuir la penetración de agua en los cerramientos terminados.

La determinación de la plasticidad se puede considerar haciendo medidas de consistencia en cono de Abrams y limitando el contenido de finos.

b) Resistencia a la compresión

Es la propiedad más indicativa del comportamiento del mortero en los cerramientos portantes contruidos con mampuestos. La resistencia debe ser lo más elevada posible aunque es conveniente que sea inferior a los elementos de albañilería que va a unir.

c) Adherencia

La adherencia puede entenderse debida a la penetración de la pasta del mortero en el elemento de albañilería -mampuesto, sustrato- provocada por la succión capilar que este ejerce. Le proporciona la capacidad de absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie de la interface mortero / elemento de albañilería.

Los mecanismos de la adherencia actúan en las fases del mortero fresco y del mortero endurecido, tienen que ver con la reología de la pasta en la etapa fresco. Influye la naturaleza de la base: porosidad, rugosidad y existe una relación directa entre la resistencia a la compresión del

cerramiento y la adherencia del mortero endurecido. En el resultado final intervienen factores internos: composición del mortero y afinidad con la base y externos curados y condiciones de humedad de las bases, espesores de las juntas.^[13]

1.4 Puzolanas

Uno de los materiales comunes clasificados como cementantes son las puzolanas, las cuales son un material natural o artificial que contiene sílice en forma reactiva. La norma ASTM 618-94 da una definición más formal; describe a las puzolanas como un material sílice o sílice y aluminoso el cual, en sí mismo, posee poco o ningún valor cementante; pero, en forma finamente dividida y en la presencia de humedad, reaccionará químicamente con hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias para formar compuestos que poseen propiedades cementantes. Es necesario que esté en un estado finamente dividido pues solamente entonces es que la sílice se puede combinar con el hidróxido de calcio (producido por la hidratación del cemento Portland) en presencia del agua para formar silicatos de calcio estables, los cuales tienen propiedades cementantes. Se debe observar que la sílice ha de ser amorfa, es decir, vidriosa, porque la sílice cristalina tiene poca reactividad.^[2]

1.4.1 Historia de las Puzolanas

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

El desarrollo del cemento hidráulico basado en una mezcla de puzolana y cal significó cambios radicales en el arte de la construcción de la era romana. El incremento de resistencia, sus propiedades hidráulicas y resistencia al agua del mar permitieron la construcción no solo de arcos y bóvedas, sino también de estructuras marítimas. Mezclas de puzolana y cal sirvieron para

dar impermeabilidad a baños, tanques y acueductos. Testimonio de su durabilidad la dan las muchas estructuras que están de pie hasta hoy.

Más recientemente, entre 1910 y 1912, más de 100,000 toneladas de puzolana fueron usadas en la construcción del acueducto de Los Ángeles. Desde entonces, las puzolanas han sido empleadas en muchas obras de infraestructura marina y de concreto masivo, especialmente en Europa, EEUA y Japón.

Con unas cuantas excepciones notables, como Indonesia, India y China, la comercialización y explotación de puzolana en el Tercer Mundo fue más lenta; hecho sorprendente si tomamos en consideración la necesidad de materiales de construcción más baratos. No obstante, recientemente hay proyectos para desarrollar puzolanas en varios países que incluyen Kenya, Tanzania, Trinidad y Dominica.

1.4.2 Principales Tipos de Puzolanas

Arcillas calcinadas

Las arcillas quemadas o calcinadas fueron las primeras puzolanas que se utilizaron, en forma de polvo proveniente de la molienda de ladrillos, alfarería y tejas, que se mezclaron con cal para producir cementos para morteros. El proceso existe hasta hoy y se conoce como "Surkhi" en la India, "Homra" en Egipto y "Semen Merah" en Indonesia. En términos generales, la mejor arcilla para las puzolanas es la plástica, que se emplea en la alfarería y en la fabricación de tejas. La temperatura óptima de calcinación es entre 700°C a 800°C con variaciones, dependiendo del tipo de arcilla.

Cenizas volcánicas

Los depósitos de cenizas volcánicas se encuentran donde hay o recientemente hubo actividad volcánica, por ejemplo en el Mediterráneo, en el África central y oriental, y en la región del Pacífico. La forma natural de estos depósitos varía bastante al igual que su reactividad puzolánica. Normalmente no requieren calcinarse de nuevo y, si se tiene la suerte de encontrarla ya en forma de polvo, no habrá necesidad de molerla. Las puzolanas volcánicas son explotadas

comercialmente en varios países, por ejemplo: Alemania, Italia, Kenya, Rwanda, Vanuatu e Indonesia. Otros materiales volcánicos como la piedra pómez pulverizada pueden ser también puzolánicas.

Cenizas pulverizadas de carbón de piedra (PFA)

Las cenizas pulverizadas del carbón de piedra, que es usado como combustible de plantas de producción de energía eléctrica, son el material puzolánico más usado en el mundo.

En 1976, algo como 30 millones de toneladas fueron usadas y hay un incremento de alrededor de 10% cada año. PFA ya están en la forma de polvo fino y no necesitan proceso adicional, por lo que tanto su disponibilidad en forma suelta como su bajo costo, la constituyen en ideal para combinarla con cemento Portland en fábricas de cemento o en grandes proyectos de ingeniería civil.

Su reactividad no es tan alta como otras puzolanas y por esta razón no es tan usada para combinarla con la cal.

enizas de residuos agrícolas

Muchas cenizas de plantas tienen un alto contenido de sílice por lo que son aptas como puzolanas. Recientemente se han efectuado investigaciones para identificar qué tipo de plantas producen puzolana de buena calidad y que por su cantidad puedan ser susceptibles de explotación.

La ceniza de bagazo de caña de azúcar, ha destacado en los últimos años debido a la abundancia con que se produce y disponibilidad de adquisición, este subproducto agrícola presenta propiedades puzolanicas de alta reactividad, su temperatura de quema puede ir desde los 400 a 800°C.

La cáscara del arroz ha demostrado tener potencialidad ya que es disponible en grandes cantidades, típicamente contiene un 90% de sílice por lo que es una excelente puzolana. Pero presenta una gran desventaja por la cual no es muy viable utilizarla, esta desventaja radica en que para hacerla altamente puzolanica, es necesario tener bien controlada la temperatura para su quema.

Otras Pozolanas

Otras fuentes de puzolana incluyen pizarra, diatomita, bauxita y escoria de homos. La pizarra requiere un tratamiento similar al de la arcilla; la bauxita igualmente, pero a menor temperatura, 250°C - 350°C. La diatomita es altamente reactiva; pero su aplicación es restringida debido a la gran cantidad de agua que requiere para producir una mezcla plástica debido a que es porosa. La escoria, residuo de las fábricas de acero, tiene una reacción limitada, pero es efectiva si es mezclada con cemento Portland.^[14]

1.4.3 La Reacción Pozolánica

La reacción pozolánica (Fig. 4.1) consiste en la solubilización de los compuestos de sílice y alúmina amorfos o débilmente cristalizados en un medio altamente alcalino como el creado por una solución de hidróxido de calcio, generándose aluminosilicatos dicálcicos y tricálcicos similares a los obtenidos en el fraguado del cemento portland. Es decir que es un proceso natural de formación de cemento. Esta reacción es irreversible y puede escribirse esquemáticamente del siguiente modo:^[15]

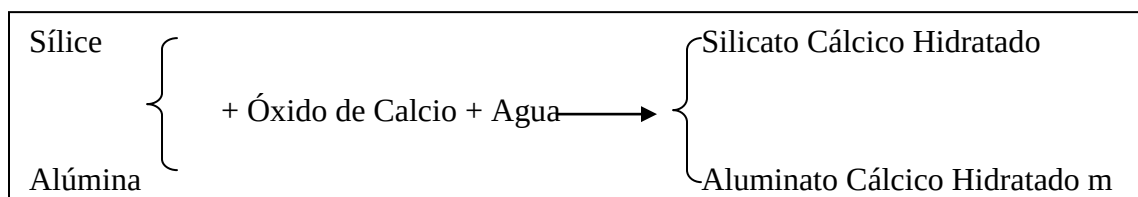


Figura 4.1 Reacción Pozolánica

Capítulo 2

MATERIALES EN ESTUDIO

En este capítulo se aborda el estudio de la adición de CBC y un el aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante. La finalidad de realizar adiciones es para el mejoramiento del desempeño del concreto en su estado fresco y endurecido. Se emplean principalmente para mejorar la trabajabilidad, la durabilidad y la resistencia. Estos materiales permiten diseñar y modificar mezclas de concreto para satisfacer la aplicación deseada.

2.1 Aditivo

Tanto por el Comité del 116R del ACI como por la Norma ASTM C 125 definen al aditivo como: “Un material distinto del agua, de los agregados y cemento hidráulico que se usa como componente del concreto o mortero. Las dosis en las que se utilizan los aditivos, están en relación a un pequeño porcentaje del peso del cemento, con las excepciones en las cuales se prefiere dosificar el aditivo en una proporción respecto al agua de amasado”.

2.1.1 Beneficios del Uso de Aditivos

La razón para el de uso de aditivos es que son capaces de impartir beneficios físicos y económicos considerables con respecto al concreto. Estos beneficios incluyen el uso del concreto en circunstancias en las que previamente existían dificultades considerables, o hasta insuperables. También hacen posible el empleo de una variedad más de ingredientes en la mezcla.

Los aditivos, aunque no son siempre baratos, no representan necesariamente gasto adicional pues su empleo puede dar por resultado ahorros concomitantes, por ejemplo, en el costo de la mano de

obra requerida para llevar a cabo la compactación, en el contenido de cemento que de otra manera sería necesario, o en mejorar la durabilidad sin el uso de medidas adicionales.

Se deberá recalcar que, aunque los aditivos propiamente usados son benéficos para el concreto, no son ningún remedio para ingredientes de mala calidad de mezcla, para uso de proporciones de mezcla incorrectas, o para mal manejo en la transportación, colocación y compactación.

2.1.2 Tipos de Aditivos

Un aditivo se puede definir como un producto químico que, excepto en casos especiales, se agrega, a la mezcla de concreto en cantidades no mayores de 5 por ciento por masa de cemento durante el mezclado o durante una operación adicional de mezclado antes de la colocación del concreto, para el propósito de realizar una modificación específica, o modificaciones, a las propiedades normales del concreto.

Los aditivos pueden ser orgánicos o inorgánicos en cuanto a la composición, pero su carácter químico, que difiere del mineral, es su característica esencial. Aunque, en la literatura americana se les llama *aditivos químicos*.

Los aditivos se clasifican comúnmente por su función en el concreto, pero con frecuencia exhiben alguna acción adicional. La clasificación de la norma ASTM C 9494-92 es la siguiente:

- Tipo A Reductores de agua
- Tipo B Retardadores
- Tipo C Acelerantes
- Tipo D Reductores de agua y retardantes
- Tipo E Reductores de agua y acelerantes
- Tipo F Reductores de agua de alto rango y súper-fluidificantes
- Tipo G Reductores de agua de alto rango y retardantes, o súper-fluidificantes y retardantes.^[2]

En la presente investigación se emplea un aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante el cual es descrito a continuación:

Aditivo Reductor de Agua de Alto Rango y Súper-plastificante (Sika ViscoCrete PC 2500)

Descripción: Aditivo líquido reductor de agua de agua de alto rango y súper-plastificante de alto desempeño de tercera generación con inclusión de aire controlada para concretos. No contiene cloruro. Cumple con la norma ASTM C 494 Tipo F ASTM C 10127 Tipo I.

Usos: El Sika ViscoCrete PC2500 se utiliza en la producción de concretos de alto desempeño en obras y plantas de concreto premezclado.

Los concretos elaborados con Sika ViscoCrete PC2500 se caracterizan por su baja relación agua/cemento, la fluidez elevada, buena permanencia de fluidez, así como una cohesión óptima y una gran facilidad de autocompactación.

El Sika ViscoCrete se utiliza en:

- Concretos con una gran reducción de agua.
- Concretos de alto desempeño.
- Concretos de altas resistencias.

La importante reducción de agua ayuda a su elevada fluidez da lugar a concretos de muy alto desempeño.

Ventajas: El Sika ViscoCrete PC2500 combina diferentes mecanismos de acción. La adsorción en la superficie de finos así como su mejor dispersión durante el proceso de hidratación producen los siguientes efectos:

- Alta compactación, es conveniente para la producción de concretos autocompactantes.
- Alta reducción de agua, produciendo concretos de altas resistencias y gran impermeabilidad.
- Disminución de la retracción del concreto.
- Reduce la velocidad de la carbonatación del concreto.

El Sika ViscoCrete PC 2500 no contiene cloruros ni sustancias que puedan favorecer la corrosión del acero de refuerzo y por lo tanto puede utilizarse sin restricciones en concretos armados o pretensados.

Modo de Empleo Aplicación del Producto: El Sika ViscoCrete PC 2500 se añade en agua de mezclado sobre la mezcla. Para aprovechar de manera óptima la gran capacidad de reducción de agua recomendamos ampliar el tiempo de mezclado medio minuto más por cada metro cúbico de concreto.

Dosificación: De 0.5% y el 1.5% del peso del cemento (4.5 a 14.0 ml/kg de cemento), dependiendo de que se emplee como superplastificante o reductor de agua de alto poder. En caso necesario puede aumentarse dicha dosificación.

Datos Técnicos:

Tipo: Aditivo líquido con base de policarboxilatos modificados.

Color: Ligeramente amarillo.

Densidad: 1.10 kg/lit. aprox.

Precauciones: El uso de Sika ViscoCrete PC 2500 permite la producción de concreto autocompactante de alta calidad; para estas aplicaciones es necesario un diseño de mezcla especial y deberán cumplirse las normas que peritan una adecuada producción y colocación del concreto.

La dosis y el diseño de mezcla óptimo deberán determinarse mediante ensayos con los materiales y las condicionantes de la obra.

Medidas de Seguridad y desecho de residuos: En caso de contacto con la piel, lave la zona afectada inmediatamente con abundante agua y jabón. En caso de contacto con los ojos, lave enseguida con agua abundante durante 15 minutos y acuda al médico. En caso de ingestión no provoque el vómito y solicite atención médica. Para mayor información y en caso de derrames consulte la hoja de seguridad.

Consultar hoja de seguridad para desecho del producto.

Almacenamiento: Un (1) año en su envase original bien cerrado, bajo techo, en un lugar fresco y seco.

Nota Legal: Toda la información contenida en este documento y en cualquier otra asesoría proporcionada, fue dada de buena fe, basada en el conocimiento actual y la experiencia de Sika Mexicana en los productos, siempre y cuando hayan sido correctamente almacenados, manejados y aplicados en situaciones normales y de acuerdo a las recomendaciones de Sika Mexicana. La información es válida únicamente para la(s) aplicación(es) y al(los) producto(s) a los que se hace expresamente referencia. En caso de cambios en los parámetros de la aplicación, como por ejemplo cambios en los sustratos, o en caso de una aplicación diferente, consulte con el Servicio Técnico de Sika Mexicana previamente a la utilización de los productos Sika. La información aquí contenida no exonera al usuario de hacer pruebas sobre los productos para la aplicación y la finalidad deseadas. Los pedidos son aceptados en conformidad con los términos de nuestras condiciones generales vigentes de venta y suministro.^[24]

2.2 Ceniza de Bagazo de Caña

La CBC es un subproducto de los desechos de fabricación del azúcar. Se utiliza como combustible que sirve para calentar las calderas para obtener el azúcar.

La utilización de las cenizas de bagazo de caña de azúcar es en diversos campos, como la agricultura, y ahora, en la construcción, es de gran aprovechamiento. Su propiedad como material cementante utilizarlo como cemento puzolánico. Además, hay que conocer que la fibra de la caña de azúcar representa entre un 40-50% de su volumen de toda la planta.

Esta ceniza se empleo como adición al mortero en tres porcentajes (3, 5 y 7%) y se obtuvo del Ingenio Lázaro Cárdenas.

Ingenio Lázaro Cárdenas

El ingenio Lázaro Cárdenas, está ubicado en la periferia de la población de Taretan, Michoacán, se localiza a los 101° 54' de longitud W – G y a los 19° 21' de latitud N (Fig. 2.1).



Figura 2.1 Ubicación satelital del Ingenio Lázaro Cárdenas.

Este ingenio permite el desarrollo de la región ya que de su derrama económica se benefician directamente 2,300 productores de caña, más de 200 familias de obreros y 60 de empleados.

- Fue fundado en el año de 1580, denominado "San Ildefonso Taretan", en 1789 fue adquirido por el Español José Joaquín de Iturbide (padre de Agustín de Iturbide).
- En la zafra 90/91, el Ingenio "Lázaro Cárdenas" pasó a formar parte del Grupo Azucarero México (GAM). En la tabla 2.1 se muestran los datos del ingenio.^[21]

En la figura 2.2 se muestra el proceso de elaboración del azúcar.

Tabla 2.1 Datos del Ingenio

Concepto	Dato
Hectáreas	2,918
Toneladas por hectárea	84.14
Capacidad de la molienda diaria (tons.)	2,300
Caña Molida en 2010 (tons.)	245,507
Rendimiento en fábrica	12.20%
Azúcar Producida (tons.)	30,002
Tipo de Azúcar	Estándar, Refinada

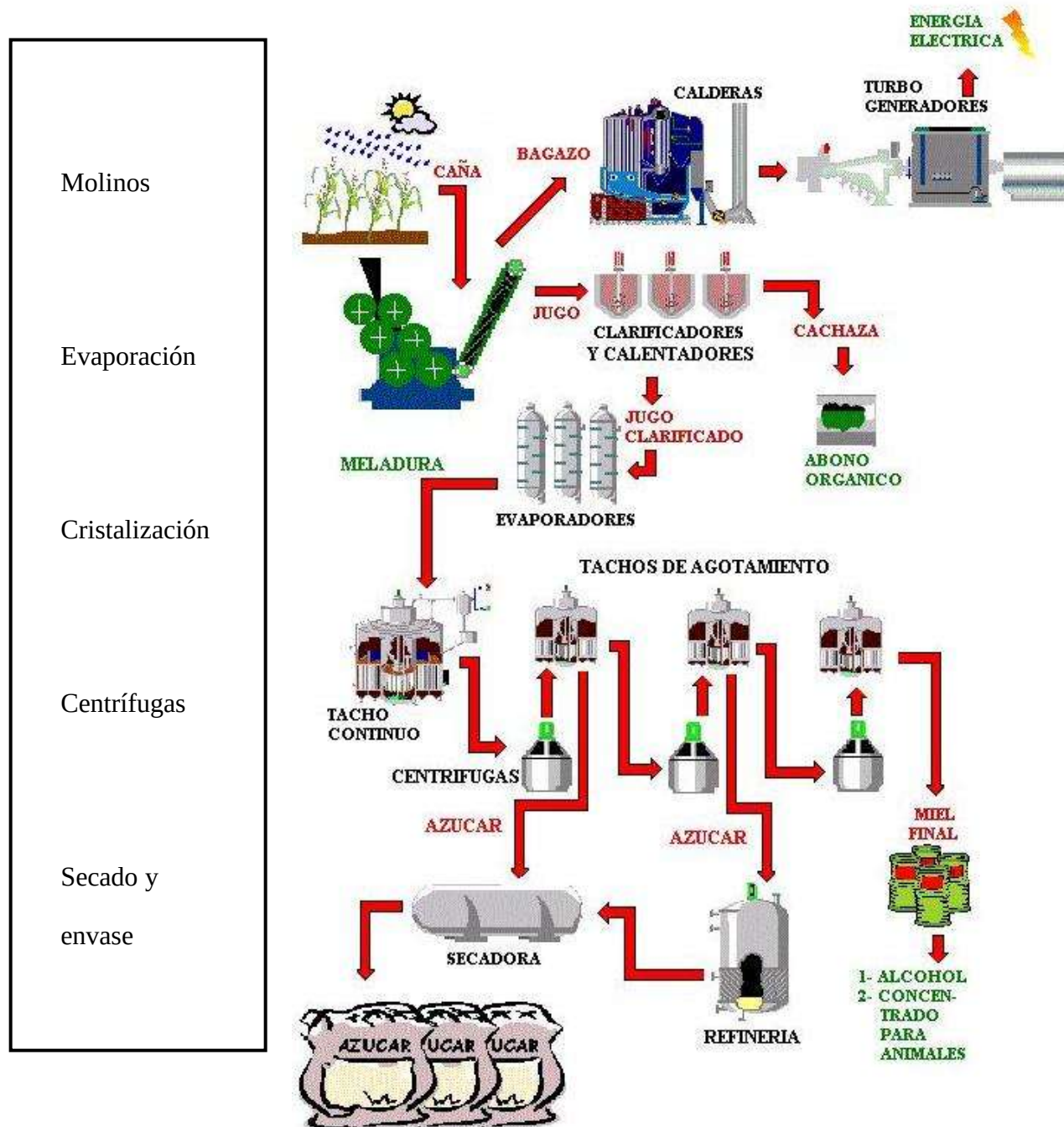


Figura 2.2 Procesamiento de la caña de azúcar.^[23]

2.2.1 Caracterización de la Ceniza de Bagazo de Caña

De acuerdo a la Norma ASTM C618 03 la ceniza de bagazo de caña se clasifica como una **Clase F**: Producidas por la calcinación de carbón antracítico o bituminoso. Cenizas que poseen propiedades puzolánicas.

Florescencia

La espectrometría de fluorescencia (también llamada fluorimetría o espectrofluorimetría) es un tipo de espectroscopia electromagnética que analiza la fluorescencia de una muestra. Se trata de utilizar un haz de luz, por lo general luz ultravioleta, que excita los electrones de las moléculas de ciertos compuestos y provoca que emitan luz de una menor energía, generalmente luz visible (aunque no necesariamente). Una técnica complementaria es la espectrometría de absorción.

Teoría de Efluorescencia: Las moléculas tienen diferentes estados llamados niveles de energía. La espectrometría de fluorescencia se refiere principalmente a estados vibracionales y electrónicos. En general, las especies objeto de examen tendrán un estado electrónico basal (un estado de baja energía) de interés, y un estado electrónico excitado de mayor energía. Dentro de cada uno de estos estados electrónicos hay diferentes estados vibracionales.

En la espectroscopia de fluorescencia, primero se excita la muestra mediante la absorción de un fotón de luz, desde su estado electrónico basal a uno de los distintos estados vibracionales del estado electrónico excitado. Las colisiones con otras moléculas causan que la molécula excitada pierda energía vibracional hasta que alcanza el estado vibracional más bajo del estado electrónico excitado.

La molécula desciende luego a uno de los distintos niveles de vibración del estado electrónico basal, emitiendo un fotón en el proceso. Como las moléculas pueden caer a cualquiera de los diferentes niveles de vibración en el estado basal, los fotones emitidos tendrán diferentes energías y, por lo tanto, frecuencias. Así pues, mediante el análisis de las diferentes frecuencias de luz emitida por espectrometría de fluorescencia, junto con sus intensidades relativas, se puede determinar la estructura de los diferentes niveles de vibración.^[31]

Resultados de la Florescencia de Rayos X de la CBC

Los resultados de la prueba de fluorescencia.^[4] arrojo los siguientes valores:

Tabla 2.2 Resultados de la Florescencia de Rayos X de la CBC.

SiO₂	56.62
Al₂O₃	4.293
TiO₂	0.422
Fe₂O₃	5.488
MgO	1.573
MnO	0.227
CaO	2.013
Na₂O	0.24
K₂O	2.178
SO₃	0.244
ZrO₂	0
Cl	0
Cr₂O₃	0
SrO	0.057
ZnO	0
PXC/PPI	26.65
BaO	0
P₂O₅	0
SUMA	100.005

Como se puede observar en la tabla 2.2 la CBC tienen un alto contenido de “sílice” y el segundo dato de relevancia es la “alúmina”; elementos que al ser mezclados con el cemento pueden mejorar el comportamiento mecánico y durable de materiales de construcción. Elementos importantes para que se lleve a cabo la reacción química en el mortero.

2.3 Cemento Portland CPC 30R RS

El cemento que se utiliza en la presente investigación es un Tolteca CPC 30R RS (Fig. 2.3). Se trata de un Cemento Portland Compuesto, de clase 30, con resistencia especificada a 3 días de 20 MPa y resistente a los sulfatos (NMX-C-414-0NNCCE, 2004). Se hace la selección de este cemento por la disponibilidad de adquisición y debido a que es el cemento líder en el mercado.

Este cemento ofrece alta resistencia a la acción de los sulfatos y se emplea exclusivamente en concretos expuestos a acciones severas de éstos, especialmente donde los suelos o aguas freáticas tengan alto contenido de sulfato.



Figura 2.3 Cemento gris CPC 30R RS Utilizado para la elaboración de los morteros.

2.4 Material Inerte

En la presente experimentación se utilizó arena de río con alto contenido en sílice (Fig. 2.5), proveniente del río Huajúmbaro del poblado del Cuervo perteneciente al municipio de Zinápecuaro, Michoacán (Fig. 2.4). Dicho material fue tamizado, utilizando solamente el material que pasa la malla # 16 y retiene la malla #30, este material posee características similares a la arena de Ottawa, es decir con alto contenido de sílice (ASTM C 91, 1995).



Figura 2.4 Huajúmbaro, Michoacán.



Figura 2.5 Recolección de arena.

2.4.1 Caracterización del Material Inerte

Se le realizaron pruebas a la arena de río empleada en la elaboración de los especímenes es importante mencionar que las pruebas que se presentan a continuación se efectuaron a la arena para tener un poco más de información acerca de ella, ya que para este caso las mezclas no conllevan un proporcionamiento de mezcla.

Humedad Actual

El objetivo de esta prueba es determinar el porcentaje de humedad que contiene una arena en el momento que se va a utilizar (Fig. 2.6). La humedad actual se determino según la norma NMX – C– 166 – ONNCCE– 2006. Se utilizó la fórmula:

$$\% \text{ de Humedad actual} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad (2.1)$$

Donde:

Mh= Masa humeda en gramos.

Ms=Masa seca en gramos.

Se realizaron tres pruebas, los resultados se muestra en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Resultados de la prueba de porcentaje de humedad actual.

Mh (gr)	Ms (gr)	% de H. actual
300	296.6	1.146
300	298.1	0.637
300	297.9	0.705
Promedio		0.844



Figura 2.6 Prueba de porcentaje de humedad actual.

Humedad de Absorción

El objetivo de esta prueba es determinar la capacidad máxima de absorción que tiene una arena expresada en porcentaje. La humedad de absorción se obtuvo siguiendo la especificación NMX – C – 165 – ONNCCE – 2004, mediante la siguiente fórmula:

$$\% \text{ de Humedad de absorción} = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad (2.2)$$

Dónde:

M_h = masa saturada y superficialmente seca en gramos.

M_s = masa seca del material en gramos.

Se realizaron 3 pruebas para obtener un promedio, resultados que se muestran en la siguiente tabla 2.4.

Tabla 2.4 Porcentaje de Humedad de Absorción.

Mh (gr)	Ms (gr)	% de H. absorción
300	284.6	5.411
300	283.3	5.895
300	284.8	5.337
Promedio		5.547



Figura 2.7 Prueba de porcentaje de humedad de absorción.

Determinación de la Masa Volumétrica Seca y Suelta de una Arena (MVSS)

El objetivo de esta prueba es determinar el peso por unidad de volumen de una arena cuando el acomodo de sus partículas es en forma libre o natural (Fig. 2.8). La prueba se realizó según la norma NMX-C-073-ONNCCE-2004.

$$MVSS = \frac{M}{V} \quad (2.3)$$

Donde:

M= Masa de la arena en gramos.

V= Volumen del recipiente en cm³.

Se realizaron 3 pruebas para obtener un promedio, resultados que se muestran en la siguiente tabla 2.5.

Tabla 2.5 Promedio de la MVSS.

M (gr)	V (cm3)	MVSS(gr/cm3)
3251	2759	1.178
3307	2759	1.199
3230	2759	1.171
Promedio		1.183



Figura 2.8 Equipo para realizar la prueba de MVSS.

Determinación de la Masa Volumétrica Seca y Varillada de una Arena (MVSV)

El objetivo de esta prueba es obtener el peso por unidad de volumen de una arena, cuando el material tiene una determinada compactación (Fig. 2.9). Esta prueba se realizó en base a la norma NMX – C– 073 – ONNCCE– 2004.

$$MVSV = \frac{M}{V} \quad (2.4)$$

Donde:

M= Masa de la arena en gramos.

V= Volumen del recipiente en cm³.

Se realizaron 3 pruebas para obtener un promedio, resultados que se muestran en la siguiente tabla 2.6

Tabla 2.6 Promedio obtenido de la prueba MVSV

M (gr)	V (cm3)	MVSV (gr/cm3)
3530	2759	1.279
3550	2759	1.287
3555	2759	1.289
Promedio		1.285



Figura 2.9 Varillado de la arena en la prueba de MVSV

Colorimetría

El objetivo de esta prueba es determinar el contenido de materia orgánica en una arena, en forma comparativa, utilizando una solución de color normal.

Se realizaron 3 pruebas, resultados que se muestran en la siguiente tabla 2.7

Tabla 2.7 Resultados de la prueba de colorimetría

No Prueba	Colorimetría
1	Escala 3
2	Escala 3
3	Escala 3

El material se encuentra en el color límite de presencia de materia orgánica figura 2.10.



Figura 2.10 Análisis colorimétrico.

Sedimentación

El objetivo de esta prueba es determinar si el contenido de material fino que contiene una arena es aceptable para definir si se acepta o no para la elaboración del concreto.

Se realizaron 3 pruebas:

Como el material fino no rebasa el límite de la marca de 444 (Fig. 2.11), se considera un material aceptable para el contenido de finos, por lo que se podría utilizar para la elaboración de una mezcla.



Figura 2.11 Análisis de contenido de finos.

Equivalente de Arena

El objetivo de esta prueba es determinar las proporciones volumétricas relativas de las partículas gruesas de un suelo respecto a los finos plásticos que contiene empleando un procedimiento que amplifica el volumen de los materiales finos plásticos. En la figura 2.12 se muestra la maquina en la que se realiza la prueba.

$$E. A = \frac{\text{LECTURA DE ARENA}}{\text{LECTURA DE ARCILLA}} 100 \quad (2.5)$$

Donde:

E.A= Equivalente de arena.



Figura 2.12 Máquina para prueba de Equivalente de arena.



Figura 2.13 Lectura de Equivalente de arena.

En la tabla 2.8 se muestran los resultados del cálculo las pruebas realizadas. (Fig. 2.13).

Tabla 2.8 Resultado de la prueba de equivalente de arena.

L. arena	L. arcilla	%E. arena
10.1	10.30	98.058
11.0	11.2	98.214
10.95	11.2	97.768
Promedio		98.013

2.5 Agua

En la presente investigación el agua usada proviene de la red de agua potable del Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Rúelas” de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. El agua se tomó tal y como venía para así realizar las mezclas lo más apegado a la realidad ya que el agua empleada en obra es el agua potable de uso común. Generalmente se utiliza el agua potable, es decir, que sea líquida, transparente, inodora, incolora e insípida (NMX-C-122-ONNCCE, 2004). Una vez que el mortero y/o concreto ha fraguado, es necesario el suministro de agua para garantizar la completa hidratación del grano de cemento. El objeto del curado es mantener el concreto saturado.

.

Capítulo 3

PRUEBAS DE LABORATORIO

Para determinar las propiedades físicas y mecánicas del mortero es necesario realizar una serie de pruebas destructivas y no destructivas, pruebas que se realizan a especímenes elaborados del mortero que se desea analizar. En la presente investigación se trabajara con especímenes; cúbicos, cilíndricos, vigas, briquetas y con la mezcla de mortero en un estado ya endurecido, las pruebas se realizan iniciando con las no destructivas ya que estas no alteran las propiedades físicas, químicas o mecánicas del espécimen a diferencia de las destructivas que si alteran las alteran.

Las pruebas con las que se trabajara en la presente investigación son las más relevantes para la caracterización de un espécimen, dichas pruebas se describen en los subtemas siguientes.

3.1 Pruebas No Destructivas

Se denomina ensayo no destructivo (también llamado END, o en inglés NDT de non destructive testing) a cualquier tipo de prueba practicada a un material que no altere de forma permanente sus propiedades físicas, químicas, mecánicas o dimensionales. Los ensayos no destructivos implican un daño imperceptible o nulo. Los diferentes métodos de ensayos no destructivos se basan en la aplicación de fenómenos físicos tales como ondas electromagnéticas, acústicas, elásticas, emisión de partículas subatómicas, capilaridad, absorción y cualquier tipo de prueba que no implique un daño considerable a la muestra examinada.

En ocasiones los ensayos no destructivos buscan únicamente verificar la homogeneidad y continuidad del material analizado, por lo que se complementan con los datos provenientes de los ensayos destructivos.

La amplia aplicación de los métodos de ensayos no destructivos en materiales se encuentra resumida en los tres grupos siguientes:

Defectología. Permite la detección de discontinuidades, evaluación de la corrosión y deterioro por agentes ambientales; determinación de tensiones; detección de fugas.

Caracterización. Evaluación de las características químicas, estructurales, mecánicas y tecnológicas de los materiales; propiedades físicas (elásticas, eléctricas y electromagnéticas); transferencias de calor y trazado de isotermas.

Metrología. Control de espesores; medidas de espesores por un solo lado, medidas de espesores de recubrimiento; niveles de llenado.^[16]

Las técnicas de inspección no destructiva tienen las siguientes limitaciones^[17]:

- En algunos casos se requiere una inversión inicial bastante alta, aunque se puede justificar si se analiza correctamente la relación costo-beneficio, especialmente en lo referente a tiempos muertos en las líneas productivas.
- La propiedad física a controlar es medida de forma indirecta y es evaluada cualitativamente o por comparación. Esto se puede evitar si se preparan patrones de referencia que permitan una calibración correcta de los sistemas de inspección.
- Una misma indicación puede ser interpretada y ponderada de forma diferente por dos o más inspectores en el caso en el que no existan procedimientos de inspección preparados y cualificados debidamente o no se cuente con patrones de calibración adecuados.
- Aunque las pruebas son fáciles de realizar, se requiere que el personal encargado de ello esté debidamente capacitado y calificado. Además deberá contar con la experiencia necesaria para interpretar y evaluar correctamente los resultados, evitando el desperdicio de material o las pérdidas de tiempo.

Sin embargo, para el estudio de las propiedades mecánicas del concreto hidráulico, en las técnicas no destructivas se han tratado de introducir dos o más parámetros para mejorar la estimación de la resistencia del concreto, algunos incluso sugieren la predicción de la resistencia del concreto en base a datos de peso y de velocidad de pulso de los especímenes, mediante regresión múltiple y redes neuronales artificiales^[19]. Existe una relación entre la velocidad ultrasónica en el material y la resistencia del mismo, se han realizado estudios para determinar la

resistencia del concreto mediante una técnica no destructiva llamada velocidad de pulso ultrasónico (VPU), en combinación con otra técnica no destructiva llamada relación de la amplitud relativa (RAR), obteniendo que las mediciones de velocidad de pulso tienen una buena correlación con la resistencia a la compresión del concreto con humo de sílice de donde obtienen resultados que indican que para concretos con resistencias grandes la sensibilidad de las mediciones para la velocidad de pulso decrece^[22].

3.1.1 Velocidad de Pulso Ultrasónico

El método de velocidad de pulso ultrasónico ha sido usado exitosamente para evaluar la calidad del concreto por más de 60 años. Este método puede ser usado para evaluar grietas internas y otros defectos como por ejemplo cambios en el concreto por deterioro debido a agresiones químicas del medio ambiente, así como por congelación y deshielo. Mediante el uso del método de la velocidad ultrasónica, también puede ser posible estimar la resistencia de especímenes de concreto y de concreto en obra. Este método utiliza ondas mecánicas que no ocasionan ningún daño al elemento de prueba. El espécimen de prueba puede ser probado varias veces en la misma localización, lo cual es útil para el monitoreo de concreto sometido a cambios estructurales internos por un largo periodo de tiempo.^[25]

Este método de prueba fue desarrollado originalmente para su uso en concreto y las publicaciones de su aplicación se refieren predominantemente a este material.

El método fue desarrollado primero en Canadá por Leslie y Cheesman entre 1945 y 1949 y también independientemente en Gran Bretaña al mismo tiempo por Jones y Gatfield. El aparato se desarrolló en aquella época e hizo uso de un osciloscopio de rayos Catódicos, para la medida de los tiempos de tránsito; las formas modificadas de este equipo eran útiles particularmente en el laboratorio, pero su uso era limitado al uso del equipo bajo condiciones de campo.

ASTM tiene en las especificaciones ASTM C - 597 reglas para el uso de este método desde 1967 y la institución británica de los estándares ha publicado las recomendaciones para la medida de la velocidad de pulsos de ultrasonido en el concreto.

Principios de la prueba

La velocidad de los pulsos ultrasónicos que viajan en un material sólido depende de la **densidad** y las **características elásticas del material**. La calidad de algunos materiales se relaciona a veces con su tiesura elástica, entonces la medida de la velocidad del pulso ultrasónico en tales materiales a menudo indicará su calidad, así como determinará sus características elásticas.

Métodos de prueba

Para evaluar la calidad del concreto así como de los materiales que lo conforman por la medida de la velocidad de pulso ultrasónico, es necesario que ésta medida sea con un alto orden de exactitud. Se hace esto usando un aparato que genere pulsos convenientes y mida exactamente el tiempo de duración de la transmisión (es decir tiempo del tránsito) que la muestra experimentó.

La distancia que los pulsos viajan en el material (es decir la longitud del camino) se debe medir también para permitir a la velocidad sea determinada por:

$$\text{Velocidad del pulso} = \text{Longitud del camino} / \text{Tiempo de tránsito}$$

Longitudes de camino y tiempos del tránsito cada uno se mide a una exactitud de alrededor $\pm 1\%$.

El instrumento indica el tiempo tomado por el pulso de ultrasonido en viajar desde el transductor de salida hasta el transductor de recepción, se logra esto cuando los transductores son colocados en los lugares convenientes en la superficie del espécimen o estructura a ensayar (Fig. 3)

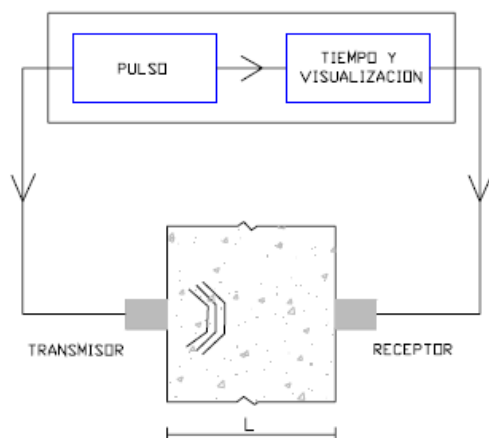


Figura 3 Diagrama simplificado del sistema de operación.

Procedimiento del ensayo para la medición de la velocidad de pulso:

Calibrar el equipo

Es necesario calibrar el equipo antes de tomar datos del ensayo a realizar, esto se logra al aplicar un borrón de transferencia y esto a su vez, al aplicar un acoplante o gel a las caras de los transductores y presionarlos firmemente frente a frente.

Colocar el acoplante adecuado

La exactitud de la medida del tiempo del tránsito puede ser asegurada solamente si se alcanza un buen acoplador acústico entre la cara del transductor y la superficie del concreto.

Colocar correctamente los transductores

La Figura 3.1 muestra tres arreglos alternativos para la colocación de los transductores al ensayar el concreto. Siempre que sea posible, se deberá emplear el arreglo de la Transmisión directa. Esto proporcionará una máxima sensibilidad, también se tendrá una longitud de camino bien definida. Sin embargo, es requerido a veces para examinar el concreto utilizar los caminos diagonales y los arreglos semi directos siempre que estos sean convenientes.

El arreglo indirecto, es el menos satisfactorio porque, aparte de su insensibilidad relativa, ofrece medidas de la velocidad del pulso que son influenciadas generalmente por la capa de concreto cerca de la superficie, esta capa superficial no necesariamente es representante del concreto más profundo, por consiguiente la longitud del camino no estará bien definida y por tanto no llegará a ser satisfactorio, tomar estas medidas, como la distancia del centro al centro de los transductores.

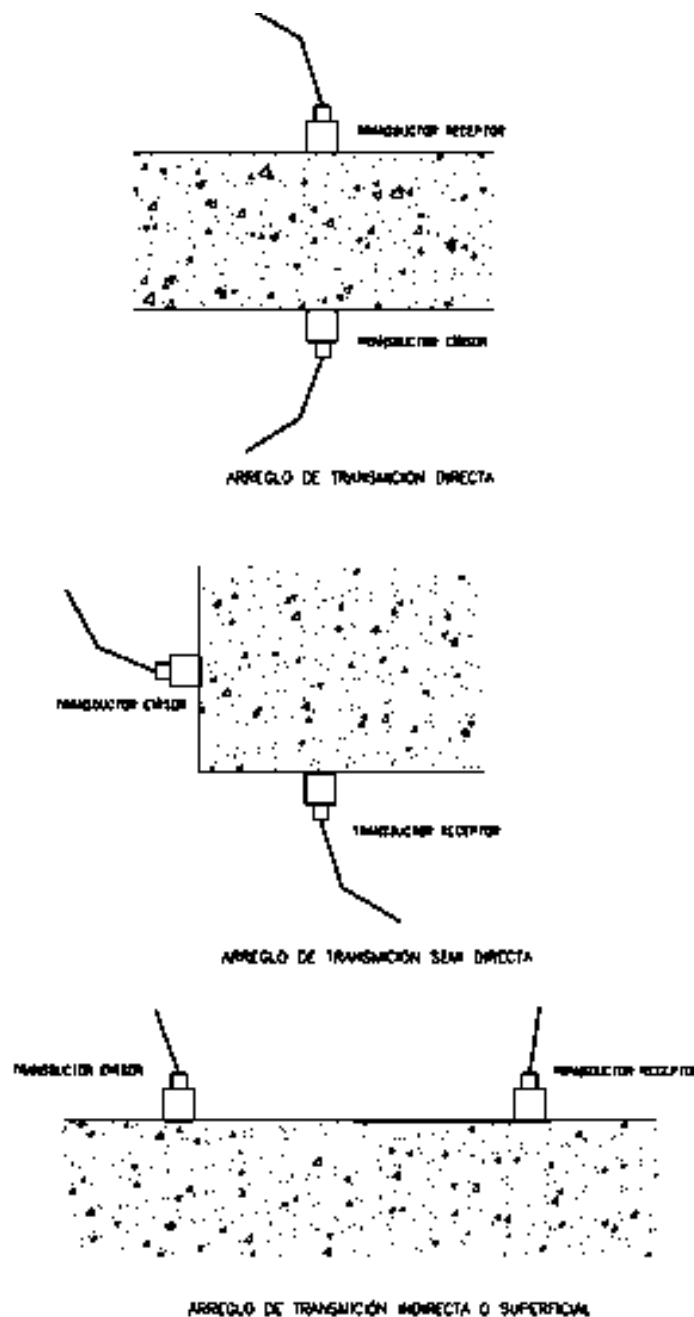


Figura 3.1 Arreglos para la colocación de los transductores.

Medición de la velocidad de pulso ultrasónico

Determinando el método de colocación de los transductores, se determina cuidadosamente la magnitud de la longitud de camino L. Posteriormente como ya se mencionó párrafos anteriores, adicionar acoplante a las caras de los transductores y presionar firmemente sobre el material bajo prueba.

Es importante no mover los transductores mientras se está tomando una lectura, ya que esto podría generar señales de ruido y errores en la medida.

La velocidad del pulso es:
$$V = \frac{L}{T} \quad (3.1)$$

Donde:

T = Tiempo de tránsito, hallado por el equipo.

L = Longitud de camino, hallada con una cinta métrica.^[18]

3.1.2 Resistividad Eléctrica

La resistividad eléctrica es una propiedad de cada material, y corresponde al recíproco de su conductividad; su unidad de medida es el (ohm-cm u ohm-m).

Depende en gran proporción del grado de saturación de los poros del concreto, y en menor grado de la hidratación de la pasta y la presencia de sales disueltas en la fase acuosa. Está en función de variables como: tipo de cemento, las adiciones inorgánicas, la relación agua/cemento, y la porosidad de las estructuras, entre otras.^[20]

Nota Histórica

Los primeros intentos de utilización de los métodos eléctricos datan desde Robert W. Fox en 1830, quien observó corrientes eléctricas fluyendo en las minas de cobre en Cornish, resultado de las reacciones químicas dentro de las vetas de los depósitos^[29]. A principio de 1882, Carl Barus

condujo experimentos en Comstock Lode, Nevada, que lo convencieron de que este método podía ser usado para la búsqueda de sulfato de oro oculto ^[29].

El concepto de resistividad aparente se introdujo alrededor de 1915, por dos personas principalmente, Wenner en 1912 del U. S. Bureau of Standards y por Schlumberger en 1920. Las técnicas de campo fueron desarrolladas por O. H. Gish y W. J. Rooney del Carnegie Institution of Washington y por Marcel Schlumberger, E. G. Leonardon, E. P. Poldini y H.g. Doll del grupo Schlumberger. Wenner utilizó un arreglo de electrodos equiespaciados (el cual aún lleva su nombre), mientras que el grupo Schlumberger estandarizó una configuración en que los electrodos de potencial están muy pegados, y la medida de campo eléctrico es hecha en la mitad de la distancia de los electrodos de corriente (llamado arreglo Schlumberger).

Ley de ohm

La conductividad eléctrica es la facilidad con que puede moverse la carga eléctrica, es la propiedad que tienen diferentes sustancias para permitir el flujo de una carga y está determinada por la movilidad de los electrones portadores de la carga o de los iones que contenga la sustancia. Ya que un electrón es una cantidad de carga muy pequeña, para medirlo se utiliza una unidad más grande denominada Culombio (Q). Un culombio corresponde a 6.24 trillones de electrones (6.24×10^{18}). A la velocidad de flujo de la carga eléctrica se le conoce como corriente eléctrica (intensidad (I)). El flujo de la carga puede trasladarse por medio de electrones y por iones, el flujo de corriente en metales se da a través de un flujo de electrones.

$$A = \frac{Q}{s} \quad (3.2)$$

Dónde:

A=Amperio; 1 Amperio = 1 Culombio/segundo

Cuando una corriente eléctrica fluye a través de un alambre conductor, se dice que lo hace porque existe una diferencia de potencial entre los dos extremos del alambre. La diferencia de potencial entre dos puntos se define como el trabajo efectuado (J), cuando 1 Q de electricidad se

mueve de un punto al otro (Ávila, 2003). A la unidad con que se mide la diferencia de potencial se le llama voltio (V) y se define como sigue: dos puntos tienen una diferencia de potencial de 1 voltio cuando se realiza un trabajo de 1 J por cada culombio de electricidad que transita de un punto al otro, por tanto:

$$V = J/C \quad (3.3)$$

La fuerza electromotriz (fem) de una celda se mide en voltios y se define como la suma de las diferencias de potencial que puede producir a través de todos los componentes de un circuito al cual está conectado, incluyendo la diferencia de potencial requerida para impulsar la corriente a través de la misma celda. Esta fem representa el trabajo total efectuado en julios por los culombios de electricidad transportados en un circuito en el que la celda está conectada. La corriente que pasa por un alambre a temperatura constante es proporcional a la diferencia de potencial en sus extremos (Ávila, 2003). El conductor que siga esta relación obedece la ley de Ohm expresada como:

$$V = RI \quad (3.4)$$

Dónde R es la resistencia o habilidad de una sustancia para oponerse al flujo de corriente que pasa por ella. Un buen conductor tiene baja resistencia y un mal conductor tiene alta resistencia. Un ohmio se define como la resistencia de un conductor dado, cuando se aplica una diferencia de potencial de 1 voltio en sus extremos y una corriente de 1 A fluye por él.

$$\Omega = V/A \quad (3.5)$$

La resistencia de un metal puro aumenta con la temperatura, pero por ejemplo en el carbón la resistencia baja con esta. La resistencia al flujo de corriente es mínima cuando:

1. El medio presenta baja resistividad (alta conductividad)
2. Existe una distancia pequeña para el flujo de corriente
3. Se tiene un área transversal grande para el flujo de corriente

En cambio la resistencia al flujo de corriente es máxima cuando:

1. El medio presenta alta resistividad (baja conductividad)
2. Las distancias son grandes para el flujo de corriente
3. El área transversal es pequeña para el flujo de corriente.

En la tabla 3.1 se muestran los valores de los criterios de evaluación de la resistividad.

Tabla 3.1 Criterios de evaluación de la resistividad eléctrica.

Resistividad del concreto (ρ)	Pronostico de Corrosión
kΩ.cm	
$\rho > 200$	Poco riesgo
$200 > \rho > 10$	Riesgo moderado
$\rho > 10$	Alto riesgo

3.1.3 Densidad

Una de las propiedades de los sólidos, así como de los líquidos e incluso la de los gases es la medida del grado de compactación de un material: su densidad.

La densidad es una medida de cuanto material se encuentra comprimido en un espacio determinado; es decir la cantidad de masa por unidad de volumen.

La densidad del mortero varía dependiendo de la cantidad y la densidad del agregado, la cantidad de aire atrapado (ocluido) o intencionalmente incluido y las cantidades de agua y cemento. Por otro lado, el tamaño máximo del agregado influye en las cantidades de agua y cemento. Al reducirse la cantidad de pasta (aumentándose la cantidad de agregado), se aumenta la densidad.

La prueba de densidad se le aplica a los especímenes cúbicos de cada material por cada porcentaje.

3.1.4 Gravedad Específica

La definición de gravedad específica o peso específico es la relación entre la densidad de una sustancia y la de la otra, para sólidos y líquidos la relación se hace con base al agua. El peso específico estará relacionado con la gravedad y el campo electromagnético en las distancias atómicas.

La gravedad específica es una medida relativa de la densidad de un elemento y dependerá de la concentración de masa por unidad de volumen de cada elemento. Dicha concentración de masa estará efectuada por la estructura tridimensional molecular y número másico de los átomos.^[30]

La prueba de gravedad específica se le realiza a los especímenes cúbicos; esta prueba se lleva a cabo como se indica en el manual “Análisis de Materiales”, de la UMSNH, tercera edición.

3.2 Pruebas Destructivas

La forma de evaluar la resistencia del concreto es mediante pruebas mecánicas que pueden ser destructivas, las cuales permiten probar repetidamente la muestra de manera que se pueda estudiar la variación de la resistencia u otras propiedades con el paso del tiempo.

3.2.1 Resistencia a la Compresión Simple

La resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto, dada la importancia que reviste esta propiedad, dentro de una estructura convencional de concreto reforzado, la forma de expresarla es, en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm². Aunque hoy en día se expresa en MPa de acuerdo con el sistema internacional de unidades.

Esta prueba consiste en la aplicación de carga axial de compresión a los cubos de dimensiones 5x5x5 cms. La prueba se lleva a cabo en una máquina universal de pruebas a una velocidad constante que se mantiene durante toda la prueba hasta que el espécimen llegue a la falla, registrando la carga de falla para posteriormente calcular el esfuerzo a compresión del espécimen (ASTM C 109).

En los cálculos para determinar la resistencia a compresión se usó la siguiente ecuación:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3.6)$$

Dónde:

σ = Esfuerzo a compresión, kg/cm².

P= Carga, kg.

A= Área transversal cm².

3.2.2 Resistencia a la Flexión

La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. Es una medida de la resistencia a la falla por momento de una viga. La resistencia a la flexión se expresa como el Módulo de Ruptura (MR) y es determinada mediante los métodos de ensayo ASTM C78 (cargada en los puntos tercios (Fig. 3.2)) o ASTM C293 (cargada en el punto medio (Fig. 3.3)). El Módulo de Ruptura es cerca del 10% al 20% de la resistencia a compresión, en dependencia del tipo, dimensiones y volumen del agregado utilizado.

El ensayo se realiza en una máquina universal de pruebas, la aplicación de la carga a las vigas debe ser de una velocidad uniforme hasta el punto de rotura. Para la aplicación de la carga se utilizan unos rodillos (varillas de acero) de apoyo para asegurar que las fuerzas aplicadas al prisma sean perpendiculares a la cara de la muestra y sean aplicadas sin excentricidad.

Previo al acomodo de la viga en la máquina de prueba es necesario tomar las dimensiones de esta y marcarla a los puntos tercios, se coloca en la máquina de prueba acomodando los rodillos y se somete a carga, el cálculo del Módulo de Ruptura dependerá del tipo de falla, se toman medidas a través de una de las caras fracturadas después de la prueba.

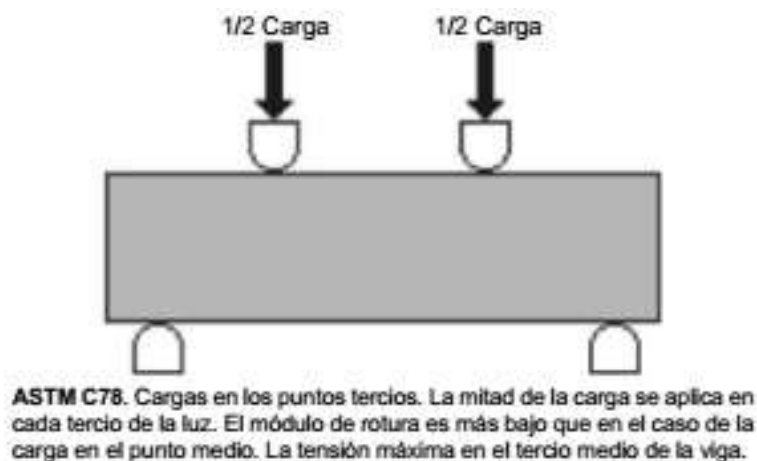


Figura 3.2 Acomodo de los rodillos para aplicación de carga.

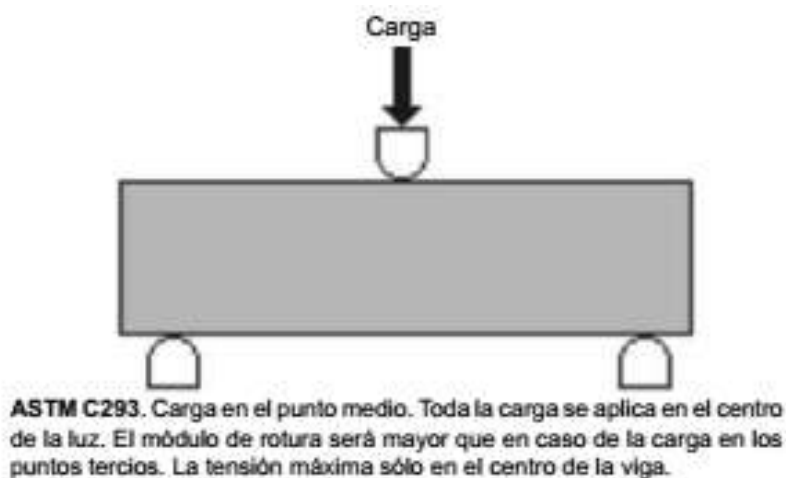


Figura 3.3 Acomodo de los rodillos para aplicación de carga.

Si se inicia la fractura en la superficie de la tensión en el tercio medio de la longitud del tramo, el Módulo de ruptura se calcula de la siguiente manera:

$$R = \frac{PL}{bd^2} \quad (3.7)$$

Dónde:

R = Módulo de ruptura, kg/cm²

P = Máxima carga aplicada indicada por la máquina de prueba, kg

L = Longitud de la muestra, cm

b = Ancho promedio de la muestra, cm

d = Espesor promedio de la muestra, cm

Si la fractura se produce en la superficie la tensión fuera del tercio medio de la longitud de tramo y en no más que 5% de la longitud del tramo, el Módulo de ruptura se calcula de la siguiente manera:

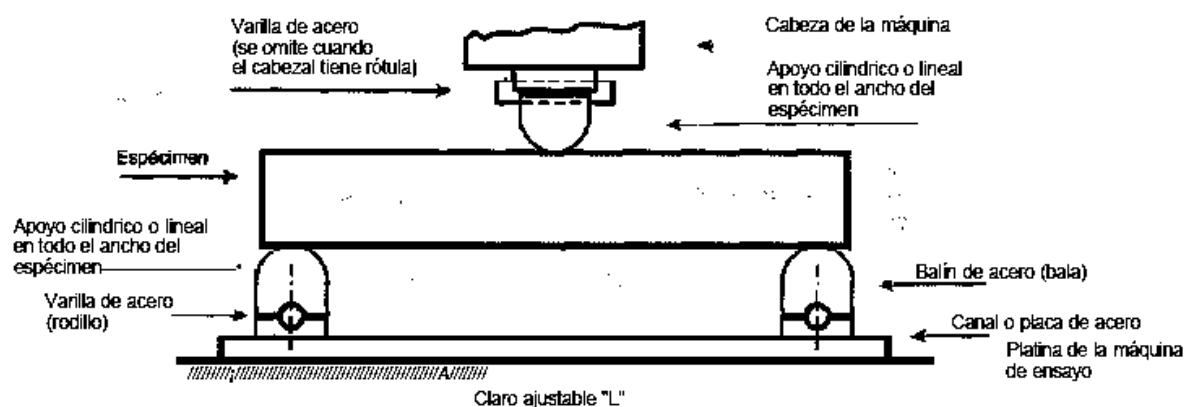
$$R = \frac{3Pa}{bd^2} \quad (3.8)$$

Dónde:

a = Distancia media entre la línea de fractura y el soporte más cercano medida en la superficie de tensión de la viga, cm.

Si la fractura se produce en la superficie la tensión fuera del tercio medio de la longitud de tramo y en más de un 5% de la longitud del tramo, se deberán desechar los resultados de la prueba.

En la figura 3.4 se representa la prueba a flexión estática en vigas, mediante un solo punto.



La presente figura es ilustrativa

Figura 3.4 Representación de la prueba de flexión estática en vigas, mediante un solo punto de carga.

3.2.3 Tensión en Briquetas

El concreto se caracteriza por tener una excelente resistencia a la compresión, sin embargo su capacidad a la tensión es tan baja que se le desprecia para propósitos estructurales. La poca capacidad del concreto a la tensión le ayuda a disminuir los agrietamientos que se pueden producir por la influencia de tensiones inducidas por restricciones estructurales, cambios volumétricos u otros fenómenos, generalmente el valor de la capacidad a la tensión se encuentra alrededor del 9% de la capacidad a compresión en concretos de peso y resistencia normal.^[26]

3.2.4 Resistencia a los Sulfatos

Los sulfatos representan uno de los mayores riesgos de agresión química para el concreto. Las reacciones químicas que incluyen la formación de productos expansivos en el concreto o en el mortero ya endurecido pueden dar lugar a efectos perjudiciales.

El ataque se presenta, cuando a través del agua, concentraciones relativamente altas de sulfatos entran en contacto con los compuestos hidratados de la pasta de cemento. Este contacto hace que se produzca una reacción química que genera expansión en la pasta y crea una presión capaz de romperla y finalmente desintegrar el concreto. Los mecanismos que intervienen en el ataque del concreto por sulfatos son dos:

- Reacción del sulfato con hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento formando sulfatos de calcio (yeso).
- Reacción de sulfato de calcio con el aluminato de calcio hidratado formando sulfato aluminato de calcio (etringita).

Ambas reaccionan y dan como resultado un aumento de volumen en el sólido, pero la segunda genera expansiones, rupturas y ablandamiento del concreto pues los sulfatos reaccionan con el aluminato de calcio hidratado.

Las consecuencias del ataque de sulfatos no solo producen degradación por expansión y fisuración (Fig. 3.5), también, una reducción en la resistencia mecánica debido a la pérdida de

cohesión en la pasta de cemento, lo anterior también conlleva a una pérdida de adherencia entre la pasta y las partículas de los agregados.^[27]



Figura 3.5 Expansión por ataque de sulfatos ^[28]

El procedimiento de prueba de ataque por sulfatos en concreto se realiza de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM-C-452-95 Standard Test Method for Potential Expansion of Portland-Cement Mortars Exposed to Sulfate.

3.2.5 Prueba de Adherencia

La adherencia es la capacidad del mortero de absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie del soporte. Es, posiblemente, la principal propiedad que se debe exigir al mortero de revestimiento pues de ella depende la estabilidad del recubrimiento. Una adherencia correcta impedirá que el mortero se despegue del soporte como consecuencia de sus variaciones dimensionales. Dichas variaciones son consecuencia de la acción de los agentes externos a que se encuentran sometidos (lluvia, hielo, frío-calor, etc.) y que dan lugar a contracciones, dilataciones y movimientos del soporte. Igualmente deberá soportar los esfuerzos mecánicos y tensionales entre revestimiento y soporte.

La adherencia es una propiedad tanto del mortero fresco como del endurecido: En el mortero fresco la adherencia se basa en las propiedades reológicas de la pasta de cemento.

Para comprobarlo basta con aplicar una capa de mortero entre dos piezas a unir y separarlas al cabo de unos minutos. Una buena adherencia del mortero se manifiesta al permanecer adherida pasta del mismo a la superficie de las dos piezas una vez separadas.

En el mortero endurecido la adherencia depende fundamentalmente de la naturaleza de la superficie del soporte, de su porosidad y rugosidad, así como de la granulometría de la arena empleada.

Cuando se coloca mortero fresco sobre la superficie del soporte, parte del agua de amasado es absorbida por el mismo penetrando en su interior a través de sus poros. El fraguado del mortero ocasiona procesos físico-químicos en su interior, responsables del fenómeno de anclaje con el soporte.

La prueba de adherencia es un método de ensayo, utilizado para medir la resistencia superficial a la tracción en el mortero consiste en realizar un corte circular sobre el soporte con una pequeña broca de 50 mm. de diámetro seguidamente, y utilizando un adhesivo epóxico con base rápida, se pega un disco de ensayo. El disco se arranca con el instrumento de medición pull off (Fig. 3.6) que indicará su resistencia directamente en N/mm² o en KN.



Figura 3.6 Equipo Pull Off para prueba de Adherencia.

Los diferentes tipos de fallas que se presentan se ilustran en la figura 3.7.

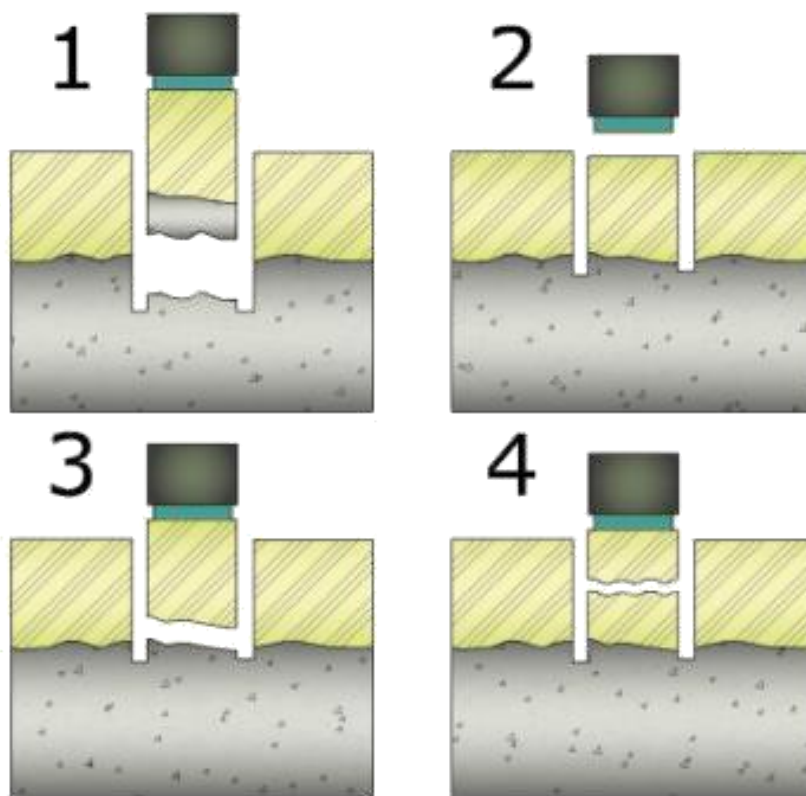


Figura 3.7. Tipos de falla que puede presentar la prueba Pull Off.

- Falla 1. En el sustrato.
- Falla 2. En la línea de unión entre la reparación o la superposición de materiales y el adhesivo epóxico que se utiliza para unir el disco de acero.
- Falla 3. En la línea de unión entre el sustrato y el material de reparación o revestimiento.
- Falla 4. En el material de reparación o revestimiento.

Capítulo 4

DISEÑO DE ESPECIMENES DE PRUEBA

Una vez hecha la elección del cemento y el análisis de la arena se procedió a la elaboración de la mezcla. Previo a la elaboración de la mezcla para los especímenes se realizó la prueba de fluidez para determinar el contenido de agua necesaria para que el mortero sea manejable, plástico y dúctil.

La fluidez es una medida de la consistencia de la pasta de cemento expresada en términos del incremento del diámetro de un espécimen moldeado por un medio cónico, después de sacudir un número específico de veces. El diámetro que se debe obtener es de $110\text{cm} \pm 5\%$. (ASTM C 109M I, 2002), (NMX-C-061, 2010).

La trabajabilidad de una mezcla de mortero tiene que ver con: la facilidad con que el albañil puede manejar la mezcla sin que se produzcan problemas de segregación, el tiempo en que la mezcla se puede trabajar sin que fragüe o se seque, la facilidad de colocación y la capacidad que posee la mezcla para retener el agua aun estando en contacto con superficies absorbentes como los tabiques u otros elementos constructivos. Como se puede presuponer, resulta muy difícil calificar la trabajabilidad de una mezcla con una simple prueba, sin embargo, se ha logrado evaluar de manera indirecta la trabajabilidad de una mezcla por medio de la prueba de fluidez.^[3]

4.1 Prueba de Fluidez

La prueba de fluidez consiste en llenar el molde troncocónico, sobre el plato circular, es decir sobre la mesa de fluidez, el llenado se hace en dos capas, agregando a cada una de estas la mitad del volumen del molde aproximadamente, después del llenado de la primera capa se le dan 25 golpes con el pisón a la mezcla distribuidos en toda la superficie, como se observa en la figura 4.1. Después se procede a llenar la segunda capa teniendo cuidado en dejar un sobrante de mezcla sobre la parte superior, después se le dan a ésta capa otros 25 golpes con el pisón, posteriormente se enraza el molde ayudándose de una espátula, cuchara de albañil o similar, se

retira el molde, mediante el uso de la manivela el plato circular se levanta y se deja caer súbitamente, esta operación se repite varias veces, debe hacerse un total de 15 veces en un tiempo aproximado de 15 segundos. La medición del diámetro final se hace después de que la mesa ha sido sometida a una serie de caídas por medio de una hélice truncada que la levanta y la deja caer súbitamente. El diámetro final se mide con un vernier apropiado como se muestra en la figura 4.2.



Figura 4.1 Apisonado del molde tronconico para prueba de fluidez.



Figura 4.2 Medición del diámetro en la prueba de fluidez.

Para determinar la cantidad de agua necesaria para la mezcla, esta se realizó dentro de una cubeta con capacidad de 18 litros aproximadamente (Fig. 4.4), esto debido a que las cantidades de materiales excedían de 1 kg de cementante y 4 kg de arena, así que sería bastante difícil mezclar dichos materiales en un recipiente de porcelana como se acostumbra usualmente. Para el mezclado de dichos materiales se utilizó un taladro marca Bosch con potencia de 750w y 3500 RPM, adicionado de unas Aspas Mezcladoras (Fig. 4.3).



Figura 4.3 Recipiente para elaboración de mezcla de mortero.



Figura 4.4 Elaboración de mezcla de mortero.

4.2 Elaboración de Especímenes de Mortero

Es importante mencionar que una vez determinada la cantidad de agua necesaria para elaborar la mezcla, de esta se partiría para elaborar todas las mezclas con las diferentes adiciones que se le agregaron al mortero para elaborar los diferentes especímenes. Sin embargo, si estas mezclas con adiciones no cumplían con la fluidez la cantidad de agua sería cambiada en especial en el caso del aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante ya que por ser un reductor de agua se busca agregar la menor cantidad posible del líquido de amasado (la cantidad de agua dependió del porcentaje de aditivo adicionado).

Las cantidades de cementante, así como de arena y agua se determinaron de un estudio previo, debido a que también se había realizado ya una mezcla para cuantificar el agua necesaria para cumplir con la fluidez especificada.

La cantidad de cementante empleada fue de 1908grs ya con un 10% de desperdicio, puesto que se realizó previamente la cuantificación del volumen requerido para la elaboración de los especímenes basado en lo que indica la norma correspondiente (ASTM C 109M I. , 2002) .

Los especímenes testigos fueron elaborados con el proporcionamiento mostrado en la tabla 4 fue necesario realizar 3 mezclas para la elaboración de la cantidad mostrada en la tabla 4.1.

Tabla 4 Proporcionamiento de la mezcla.

Agregado o Característica	Cantidad
Cemento	1908 grs.
Arena	5247 grs.
Agua	1927 ml
Relación agua/cemento (A/C)	1.01
Fluidez	115 cm

Tabla 4.1 Cantidad de especímenes elaborados.

Espécimen	Prueba a Realizar	No. de Especímenes
Cubos de 5 x 5 x 5cm	Compresión axial	18
Cilindros de 10 x 20cm	Resistencia a los sulfatos	18
Prismas de 4 x 4 x 16cm	Flexión	18
Briquetas	Tensión	18

La mezcla con el aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante (Sika ViscoCrete PC 2500) no cumplió con la fluidez por lo cual fue necesario disminuir la cantidad de agua y aumentar el porcentaje de desperdicio, en la tabla 4.2 se muestra el proporcionamiento de acuerdo al porcentaje de aditivo.

Tabla 4.2 Proporcionamiento de Sika ViscoCrete PC 2500 de acuerdo al porcentaje empleado.

Porcentaje de Aditivo	Cantidad de Agua (ml)	Cantidad de Cemento (grs.)	Cantidad de Arena (grs.)	Fluidez (cm)
0.5 %	1440	1908	5248	108
1 %	1256	1908	5248	106
1.5 %	1341.50	2309	6350	106

En el caso de CBC no se presento ningún problema al realizar la prueba de fluidez por lo cual se empleo el mismo proporcionamiento que en los especímenes testigos.

De los especímenes elaborados, se realizaron las pruebas correspondientes a las edades de 7, 14, 28, 45, 90 y 150 días, a excepción de los cilindros que solo se probaron a la edad de 120 ± 10 días.

4.2.1 Elaboración de Cubos

Para la elaboración de los cubos de mortero en sus diferentes adiciones, se utilizaron moldes de acero inoxidable y bronce que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma correspondiente (ASTM C 109M, 2002). Primeramente es necesario recubrir los moldes con un desmoldante, con la finalidad de que al transcurrir 24 hrs se descimbraran sin mayor problema de que el mortero se adhiera a las paredes del molde o los especímenes se desmoronaran, como desmoldante se empleó aceite para transmisión mezclado con diesel como se muestra en las figuras 4.5 y 4.6.



Figura 4.5 Aplicación de desmoldante.



Figura 4.6 Moldes para cubos con desmoldante.

Una vez engrasados los moldes para la elaboración de los cubos y la mezcla se encuentra lista, es decir, que ya se le haya realizado la prueba de fluidez y esta haya cumplido con ella, se procedió al llenado de los moldes (Fig. 4.8). El llenado de los moldes se realizó en cuatro capas de igual espesor aproximadamente (ASTM C 109M I. , 2002), en cada capa de mortero y antes del llenado de la subsecuente, se apisonó con 8 pequeños golpes en la superficie, los golpes se dieron en diferente sentido a cada capa, como se indica en la figura 4.7, el pisón con el que se dan los golpes es de forma rectangular en su base, de aproximadamente 2.5cm x 1.25cm, en la última se cercioró de dejar un sobrante de la mezcla para que al momento de enrazar el cubo la mezcla quedase al nivel del molde, el enrase se realizó con una espátula metálica.

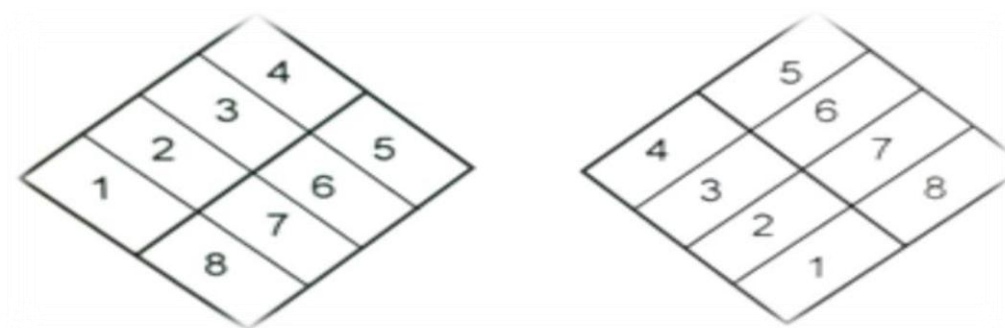


Figura 4.7 Sentido de los golpes en el llenado de los moldes para cubos.



Figura 4.8 Llenado y apisonado de los moldes para la elaboración de cubos.

Una vez elaborados el número de cubos correspondientes necesarios para las edades de prueba especificadas y con la adición correspondiente, se dejaron fraguar en los moldes durante 24 hrs aproximadamente, posteriormente se procedió a desmoldarlos. Finalmente se etiqueto cada cubo con la ayuda de un marcador indeleble con su correspondiente nomenclatura en la cara superior, la nomenclatura asignada consistió en fecha de elaboración, adición y su correspondiente porcentaje de adición.

Finalizado el paso anterior, se procedió al curado de los cubos de mortero (el curado para todos los especímenes como son: cubos, cilindros, prismas y briquetas fue el mismo) el curado que se dio a los especímenes fue por inmersión en agua hasta el día de la prueba correspondiente (ASTM C 511, 2003).

Es importante mencionar que durante la elaboración de la mezcla con la adición del aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante (Sika ViscoCrete PC 2500) fue necesario elaborar más de 5 mezclas para encontrar la cantidad de agua adecuada y así nuestra mezcla cumpliera con la fluidez, sin embargo, cabe mencionar que esto solo fue necesario con la adición del 0.5% porque con los siguientes porcentajes ya se tenía la idea con qué cantidad de agua iniciar la mezcla y solo fue cuestión de 2 a 3 mezclas para llegar a la cantidad de agua con la que cumpliera la fluidez de norma.

En la figura 4.9 se muestran los moldes para la elaboración de cubos ya totalmente llenos con la mezcla y previo al enrase.



Figura 4.9 Cubos llenos previos al enrase.

Una vez que transcurridas las 24 horas de haber llenado los moldes con la mezcla y los cubos fraguaron se procedió a descimbrarlos, como se muestra en la figura 4.10 y por último se procedió a etiquetarlos como se muestra en la figura 4.11.



Figura 4.10 Cubo ya fraguado y descimbrado.



Figura 4.11 Cubos etiquetados.

4.2.2 Elaboración de Prismas

Se elaboraron prismas de una dimensión de 4 x 4 x 16cm, con la adición correspondiente, para ello se utilizaron moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas por la norma correspondiente.

El procedimiento seguido para la elaboración de los prismas fue básicamente en mismo que el seguido en la elaboración de los cubos, es decir, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de mortero correspondiente. Con la única diferencia del llenado de los moldes.

El llenado de los moldes para prismas se hizo en dos capas de igual espesor aproximadamente como se muestra en la figura 4.12 en cada capa se le dieron 12 golpes con el mismo pisón empleado en la elaboración de los cubos, los golpes se dieron en diferente sentido, a cada capa.



Figura 4.12 Llenado de moldes para elaboración de prismas.

Una vez que se elaboraron los prismas necesarios para las edades y pruebas especificadas con sus respectivas adiciones se dejaron fraguar durante 24 hrs aproximadamente para después de transcurrido este tiempo descimbrarlos y etiquetarlos con la nomenclatura correspondiente. Finalmente se sometieron a curado de la misma manera indicada en los especímenes cúbicos.

4.2.3 Elaboración de Cilindros

Los cilindros de mortero elaborados son de dimensiones de 10cm de altura, por 5cm de diámetro, se elaboraron los especímenes requeridos para las edades y pruebas especificadas con sus respectivas adiciones. Se utilizaron moldes de acero inoxidable que cumplen con las dimensiones especificadas para su fabricación.

En la elaboración de los cilindros, se siguió el mismo procedimiento descrito en la elaboración de los cubos, es decir, primero se engrasaron los moldes y después se llenaron con la mezcla de mortero correspondiente. El llenado de los moldes cilíndricos se realizó en dos capas de igual espesor aproximadamente, es decir a la mitad de la altura del cilindro como se muestra en la siguiente figura 4.13, en cada capa se le dieron 25 golpes con una varilla punta de bala de 1/4" de diámetro, después de la segunda capa se enrazaron con ayuda de la misma varilla punta de bala.



Figura 4.13 Llenado de moldes para elaboración de cilindros.

Después de la elaboración del número de cilindros requerido, se dejaron fraguar durante 24 hrs aproximadamente, para proceder a descímbrales y etiquetarlos con la nomenclatura correspondiente y llevarlos a curado de la misma manera que los cubos y el resto de los especímenes.

4.2.4 Elaboración de Briquetas

Para la elaboración de las briquetas (especímenes en forma de cacahuete) con las mezclas y adiciones correspondientes, se empleo un molde de bronce mostrado en la figura 4.14. El proceso de elaboración es básicamente el mismo que en el resto de los especímenes, es decir, primero que nada se engrasa el molde para proceder a su llenado, con la diferencia de que estas no se dejan fraguar en el molde si no que solo se elaboran en este y en el mismo instante se desmoldan y se dejan fraguar sobre una base de cristal como se muestra en la figura 4.15 a la que previamente se le untó desmoldante para evitar se agrieten las briquetas al ser retiradas.

El llenado del molde para la elaboración de las briquetas se realiza en dos capas y se apisona cada una de ellas con el dedo índice y finalmente se enrazan con la espátula metálica.



Figura 4.14 Molde para elaboración de briquetas.



Figura 4.15 Briquetas sobre base de cristal.

Finalmente se etiquetan las briquetas con la nomenclatura correspondiente y se llevan a curado de la misma manera que el resto de los especímenes como se muestra en la figura 4.16.



Figura 4.16 Etiquetado de briquetas.

El curado de los especímenes se hizo en cubetas de 19 litros buscando un acomodo adecuado de estos para que estos no se lastimaran unos con otros, manteniendo el tirante de agua lo suficientemente grande como para que cubriera todos los especímenes como se muestra en la siguiente figura 4.17.



Figura 4.17 Curado de especímenes.

4.3 Elaboración de las Losa para Prueba de Adherencia

Para las pruebas de adherencia se elaboraron losas de concreto con dimensiones de 1m^2 por 7 cms de espesor. Se elaboraron los moldes cimbra hechos a base de madera con las dimensiones indicadas, colocando una malla de alambón como refuerzo, dichos moldes se coloraron sobre un plástico en la superficie del suelo para que este trabajara aislante (Fig. 4.18). Se elaboraron 3 losas para que cubrieran cada una de las adiciones y sus respectivos tres porcentajes.

Previo a la elaboración de las losas se hizo un diseño de mezcla con una resistencia de 150 kg/cm^2 por el Método del ACI, utilizando agregado triturado, arena volcánica del banco de Joyitas, agua del laboratorio de Materiales y cemento CPC 30R RS, la dosificación del proporcionamiento se baso en estudios previos hechos por tesistas. La dosificación de los materiales se muestra en la tabla 4.5. Para la elaboración de la losas se pesaron los materiales (Fig. 4.19), se mezclaron en una charola metálica y finalmente se procedió al llenado de los moldes cimbra en dos capas, una vez que estos estaban totalmente llenos se les dio un acabado con una llana de madera con la finalidad de que la superficie no quedase muy rugosa (Fig. 4.20), finalmente se cubrieron con un plástico ya que estaban expuestas a la intemperie y para evitar la contaminación de estas.



Figura 4.18 Cimbra para losas.



Figura 4.19 Pesado y mezclado de los materiales para elaboración de losas.

En la tabla 4.3 se muestra el proporcionamiento para elaboración de una losa considerando un 10% de desperdicio:

Tabla 4.3 Proporcionamiento para una losa por el método del ACI.

MATERIAL	PESO TOTAL (kg)
Grava	66.99
Arena	66.13
Cemento	22.75
Agua	18.10

Ya coladas las losas los días posteriores se procedió a curarlas, el procedimiento fue agregar agua en la superficie de las estas durante 28 días aproximadamente, cumpliendo esta edad las losas se descimbraron, para posteriormente agregarles las capas de mortero de las diferentes adiciones con un espesor aproximado de entre 7 y 10 cm.



Figura 4.20 Colado y acabo de las losas de adherencia.

4.3.1 Elaboración de Mezclas para Prueba de Adherencia

Para la realización de las pruebas de adherencia (ASTM C 1583, 2004), se elaboraron mezclas de mortero con sus diferentes adiciones de CBC y aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante.

Anterior a la realización de dichas mezclas, las losas de concreto sobre las cuales se pondría el revestimiento se dividieron en 6 partes de aproximadamente 50cm x 33cm, en las cuales una vez que se elaboraron las diferentes mezclas, se colocaron sobre la losa con un espesor aproximado entre 7 y 10 cm, de manera que cada losa de 1m² obtuvo 6 mezclas con diferentes sustituciones y una mezcla de mortero sin adición (testigo), para después realizarle la prueba de adherencia correspondiente a la edad especificada.

Capítulo 5

EXPERIMENTACIÓN

Una vez que los especímenes cumplieron las edades de 7, 14, 28, 45, 90 y 150 días se procedió a realizarles las pruebas programadas (a cada edad establecida), tanto las no destructivas como las destructivas. Los ensayos realizados son descritos en los siguientes subtemas.

Para cada edad de prueba se ensayaron 3 especímenes de cada uno, es decir, cubos, prismas, y briquetas, solo en el caso de los cilindros se probaron a una sola edad de 1120 ± 10 días. Antes de probar los especímenes fueron retirados del curado y marcados con números del 1 al 3 como se muestra en la figura 5 y una “X” sobre la cara en la cual se sometió a carga, se tomaron sus dimensiones y se pesaron, todos los datos recabados fueron anotados en una bitácora.



Figura 5 Especímenes cúbicos marcados antes de ser probados

5.1 Velocidad de Pulso Ultrasónico

El equipo empleado para esta prueba fue una máquina dual para ensayos ultrasónicos y por rebote, con introducción automática de los resultados del esclerómetro, modelo 58-E0049/B marca CONTROLS, medidor de velocidad de pulsos ultrasónicos, figura 5.1; con una escala de frecuencia de 24 a 150kHz; impedancia de entrada del receptor de 1M; salida RS 232; cuenta con la posibilidad de conectar un osciloscopio; con una medición del tiempo de propagación de 0.1 a

1 999.9 μ s; velocidad de los impulsos con una selección de 1 a 10 por segundo; precisión 1 μ s; salida del transmisor hasta 1500V; funciona con baterías recargables internas; incluye un esclerómetro para ensayos en concreto con una energía de impacto de 2.207NM.



Figura 5.1 Equipo de velocidad de pulso ultrasónico.

El equipo tiene dos transductores, un emisor y un receptor, estos transductores tienen que tener un buen contacto con la superficie a probar y para tal fin se emplea un medio conductor ó gel. Este gel es proporcionado por el fabricante del equipo, sin embargo, se hicieron mediciones empleado un gel antibacterial y con el proporcionado por el fabricante, las lecturas obtenidas con tuvieron diferencias mínimas, razón por la cual se decidió el empleo del gel antibacterial para la toma de mediciones de velocidad de pulso. Se buscó el empleo de otro gel debido a que el que proporciona el fabricante es insuficiente para realizar la cantidad de mediciones planeadas, y los tiempos de adquisición de este gel son prolongados.

Durante la realización de la prueba se tomó la precaución de mantener constantemente húmedos los especímenes y evitar así variantes en las lecturas ya que el grado de saturación del espécimen afecta a la velocidad de pulso, y este factor debe tenerse en cuenta al evaluar los resultados del ensayo.

5.2 Resistividad Eléctrica

Las mediciones correspondientes a esta prueba se realizaron con un equipo Resistómetro que mide resistividad eléctrica en suelos y materiales porosos, marca Nilsson (Fig. 5.2) esta prueba solo se realizó en cubos y prismas.



Figura 5.2 Equipo utilizado para determinar la resistividad eléctrica.

El procedimiento seguido para el ensaye de los especímenes fue el descrito en los siguientes pasos:

1. Se determinaron las dimensiones de la muestra.
 - Cubos: lado 1, lado2 y espesor.
 - Prismas: base (lado1), espesor (lado2) y longitud.
2. Se revisa la conexión de las terminales de corriente y voltaje.
3. Se monta la muestra en el equipo Nilsson.
4. Se colocan las caras laterales del espécimen a realizarle la prueba entre dos placas de cobre y entre éstas esponjas húmedas figura.
5. Mediante la fuente y a través de las placas metálicas adosadas a las caras laterales del espécimen, se somete el espécimen a una corriente dada, (I) y voltaje (E).

La resistencia eléctrica (R) se calcula como E/I y se expresa en Ohmios (Lo hace el equipo automáticamente).

De esta manera la resistividad eléctrica está dada por:

$$\rho = R_e \left(\frac{A}{L} \right) \quad (5.1)$$

Dónde:

ρ = Resistividad eléctrica en $K\Omega$ -cm (ohm-m)

R_e = Resistencia eléctrica que el equipo proporciona, en $K\Omega$

A = Área transversal del espécimen en cm^2

L = Longitud del espécimen en cm

5.3 Densidad

La prueba de densidad se le aplica a los especímenes cúbicos de cada material por cada porcentaje el procedimiento que se sigue es el que se indica en el manual “Análisis de Materiales”, de la UMSNH, Tercera edición. El procedimiento es como se describe:

- Los especímenes se sacan de los recipientes de curado y se enumeran, posteriormente se secan superficialmente con una franela y registrando su masa como masa de la muestra (M).
- Se llena un picnómetro hasta el nivel de orificio con agua, se coloca en una superficie plana y se procede a colocar el espécimen dentro, recibiendo el agua desalojada con una probeta graduada esperando a que escurra el agua desalojada y tendremos en la probeta el volumen del agua que corresponde al volumen (V) del espécimen (Fig. 5.3).

Los cálculos para obtener la densidad de los especímenes cúbicos se hace con la siguiente fórmula:

$$D = \frac{M}{V} \quad (5.2)$$

Dónde:

D= Densidad, en g/cm^2

M= Masa del espécimen, en g.

V= Volumen del espécimen, en cm^3 .



Figura 5.3 Determinación de la densidad de especímenes cúbicos.

5.4 Gravedad Específica

La prueba de gravedad específica se le realiza a los especímenes cúbicos; esta prueba se lleva con forme se indica en el manual “Análisis de Materiales”, de la UMSNH, tercera edición. El procedimiento es el que se describe a continuación:

1. Se secan las muestras superficialmente con una franela y se determina su masa superficialmente seca (M_{ss} =Masa superficialmente seca).
2. Se adapta una canastilla a la balanza y se sumerge en agua para determinar su masa.
3. Se coloca la muestra dentro de la canastilla sumergida para determinar su masa sumergida más la canastilla (Fig. 5.4).

4. Se determina la masa sumergida del espécimen (M_a =Masa sumergida).
5. Se secan las muestras en el horno a una temperatura de $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas.
6. Se deja enfriar a temperatura ambiente y se determina su masa seca con ayuda de una balanza (M_s =Masa seca).

Los cálculos para la obtención de la gravedad específica se hacen con la siguiente fórmula:

$$G. E. = \frac{M_s}{M_{ss} - M_a} \quad (5.3)$$



Figura 5.4 Determinación de la gravedad específica.

5.5 Compresión Simple en Cubos

Una vez de haber realizado las pruebas no destructivas se procedió con las destructivas, siendo una de ellas la prueba de “Compresión simple en cubos” de 5x5cm, esta se realizó utilizando la máquina universal de pruebas Tinius Olsen (Figura 5.5). Se aplicó carga a una velocidad constante en el rango de 50000kg, el cual tiene una aproximación a 0.5kg, esta velocidad se

mantuvo durante toda la prueba hasta la falla (Fig. 5.7) del cubo registrando la carga de falla para posteriormente calcular el esfuerzo a compresión del espécimen (ASTM C 109M I. , 2002).



Figura 5.5 Máquina Universal de Pruebas Tinius Olsen.

Se probaron 3 cubos a compresión (Fig. 5.6) a las edades programadas para cada una de las adiciones en sus diferentes porcentajes, tres pruebas con la finalidad de obtener un promedio de estas, el promedio se tomo como la resistencia a compresión de la adición y el porcentaje probado, cabe destacar que los primeros especímenes cúbicos a los cuales se les realizó la prueba fueron los cubos testigo con los cuales se hicieron las comparaciones.



Figura 5.6 Prueba de compresión en espécimen cúbico.

En los cálculos para determinar la resistencia a compresión se empleó la ecuación 3.6 descrita en el capítulo 3, sección 3.2.1.



Figura 5.7 Espécimen cúbico después de someterse a carga y llegar a la falla.

5.6 Flexión en Prismas

Esta prueba se le realizó a los especímenes prismáticos de 4x4x16cm. Se probaron tres muestras cada edad programada, para cada una de las adiciones en sus diferentes porcentajes, se utilizó la máquina universal de pruebas Tinius Olsen (Fig. 5.5). El procedimiento seguido para la aplicación de carga a los prismas se describe a continuación:

Se marcó el prisma a 1” de cada uno de sus extremos longitudinales, y una marca al centro del claro del prisma; dirección a la que se aplicara la carga.

Se colocaron los soportes adecuados para la prueba y se aplica carga sin impacto y a una velocidad constante (Fig. 5.8) (ASTM C 293, 2002).

Se registró la carga de falla y la ubicación de la misma, ya que la ecuación para el Módulo de Ruptura es diferente si la falla se da en el tercio medio marcado o fuera de él.

Los cálculos se realizaron dependiendo la zona de falla con las ecuaciones 3.7 y 3.8 descritas en el capítulo 3, sección 3.2.2.



Figura 5.8 Prisma para prueba a flexión.



Figura 5.9 Prisma fallado al centro.

5.7 Tensión en Briquetas

Se determinó la resistencia a la flexión en las briquetas, a cada edad programada en sus diferentes adiciones y cada uno de los porcentajes. La prueba se realizó en la máquina de prueba para tensión en morteros tipo Michaelis (Fig. 5.10).

El procedimiento seguido para la realización de la prueba se describe a continuación:

- Se sacaron de curado las muestras a probar a la edad y adición correspondiente.
- Se tomaron las dimensiones; sección media (S_m) de la briketa.
- Se colocó la briketa en la máquina la cual debe quedar nivelada.
- Se aplicó la carga lenta y constantemente por medio de las municiones hasta la falla de la muestra (Fig. 5.11).

Después de la falla de la muestra se retiraron las municiones pesándolas al decimo de gramo, el peso de las municiones (P_m) fue considerado como la carga que soportó la sección media de la briketa.

En los cálculos para determinar la resistencia a tensión se usó la siguiente ecuación:

$$R = P_m \frac{x_{50}}{s_m} \quad (5.4)$$

Donde:

R = Resistencia a la tensión en kg/cm^2

P_m = Peso de las municiones o carga de ruptura en kg .

S_m = Sección media de la briketa en cm^2 .

50 = Constante de la máquina.



Figura 5.10 Máquina Michaelis para pruebas de tensión en morteros.



Figura 5.11 Briqueta después de la falla

5.8 Ataque por sulfatos

El objetivo de esta prueba consiste en medir la pérdida de solidez del concreto debida a la acción de las sales a las que se encuentra sometido en ambientes marinos donde se tienen eventos de humedecimiento y secado del elemento.

El método de medición es a través de la simulación de los eventos de una manera acelerada mediante los ciclos de saturación en una solución a base de sulfatos de sodio y de secado de los elementos sujetos a prueba.

Esta prueba se realizó únicamente a especímenes cilíndricos de 5cm de diámetro por 10cm de altura a la edad de 110 ± 10 días, para cada una de las adiciones y sus diferentes porcentajes. Se elaboro una solución de sulfato de sodio en la cual se sumergieron los especímenes.

El procedimiento de prueba es el que se describe a continuación:

Para iniciar con la prueba se prepara la solución saturada de sulfato de sodio suficiente para realizar 5 ciclos de humedecimiento de los especímenes, empleando agua destilada (la cual fue proporcionada por el laboratorio de ingeniería ambiental de la FIC). La solución se preparó disolviendo 350 gramos de sulfato de sodio (Sosa caustica) por cada litro de agua, en una cubeta de 19 litros con un taladro marca Bosch con potencia de 750w y 3500 RPM, adicionado de unas Aspas Mezcladoras, para que la solución este lista se tiene que disolver completamente el sulfato no quedando polvos de este en el interior del recipiente (Fig. 5.12).

- Los especímenes deberán de secarse hasta peso constante antes de iniciar la prueba. Para este caso los especímenes permanecieron en el horno a temperatura de 110°C durante un mes aproximadamente sin lograr el peso constante, aunque las variaciones de peso en los últimos días eran mínimas se tomó este tiempo como el necesario para iniciar la prueba.
- Se pesan los especímenes para obtener el peso seco o peso inicial de cada uno, y se enumeran del 1 al 18, se sumergen en un recipiente capaz de contenerlos con un tirante de solución mínimo de 2 cm por encima de la parte superior de los especímenes (Fig. 5.13), la parte inferior de los especímenes deberá estar en contacto con la solución y no con el recipiente que los contiene.



Figura 5.12 Preparación de solución saturada de sulfato de sodio.

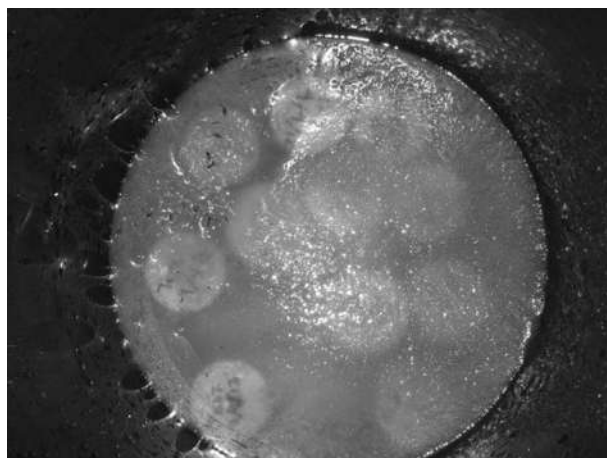


Figura 5.13 Inmersión de los especímenes en la solución de sulfato de sodio

- Los especímenes deberán de permanecer en la solución saturada de sodio durante un tiempo no menor de 16 horas ni mayor de 18 horas y manteniendo los a una temperatura en promedio de 21°C.
- Una vez pasadas las 16 horas se sacan los especímenes y se dejan escurrir durante 15 minutos para después colocarlos en el horno previamente calentado a una temperatura constante de 110°C, durante 24 horas.

- Pasado el tiempo de secado se sacan del horno los especímenes y se dejan enfriar a temperatura ambiente para después obtener su peso seco. Todos los pasos mencionados hasta ahora generan un ciclo de saturación y secado de los especímenes, se deberá hacer lo mismo hasta completar 5 ciclos (indicados por la norma).
- Como último paso a los cilindros que no se afectaron tanto de su base superior e inferior se les aplica una carga de compresión para después cotejar con los cilindros que se probaron sanos y ver cuál es la disminución de resistencia.
- El tiempo total que se empleo en esta prueba fue de 15 días por adición.
-

A medida que los ciclos iban avanzando el deterioro del espécimen era más notorio, a excepción de los especímenes con el aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 (Fig. 5.14 y 5.15).



Figura 5.14 Especímenes cilíndricos con aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 después del primer ciclo de la prueba de ataque por sulfatos.



Figura 5.15 Especímenes cilíndricos con aditivo Sika Viscocrete PC 2500 después del quinto ciclo de la prueba de ataque por sulfatos.

En el caso de los especímenes testigos y de CBC el daño causado por la solución de sulfatos fue mucho más severo. Los especímenes testigos solo resistieron 4 ciclos (Fig. 5.16) ya que desde el primero presentaron daños considerables, en el caso de los de CBC con un porcentaje de 7% resistieron un ciclo (Fig. 5.17) y los de 3 y 5% resistieron 2 ciclos (Fig. 5.18), sin embargo, ya no fue posible tomar sus pesos ni someterlos a compresión ya que se disgregaron totalmente.



5.16 Especímenes testigos después del primer ciclo.



Figura 5.17 Especímenes CBC 7% después del primer ciclo.



Figura 5.18 Especímenes de CBC 3 y 5% después del primer ciclo.

5.9 Prueba de Adherencia

Una vez que se obtuvo la edad correspondiente para realizar las pruebas de adherencia, se comenzó por hacer una perforación en la superficie del revestimiento (Fig. 5.19). Esta se hizo mediante la ayuda de un esmeril angular portátil marca Black & Decker con una potencia de 750w y 11000rpm adicionada de una broca circular con punta de diamante de 50mm de espesor, la perforación se hizo a un cm por debajo del sustrato de concreto.



Figura 8.19 Perforación de losas para prueba de adherencia.

Una vez que se realizaron las perforaciones a las mezclas correspondientes se procedió a pegar los dollys de acero inoxidable (Fig. 5.20), los cuales sirvieron para realizar la prueba. Los dollys se adhirieron al revestimiento mediante un epóxico marca Sikadur-31 Hi-Mod Gel. El epóxico se dejó secar durante 24 horas.



Figura 5.20 Dollys listos para realizar la prueba de adherencia.

Una vez que el epóxico estuvo seco se procedió a realizar la prueba de adherencia, la cual consistió en insertar el perno con cabeza cilíndrica (Fig. 5.21) en el disco de metal pegado a la superficie de la muestra, después se colocó el instrumento de medición Pull Off (Fig. 5.22) de carga en el perno para después apretar ligeramente hasta sentir una ligera tensión, se comenzó a aplicarle carga lenta y constante en el rango que indica la norma, hasta que se obtuvo la falla de la muestra (ASTM C 1583, 2004), es decir hasta que hubo desprendimiento del revestimiento o sustrato de concreto.



Figura 5.21 Perno con cabeza cilíndrica.



Figura 5.22. Realización de la prueba de adherencia, mediante el equipo de Pull Off.

Capítulo 6

RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados de las pruebas desarrolladas en el capítulo 7. La forma en la que se presentan los resultados es por medio de gráficas y tablas obtenidas en las diferentes pruebas, cabe recordar que las pruebas se realizan por triplicado como un principio del diseño experimental, lo cual permite obtener una mejor aproximación al valor real. Los datos contenidos en la tabla son el promedio de los tres resultados en las correspondientes pruebas y de estas se derivan las gráficas que se presentan.

Descripción de tablas:

Tabla 6.1 a 6.7: En la primera columna aparecen los testigos y las adiciones hechas al material, en la segunda columna se presentan los porcentajes de adición, de la tercera a la octava columna se reflejan los resultados de las pruebas realizadas de forma progresiva y cronológica a las edades de pruebas.

Tabla 6.8: En la primera columna aparecen los testigos y las adiciones hechas al material, en la segunda columna se presentan los porcentajes de adición, de la tercera a la séptima columna se reflejan los resultados a los diferentes ciclos de prueba.

Tabla 6.9: En la primera columna aparecen los testigos y las adiciones hechas al material, en la segunda columna se presentan los porcentajes de adición, en el primer y tercer renglón se muestran las edades de prueba, en el renglón dos y del cuatro a nueve de la columna tres a siete se presentan los resultados.

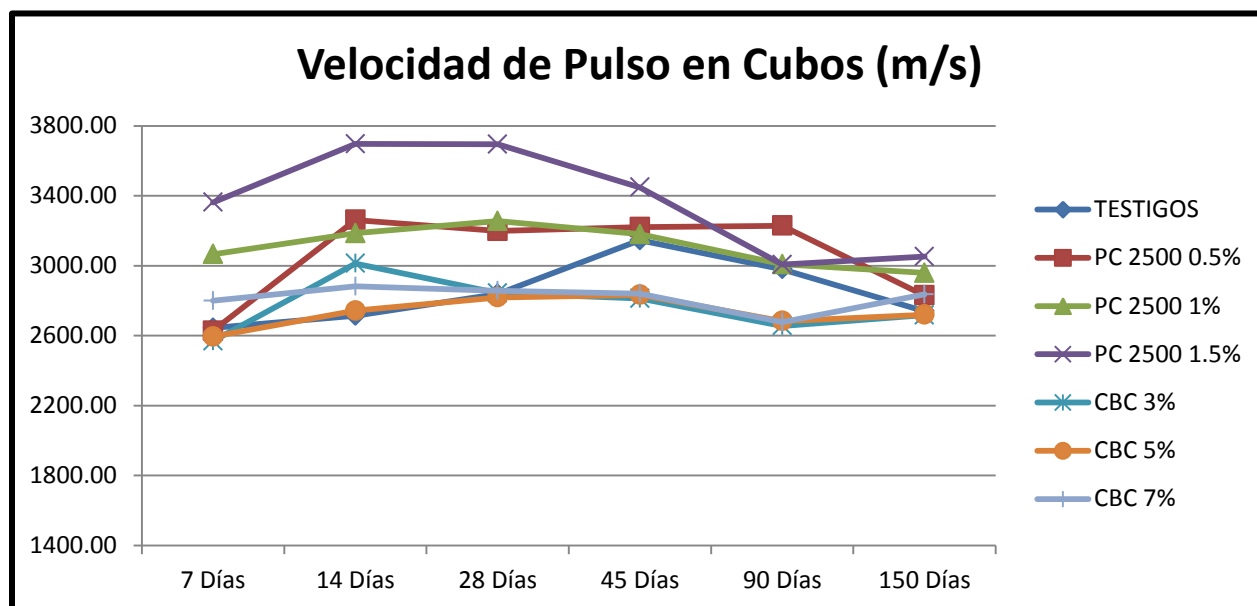
Donde:

TESTIGO: Mortero puro, es decir, sin adición.

PC 2500: Aditivo reductor de agua de alto rango y súper-plastificante Sika ViscoCrete PC 2500.

CBC: Ceniza de bagazo de caña.

6.1 Velocidad de Pulso Ultrasónico

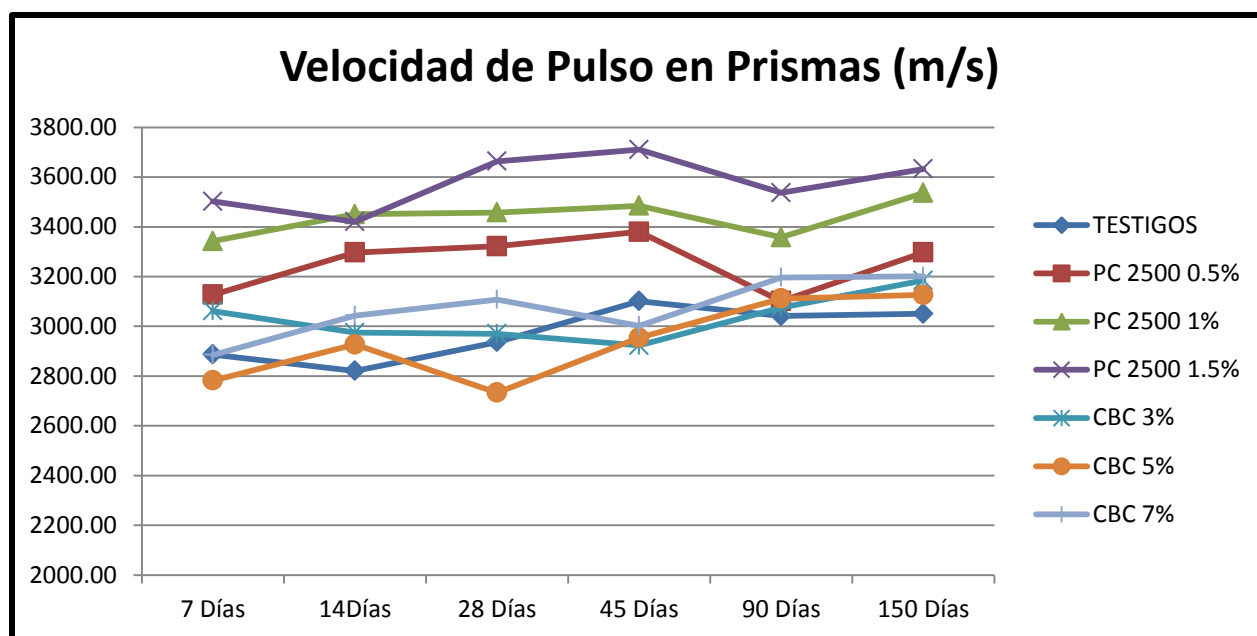


Gráfica 6.1 Representación gráfica de la Velocidad de Pulso en cubos.

Tlaba 6.1 Datos de la Prueba de Velocidad de Pulso en Cubos.

		VELOCIDAD DE PULSO EN CUBOS (m/s)					
	%	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	45 DIAS	90 DIAS	150 DIAS
TESTIGOS		2644.33	2714.00	2838.00	3145.67	2980.00	2740.139
PC 2500	0.5	2627.667	3262.000	3198.333	3220.333	3228.373	2829.518
	1	3065.667	3186.000	3255.000	3180.333	3008.667	2959.098
	1.5	3362.667	3696.000	3695.000	3448.000	3006.053	3052.548
CBC	3	2568.67	3012.67	2844.00	2812.07	2655.81	2717.16
	5	2594.33	2743.00	2819.33	2833.19	2683.54	2720.05
	7	2799.33	2882.00	2857.00	2840.79	2677.42	2835.91

Para el aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 en sus tres porcentajes presento los resultados de mayor rango a todas las edades de prueba, en el caso de CBC resultaron con valores inferiores a los testigos, pudiera ser que en la resistencia a la compresión el valor de estos también fuera inferior ya que la velocidad de pulso es una prueba que predice la resistencia, sin embargo, no es determinante.



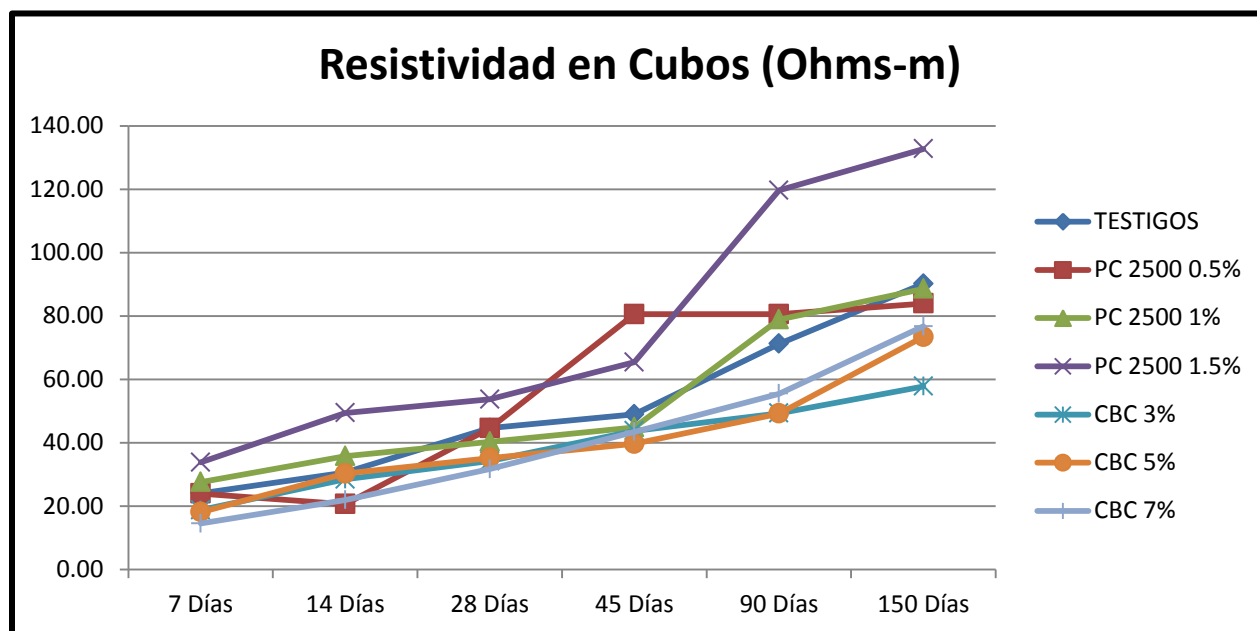
Gráfica 6.1.1 Representación gráfica de la Velocidad de Pulso en Prismas.

Tabla 6.1.1 Datos de la Prueba de Velocidad de Pulso en Prismas.

		VELOCIDAD DE PULSO EN PRISMAS (m/s)					
	%	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	45 DIAS	90 DIAS	150 DIAS
TESTIGOS		2886.00	2821.00	2936.67	3101.00	3041.67	3050.66
PC 2500	0.5	3127.00	3297.00	3322.00	3380.00	3101.00	3296.58
	1	3342.33	3450.33	3457.33	3484.67	3357.97	3536.23
	1.5	3502.00	3420.00	3663.67	3710.67	3536.61	3632.38
CBC	3	3061.00	2974.67	2970.00	2922.67	3075.27	3183.96
	5	2782.00	2927.00	2733.33	2954.00	3111.48	3126.53
	7	2885.00	3043.00	3107.67	3002.00	3196.51	3200.70

De igual manera que en los especímenes cúbicos el aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 es el que presenta los resultados de mayor rango y los especímenes de CBC con valores variables, es decir, en algunas edades con valores superiores y otras inferiores, pero mayormente fueron valores superiores con respecto de los testigos.

6.2 Resistividad

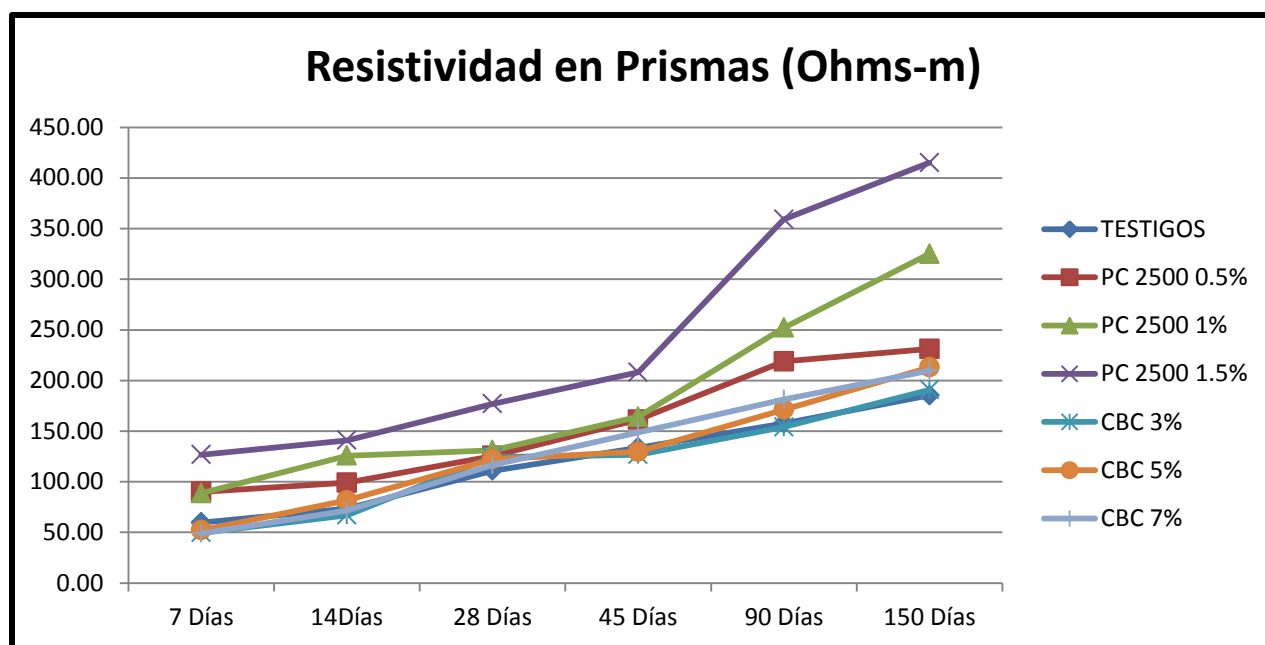


Gráfica 6.2 Representación gráfica de la Prueba de Resistividad en Cubos.

Tabla 6.2 Datos de la Prueba de Resistividad en Cubos.

		RESISTIVIDAD EN CUBOS (Ohms-m)					
	%	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	45 DIAS	90 DIAS	150 DIAS
TESTIGOS		24.05	30.56	44.64	48.94	71.24	90.180
PC 2500	0.5	23.945	20.651	44.572	80.552	80.552	83.940
	1	27.620	35.764	40.328	44.880	78.918	88.575
	1	33.788	49.410	53.705	65.432	119.628	132.712
CBC	3	18.79	28.46	34.19	43.74	49.33	57.82
	5	18.09	30.28	35.15	39.65	49.19	73.41
	7	14.54	21.93	31.67	43.43	55.48	76.72

Los valores obtenidos de mayor rango fueron los del aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 con el porcentaje del 1.5%, con el 0.5% los valores obtenidos fueron inferiores a los de los testigos a la edad de 7, 14 y 28 y superiores en las edades consecuentes, en el caso del 1% los valores fueron más variables. Los valores de CBC resultaron inferiores en todas las edades en comparación con los testigos, sin embargo, los resultados no son valores que presentan posibles daños de corrosión (de acuerdo a la tabla 3.1).



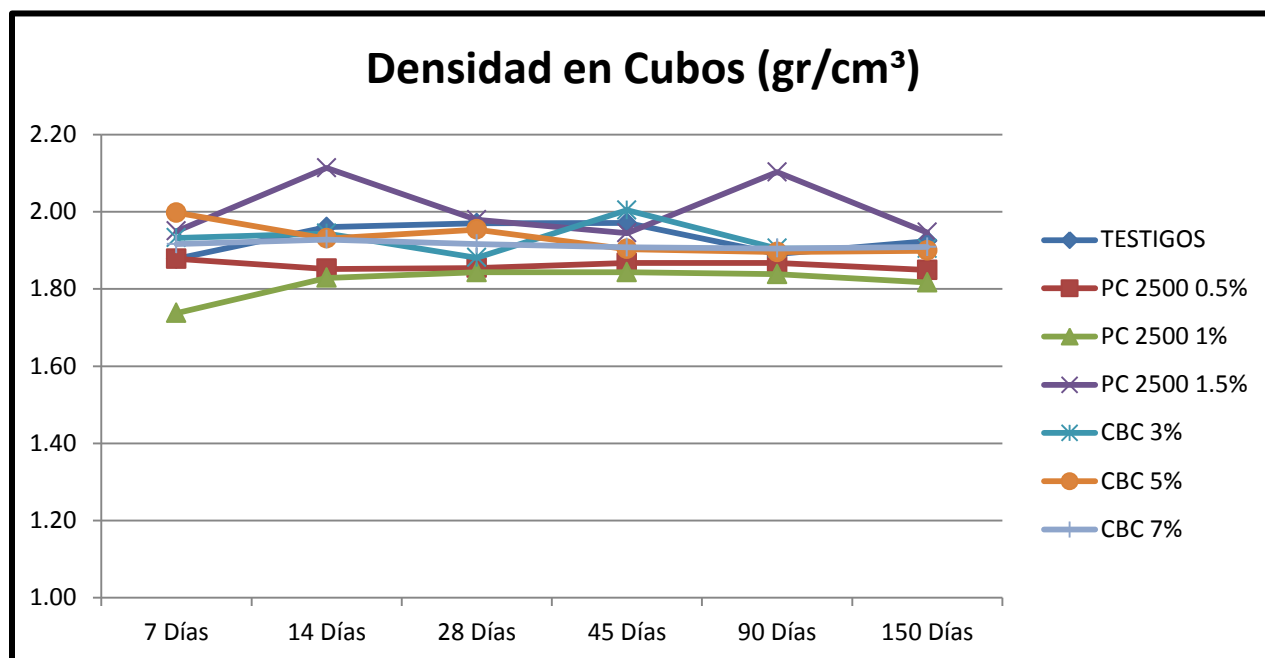
Gráfica 6.2.2 Representación gráfica de la Prueba de Resistividad en Prismas.

Tabla 6.2.2 Datos de la Prueba de Resistividad en Prismas.

		RESISTIVIDAD EN PRIMAS (Ohms-m)					
	%	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	45 DIAS	90 DIAS	150 DIAS
TESTIGOS		59.60	73.58	110.88	133.57	157.63	185.30
PC 2500	0.5	90.01	98.96	125.47	161.28	218.75	231.14
	1	88.54	125.67	131.10	164.10	252.14	324.95
	1.5	126.61	140.86	176.95	208.05	359.15	415.01
CBC	3	49.60	66.88	124.22	126.70	154.03	190.84
	5	52.13	81.70	122.26	129.73	171.16	212.98
	7	48.96	71.47	116.57	148.75	181.32	209.72

En el caso de los prismas los especímenes que presentaron resultados de mayor rango fueron los del aditivo Sika ViscoCrete PC 2500 en cada uno de sus porcentajes y a todas las edades de prueba. En el caso de CBC los resultados solo fueron superiores a los de los testigos a partir de la edad de 45 días pero solo en el 7%, en el 3 y 5% los valores fueron superiores a los de los testigos en la edad de 150 y 90 días respectivamente.

6.3 Densidad



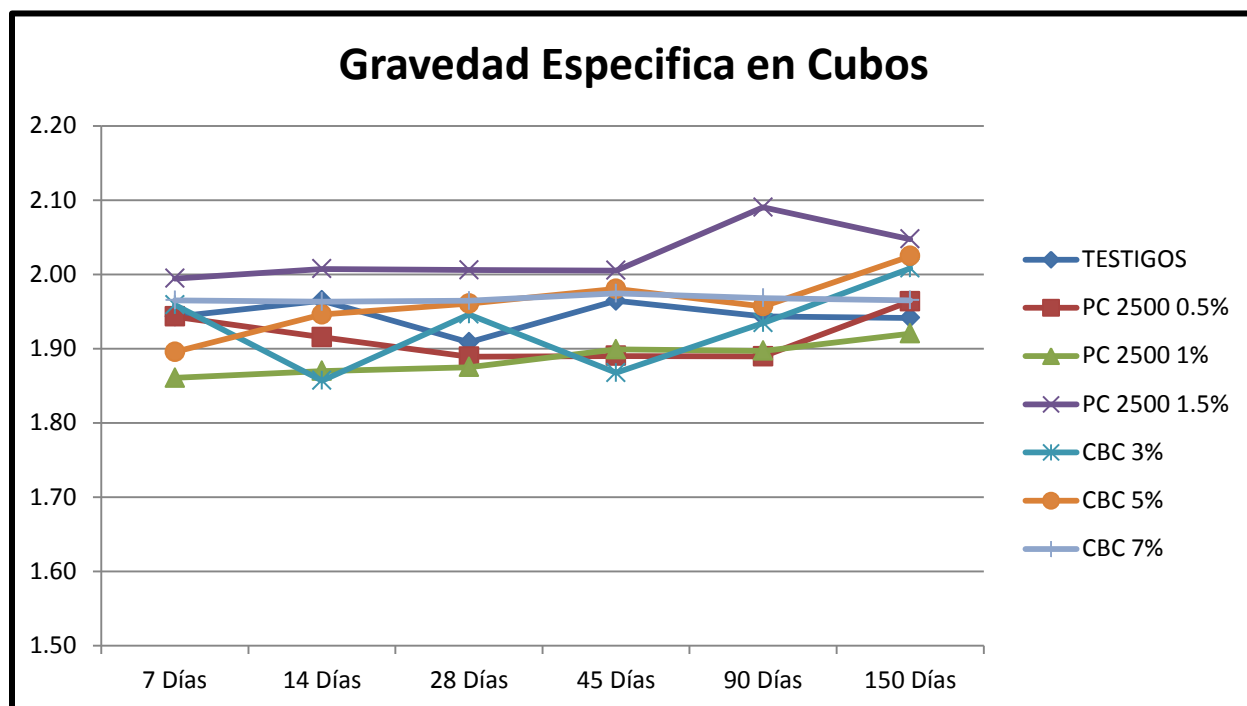
Gráfica 6.3 Representación gráfica de la Prueba de Densidad en Cubos.

Tabla 6.3 Datos de la Prueba de Densidad en Cubos.

	DENSIDAD EN CUBOS (gr/cm³)						
	%	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	45 DIAS	90 DIAS	150 DIAS
TESTIGOS		1.88	1.96	1.97	1.97	1.89	1.924
PC 2500	0.5	1.878	1.852	1.855	1.867	1.868	1.849
	1	1.737	1.829	1.843	1.843	1.838	1.817
	1.5	1.950	2.114	1.980	1.945	2.103	1.947
CBC	3	1.93	1.94	1.88	2.00	1.90	1.90
	5	2.00	1.93	1.95	1.90	1.90	1.90
	7	1.92	1.93	1.92	1.91	1.91	1.91

La densidad es una prueba física de suma importancia, ya que ayuda a evaluar la calidad del material. En los resultados obtenidos se observa que los especímenes del Sika ViscoCrete PC 2500 en sus tres porcentajes son los más densos, siguiendo los de CBC y siendo menos densos los especímenes testigos.

6.4 Gravedad Específica



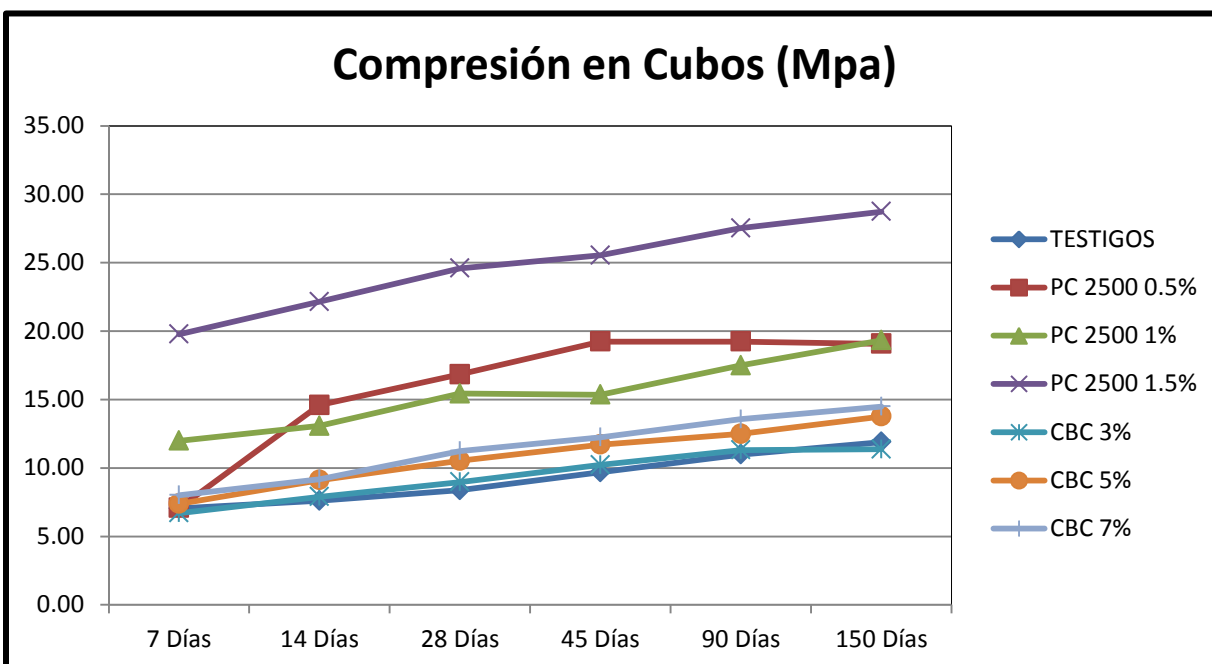
Gráfica 6.4 Representación gráfica de la Gravedad Específica en Cubos.

Tabla 6.4 Datos de Prueba de Gravedad Específica en Cubos

		GRAVEDAD ESPECIFICA EN CUBOS					
	%	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	45 DIAS	90 DIAS	150 DIAS
TESTIGOS		1.94	1.96	1.91	1.96	1.94	1.941
PC 2500	0.5	1.943	1.915	1.889	1.890	1.889	1.964
	1	1.860	1.870	1.875	1.899	1.897	1.920
	1.5	1.994	2.007	2.006	2.005	2.090	2.047
CBC	3	1.96	1.86	1.95	1.87	1.93	2.01
	5	1.90	1.95	1.96	1.98	1.96	2.02
	7	1.96	1.96	1.96	1.97	1.97	1.97

Se observa que los valores de la gravedad específica en cada una de las adiciones no es muy variable, es decir, mantienen el valor de sus resultados. Los especímenes con Sika ViscoCrete PC 2500 al 1.5% son los que presentan los valores de mayor rango y a su vez el 1% los valores inferiores comparando con los testigos.

6.5 Compresión Simple



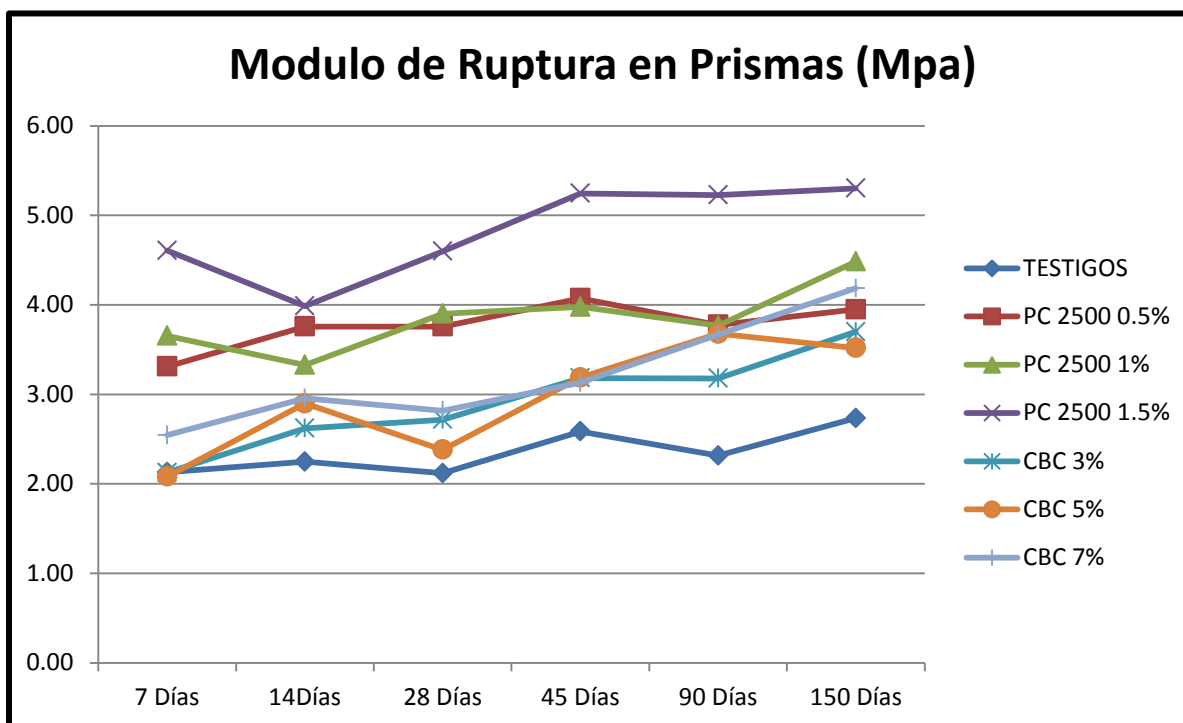
Gráfica 6.5 Representación gráfica de la Prueba de Compresión en Cubos.

Tabla 6.5 Datos de la Prueba de Compresión en Cubos.

		ESFUERZO EN CUBOS (Mpa)					
	%	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	45 DIAS	90 DIAS	150 DIAS
TESTIGOS		7.046	7.606	8.378	9.691	10.983	11.896
PC 2500	0.5	7.075	14.596	16.842	19.243	19.243	19.069
	1	11.989	13.079	15.433	15.357	17.492	19.326
	1.5	19.773	22.150	24.592	25.541	27.523	28.727
CBC	3	6.702	7.901	8.974	10.224	11.312	11.374
	5	7.388	9.110	10.526	11.707	12.496	13.761
	7	8.013	9.182	11.243	12.252	13.572	14.491

Como se observa los especímenes que presentaron mayor resistencia a la compresión fueron los de Sika ViscoCrete PC 2500 en sus tres porcentajes, seguidos de los de CBC y los de menor resistencia los especímenes testigos.

6.6 Flexión en Prismas



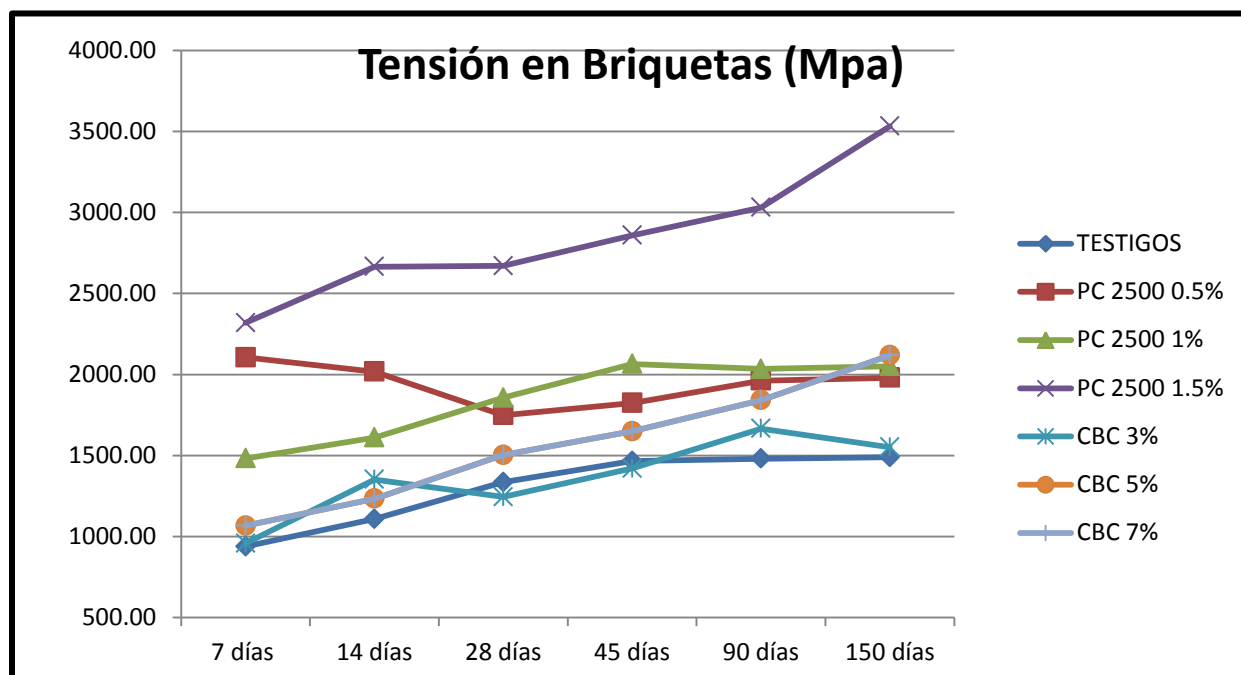
Gráfica 6.6 Representación Gráfica de la Flexión en Prismas.

Tabla 6.6 Datos de la Prueba de Flexión en Prismas.

		MODULO DE RUPTURA EN PRISMAS (Mpa)					
	%	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	45 DIAS	90 DIAS	150 DIAS
TESTIGOS		2.13	2.25	2.12	2.58	2.31	2.73
PC 2500	0.5	3.31	3.76	3.76	4.07	3.78	3.95
	1	3.65	3.33	3.90	3.98	3.77	4.48
	1	4.61	3.99	4.60	5.24	5.23	5.30
CBC	3	2.126	2.621	2.716	3.183	3.178	3.698
	5	2.081	2.898	2.381	3.187	3.677	3.518
	7	2.544	2.957	2.817	3.131	3.666	4.184

Los especímenes que mostraron mayor resistencia a la flexión fueron los de Sika ViscoCrete PC 2500 en sus tres porcentajes, seguidos por los de CBC y por último los de menor resistencia fueron los especímenes testigos.

6.7 Tensión en Briquetas



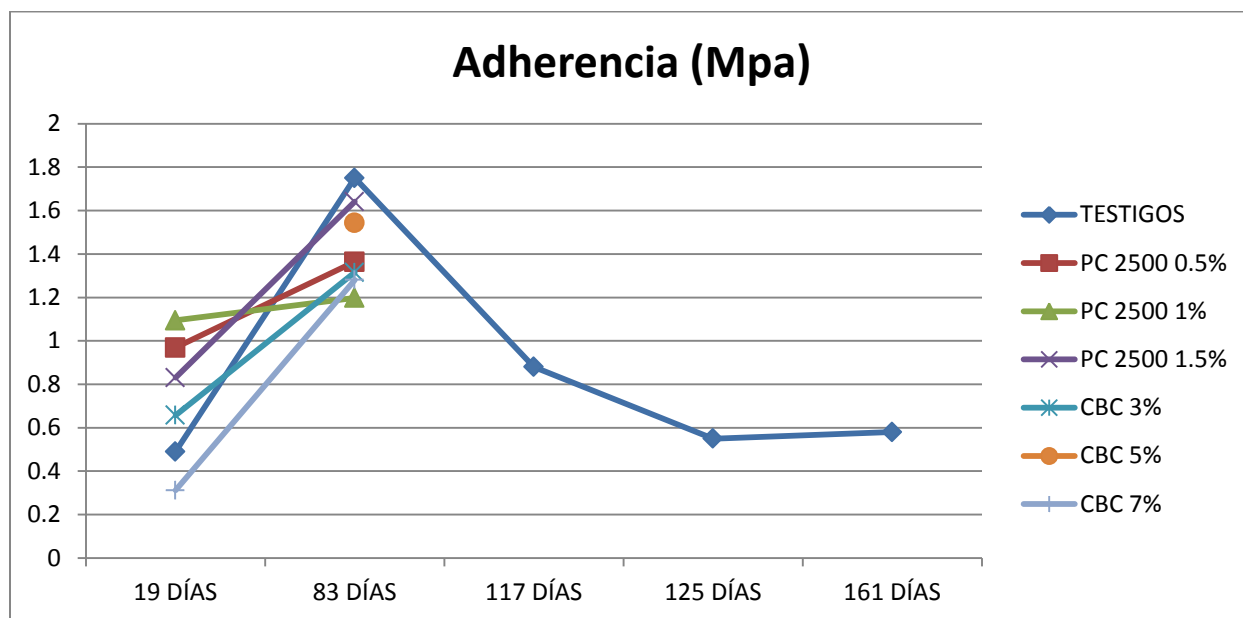
Gráfica 6.7 Representación gráfica de la Prueba de Tensión en Briquetas.

Tabla 6.7 Datos de la Prueba de Tensión en Briquetas.

		TENSIÓN EN BRIQUETAS (Mpa)					
	%	7 DIAS	14 DIAS	28 DIAS	45 DIAS	90 DIAS	150 DIAS
TESTIGOS		937.67	1107.88	1334.84	1465.21	1480.18	1489.250
PC 2500	0.5	2105.415	2017.825	1748.930	1824.014	1962.464	1980.171
	1	1482.226	1610.498	1856.609	2064.836	2034.064	2051.330
	1.5	2318.735	2665.320	2670.081	2858.453	3030.823	3532.510
CBC	3	957.916	1351.912	1244.470	1419.836	1665.707	1551.710
	5	1041.256	1336.065	1376.551	14533.645	1608.331	1953.625
	7	1066.742	1233.677	1502.908	1648.783	1841.376	2117.859

Los especímenes que mostraron mayor resistencia a la tensión fueron los de Sika ViscoCrete PC 2500 en sus tres porcentajes, seguidos por los de CBC y por último los de menor resistencia fueron los especímenes testigos.

6.8 Adherencia



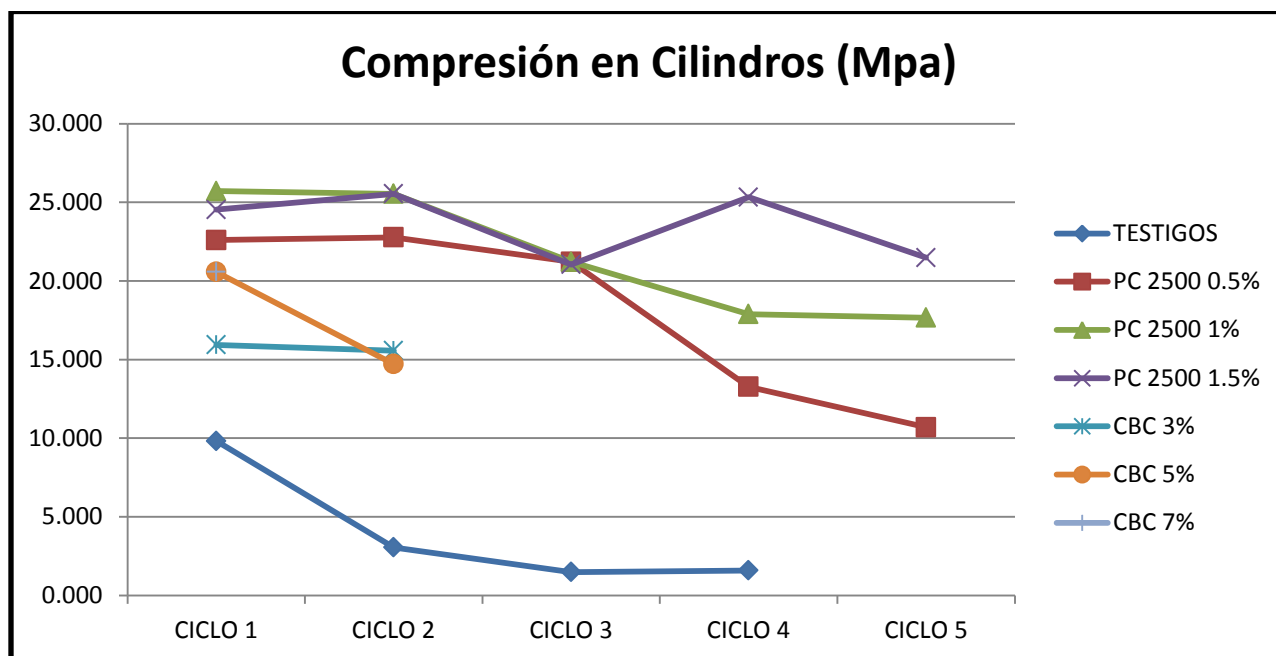
Gráfica 6.8 Representación gráfica de la Prueba de Adherencia.

Tabla 6.8 Datos de prueba de Adherencia.

		ADHERENCIA (Mpa)				
	%	19 DÍAS	83 DÍAS	117 DÍAS	125 DÍAS	161 DÍAS
TESTIGOS		0.49	1.75	0.88	0.55	0.58
		14 DÍAS	21 DÍAS			
PC 2500	0.5	0.969	1.364			
PC 2500	1	1.094	1.198			
PC 2500	1.5	0.831	1.641			
CBC	3	0.658	1.316			
CBC	5		1.544			
CBC	7	0.312	1.281			

Se observa que los valores de adherencia son ascendentes en el caso de las adiciones, lo contrario de los especímenes testigos que su valor de adherencia va disminuyendo.

6.9 Resistencia a los Sulfatos



Gráfica 6.9 Representación gráfica de la Resistencia a la Compresión de Cilindros sometidos al Ataque de los Sulfatos

Tabla 6.1 Datos de Prueba de Compresión en Cilindros.

COMPRESIÓN EN CILINDROS (Mpa)						
	%	CICLO 1	CICLO 2	CICLO 3	CICLO 4	CICLO 5
TESTIGOS		9.813	3.047	1.486	1.588	
PC 2500	0.5	22.598	22.769	21.214	13.265	10.694
PC 2500	1	25.713	25.539	21.213	17.891	17.662
PC 2500	1.5	24.536	25.539	21.040	25.324	21.477
CBC	3	15.936	15.571			
CBC	5	20.577	14.709			
CBC	7	20.577				

Se observa que los especímenes con adición de Sika ViscoCrete son los más resistentes a los sulfatos y los de CBC los que presentaron menor resistencia a ellos, ya que solo resistieron un ciclo los del 7% y dos ciclos los de 3 y 5%.

Capítulo 7

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los materiales empleados como adición en la presente investigación tienen efectos apreciables en el comportamiento físico-mecánico de los morteros, principalmente el mecánico, ya que mejoran las resistencias a compresión, flexión y tensión, destacando la compresión. Se puede concluir que el uso de adiciones en un porcentaje óptimo es viable en la elaboración de morteros utilizados en la construcción de cualquier obra, debido a la mejora de las propiedades físicas-mecánicas que presentan en este. El hecho de aumentar la resistencia mediante adiciones conlleva la disminución del consumo de cemento Portland y por lo tanto se disminuiría la producción de este.

Concluido el trabajo de experimentación y una vez analizado los resultados de las diferentes pruebas que se realizaron como son: compresión, flexión, tensión, adherencia, resistencia a los sulfatos, velocidad de pulso, resistividad, densidad y gravedad específica se observa que los especímenes presentaron los resultados más favorables fueron los de Sika ViscoCrete PC 2500 en sus tres porcentajes de adición pero si siendo el óptimo el del 1.5%

Los resultados de la experimentación de CBC arrojan resultados favorables a compresión, flexión y tensión, por lo que se concluye que sí es viable su adición al mortero para mejorar las propiedades mecánicas de este. El agregar CBC a las mezclas de mortero tiene dos grandes ventajas: primero, se mejoran las propiedades de la mezcla y su resistencia a la compresión, flexión y tensión, segundo, como el costo de la CBC es mucho menor que el del cemento, el costo del producto final será significativamente menor, asumiendo que la CBC no requiere mayor tratamiento que el tamizado y que no tiene que ser transportada desde muy lejos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ecología Verde, Desarrollo Sostenible para un mundo mejor. Cemento ecológico que contamina menos. Recuperado el 19 de febrero de 2013.
<http://www.ecologiaverde.com/cemento-ecologico-que-contamina-menos/>
- [2] Adam M. Neville, “Tecnología del Concreto” Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México (1995), pp 1.
- [3] INGTEKCH. (s.f.). El constructor civil. Tips para la construcción de edificaciones, casas materiales y equipos de construcción. Recuperado el 19 de febrero de 2013.
<http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/fabricacion-del-cemento-portland.html>
(2004). En D. Mendoza, E. L. Brito Benítez, & J. A. Arenas Alatorre, La ciencia de materiales y su impacto en la arqueología).
<http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/morteros-de-cemento-portland.html>
- [4] Rodríguez Bucio, J L. Tesis Profesional “Ceniza de origen orgánico: su efecto sobre las propiedades físico-mecánicas de morteros de cemento” Tesis Profesional.
- [5] Mena Ferrer, M. “Durabilidad de Estructuras de Concreto en México Previsiones y Recomendaciones” Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México (2005), pp 17.
- [6] CANACEM (Cámara Nacional del Cemento) “Tipos de cementos”. Recuperado el 19 de febrero de 2013. http://www.canacem.org.mx/tipos_de_cemento.htm
- [7] Grupo Calhidra, “Qué es el mortero y cómo funciona”. Recuperado el 21 de febrero de 2013, <http://calidra.com/usodelacal/mortero/>
- [8] Materiales de Construcción. Clasificación de los materiales. Recuperado el 24 de febrero 2013, <https://sites.google.com/site/materialesdeconstrucion/clasificacion-de-los-materiales-de-construccion/materiales-aglutinantes>.
- [9] Herrera, A. M., “Manual de Construcción de Mampostería de Concreto” Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C., México (2001)
- [10] Arenas Silíceas Especiales, Gómez Vallejo. Recuperado 26 de febrero de 2013.
<http://www.gomezvallejo.es/silice>
- [11] Cátedra de Ingeniería Rural. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real, http://www.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf
- [12] Manual Tecnológico y Propiedades, Instituto del Concreto. Colombia 1997.

- [13] Departamento de Enseñanza de las Tecnologías de la Construcción, Taller de Construcción y Cátedra de Construcción 1. “Construcción 1, Mortero” Facultad de Arquitectura Br. Artigas 1031 – Montevideo – Uruguay. www.farq.edu.uy
- [14] Practical Action, The Schumacher Centre for Technology and Development, Bourton on Dunsmore, Rugby, Warwickshire, CV23 9QZ, UK, infoserv@practicalaction.org.uk
http://www.solucionespracticas.org.pe/fichastecnicas/pdf/Puzolanas_Introduccion.pdf
- [15] Ing. Geólogo Quintana Crespo, E. “Relación entre las Propiedades Geotécnicas y los Componentes Puzolánicos de los Sedimentos Pampeanos” Tesis doctoral Crespo
http://www.efn.uncor.edu/archivos/doctorado_cs_ing/quintana/TESIS_COMPLETA.pdf
- [16] Estructuras de Concreto, Construcción y Supervisión 49169 “Pruebas no Destructivas” Recuperado el 29 de marzo de 2013. http://eccs.mex.tl/941754_4-03---Pruebas-no-destructivas.html
- [17] Gaete L, Y. Vargas Hernández, Pettorino A., 2001, Medida de los parámetros acústicos en sólidos II, Jornadas Iberoamericanas en Ultrasonido e Imagen Ultrasónica, España.
- [18] Velocidad de Pulso Ultrasónico, una Prueba no Destructiva del Concreto. Recuperado 28 de marzo de 2013.
http://www.biblioteca.udep.edu.pe/BibVirUDEP/tesis/pdf/1_153_164_104_1438.pdf
- [19] Kewalramani Manish A., Gupta Rajiv, 2005, Concrete compressive strength prediction using ultrasonic pulse velocity through artificial neural networks, Automat Construction, Vol. 15, No. 3, pp 374–9.
- [20] SCT, IMT “Durabilidad de la Infraestructura de Concreto Reforzado Expuesta a Diferentes Ambientes Urbano de México” López Celis, R López Celis, R., Pérez Quiroz, J.T., Torres Acosta, A.A., Publicación Técnica No 292, Sanfandila, Qro 2006
- [21] Ingenio Lázaro Cárdenas. Taretan Michoacán.
- [22] Hamid R., Yusof K.M., Zain M.F.M., 2009, A combined ultrasound method applied to high performance concrete with silica fume, Construction and Building Materials, Elsevier Science, No. 24, September, pp 94-98.
- [23] Pilares de la Administración del Conocimiento “Procesamiento de la caña de azúcar” Recuperado el 9 de febrero de 2013.
http://alexander-ingenieros.blogspot.mx/2011_06_01_archive.html
- [24] Ficha Técnica: Aditivo Reductor de agua y súper-plastificante de alto desempeño para concreto con inclusión de aire controlada.

- [25] Malhotra, V. M., 1976, Testing of Hardened Concrete: Nondestructive Methods, ACI Monograph 9, American Concrete Institute, Detroit, MI.
- [26] Constructor Civil. “Resistencia a la Tensión” Recuperado el 20 de mayo de 2013. <http://www.elconstructorcivil.com/2011/01/concreto-resistencia-la-tension.html>
- [27] 360° En Concreto. “Tecnología del Concreto”. Recuperado el 23 de mayo de 2013. <http://www.360gradosblog.com/index.php/lo-que-debes-saber-sobre-el-ataque-de-sulfato-en-el-concreto/>
- [28] Construmática. “Durabilidad de los Morteros de Revestimiento”. Recuperado 23 de mayo de 2013. http://www.construmatica.com/construpedia/Durabilidad_de_los_Morteros_de_Revestimiento
- [29] Ward, S. H., 1980, Electrical, electromagnetic, and magnetotelluric methods: Geophysics, Vol. 45, pp. 1659-1666.
- [30] Molina, Maria José T. 2008. Teoría de la Equivalencia Global. s.l. : Molwik, 2008. Vol. III.
- [31] Espectrometría. “Espectrometría de fluorescencia” Recuperado 23 de junio de 2013. http://www.espectrometria.com/espectrometra_de_fluorescencia